



- Ciudad de La Plata -

30 de septiembre al 3 de octubre de 2025



Libro de actas

ISBN 978-950-34-2665-4



Libro de Actas del XV Congreso Argentino de Meteorólogos: CONGREMET XV /
Esteban Garuti ... [et al.] ; Compilación de Yanina García Skabar ... [et al.] ;
Coordinación general de Vanesa C. Pántano ... [et al.]. - 15a ed. - La Plata :
Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Astrónomicas y
Geofísicas. Observatorio Astronómico de la Plata, 2025.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-950-34-2665-4

1. Geofísica. 2. Hidrología. 3. Meteorología. I. Garuti, Esteban II. García Skabar,
Yanina, comp. III. Pántano, Vanesa C. , coord.

CDD 559

ISBN 978-950-34-2665-4



Apoyaron este Congreso

**FUNDACIÓN
WILLIAMS**

CONICET




UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

IFAECI



Servicio
Meteorológico
Nacional
Argentina

INVAP



American
Consulting
Group

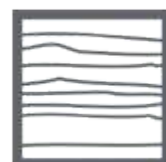


METOS[®]ARG
BY PESSL INSTRUMENTS



TECMES

Auspiciaron este Congreso



Universidad
Nacional de los
Comechingones

.UBA
Universidad de
Buenos Aires



C I M A





ÁREAS TEMÁTICAS

- 1. Pronóstico de la atmósfera y el océano:** Aspectos metodológicos del pronóstico en diferentes escalas espacio-temporales: proyecciones de cambio climático, pronósticos por ensambles, estudios de predictibilidad, pronóstico de dispersión de contaminantes, entre otros. Desarrollos e implementaciones de sistemas operacionales de pronóstico..
- 2. Inserción de la meteorología y la oceanografía en la sociedad:** Productos y aplicaciones para la población y el sector productivo. Educación, extensión universitaria y divulgación en meteorología y oceanografía. Comunicación al público. Programas gubernamentales a nivel nacional, provincial y municipal. Estudios sobre exposición, vulnerabilidad y riesgo de desastres y/o eventos de alto impacto social asociados con la atmósfera y el océano en diferentes escalas espacio-temporales.
- 3. Procesos y variabilidad de la atmósfera y el océano:** Estudio de procesos y variabilidad de la atmósfera y el océano en diferentes escalas espacio-temporales. Interacción entre los componentes del sistema Tierra (hidrosfera, atmósfera, criosfera, biosfera y litosfera).
- 4. Obtención, procesamiento y análisis de datos ambientales:** Tecnologías para la obtención y el procesamiento de datos ambientales (sistemas de observación, sistemas de cómputo de alto desempeño, desarrollo y validación de instrumental, diseño de redes de medición, sistemas de comunicación y adquisición de datos, etc). Metodologías para el análisis de datos ambientales (estadísticas y numéricas, aprendizaje automático, visualización, control de calidad, etc).



1

Pronóstico de la atmósfera y el océano

Evaluación de la Capacidad de Detección de Granizo de un Algoritmo de Clasificación de Hidrometeoros Sobre Una Red de Radares de Banda C

Esteban Garuti ^{1,2}; Paola Salio ^{2,3}; Vito Galligani ³; Maite Cancelada ²; Fernanda Verdelho ⁴; Cesar Beneti ⁴

egaruti@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

² Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (DCAO-FCEN-UBA)

³ CONICET, Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA-CONICET)

⁴ Environmental Technology and Monitoring Services, Curitiba, Brazil (SIMEPAR)

Palabras clave: clasificación de hidrometeoros, granizo, radar polarimétrico

1) RESUMEN

En este trabajo se analizó la capacidad del algoritmo de identificación de hidrometeoros (HID) presentado en Dolan y otros (2013) para detectar granizo en tormentas de diferente organización en Argentina. Se utilizaron datos de radares polarimétricos de banda C pertenecientes a la red del sistema nacional de radares meteorológicos de Argentina (SINARAME) y reportes de granizo de la Base de Datos de Amenazas Meteorológicas y sus Impactos de América del Sur (SAMHI). Se seleccionaron reportes en el periodo de 2018 a 2023 y se emplearon datos de radiosondeos coincidentes con las observaciones de radar para obtener el perfil vertical de temperatura más cercano tanto espacial como temporalmente a cada reporte. Se realizó un procesamiento de los datos de radar. Los pasos incluyen la corrección por atenuación resultante de lluvias intensas de reflectividad horizontal (Zh) y reflectividad diferencial (Zdr) aplicando el método Z-PHI y corrección del diferencial de fase (PHI) para el cálculo del diferencial de fase específico (Kdp). Se evaluó la probabilidad de detección del HID mediante una validación comparando el output del HID y las ubicaciones de los reportes. Se clasificaron los eventos en cuatro categorías de convección según el modo de organización de las tormentas y en tres categorías de severidad según el diámetro máximo estimado del granizo. El HID mostró una probabilidad de detección cercana al 80%, el modo convectivo Multicelular predominó en más del 70% de los casos y la categoría de granizo predominante fue No Severo, con diámetro máximo inferior a 20mm.

Se analizaron tres casos de estudio, uno de los cuales compara dos radares que operan en distinta frecuencia y que comparten área de cobertura, el RMA5 ubicado en Argentina (banda C) y el radar de Cascavel ubicado en Brasil (banda S).

2) INTRODUCCION

El uso de radares de doble polarización ha mostrado una notable mejora en la capacidad de detección de granizo debido a que se pueden obtener variables suplementarias a Zh que proporcionan información sobre diversas propiedades microfísicas de los elementos dispersores (Ryzhkov y Zmic, 2019). Los HID son herramientas estadísticas y de inteligencia artificial que buscan evaluar la presencia de diversas categorías de agua, hielo y ecos no meteorológicos en función del comportamiento de las variables obtenidas por el radar. Entre los métodos que pueden ser utilizados para la clasificación de hidrometeoros se encuentran los que utilizan lógica difusa como es el caso del presentado en Dolan y otros (2013), que utiliza funciones predefinidas para clasificar los datos polarimétricos en las distintas categorías de hidrometeoros para la banda C. El objetivo de este trabajo es analizar la sensibilidad del HID para detectar la presencia de granizo en las celdas convectivas de distinta organización en Argentina y generar una base de datos de eventos de granizo detectados a partir de la aplicación de dicho algoritmo a los datos de radar disponibles en Argentina.

3) DATOS

Se utilizaron datos de Radar Meteorológico Argentino (RMA) provenientes la red SINARAME (De Elia y otros, 2020) que es un radar Doppler de doble polarización que opera en la banda C con

resolución espacial en rango de 500m (250m) y temporal de 10min (5min) en la estrategia de escaneo de 240km (120km). Los datos de reportes de ocurrencia de granizo en superficie fueron extraídos de la base de datos SAMHI (Salio y otros, 2024). Los perfiles verticales de temperatura provinieron de sondeos realizados por el SMN y Instituto Nacional de Meteorología de Brasil (fuente: Global Telecommunication System, <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) y sondeos realizados durante la campaña RELAMPAGO (<https://doi.org/10.26023/3QGG-JQKS-AF0G>).

4) METODOLOGIA

Se seleccionaron reportes de granizo que cumplieran con las siguientes condiciones: distancia mayor a 40km y menor de 180km del radar; disponibilidad de Zh, Zdr, coeficiente de correlación (ROHV) y PHI en una ventana de una hora anterior y posterior a la hora del reporte; datos no afectados por atenuación por radomo mojado, interferencias electromagnéticas o bloqueo del haz. Se realizó un procesamiento de los datos donde se aplicó el método Z-PHI (Testud y otros, 2000) para ajustar los valores de Zh por atenuación resultante de lluvias intensas y partir de este se calculó Zdr corregido. Para calcular el diferencial de fase específico (Kdp), PHI fue sometido a un preprocesamiento involucrando pasos de eliminación de saltos de fase y suavizado. Los perfiles de temperatura se extrapolaron a partir de los datos del radiosondeo más cercano tanto temporal como espacialmente. Se aplicó el HID a todos los casos a partir de los datos procesados dejando un total de 143 reportes distribuidos en Argentina durante el periodo 2018-2023. Se evaluó la capacidad de detección del HID a través de la comparación del output del mismo en la elevación más baja de radar ($\approx 0,5^\circ$) con la ubicación del reporte a través de distintos análisis con distinta definición de acierto y error. Uno de ellos consistió en tomar el dato de radar más cercano al reporte y buscando algún píxel de granizo en una caja de 3x3 pixeles alrededor del reporte, y otro análisis teniendo en cuenta una ventana temporal de 10 minutos y evaluando la presencia de granizo en un radio de 5km alrededor del reporte en alguno de los tiempos considerados.

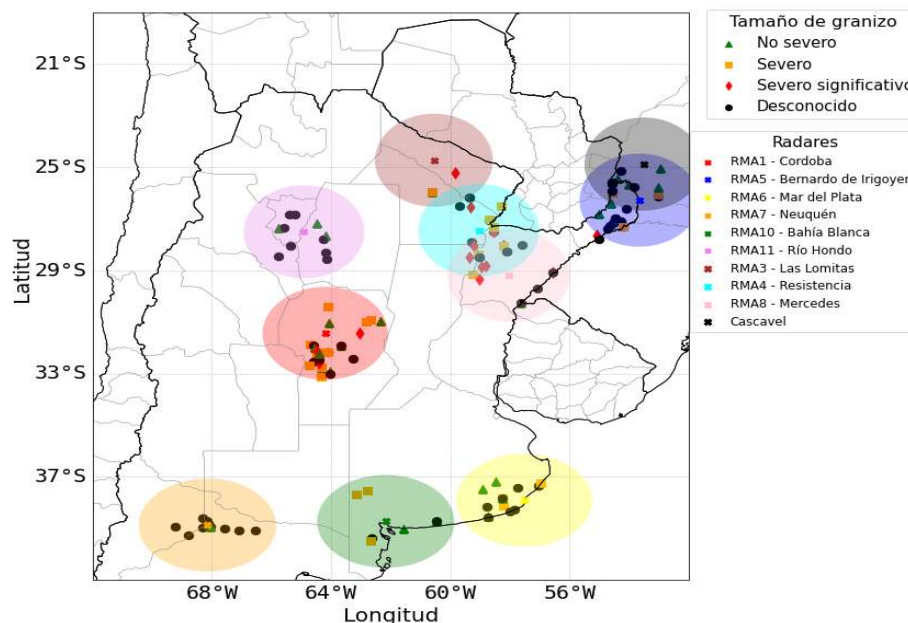


Fig. 1. Ubicaciones de los radares utilizados (cruces de colores) con el rango de cobertura de 200km (círculos de colores) y las ubicaciones de los reportes según tamaño de granizo.

5) RESULTADOS

Luego del filtrado de casos se generó una base de datos que contiene 143 reportes de granizo distribuidos en la región de vigilancia de 9 radares RMA en Argentina (ver Fig.1). Se encontró para el primer análisis de caja de 3x3 pixeles, un total de 42 aciertos y 101 errores, dando la POD un valor de 0.29 (29%). La POD es baja porque este método es restrictivo por la incertidumbre temporal y espacial de los reportes. Al calcular la POD teniendo en cuenta una incertidumbre temporal de 10

minutos y un radio de 5km la cantidad de aciertos asciende a 115 y sólo 28 de ellos son errores dando como resultado una POD de 0,80 (80%). Con este segundo análisis la POD mejora notablemente y se ve que en la mayoría de los casos los reportes fueron cargados a la base de datos SAMHI con una incertidumbre temporal de 10 minutos. Se agrupó a los eventos de granizo según el modo convectivo predominante con la clasificación utilizada en Mulholland y otros (2018). Del total de reportes el 71% estuvo asociado a convección Multicelular (43% multicelular organizada y 28% no organizada) y 29% a convección Discreta (21% no supercelular y 8% supercelular). Se calculó la POD bajo este agrupamiento y los resultados muestran que los modos de convección discreta tienen POD más alto (POD promedio 75%) que los modos multicelulares (POD promedio 60%). Los eventos, también, fueron clasificados a partir del diámetro (D) máximo de granizo (Fig. 2). Del total de casos 23% pertenecen a la categoría No Severo ($D < 25\text{mm}$), 22% Severo ($25\text{mm} < D < 50\text{mm}$), y 12% Severo significativo ($D > 50\text{mm}$), quedando el otro 43% de los casos restantes sin tamaño estimado. Entre los casos en los que el HID no detectó granizo, se encontraron tres posibles causas de fallo, error en la ubicación del reporte (11 casos, 7% del total), error en la hora del reporte (9 casos, 6% del total) y atenuación por lluvias intensas que permaneció sin corregir con la metodología utilizada (8 casos, 6% del total).

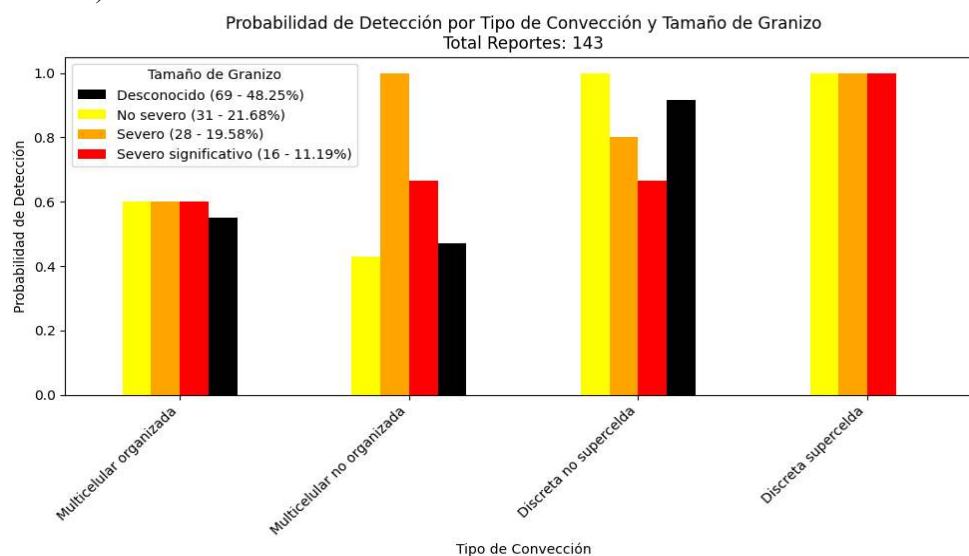


Fig. 2. Probabilidad de detección para cada categoría de tamaño de granizo según el modo convectivo asociado.

REFERENCIAS

- Dolan, B., S. A. Rutledge, S. Lim, V. Chandrasekar, and M. Thurai, 2013: A Robust C-Band Hydrometeor Identification Algorithm and Application to a Long-Term Polarimetric Radar Dataset. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52, 2162–2186, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0275.1>.
- Mulholland, J. P., S. W. Nesbitt, R. J. Trapp, K. L. Rasmussen, and P. V. Salio, 2018: Convective Storm Life Cycle and Environments near the Sierras de Córdoba, Argentina. *Mon. Wea. Rev.*, 146, 2541–2557, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0081.1>.
- Ryzhkov, A. V.; Zrnica, D. S. Radar Polymetry for Weather Observations; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019. 10.1007/978-3-030-05093-1
- Salio, P., and Coauthors, 2024: Towards a South American High Impact Weather Reports Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0063.1>
- Testud, J., E. Le Bouar, E. Obligis, and M. Ali-Mehenni, 2000: The Rain Profiling Algorithm Applied to Polarimetric Weather Radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17, 332–356, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0332:TRPAAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0332:TRPAAT>2.0.CO;2)

REGIONALIZACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EXTREMA EN ARGENTINA BASADA EN LA TEMPERATURA MÁXIMA MEDIANTE UN INNOVADOR ENFOQUE DE ANÁLISIS DE EXTREMOS

Melanie Meis¹, Ramiro Saurral², Mariela Sued³, Patricia Menendez⁴

mmeis@dcao.uba.ar

¹Dto. de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Facultad de Cs. Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires (DCAO-FCEN). CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina. CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

²Barcelona Supercomputing Center (BSC), Barcelona, Spain.

³Universidad de San Andrés, Instituto de Cálculo, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires – CONICET, Buenos Aires, Argentina.

⁴School of Mathematics and Statistics, The University of Melbourne, Melbourne, Australia.

Palabras clave: Eventos extremos, sistema de alerta, covariabilidad climática.

1) INTRODUCCIÓN

Los eventos de precipitación extrema han aumentado globalmente y en Argentina en las últimas décadas (Hannart, 2015; Rivera, 2021), desafiando modelos predictivos y políticas de gestión. Mientras que los estudios tradicionales analizan variables atmosféricas de forma aislada, el enfoque actual busca integrar múltiples procesos para comprender mejor las anomalías de precipitación. En este marco, se propone una metodología que combina modelos de series temporales y regresión por cuantiles, utilizando la temperatura máxima diaria como predictora. Este enfoque permite identificar patrones físicos, comprender la covariabilidad entre variables y mejorar la regionalización de eventos extremos (Meis et al., 2024).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Consideramos datos diarios de precipitación y temperatura máxima de 32 estaciones meteorológicas in-situ de Argentina para el periodo Enero-1980 a Diciembre-2019. Los datos fueron obtenidos a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), (Tabla I).

Estudiamos el proceso conjunto de temperatura (X) y precipitación (Y), modelando los eventos extremos de esta relación condicional. Nuestro objetivo es entender la relación entre estos dos procesos climáticos y determinar la ocurrencia de eventos extremos de precipitación en función de la temperatura máxima diaria.

Dado un nivel τ entre 0 y 1 vamos a estimar el percentil τ de precipitación condicional al valor de temperatura $Q_{Y|X}(\tau) = F_{Y|X}^{-1}(\tau)$ que puede ser representada como la solución a la siguiente Ec.1:

$$Q_{Y|X}(\tau) := \arg \min_{a \in \mathbb{R}} \mathbb{E}_{Y|X}(\rho_\tau(Y - a))$$

Donde $\rho_\tau(u)$ es una función de costo.

De esta manera vamos a proponer dos pasos para la estimación de la precipitación extrema:

- 1) Vamos a modelar el proceso de temperatura máxima diaria ($\hat{X}_i$) y utilizar estos valores modelados en la Ec.1. De esta manera podremos describir y cuantificar la estructura temporal del proceso de temperatura de varios días en un único valor. Esto involucra evaluar la no estacionariedad de la serie y luego aplicar un modelo de regresión armónica dinámica con componentes autoregresivas y estacionales Ec.2:

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + S_t + \epsilon_t$$

Donde $c \in \mathbb{R}$ es una constante, $\varphi_i \in \mathbb{R}, i = 1, \dots, p$ son los coeficientes de la componente autoregresiva con el orden de número necesarios de los valores temporales precedentes para predecir la medición al tiempo t , S_t representa la componente estacional y ϵ_t es la secuencia de ruido blanco. La parte autoregresiva del modelo captura la dependencia temporal de las temperatura a través de los diferentes lags, utilizando el parámetro p , logramos modelar la persistencia de las condiciones atmosféricas en el tiempo.

Estación	Longitud	Latitud	Acronimo
Aeroparque	-58.25	-34.34	AER
Bahia Blanca	-62.10	-38.44	BBL
Bariloche	-71.10	-41.09	BAR
Catamarca	-65.46	-28.36	CAT
Cordoba	-64.12	-31.18	CBA
Corrientes	-58.46	-27.27	COR
Esquel	-71.10	-42.56	ESQ
Formosa	-58.14	-26.12	FOR
Iguazu	-54.28	-25.44	IGU
Jachal	-68.50	-30.14	JAC
Jujuy	-65.05	-24.23	JUJ
Laboulaye	-63.20	-34.08	LAB
La Plata	-57.54	-34.58	LPL
La Quiaca	-65.40	-22.06	LQU
Malargue	-69.40	-35.30	MAL
Mar del Plata	-57.58	-37.93	MDQ
Mendoza	-68.47	-32.50	MEN
Parana	-60.48	-31.78	PAR
Posadas	-55.58	-27.22	POS
Resistencia	-59.42	-27.27	RES
Rio Cuarto	-64.10	-33.07	RCU
Rio Gallegos	-69.17	-51.37	RGA
Salta	-65.29	-24.51	SAL
San Juan	-68.25	-31.34	SJU
Santa Rosa	-64.16	-36.34	SRO
Santiago del Estero	-64.18	-27.46	SDE
Sauce Viejo	-60.49	-31.42	SVI
Tandil	-59.20	-37.14	TAN
Trelew	-65.16	-43.12	TRE
Tucuman	-65.10	-26.85	TUC
Ushuaia	-68.31	-54.80	USH
Viedma	-63.00	-40.51	VIE

Tabla I: nombre, longitud, latitud y acrónimos de las estaciones meteorológicas utilizadas.

2) Estimamos los cuantiles extremos (con valores no nulos de precipitación) de la distribución condicional de precipitación basados en la temperatura máxima. En este sentido asumimos una regresión de cuantiles por polinomios y estimamos el cuantil mediante la Ec. 3:

$$(\hat{\beta}_0, \dots, \hat{\beta}_k) = \arg \min_{\beta} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_{\tau}(\log(Y_i) - (\beta_0 + \beta_1 \hat{X}_i + \dots + \beta_k \hat{X}_i^k)))$$

Donde N representa el número totales de observaciones en cada estación in-situ, i corresponde con el valor i -ésimo de observación de precipitación, $\hat{X}_i$ son las temperaturas simuladas y $\hat{\beta}_0, \dots, \hat{\beta}_k, k \in \mathbb{R}$ los coeficientes de la regresión de cuantiles estimados. Aplicamos logaritmo al valor de precipitación para modelar una relación exponencial. Luego, $\hat{X}_i$ e Y fueron separados en verano (DIC-ENE-FEB) e invierno (JUN-JUL-AGO). Para la elección de los hiperparametros del modelo empleamos validación cruzada con el 80% inicial de los datos, mientras que el 20% restante fue utilizado para evaluar el comportamiento del modelo seleccionado. Para validar nuestro modelo utilizamos una medida de error estándar, la función de costo de la regresión de cuantiles. De esta forma, evaluamos la diferencia en magnitudes entre el modelo propuesto y el modelo que solo utiliza datos de precipitación para estimar los cuantiles (modelo nulo).

Por último, de acuerdo al valor de p clasificamos la dependencia temporal en tres categorías de complejidad de procesos de memoria temporal: bajo (1,2), mediano (3,4) y alto (5,6). También de acuerdo al orden polinomial de la serie de regresión distinguimos en cuatro casos: lineales, cuando los coeficientes de grado mayor a uno son cercanos a cero; cuadráticos cuando los grados mayores a dos son cercanos a cero; lineales-cuadráticos cuando la forma está asociada a una parte lineal y otra parte cuadrática; y por último ni lineal ni cuadrática cuando no abarca ninguna de las clasificaciones anteriores.

3) RESULTADOS

Utilizando el cuantil 0.9 de la precipitación y considerando la temperatura máxima diaria como variable predictora independiente, encontramos que el método propuesto supera al modelo nulo en aproximadamente el 47% de las estaciones durante la temporada de verano. Por otra parte, exhibimos para la época de verano la Fig. 1, donde hallamos una consistencia geográfica en los valores óptimos del parámetro p . Esta coherencia espacial es esperable, dado que los valores de p reflejan el tipo de relación entre la temperatura y los eventos extremos de precipitación en cada región. Por lo tanto, es razonable que regiones

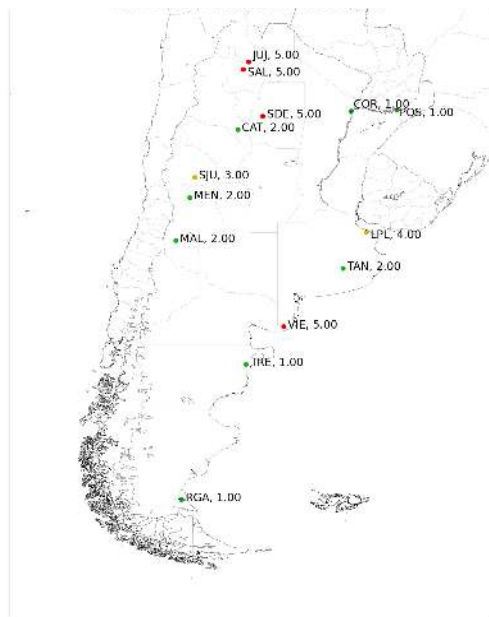


Fig 1: Valores de p para las estaciones que presentaron una performance mejor que el modelo nulo. La clasificación de colores es de acuerdo a la memoria del proceso, verde (proceso de baja complejidad; dorado y rojo . Meis, et al. 2024.

geográficamente cercanas, al compartir condiciones climáticas similares, presenten valores de p coherentes entre sí. A modo de ejemplo podemos describir la región Noroeste, en la misma se observa que la mayoría de las estaciones presentan un valor elevado de p , por lo cual podemos inferir que es una región donde los procesos físicos involucrados que afectan a la temperatura y la precipitación extrema son complejos. Esto podría estar relacionado con la Depresión del Noroeste Argentino donde el sistema de baja presión se intensifica durante el verano debido al origen termal-orográfico y las altas temperaturas dominan inhibiendo la precipitación. En cuanto a la relación obtenida entre temperatura y logaritmo de precipitación mediante el modelo de regresión polinomial, observamos que la mayoría de las relaciones identificadas son lineales o cuadráticas. En el primer caso podemos atribuir el patrón a la relación de Clausius-Clayperon, a mayor temperatura mayor es la capacidad de la atmósfera de contener vapor de agua, dando lugar a mayor posibilidad de

precipitación. En cuanto al segundo tipo de relación, se observa un crecimiento de precipitación hasta cierto umbral y luego los extremos de precipitación empiezan a disminuir, lo cual puede estar causado por un gran déficit de saturación inducido por la temperatura.

Durante la época de invierno distinguimos tres regiones: una al noreste (20°S - 35°S), otra en la zona este-central (35°S - 40°S) y una región al sur más allá de los 40°S . La primera región involucra a IGU, POS SVI, PAR y RES, en la cual hemos destacado la posible coexistencia de procesos complejos y de baja complejidad. La segunda región formada por AER, LAB, LPL y MDQ, presentan procesos de baja complejidad para las primeras dos estaciones y alta complejidad para las últimas dos. Esto podría estar asociado con procesos rápidos asociados a la temperatura mientras que en el caso de LPL y MDQ podría pensarse en sistemas frontales que resultan dominantes en la temporada de invierno en dichas regiones. Por último en la región sur, VIE, ESQ y BAR, observamos procesos de baja complejidad al oeste y mediana complejidad cercana a la costa. Además, en ESQ podría estar asociada a la presencia de los ríos atmosféricos donde los canales de humedad contribuyen a la generación de precipitación extrema.

4) CONCLUSIÓN

El método propuesto permite caracterizar la dependencia temporal entre la temperatura máxima diaria y la ocurrencia de precipitación extrema, identificando cuántos días previos de temperatura ejercen una influencia significativa en la ocurrencia de precipitaciones extremas en cada región. Esta aproximación facilita la regionalización, cuantificación y clasificación de la covariabilidad entre ambas variables meteorológicas en el sur de Sudamérica.

5) AGRADECIMIENTOS

PICT-2021-SerieA-4914 y UBA N°20020220400093BA de la Programación Científica 2023.

6) REFERENCIAS

- Hannart, A., Vera, C., Otto, F. E. L., Cerne, B. (2015). 9. Causal influence of anthropogenic forcings on the Argentinian heat wave of december 2013. Bulletin of the American Meteorological Society, 96(12), S41-S45.
- Meis, M., Sued, M., Saurral, R. I., Menéndez, P. (2024). A novel statistically-based approach to regionalize extreme precipitation events using temperature data. Natural Hazards, 1-23.
- Rivera, J., Otta, S., Lauro, C., Zazulie, N. (2021). A decade of hydrological drought in Central-Western Argentina. Frontiers in Water, 3.

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE LOS PRONÓSTICOS DEL PROYECTO SubX DE LAS ANOMALÍAS SEMANALES DE TEMPERATURA ESTIVAL EN SUDAMÉRICA

Lucia Castro¹, Marisol Osman², Mariano S. Alvarez¹
lucia.micaela.castro20@gmail.com.ar, lmcastro@smn.gob.ar.

¹Investigador independiente

²Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)

³Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IFAECI)

Palabras clave: Subestacional, Madden-Julian, Predictibilidad, Temperatura extrema

1) INTRODUCCIÓN

La predicción en escalas subestacionales (10-30 días) es muy valiosa para el planeamiento y el manejo de recursos de diversas áreas como la agricultura, salud y el sector energético (Merryfield y otros, 2020). En los últimos años ha existido una tendencia de la comunidad científica que estudia el sistema climático a enfocarse en el estudio de la predictibilidad y capacidad predictiva en estas escalas.

El principal modo de variabilidad en escala subestacional es la Oscilación de Madden-Julian (MJO), puede excitar ondas de Rossby que se propagan extratropicalmente generando teleconexiones con regiones alejadas de la fuente. Alvarez y otros (2016) describieron el impacto de la MJO en Sudamérica a partir del índice Multivariado de Tiempo-Real (RMM, por sus siglas en inglés, Wheeler y Hendon (2004)). Los autores confirmaron que la MJO tiene una influencia significativa en las anomalías de temperatura del aire en superficie en diversas regiones del continente sudamericano, en función de la fase de la MJO, principalmente durante la estación cálida.

Con el objetivo de mejorar los pronósticos numéricos, se creó el proyecto Subseasonal eXperiment (SubX) (Pegion y otros, 2019). Este proyecto provee una serie de pronósticos retrospectivos elaborados por los centros globales de pronóstico con un plazo de 30 a 60 días para estudiar y mejorar el conocimiento sobre estas escalas de tiempo.

El objetivo de este trabajo es estudiar el desempeño general de los pronósticos subestacionales del proyecto SubX en el pronóstico de temperatura a 2 metros, documentando el rol de la MJO en el mismo. Sumado a esto, se analizan los cambios en la predictibilidad y desempeño al pronosticar fechas extremas cálidas y frías.

La predictibilidad y la verificación de seis modelos pertenecientes al proyecto SubX y su respectivo Ensamble Multi-Modelo (MME) son evaluadas para los promedios semanales de anomalías de temperatura a 2 metros (T2M) en la época estival en Sudamérica. Los pronósticos retrospectivos para el periodo 1999-2014 se utilizan para producir medias semanales de los plazos de pronóstico, obteniéndose las semanas 1 a 4 (con 1 a 28 días) y son evaluados contra los datos diarios de temperatura máxima y mínima del Centro de Predicción Climática (CPC) (Chen y otros, 2008). Becker y otros (2013) proponen analizar la predictibilidad potencial ignorando los errores entre modelos, asumiendo la aproximación de “Modelo Perfecto” porque la verificación se realiza entre modelos provenientes de la misma fuente. Además, el desempeño de los modelos para cada semana de pronóstico es evaluado a partir de métricas utilizadas comúnmente por la comunidad de verificación de pronóstico.

2) RESULTADOS

En la semana 1 la predictibilidad es máxima y disminuye al aumentar los plazos de pronóstico. Se encuentra que las latitudes tropicales, norte de 30°S, conservan predictibilidad para plazos mayores que latitudes altas (Figura 1). La verificación muestra que en la semana 1 el Coeficiente de Correlación de Anomalías (ACC) al sur de 20°S es mayor que en el norte, pero disminuye en las siguientes semanas, perdiendo significancia en el centro de Sudamérica en la semana 4. La Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) incrementa en la porción sur con el plazo de pronóstico, llegando al máximo en semana 4, mientras que en el lado norte ACC y RMSE se conservan similares a la semana 1 (Figura 2). En todos los casos, el desempeño del MME supera a los modelos individuales.

La predictibilidad de las semanas 2-3 aumenta en el sudeste de Sudamérica al considerar los pronósticos inicializados durante las fases 6-7 de la MJO. Es beneficioso en Patagonia, donde en la semana 3 aumenta la predictibilidad al considerar los pronósticos inicializados en fases 2-3, y en menor medida, en las 4-5.

Se estudia la capacidad predictiva de los modelos (skill), también es favorecida por la MJO en tres regiones donde la influencia de la MJO fue documentada por otros autores: la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (SACZ), el Sudeste de Sudamérica (SESA) y Patagonia (PAT). Se obtuvo que el skill es mejor en las ejecuciones durante eventos activos de la MJO con las fases iniciales 8 y 1, especialmente en la tercera semana de pronóstico. En SACZ los modelos tienen mejor desempeño que el resto de las regiones, especialmente cuando la fase inicial es 8 o 1. Los pronósticos de SESA tienen mejor desempeño en inicializaciones en fases 2 y 3. Similarmente, en la semana 2 los modelos en PAT presentan mayor ACC durante inicializaciones en fases 2 y 3, pero en la semana 3 el ACC no es significativo en ninguna fase inicial de la MJO.

Para estudiar el desempeño en eventos extremos, las semanas con anomalías medias de T2M por encima (debajo) del percentil 90 (10) son evaluadas también. Se enfoca en análisis en las mismas tres regiones utilizadas anteriormente. Se obtiene que SACZ tiene mejores métricas que el resto de las regiones, seguida de PAT, pero no se aprecian diferencias de ACC entre regiones. En las regiones estudiadas el skill es semejante para ambos tipos de extremos. El MME demuestra dificultades en el pronóstico de magnitudes extremas, mientras que sobresalen los modelos GEFS y FIMr1p1 ya que el skill es consistentemente mejor al resto del conjunto en todas las regiones y eventos.

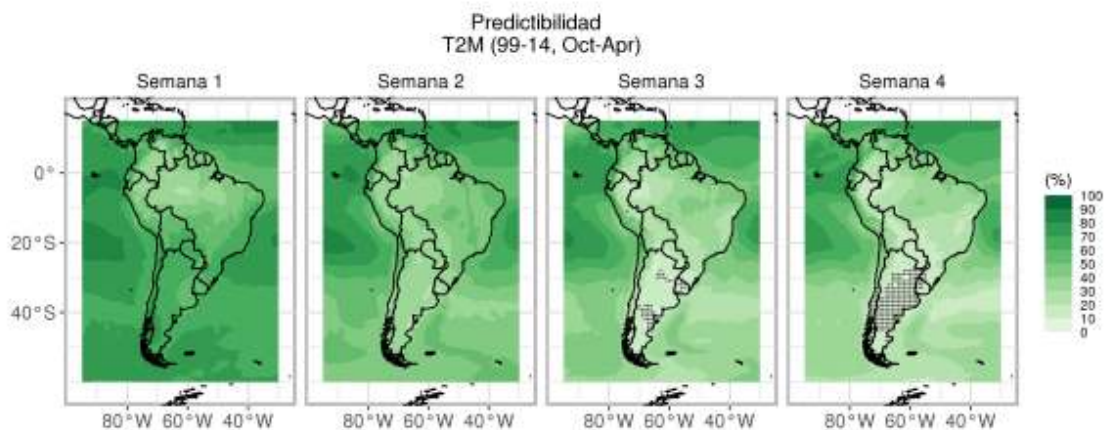


Figura 1: Predictibilidad semanal media de anomalía de T2M en el periodo 1999-2014. Los puntos indican zonas no significativas con 95% de confianza.

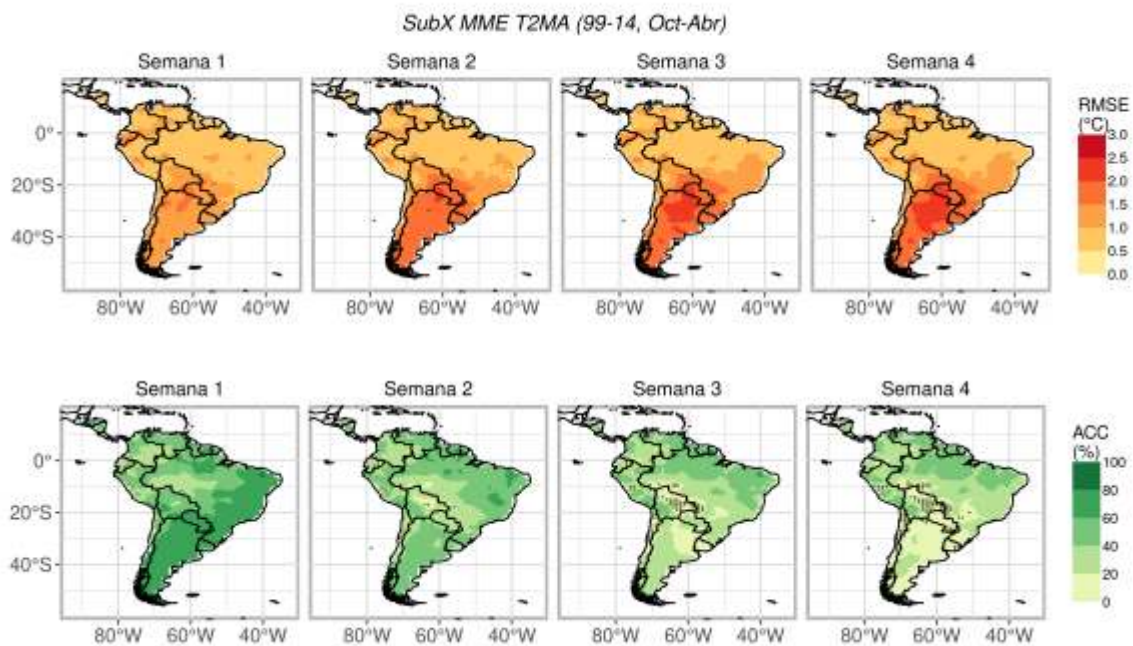


Figura 2: Métricas de anomalía de T2M para MME en el periodo 1999-2014. En la primera fila se presenta RMSE y en la segunda, el ACC donde los puntos eliminan zonas no significativas.

REFERENCIAS

Alvarez, M. S., Vera, C. S. y Kiladis, G. N., 2017: MJO modulating the activity of the leading mode of intraseasonal variability in south america, *Atmosphere*, 8(12), 232.

Becker, E. J., Van Den Dool, H. y Peña, M., 2013: Short-term climate extremes: Prediction skill and predictability, *Journal of Climate*, 26(2), 512-531.

Chen, M., Shi, W., Xie, P., Silva, V. B., Kousky, V. E., Wayne Higgins, R., y Janowiak, J. E., 2008: Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D4).

Merryfield, W. J., Baehr, J., Batté, L., Becher, E. J., Butler, A. H., Coelho, C. A. y otros, 2020: Current and emerging developments in subseasonal to decadal prediction, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(6), E869-E896.

Pegion, K., Kirtman, B. P., Becker, E., Collins, D. C., LaJoie, E., Burgman, R. y otros, 2019: The subseasonal experiment (SubX): A multimodel subseasonal prediction experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(10), 2043-2060.

Wheeler, M. C. y Hendon, H. H. 2004: An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly weather review*, 132(8), 1917-1932.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MODELOS DINÁMICOS Y ESTADÍSTICOS EN EL PRONÓSTICO DE PRECIPITACIONES ESTACIONALES EN AMÉRICA DEL SUR DURANTE EL OTOÑO.

Diego García Picasso¹, Candela Sol Glatstein¹, Marisol Osman^{1,2}

diegogarciapicasso@gmail.com

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

²Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)

Palabras clave: predictibilidad, modelos climáticos, calibración

1. Introducción

En las últimas décadas, el acceso a pronósticos dinámicos históricos y observaciones de calidad ha permitido evaluar modelos actuales de predicción climática y desarrollar herramientas regionales de pronóstico estacional en Sudamérica (Osman et al., 2016). Junto a los modelos dinámicos, los modelos empíricos, en particular el análisis de correlación canónica (CCA), continúan siendo de uso corriente, ya que permiten extraer patrones predictivos robustos (Barnston et al., 1992, Osman M et al., 2021).

El objetivo de este trabajo es desarrollar y evaluar la predictibilidad de la precipitación para el trimestre marzo, abril y mayo (MAM) entre los años 1983-2020 en Sudamérica. Para esto, se utiliza el modelo CanCM4i y pronósticos estadísticos y se los evalúa objetivamente utilizando métricas determinísticas y probabilísticas.

2. Metodología

El modelo CanCM4i cuenta con 10 miembros de ensamble y pronósticos retrospectivos desde 1980 hasta 2020. Su resolución es de $\sim 2.8^\circ$ para la atmósfera y $\sim 1^\circ$ para el océano. El modelo se inicializa en febrero y pronostica el trimestre Marzo-Abril-Mayo (MAM). La predictibilidad se analiza mediante el análisis de la señal, el ruido y el cociente señal-vs-ruido; y calculando el coeficiente de correlación de anomalías (ACC) entre los miembros del ensamble (ACC teórico), (Lorenz, 1982). Como el modelo puede presentar errores sistemáticos (Coelho et al., 2018), se lo calibra a partir de ajustar su media y desvío a las correspondientes de las observaciones. Por otro lado, se usa la técnica de CCA para corregir estos pronósticos.

Por otro lado, se explora el desarrollo de modelos estadísticos para pronosticar la misma estación. Se consideran regresiones lineales múltiples (MLR) y CCA usando predictores como el índice Niño 3.4, la oscilación anular del sur (SAM) y el dipolo del Índico (DPI). Se emplean estrategias de validación cruzada (CV) y divisiones de entrenamiento/testeo (TT) para generar y evaluar los modelos considerando un período de desarrollo de los modelos independiente del período de verificación de estos modelos. El desempeño de los modelos se hace a partir de las métricas de verificación determinísticas como el error medio o BIAS, el error absoluto medio (MAE). Por otro lado, con estos modelos se construyen pronósticos probabilísticos para los terciles de la distribución climatológica que son evaluados con los índices de verificación probabilísticos Brier Skill Score (BSS), el Rank Probability Skill Score (RPSS), las curvas ROC y los diagramas de confiabilidad.

3. Resultados y discusión

El CanCM4i muestra alta señal y predictibilidad en el noreste de Brasil y sudeste de Sudamérica (SESA). La Fig. 1a muestra una alta señal en la cordillera patagónica, el norte de Sudamérica y el SESA. En la Fig. 1b se observa el ruido, con niveles altos en el norte de Sudamérica, SESA y en los Andes centrales y australes. Esta alta varianza sugiere que existen grandes diferencias entre los diferentes ensambles del modelo, lo que puede implicar que, finalmente, el ruido esté enmascarando la señal significativa. En la Fig. 1c se muestra la predictibilidad potencial, donde se aprecian altos valores en el norte de Sudamérica, con máximos en el noreste de Brasil y SESA.

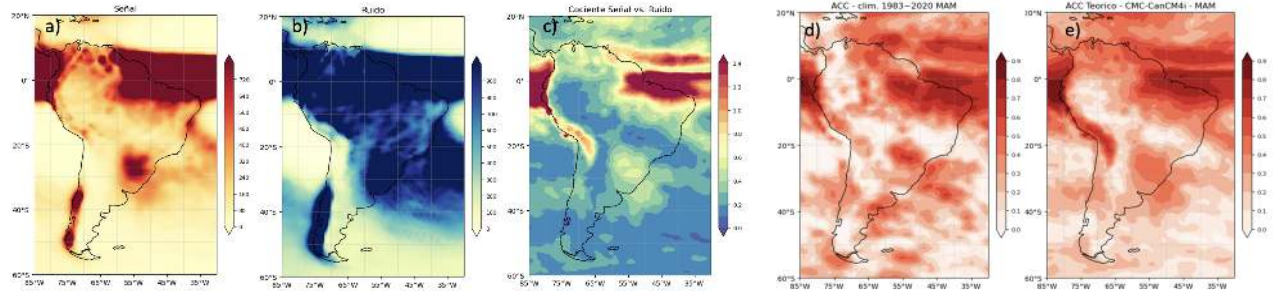


Figura 1. a-c) Métricas de la predictibilidad del modelo CanCM4i para trimestre MAM: a) señal (mm^2), b) ruido (mm^2), c) cociente señal versus ruido. d) ACC entre el CanCM4i y las observaciones (1983 y 2020) – MAM, (e) ACC teórico (modelo perfecto) del CanCM4i.

En varias regiones, como SESA y Patagonia oriental, la habilidad de predicción (Figura 1.d) supera al ACC teórico (Figura 1.e), lo que indica que el modelo subestima la predictibilidad real. En los Andes ocurre lo contrario: la predictibilidad teórica es alta, pero la habilidad baja. Esto sugiere exceso de confianza del modelo en sus propios resultados (conducen entre sí y no con las observaciones).

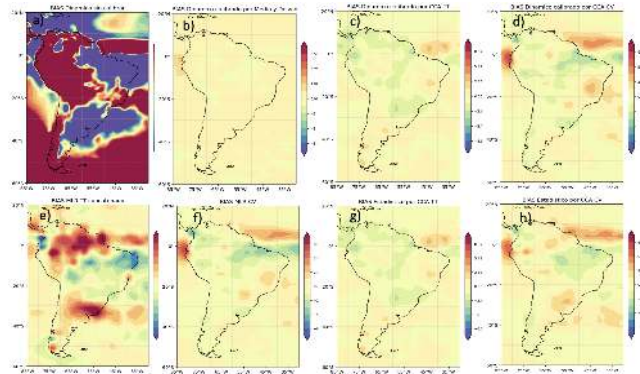


Figura 2. BIAS (mm) del modelo dinámico (a-d), modelo estadístico (e-h). Sin calibrar (a), calibrado por: media y desvío (b), CCA por TT (c), CCA CV (d), generado por: MLR con TT (e), MLR CV (f), CCA TT (g), CCA CV (h).

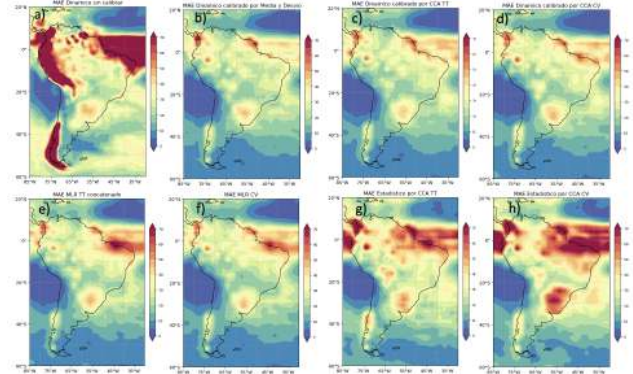


Figura 3. MAE (mm) del modelo dinámico (a-d), modelo estadístico (e-h). Sin calibrar (a), calibrado por: media y desvío (b), CCA por TT (c), CCA CV (d), generado por: MLR con TT (e), MLR CV (f), CCA TT (g), CCA CV (h).

Las Figuras 2 y 3 muestran que el modelo CanCM4i presenta un desempeño malo si no se lo calibra, ya que presenta un alto MAE (3a), pese a un BIAS bajo (2a). Al corregir el modelo ajustando su media y desvío climatológicos con las observaciones mejora notablemente el pronóstico, especialmente en regiones como SESA y el noreste de Brasil (2b y 3b). El modelo calibrado por CCA también muestra mejoras, aunque con sesgos regionales, subestimando o sobreestimando la precipitación según la zona (2c, 3d, 3c, 3d). Los modelos estadísticos, en particular el MLR TT (2e y 3e), tienen bajo rendimiento, mientras que el MLR CV mejora los resultados (2f y 3f).

Al desarrollar pronósticos probabilísticos, la calibración por media y desvío del modelo mejora los valores de BSS, RPSS y confiabilidad, con respecto al modelo sin calibrar.

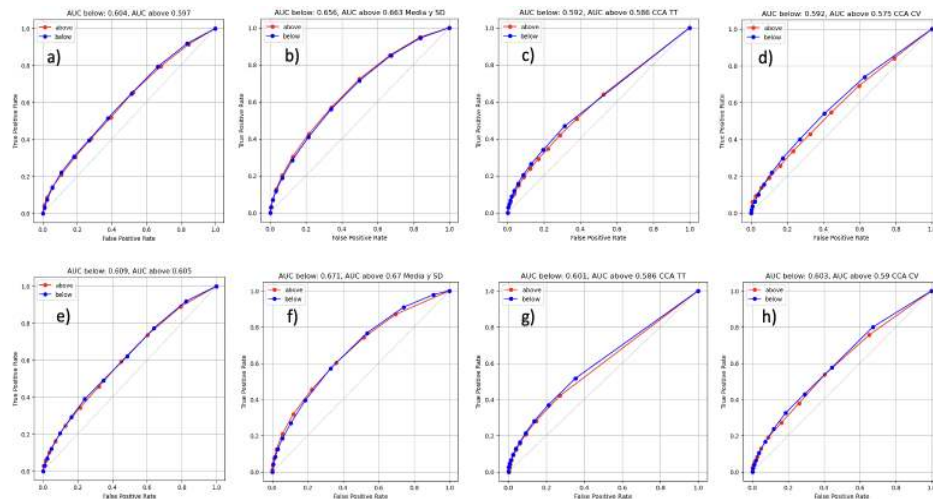


Figura 14. Curvas ROC para el modelo dinámico probabilístico por método de: conteo (a-d), ajuste gaussiano (c-d). Sin calibrar (a, e), calibrado por media y desvío (b, f), calibrado por CCA TT (c, g) y calibrado por CCA CV (d, h).

En la Fig. 4 el área bajo la curva ROC fue mayor para los pronósticos calibrados por media y desvío (0,67) en comparación con los otros modelos (0,60 para eventos secos y 0,55 para eventos húmedos). Este resultado corrobora una menor capacidad de discriminación para el modelo sin calibrar o calibrado por CCA, es decir, una menor resolución.

4. Conclusiones

La calibración mejora sustancialmente los pronósticos estacionales del modelo CanCM4i en Sudamérica, especialmente en regiones con alta predictibilidad como el noreste de Brasil y el SESA. El modelo sin calibrar muestra errores sistemáticos, corregibles con ajustes estadísticos. La calibración por media y desvío es efectiva y supera a la calibración vía CCA en varias regiones. El pronóstico probabilístico calibrado gana confiabilidad, aunque persisten desafíos en eventos extremos. Los modelos estadísticos, si bien menos precisos, aportan valor, en especial el MLR con validación cruzada. Finalmente, un enfoque multimodelo integrado podría combinar las fortalezas de ambos tipos de modelos, mejorando la predicción estacional para Sudamérica.

Bibliografía

- Barnston AG, Glantz MH, He Y (1992) Predictive skill of statistical and dynamical climate models in SST forecasting. *J Clim* 5: 631–648.
- Coelho C, Firpo M, Andrade F., 2018. A verification framework for South American sub-seasonal precipitation predictions. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 27, No. 6, 503–520.
- Lorenz, E. N., 1982. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, 34, 505–513.
- Osman M, Vera CS (2017) Climate predictability and prediction skill on seasonal time scales over South America from CHFP models. *Clim Dyn*.
- Osman M, Cohelo C, Vera CS (2021) Calibration and combination of seasonal precipitation forecasts over South America using Ensemble Regression. *Clim Dyn*.

INTERCOMPARACIÓN DE DOS METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN DE PRONÓSTICOS DE TEMPERATURA

Silvina Righetti^{1,2}, Federico Cutraro¹, Rahel Weber³, Omar Bellprat³, Lorena Ferreira¹,
Yanina García Skabar¹
srighetti@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

² Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO, FCEyN, UBA)

³ Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology (MeteoSwiss)

Palabras clave: RAFK, EMOS, ENANDES

1) INTRODUCCIÓN

En el marco de las colaboraciones entre pares del proyecto ENANDES+ (Sur-Sur-twinning) se identificó la necesidad de mejorar los pronósticos meteorológicos a corto y mediano plazo a partir de la incorporación de la calibración de los mismos usando información observada de estaciones meteorológicas. Actualmente, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) aplica la metodología de Regresión Adaptada basada en el Filtro de Kalman (RAFK) para calibrar los pronósticos horarios de temperatura y viento (determinísticos y ensamble) desde el año 2021 (Cutraro y otros, 2020; Righetti y otros, 2024). Por otro lado, MeteoSwiss también realiza una corrección de sus pronósticos de temperatura por ensambles considerando la metodología Ensemble Model Output Statistics (EMOS) (Gneiting y otros, 2005). En este trabajo se busca realizar una comparación de ambas metodologías aplicadas a los pronósticos por ensamble de temperatura a 2 m generados en el SMN por el Sistema de Asimilación y Pronóstico Numérico (SAP.SMN-ENS; Matsudo y otros, 2022).

2) METODOLOGÍA

Existe una amplia variedad de métodos para corregir los errores de los pronósticos. En el SMN se está aplicando, desde el año 2021, en sus versiones determinística y por ensamble, la metodología RAFK. Este método consiste en una regresión lineal donde los predictores son variables pronosticadas por el modelo numérico y el predictando es el valor observado de la variable pronosticada. Los coeficientes de esta regresión se calculan de forma secuencial aplicando las ecuaciones del filtro de Kalman, lo que permite actualizar sus valores en cada paso de tiempo. Para más detalle de la metodología ver Cutraro y otros (2020).

Por otro lado, existen otros tipos de métodos de postprocesamiento estadístico que se aplican específicamente a los pronósticos por ensamble, donde se busca ajustar sus distribuciones de probabilidad a las observadas. En particular, en MeteoSwiss utilizan el método denominado EMOS que es una variante de la regresión lineal múltiple de la metodología Model Output Statistics (MOS) (Glahn and Lowry, 1972) adaptada a pronósticos por ensamble. Para el caso particular de la temperatura, considerando que esta presenta una distribución gaussiana, con la aplicación del EMOS se busca ajustar la PDF (o CDF) considerando que la distribución de probabilidades presenta:

$$\text{Media: } \mu(t) = a + b\bar{x}(t) \quad (1)$$

$$\text{Desvío estándar: } \tau(t) = \sqrt{c + ds(t)^2} \quad (2)$$

donde $\bar{x}(t)$ es la media del ensamble y $s(t)$ su desvío estándar y a , b , c y d son los coeficientes a ajustar. Para optimizar dichos coeficientes se busca minimizar el estadístico CRPS (Continuous Ranked Probability Score) considerando 30 días de pares de pronóstico-observación pasados. Para más detalle de la metodología, ver Gneiting y otros (2005).

En el presente trabajo se busca entonces comparar las metodologías RAFK y EMOS y analizar el desempeño de las mismas al aplicarlas al ensamble de 20 miembros del SAP.SMN-ENS. Para esto se consideraron los pronósticos horarios de temperatura a 2 m y las observaciones de

las estaciones sinópticas de superficie de toda la Argentina (excepto Antártida). El período de tiempo analizado fue del 1 de diciembre de 2024 al 28 de febrero de 2025.

Para analizar el desempeño de ambas calibraciones se consideraron los siguientes estadísticos calculados para la totalidad de los puntos con observaciones:

- BIAS: Representa el error sistemático o sesgo.
- RMSE: Es la raíz del error cuadrático medio.
- % Acierto: Es el porcentaje de casos en que el pronóstico estuvo a $\pm 2^{\circ}\text{C}$ de la observación.
- CRPS: Es la generalización del error absoluto medio (MAE) para los pronósticos probabilísticos.

3) RESULTADOS

En la Figura 1 se presentan el BIAS y el RMSE de la media del ensamble en función del plazo de pronóstico, considerando todas las estaciones. Se puede ver que el pronóstico sin corrección presenta un BIAS que fluctúa aproximadamente entre -1°C y $1,5^{\circ}\text{C}$, mientras que al aplicar las metodologías de calibración el BIAS disminuye considerablemente presentando valores entre 0°C y $0,5^{\circ}\text{C}$ en prácticamente todos los plazos de pronóstico. Es importante mencionar que, si bien los resultados de ambas calibraciones disminuyen el error sistemático, parecería ser que RAFK tiene un mejor desempeño en este estadístico. En relación al RMSE también se puede observar una mejora importante al aplicar las correcciones, siendo RAFK levemente mejor a EMOS en las primeras 36 hs de pronóstico.

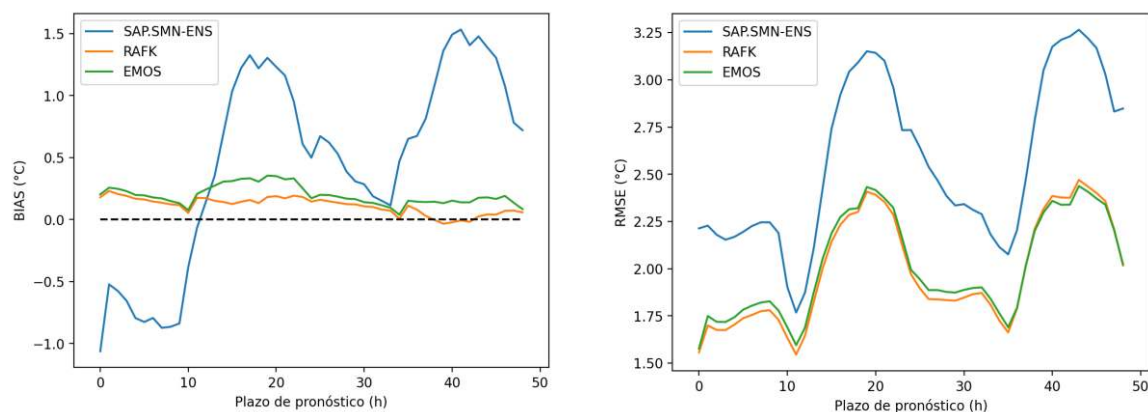


Figura 1: BIAS (izquierda) y RMSE (derecha) en función del plazo de pronóstico para la media del ensamble del SAP.SMN sin calibrar (línea azul), calibrado con RAFK (línea naranja) y calibrado con EMOS (línea verde).

Por otro lado, en la Figura 2 se presenta el porcentaje de acierto y el estadístico CRPS, ambos en función del plazo de pronóstico. Nuevamente se puede apreciar una mejora en las predicciones al calibrar (con ambos métodos), aumentando el porcentaje de aciertos en más de un 10% en casi todos los plazos de pronóstico. Aquí también es posible ver que RAFK tiene un desempeño levemente mejor que EMOS en las primeras 24 hs de pronóstico. En relación al CRPS se observa una disminución del índice al calibrar, pero en este caso los menores valores (mejor desempeño) los presenta EMOS, ya que en el cálculo de los coeficientes se busca minimizar este estadístico.

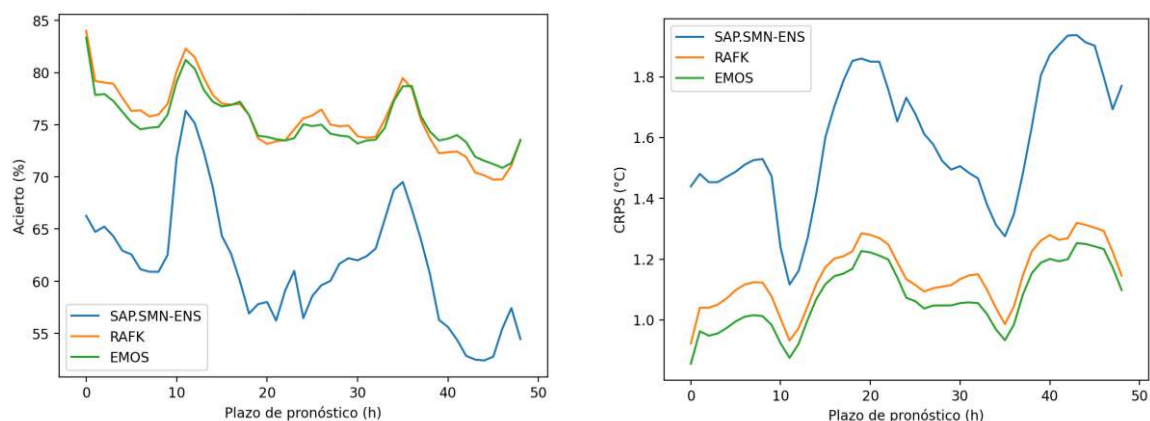


Figura 2: Porcentaje de acierto (izquierda) y CRPS (derecha) en función del plazo de pronóstico para el ensamble del SAP.SMN sin calibrar (línea azul), calibrado con RAFK (línea naranja) y calibrado con EMOS (línea verde).

4) CONCLUSIONES

En el marco del proyecto ENANDES+ se buscó realizar una comparación de 2 metodologías de calibración de pronósticos por ensamble: RAFK (SMN) y EMOS (MeteoSwiss). Al aplicar ambos métodos a los pronósticos realizados por el ensamble del SAP.SMN durante 3 meses se pudo observar que ambas metodologías disminuyen el BIAS y RMSE, siendo levemente mejor el RAFK en las primeras 36 horas. Los aciertos con ambas calibraciones también aumentan considerablemente, llegando en algunos plazos hasta un 20% de mejora. En relación al CRPS, en ambos casos se obtienen valores menores a los de los pronósticos sin calibrar, pero se aprecia un mejor desempeño para el EMOS.

En conclusión, ambas metodologías resultan buenas para reducir los errores sistemáticos y presentan pequeñas diferencias en su desempeño, lo que las convierte en herramientas útiles para ser incorporadas en el desarrollo de servicios. Actualmente, se está trabajando en la mejora del desempeño de la metodología EMOS al incluir información del ensamble del IFS (ECMWF, 2024), siendo los primeros resultados muy alentadores. Por otro lado, como parte de una posible siguiente etapa del proyecto ENANDES+, se está evaluando la posibilidad de extender la calibración a nivel regional, cubriendo toda Sudamérica.

REFERENCIAS

- Cutraró, F., Righetti, S., García Skabar, Y. y Sacco, M., 2020: Implementación del sistema de pronóstico numérico en el HPC: Calibración de temperaturas pronosticadas. Nota Técnica SMN 2020-81.
- ECMWF, D. (2024). IFS documentation CY49R1-Part V: Ensemble prediction system. In IFS Documentation CY49R1 (Vol. 5). ECMWF.
- Glahn, H. y Lowry, D., 1972: The Use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting. *Journal of Meteorology*, 11, 1203-1211.
- Gneiting, T., Raftery, A.E., Westveld, A.H. y Goldman, T., 2005: Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation. *Monthly Weather Review*, 133, 1098–1118.
- Matsudo, C., García Skabar, Y., Righetti, S., Cutraró, F., Sacco, M., Dillon, M. E., Álvarez Imaz, M., Maldonado, P. y Salles, A., 2022: Sistema de Asimilación y Pronóstico Numérico del Servicio Meteorológico Nacional: Componente operativa. XIV Congreso Argentino de Meteorología. Buenos Aires, Argentina. 7 al 11 noviembre 2022. Sesión de posters.
- Righetti, S., Cutraró, F., García Skabar, Y. y Sacco, M., 2024: Calibración de los pronósticos horarios de magnitud del viento. Nota Técnica SMN 2024-162.

CAPACIDAD PREDICTIVA DE MODELOS CLIMÁTICOS PARA LA TEMPERATURA INVERNAL EN SUDAMÉRICA: ENFOQUES DINÁMICOS Y ESTADÍSTICOS.

Candela Sol Glatstein¹, Diego García Picasso¹, Marisol Osman^{1,2}
candeglatstein@gmail.com

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

²Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)

Palabras clave: predictibilidad, modelos climáticos, calibración

1) INTRODUCCIÓN

El pronóstico estacional de la temperatura en Sudamérica durante el invierno austral, Junio-Julio-Agosto (JJA) presenta grandes desafíos debido a la alta variabilidad climática en la región, influenciada por fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), el Dipolo del Océano Índico (IOD) y la Oscilación Anular del Sur (SAM). Los modelos de circulación general acoplados atmósfera-oceano (GCMs) han demostrado ser herramientas poderosas para abordar esta incertidumbre inherente a la predicción climática, al proporcionar simulaciones que integran tanto los forzantes internos como los externos del sistema climático (Osman et al., 2016). En particular, el uso de ensambles de modelos con perturbaciones en las condiciones iniciales ha permitido capturar mejor la variabilidad climática y mejorar la precisión de las predicciones a escala regional (Coelho et al., 2018).

Los modelos pronostican parcialmente los patrones climáticos observados, especialmente en zonas de alta complejidad topográfica o donde las interacciones locales son determinantes. En este contexto, las metodologías estadísticas, como la regresión lineal múltiple (MLR, por sus siglas en inglés) y el análisis de correlación canónica (CCA), complementan los modelos dinámicos al capturar relaciones entre variables climáticas y fenómenos como el ENSO o el SAM, los cuales afectan la temperatura y otros parámetros en Sudamérica (Barnston et al., 1992).

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la predictibilidad del modelo GEM5-NEMO para la temperatura a 2 metros en el trimestre Junio-Julio-Agosto (JJA) en Sudamérica, analizando la capacidad de los pronósticos generados con este modelo y compararlos con otros enfoques estadísticos. También se busca analizar el impacto del fenómeno ENSO y la aplicación de distintas técnicas de calibración.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El modelo GEM5-NEMO perteneciente al Environment and Climate Change Canada y al proyecto North American Multi-Model Ensemble (NMME), es un pronóstico retrospectivo, acoplado atmósfera-oceano que posee 10 miembros de ensamble obtenidos mediante perturbaciones isotrópicas aleatorias en la atmósfera. Se analizaron las temperaturas pronosticadas en JJA en el período 1983-2020 con condiciones iniciales del mes de mayo (plazo de pronóstico 1 mes). Para la verificación se usaron datos pertenecientes al Climate Prediction Center (CPC).

La predictibilidad del modelo se evaluó con dos métricas: la predictibilidad potencial (Pb) definida como la fracción de la señal sobre la varianza total (Osman et al., 2016) y el coeficiente de correlación de anomalías (ACC) entre cada miembro del ensamble y la media

del resto, también llamada habilidad de modelo perfecto (Lorenz, 1982) y definida en este trabajo como ACC Teórico. Este índice indica el grado de acuerdo entre los miembros del modelo. A su vez, se calculó el ACC entre la media del ensamble del modelo y la climatología de las observaciones para evaluar la habilidad (skill) del modelo para reproducir patrones climáticos observados. Estos análisis se repitieron para todos los años del período y sólo para años ENSO.

Se construyeron cinco pronósticos estadísticos determinísticos: tres mediante una MLR utilizando como predictores no locales (asociados a fenómenos remotos) a los índices Niño3.4 y el Dipole Mode Index (DMI), y dos utilizando CCA empleando la presión a nivel del mar (SLP) como predictor. En ambos casos se emplearon diferentes técnicas para generar y evaluar pronósticos de manera independiente: validación cruzada (CV), donde un año o conjunto de años es retirado y con los años restantes se construye el modelo para luego validarlo en los años retirados; y división del período total en uno de entrenamiento y otro de testeo (TT). Además, se construyeron pronósticos probabilísticos basados en terciles para cuantificar la incertidumbre de los miembros de ensamble del pronóstico dinámico. Esto se llevó a cabo mediante el conteo de la proporción de miembros del ensamble que cae en cada tercil de la distribución de la variable y realizando un ajuste Gaussiano a partir de la media y el desvío de cada ensamble.

Con el objetivo de ajustar las predicciones y reducir las discrepancias con las observaciones (Coelho et al., 2018), se calibraron los pronósticos probabilísticos y los determinísticos, aplicando una técnica de corrección local (por media y desvío) y otra no local (con CCA). Finalmente, para cuantificar la calidad de los pronósticos estudiados, se analizaron diversas métricas de verificación determinísticas: error absoluto medio (MAE), el BIAS o error sistemático, el coeficiente de correlación de Spearman (sr) y de Pearson (r); y probabilísticas: Brier Skill Score (BSS), Rank Probability Skill Score (RPSS), diagramas ROC y de confiabilidad.

3) RESULTADOS PRINCIPALES

La predictibilidad del modelo GEM5-NEMO para la temperatura en JJA muestra una fuerte dependencia regional, con mejor desempeño en zonas tropicales. La señal del modelo (Fig. 1a) es particularmente alta en el norte argentino, Paraguay y el centro de Brasil, donde

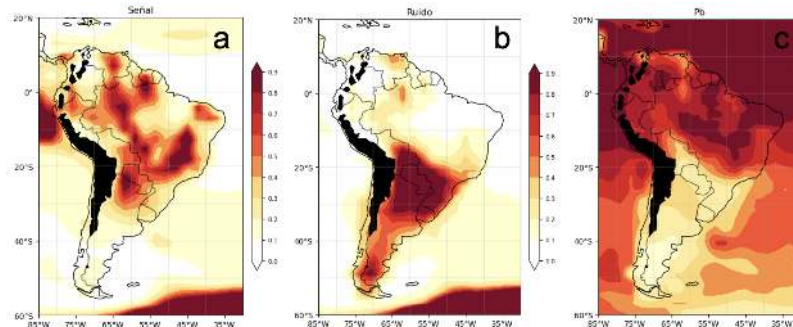


Figura 1. Medidas de predictibilidad del modelo GEM5-NEMO para JJA: **a** señal (°C); **b** ruido (°C); **c** predictibilidad potencial (Pb).

también se observan máximos de Pb (Fig. 1c), lo que indica una respuesta coherente del modelo a las condiciones iniciales. En contraste, el ruido (Fig. 1b), asociado a la variabilidad interna del ensamble, es elevado en el sur del continente, en particular en el Sudeste de Sudamérica (SESA) y la

Patagonia, reduciendo la predictibilidad en esas áreas. En cambio, regiones tropicales y oceánicas, presentan menor ruido y mayor consistencia entre miembros. Se encontró que durante años ENSO, la señal se intensifica en la región tropical del continente y en el Atlántico, incrementando la Pb y sugiriendo que el ENSO actúa como un modulador clave de la predictibilidad climática en Sudamérica.

Las métricas de verificación permitieron comparar la habilidad de los pronósticos determinísticos y probabilísticos. El MAE fue menor en los modelos estadísticos con validación cruzada (MLR CV y CCA CV), aunque la calibración del modelo dinámico —especialmente mediante CCA CV— también logró reducciones importantes del MAE, superando al modelo sin calibrar. En contraste, la calibración con CCA TT no mejoró el desempeño significativamente.

En términos probabilísticos, el BSS demostró que ninguna de las técnicas para construir pronósticos probabilísticos logró superar de forma consistente a la climatología, incluso tras la calibración. Sin embargo, la curva ROC (Fig. 2) indicó que la calibración mejora sustancialmente la capacidad de discriminación del modelo dinámico, y que el ajuste Gaussiano es superior al conteo directo en este aspecto. Por su parte, los diagramas de confiabilidad evidenciaron mejoras claras al calibrar el modelo dinámico, acercando la probabilidad pronosticada a la frecuencia observada, aunque sin resolver completamente las deficiencias en la resolución. Estos resultados refuerzan la necesidad de calibraciones cuidadosas y enfoques combinados para mejorar la representación de la incertidumbre en los pronósticos estacionales.

4) CONCLUSIONES

El análisis realizado demuestra que el modelo GEM5-NEMO presenta una predictibilidad razonable para la temperatura invernal en Sudamérica, con mejor desempeño en regiones tropicales y durante años ENSO. Los modelos estadísticos resultan complementarios, aunque limitados ante condiciones extremas o cambios no captados por los predictores. Calibrar el modelo dinámico, en especial mediante CCA con validación cruzada, mejora significativamente la precisión de los pronósticos determinísticos, incluso superando en algunos casos a los modelos estadísticos. Si bien los modelos probabilísticos calibrados mostraron mejoras en discriminación y confiabilidad, no lograron superar sistemáticamente a la climatología en todas las métricas. Estos resultados destacan la importancia de las técnicas de calibración y de la combinación de enfoques dinámicos y estadísticos para optimizar la calidad de los pronósticos estacionales en una región con alta complejidad climática como Sudamérica.

REFERENCIAS

- Barnston, A. G., & Ropelewski, C. F., 1992.** Prediction of ENSO episodes using canonical correlation analysis. *J. Climate*, 5(11), 1316-1345.
- Coelho C, Firpo M, Andrade F., 2018.** A verification framework for South American sub-seasonal precipitation predictions. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 27, No. 6, 503–520.
- Lorenz, E. N., 1982.** Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, 34, 505–513.
- Osman, M., Vera, C.S. & Doblas-Reyes., 2016.** F.J. Predictability of the tropospheric circulation in the Southern Hemisphere from CHFP models. *Clim Dyn* 46, 2423–2434.

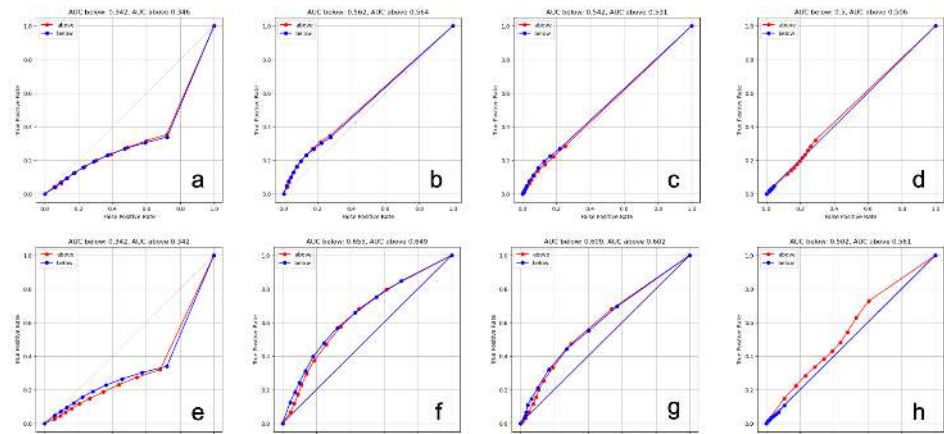


Figura 2: diagrama ROC y área ROC para el tercil inferior (azul) y superior (rojo) de los modelos dinámicos con a-d la estimación a partir de contar; e-h ajuste Gaussiano: a,e sin calibrar; b,f calibrado por media y desvío; c,g calibrado por CCA CV; d,h calibrado por CCA TT.

ESTIMACIÓN DEL ESTRÉS TÉRMICO EN EL SUR DE SUDAMÉRICA A PARTIR DE PRONÓSTICOS BASADOS EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Soledad Collazo^{1,2,3}, Jorge Pérez-Aracil⁴, Cosmin Marina⁴, Ricardo García-Herrera^{1,2},
David Barriopedro², Sancho Salcedo-Sanz⁴
scollazo@ucm.es

¹Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, ESPAÑA

²Instituto de Geociencias (IGEO), Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Universidad Complutense de Madrid (CSIC-UCM), ESPAÑA

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA

⁴Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad de Alcalá, ESPAÑA

Palabras clave: UTCI, selección de predictores, aprendizaje automático.

1) INTRODUCCIÓN

La exposición a condiciones ambientales extremas, como el calor intenso y la alta humedad, puede comprometer la capacidad del organismo para regular eficazmente su temperatura interna. El Índice Climático Térmico Universal (UTCI) es una herramienta bioclimática que permite evaluar el impacto combinado de la temperatura, el viento, la radiación y la humedad sobre el cuerpo humano. Una estimación precisa del estrés térmico mediante el UTCI puede ayudar a reducir los riesgos para la salud y fortalecer la preparación ante eventos climáticos extremos.

A diferencia de los modelos meteorológicos tradicionales, fundamentados en ecuaciones físicas, los avances en inteligencia artificial (IA) han permitido crear sistemas que, mediante el entrenamiento en datos históricos, generan pronósticos con mayor rapidez. Sin embargo, estos modelos de IA suelen ser menos interpretables y no siempre proporcionan todas las variables necesarias para calcular el UTCI, especialmente los datos de radiación, aunque sí incluyen temperatura, humedad, viento y altura geopotencial en varios niveles atmosféricos.

En este contexto, el presente estudio propone una metodología para estimar el UTCI en el sur de Sudamérica utilizando exclusivamente las variables disponibles en modelos basados en IA. Se analiza la precisión de dicha estimación y, posteriormente, se aplica a predicciones meteorológicas generadas por estos modelos para evaluar las condiciones térmicas durante un evento de ola de calor. Finalmente, se comparan los pronósticos del UTCI obtenidos mediante IA con los generados por el modelo tradicional GFS.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Como referencia para el UTCI, se emplean datos del reanálisis ERA5-HEAT a las 18:00 UTC durante la estación cálida (noviembre a marzo) a lo largo de un periodo de 11 años (2012-2023). Además, se utilizan datos meteorológicos provenientes de ERA5, GFS y modelos de IA como PanguWeather, FourCastNet y GraphCast. Estos conjuntos de datos incluyen variables como temperatura, velocidad del viento, humedad y altura geopotencial tanto en superficie como en distintos niveles de presión.

El UTCI resulta de la combinación de la temperatura del aire y un factor de corrección determinado por las condiciones ambientales. Un desafío central de este estudio es calcular el UTCI en ausencia de datos de radiación, ya que estos no están disponibles en las salidas de los modelos basados en IA. Para abordar esta limitación, proponemos un enfoque alternativo que aproxima el factor de corrección utilizando un subconjunto de las variables meteorológicas

disponibles. Para su estimación, se exploran diversos métodos, desde técnicas simples como la persistencia y la climatología, hasta modelos lineales y no lineales, incluyendo regresión lasso y LightGBM.

Con el objetivo de mejorar la interpretabilidad de los resultados, combinamos el aprendizaje automático con dos técnicas de selección de variables: el método stepwise y el algoritmo Probabilistic Coral-Reef Optimization with Substrate Layers (PCRO-SL), un enfoque evolutivo diseñado para resolver problemas de optimización complejos mediante la combinación de múltiples estrategias de búsqueda. Adicionalmente, la región de estudio se segmenta en zonas homogéneas de UTCI utilizando técnicas de agrupamiento K-means.

3) RESULTADOS

Se identificaron tres regiones homogéneas de UTCI (Figura. 1). Utilizando el algoritmo PCRO-SL, se seleccionaron los 10 predictores más relevantes para estimar el factor de corrección en cada punto de la grilla, para luego identificar los 10 predictores recurrentes en cada región. Entre los modelos evaluados, LightGBM se destacó por ofrecer el mejor desempeño. Además, este modelo permitió cuantificar la importancia relativa de cada predictor, lo cual facilitó una exploración de los mecanismos físicos que influyen en el UTCI.

En la región norte, de clima predominantemente tropical, el UTCI está fuertemente condicionado por las variables atmosféricas de capas bajas (Figura 2). En la región central, el transporte de humedad en niveles bajos resulta fundamental para la regulación del estrés térmico. Finalmente, en la Patagonia, la variabilidad de los vientos zonales en niveles bajos emerge como el principal modulador del estrés térmico.

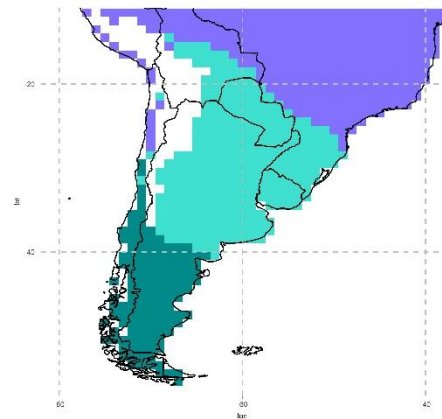


Figura 1: Regiones homogéneas de UTCI

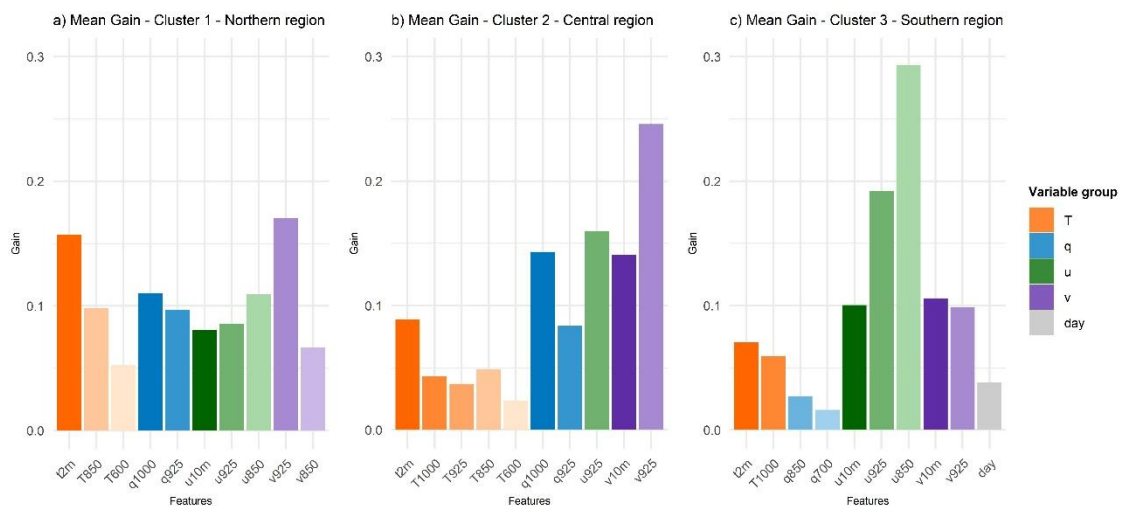


Figura 2: Importancia media de los predictores derivada del modelo LightGBM para cada región del sur de Sudamérica. En la figura, las variables están codificadas por colores según su tipo, y un gradiente de tonos oscuros a claros indica los niveles de presión.

La capacidad del modelo para estimar el factor de corrección del UTCI a partir de los predictores seleccionados se evaluó utilizando diversas métricas de desempeño. Los resultados

indican un desempeño predictivo razonable: el error cuadrático medio (RMSE) promedio fue de 1,36 °C, mientras que la correlación espacial alcanzó un valor de 0,43.

Posteriormente, aplicamos esta metodología para estimar el UTCI durante una ola de calor ocurrida en el centro de Argentina en marzo de 2023. En este estudio de caso, empleamos pronósticos de variables meteorológicas como datos de entrada para la estimación del UTCI, provenientes tanto del modelo tradicional GFS como de modelos basados en IA (Figura 3). Además, se analizaron pronósticos inicializados a distintos plazos, lo que permitió evaluar la capacidad predictiva del modelo en función del horizonte temporal.

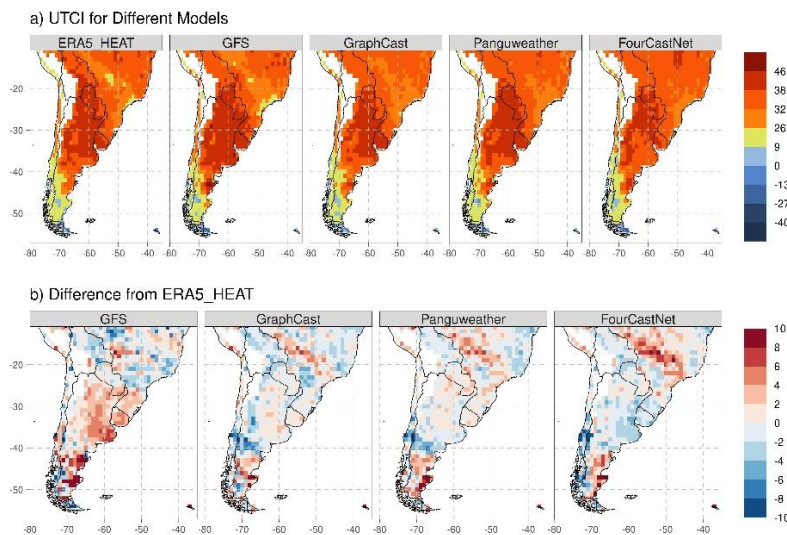


Figura 3: UTCI del reanálisis ERA5-HEAT y pronosticado por GFS NWP y modelos basados en IA para el 11 de marzo, inicializado el 9 de marzo a las 12 UTC (a). Diferencias entre el UTCI pronosticado y ERA5-HEAT se muestran en el panel inferior (b).

El desempeño de los pronósticos del UTCI está determinado principalmente por dos factores: la calidad de los datos meteorológicos de entrada y la precisión en la estimación del propio índice. En nuestro análisis, los enfoques no lineales superaron consistentemente a los métodos lineales en la estimación del UTCI. Además, los modelos basados en IA demostraron un rendimiento superior al de los modelos físicos tradicionales en los pronósticos de las variables meteorológicas de entrada y del estrés térmico durante la ola de calor de marzo 2023.

4) CONCLUSIONES

En el presente estudio se establece un marco para desarrollar un sistema de predicción del UTCI, utilizando un subconjunto cuidadosamente seleccionado de variables meteorológicas pronosticadas mediante modelos basados en IA. Para lograr este objetivo, hemos explorado y evaluado una serie de metodologías para la selección de predictores y la estimación del UTCI. Los principales resultados son los siguientes: las metodologías no lineales son más eficaces para estimar el factor de corrección del UTCI; el análisis del UTCI por regiones homogéneas mejora la interpretabilidad, los modelos basados en IA superan a los modelos físicos tradicionales en la representación de variables meteorológicas y la estimación del estrés térmico durante la ola de calor de marzo de 2023. Estos resultados subrayan el potencial de los métodos avanzados de previsión para apoyar la salud pública mediante alertas tempranas oportunas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el proyecto SAFETE, financiado por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, Marie Skłodowska-Curie n° 847635 (UNA4CAREER).

EL ROL DEL CALOR DIABÁTICO EN LA INTENSIFICACIÓN DE UNA CICLOGÉNESIS EXPLOSIVA EN EL ATLÁNTICO SUR OCCIDENTAL: MODELADO CON WRF

Lisandro Pinto¹, Lucas Zapata¹, Juan Augusto Diaz^{1,2}
lpinto@fcaglp.unlp.edu.ar

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - UNLP

²Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: ciclogénesis explosiva, wrf, modelado.

1) INTRODUCCIÓN

Entender la dinámica de los sistemas de baja presión es fundamental para la realización del pronóstico del tiempo. En la teoría de ciclogénesis, se distinguen tres tipos de desarrollo. Ciclogénesis tipo A: se caracteriza por el predominio de un sistema frontal en superficie, que puede desarrollarse sin la necesidad de una perturbación en altura. Este tipo de ciclogénesis es poco común. Ciclogénesis tipo B: es la más frecuente y se produce cuando una vaguada en niveles altos se superpone a una zona baroclínica en superficie, intensificando el sistema a medida que las advecciones de temperatura y vorticidad se refuerzan. Ciclogénesis tipo C: está marcada por una liberación significativa de calor latente debido a la convección, y se intensifica principalmente por el calor diabático (Plant y otros 2003). Este tipo de eventos suelen estar acompañados de vientos intensos y precipitaciones severas. Sanders and Gyakum (1980) proponen un criterio para definir la ciclogénesis explosiva, según la tasa de caída de la presión en superficie y la latitud media del centro del ciclón. En la región de Sur América, las bajas explosivas son más frecuentes durante el invierno aunque durante el otoño mantienen una frecuencia considerable, y de 200 ciclones explosivos sólo el 3 por ciento se desarrolló sobre el continente (Possia, 2004).

El objetivo de este trabajo es cuantificar el aporte de los términos de calor latente durante un evento de ciclogénesis explosiva que afectó la ciudad de Mar del Plata con vientos fuertes, lluvias y tormentas intensas entre los días 28 al 30 de abril de 2020.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para poder comprender la dinámica que dominó la ciclogénesis explosiva se realizaron 4 simulaciones utilizando el modelo WRF-ARWv4.2 (Skamarock y otros 2019). El WRF-ARW es un modelo numérico de pronóstico del tiempo desarrollado por el National Center of Atmospheric Research (NCAR) de los Estados Unidos y es utilizado en forma operativa en varios Servicios Meteorológicos Nacionales del mundo. Las simulaciones se enfocaron en evaluar el impacto del calor latente como forzante en la intensificación del sistema ciclónico. Las mismas comprenden el periodo 28/04/2020 a las 00:00 UTC hasta el 01/05/2020 a las 00:00 UTC. Se utilizó el mismo dominio, resolución horizontal, vertical y temporal para las 4 simulaciones, al igual que las condiciones de borde e iniciales, tomadas a partir de los campos de análisis generados por el modelo GFS de resolución de 0.22° cada 3 horas.

Además, se utilizaron las mismas parametrizaciones de configuración modificando únicamente el bloque de microfísica de nube y el parámetro no_mp_heat. Como se muestra en la tabla 1, las simulaciones RUN-2 y RUN-4 utilizan el parámetro no_mp_heat activado (configuración NoHeat), lo que inhabilita la liberación de calor latente y posterior aporte a la tendencia de temperatura, humedad en el esquema de microfísica. En las simulaciones

RUN-1 y RUN-3, no se tuvo en cuenta el parámetro `no_mp_heat` y se utilizan parametrizaciones diferentes con el objetivo de analizar la sensibilidad del sistema ante diferentes representaciones de los procesos de nube.

Esquema	RUN-1	RUN-2	RUN-3	RUN-4
<code>no_mp_heat</code>	No	Si	No	Si
<code>mp_physics</code>	8 Thompson	8 Thompson	6 WSM6	6 WSM6

Tabla 1: Esquema de microfísica para cada una de las simulaciones

Se utilizaron datos de reanálisis ERA5, con una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ proporcionada por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Se seleccionaron las siguientes variables: presión a nivel medio del mar (PNMM), altura geopotencial en 1000 hPa y 500 hPa, vorticidad relativa en 500 hPa, velocidad del viento, temperatura y precipitación acumulada en superficie.

Para identificar la ciclogénesis explosiva se siguió el criterio de Sanders y Gyakum (1980) aplicado a las 4 simulaciones y datos de reanálisis:

$$\left| \frac{\Delta P}{\Delta t} \right| \cdot \left| \frac{\sin(60^\circ)}{\sin(\varphi_{medio})} \right| \geq 1 \cdot \frac{hPa}{h} \quad (1)$$

Donde φ_{medio} es la latitud media del centro del ciclón durante el periodo de análisis.

Además se utilizaron las imágenes del radar RMA6 Mar del Plata de la red SiNaRaMe producto COLMAX y Doppler para verificar las rafagas e intensidad de la tormenta sumado a los datos de viento y precipitación de la estación meteorológica Mar del Plata Aeropuerto del SMN. Por último se consultaron estaciones automáticas disponibles en el portal wundermap.

3) RESULTADOS

El 28 de abril de 2020 se inició una ciclogénesis al sudeste de la provincia de Buenos Aires, que rápidamente se profundizó hacia la tarde/noche mientras se desplazaba hacia el sudeste.

La Figura 1 muestra la evolución temporal de la PNMM en el centro del ciclón, comparando los resultados de las cuatro simulaciones realizadas con el modelo WRF con los datos del reanálisis ERA5. Se observa una fuerte caída de la presión en todas las simulaciones, aunque con diferente intensidad y momento de profundización según la configuración del modelo.

Según el criterio de Sanders and Gyakum (1980) y la serie ERA5 este proceso calificó como ciclogénesis explosiva entre las 12 UTC del 28 de abril y las 12 UTC del 29 de abril, para una latitud media de 39°S . Este resultado es consistente con lo hallado en el trabajo de Allen et al. (2010) donde encuentra que en el HS hay un máximo de ciclones explosivos al este de Sudamérica.

Por su parte, las simulaciones RUN-1 y RUN-3, que incluyen el efecto del calor latente en el esquema de microfísica, reproducen con mayor precisión tanto la magnitud como la tendencia de presión de acuerdo con lo observado en ERA5. En contraste, las simulaciones RUN-2 y RUN-4, en las que se encuentra desactivado el parámetro `no_mp_heat`, muestran un debilitamiento considerable del sistema y una evolución más lenta, lo que pone en evidencia la importancia del calor diabático en el desarrollo e intensificación de este tipo de ciclones.

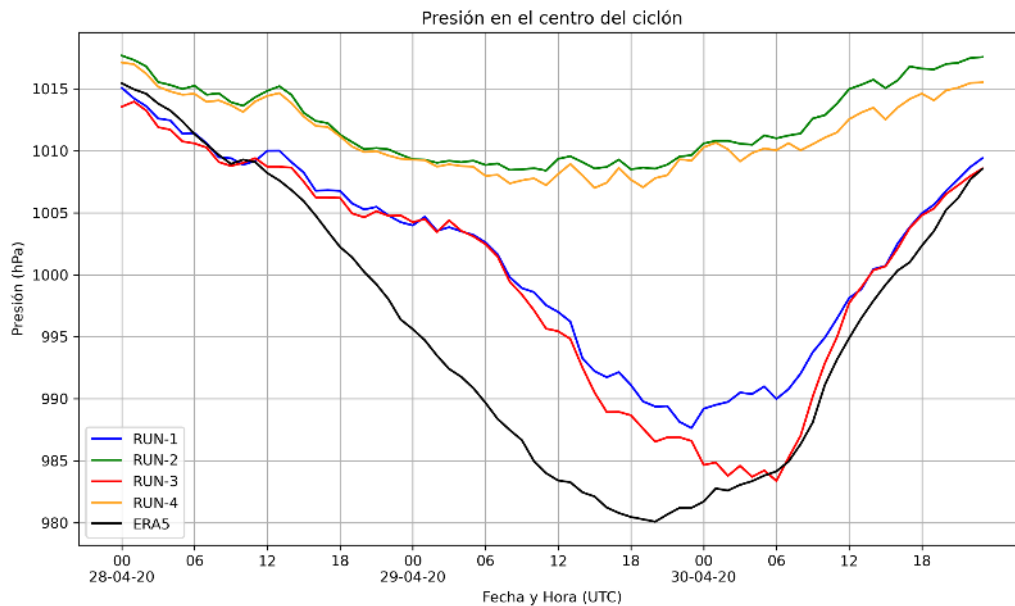


Figura 1: PNMM. Azul: RUN-1, Verde: RUN-2, Rojo: RUN-3, Amarillo: RUN-4 y Negro: ERA5

La profundización del sistema estuvo acompañada de vientos fuertes, con ráfagas de hasta 40 km/h registradas en la estación de Mar del Plata. Además se registraron 91 mm de precipitación acumulada, casi alcanzando la media mensual de 97 mm para abril en solo dos días, destacando la magnitud del evento meteorológico.

4) CONCLUSIONES

Las simulaciones RUN-1 y RUN-3 obtiene un buen resultado en la representación de la tendencia de precesión, sin embargo, subestiman el valor mínimo absoluto con una diferencia del orden de 10hPa y 5hPa respectivamente. Como era de esperarse las simulaciones RUN-2 y RUN-4 obtienen una tendencia de presión cuasi estacionaria con presiones mínimas del orden de 1008hPa con una diferencia del orden de 30hPa con ERA5. Los resultados confirman la importancia de los procesos de calor diabático en la intensificación de las ciclogénesis explosivas.

REFERENCIAS

- Allen, J. T., A. B. Pezza, and M. T. Black, 2010:** Explosive cyclogenesis: A global climatology comparing multiple reanalyses. *J. Climate*, 23, 6468–6484.
- Sanders, F., & Gyakum, J. R. (1980).** Synoptic-dynamic climatology of the “bomb”. *Monthly Weather Review*, 108(10), 1589-1606.
- Plant, R. S., C. G. Craig, and S. L. Gray, 2003:** On a threefold classification of extratropical cyclogenesis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129, 2989–3012.
- Possia, N. E. (2004).** Estudio de los ciclones explosivos sobre la región sur de Sudamérica (Doctoral dissertation, UBA. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).
- Skamarock W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J. y otros, 2019:** A description of the advanced research WRF v4. NCAR/TN–556+STR TECHNICAL NOTE. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.

EXTREMOS CLIMÁTICOS PROYECTADOS EN SUDAMÉRICA BAJO EL ESCENARIO DE SOBREPASO SSP5-3.4OS DEL CMIP6

Ezequiel Adrián Callegari^{1*}, Carla Natalia Gulizia^{1,2,3}

[*ezecallegari@gmail.com](mailto:ezecallegari@gmail.com) Autor correspondiente

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: extremos climáticos, CMIP6, escenario de sobrepaso, Sudamérica

1) INTRODUCCIÓN

En el contexto de una respuesta internacional demorada frente al calentamiento global, ha crecido el interés científico por explorar escenarios en los que el forzamiento radiativo alcanza un máximo antes de disminuir, conocidos como escenarios de sobrepaso u overshoot en inglés (Reisinger y otros, 2025). Estos escenarios representan trayectorias en las cuales el sistema terrestre excede transitoriamente un determinado umbral de temperatura global, para luego iniciar un descenso impulsado por una reducción drástica de las emisiones (O'Neill y otros, 2016; IPCC, 2023). En el presente trabajo se analiza la respuesta regional del clima medio y extremo en Sudamérica, bajo el escenario de sobrepaso SSP5-3.4OS, incluido en el conjunto de simulaciones de la sexta fase del Programa de Intercomparación de Modelos Climáticos (CMIP6).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se evaluaron las simulaciones climáticas de temperatura y precipitación bajo el escenario SSP5-3.4OS derivadas de un conjunto de 8 Modelos Climáticos Globales (MCG). Este escenario contempla una fase inicial de altas emisiones (análoga al SSP5-8.5) hasta aproximadamente 2040, seguida por una descarbonización acelerada, y es el único escenario de CMIP6 que alcanza y revierte un pico calentamiento global antes de 2100 (O'Neill y otros, 2016).

El análisis de extremos climáticos se centra en un subconjunto de índices climáticos del Equipo de Expertos en Detección e Índices del Cambio Climático (ETCCDI, Zhang y otros, 2011). En particular, se evaluaron los extremos cálidos a partir de los índices que representan los días (tx90p) y noches (tn90p) cálidas. Complementariamente, se analizó la temperatura media anual (tas). Para la precipitación, se consideraron los días secos consecutivos (cdd), la precipitación extrema de 5 días consecutivos (rx5day), la precipitación anual de días húmedos superiores al percentil 95 (r95p), y la contribución a la precipitación total de la precipitación en días extremos húmedos (r95ptot). Asimismo, se evaluó la precipitación total anual en días húmedos (preptot), representativa de las condiciones medias de precipitación.

Con el objetivo de identificar los períodos pre- y post-sobrepaso, se evaluó el año del pico de calentamiento global simulado por cada MCG individualmente. Para ello, se analizaron, en cada caso, los promedios móviles centrados de 21 años de las anomalías de la temperatura media global en superficie, respecto al período preindustrial (1850–1900). Los períodos pre- y post-sobrepaso se consideran como ventanas simétricas en torno al pico identificado, teniendo en cuenta que las simulaciones terminan en 2100.

Finalmente, se calculó el ensamble multi-modelo de los cambios proyectados, en el clima medio y en los extremos climáticos, entre las fases de calentamiento (pre-sobrepaso) y enfriamiento (post-sobrepaso) del escenario SSP5-3.4OS. El análisis del ensamble se calculó a partir de la mediana de los resultados de cada MCG individualmente.

3) RESULTADOS

La Figura 1 muestra los cambios proyectados en los índices de temperatura y precipitación derivados de la mediana del conjunto de modelos bajo el escenario SSP5-3.4OS, junto con el histograma de la distribución del año del pico de calentamiento global. Este último ocurre entre 2060 y 2070 para la mayoría de las simulaciones consideradas, aunque en el rango desde 2050 hasta 2090. Los cambios proyectados para las variables relacionadas con la temperatura exhiben un aumento generalizado en Sudamérica, con patrones espaciales similares entre sí. Las zonas de mayor aumento resultaron en el este de Brasil y el centro de Argentina, con una mayor concordancia entre la mayoría de los modelos en ese signo de cambio. Por otra parte, en menor medida, se proyectan disminuciones en tas y tx90p en el norte de Brasil, y en tn90p para la zona del litoral argentino. Sin embargo, estos cambios son más localizados y los MCGs analizados no presentan un acuerdo en el signo de cambio.

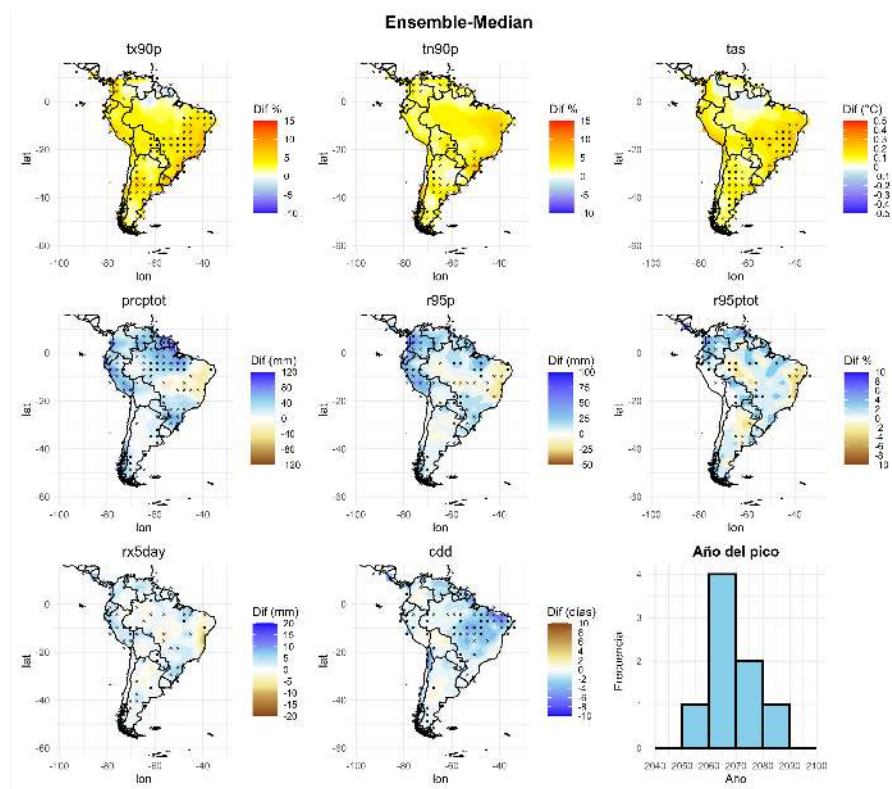


Figura 1: Mediana del ensamble multi-modelo para los cambios proyectados entre los períodos post- y pre- pico de calentamiento global para las variables analizadas: de temperatura (fila superior: tx90p, tn90p, y tas), y de precipitación (fila intermedia: prcptot, r95p, y r95ptot, y fila inferior: rx5day y cdd)). Las cruces indican donde el signo de cambio proyectado coincide en al menos 6 de los 8 MCGs analizados. En la esquina inferior derecha, se indica el histograma de frecuencias para el año del pico de calentamiento global según escenario SSP5-3.4OS, calculado a partir de los resultados de cada MCG individual.

Para las variables analizadas relacionadas con la precipitación, los patrones de cambios proyectados son más heterogéneos. Los campos de $prcptot$ y $r95p$ presentan un patrón espacial similar, con los mayores aumentos en el norte y sur de Brasil, y Perú, mientras que se destacan disminuciones en el noreste de Brasil, consistentes con los máximos aumentos proyectados de temperatura media y extrema. Estas reducciones se proyectan también en el índice $r95ptot$. Por otra parte, los cambios para el índice $rx5day$ son de menor magnitud, aunque con un patrón espacial consistente con los de los otros índices relacionados con la precipitación, ya analizado. Finalmente, los resultados para cdd indican una reducción de los días consecutivos secos en el noreste de Brasil, la cordillera de los Andes y la Patagonia, con un acuerdo en el signo de cambio entre modelos.

4) CONCLUSIONES

El período de sobrepaso conlleva un riesgo elevado de intensificación de fenómenos extremos como olas de calor, lluvias torrenciales y sequías prolongadas. El presente trabajo se focalizó en avanzar en el entendimiento de las respuestas en la temperatura y precipitación medias y extremas, a nivel regional en Sudamérica, bajo el escenario SSP5-3.4OS. Aunque este no sería una trayectoria recomendable por las demoras que implica en la reducción de emisiones, es el único escenario de CMIP6 que permite evaluar, de manera explícita, los efectos de un sobrepaso térmico antes de 2100.

Los resultados obtenidos muestran que los impactos del sistema climático a nivel regional en Sudamérica, persistirían e incluso se intensificarían en algunas regiones. Las simulaciones analizadas mostraron aumentos generalizados en la temperatura media y extrema, incluso en el período de enfriamiento (posterior al pico de calentamiento global). Sin embargo, es relevante destacar la incertidumbre en los resultados dada la gran dispersión en la respuesta de los MCGs analizados (no se muestra). Por otro lado, del análisis de los índices de precipitación se destaca la señal de reducción de condiciones secas durante el período de enfriamiento (post-sobrepaso) en regiones como los Andes centrales y el noreste de Brasil, donde la tendencia observada, y proyectada bajo escenarios de altas emisiones, documenta un aumento y permanencia de condiciones cada vez más secas..

En este sentido, los resultados obtenidos en el presente trabajo son consistentes con estudios previos (Pfleiderer y otros, 2023, Mondal y otros, 2023), que sugieren que, incluso si se lograra revertir la tendencia del calentamiento global, los efectos sobre el sistema climático regional podrían mantenerse durante décadas.

5) REFERENCIAS

IPCC (2023): Summary for Policymakers. En: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34

Mondal, S. K., An, S.-I., Min, S.-K., Kim, S.-K., Shin, J., Paik, S., Im, N., & Liu, C. (2023): Hysteresis and irreversibility of global extreme precipitation to anthropogenic CO₂ emission. *Weather and Climate Extremes*, 40, 100561.

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L. y otros (2016): The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482.

Pfleiderer, P., Schleussner, C. F., & Sillmann, J. (2024): Limited reversal of regional climate signals in overshoot scenarios. *Environmental Research: Climate*, 3, 015005.

Reisinger y otros (2025): Overshoot: A conceptual review of exceeding and returning to global warming of 1.5 °C. *Annual Review of Environment and Resources*, 50, 1.1–1.33.

EVALUACIÓN DE SESGOS DE TEMPERATURAS Y PRECIPITACIÓN DIARIAS EN MODELOS CLIMÁTICOS REGIONALES EN EL SUDESTE DE SUDAMÉRICA

Melany Kapustiak^{1*}, Maria Laura Bettolli¹²³

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN,UBA)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³ IFAECI/CNRS-IRD-UBA

*Melanykapustiak@hotmail.com

Palabras clave: Sesgos Sistemáticos, Modelos climáticos, Corrección de sesgo

1) INTRODUCCIÓN

Los modelos climáticos globales (GCMs) y regionales (RCMs) son herramientas fundamentales para proyectar el clima futuro. Estos modelos permiten estimar la evolución de variables clave como la temperatura, la precipitación y el viento bajo diferentes escenarios de emisión. Sin embargo, presentan sesgos sistemáticos (bias) que pueden limitar su aplicación en estudios de impacto.

Estos sesgos pueden variar en el tiempo y en el espacio, es decir, no son estacionarios, lo que representa un desafío adicional para la generación de proyecciones climáticas confiables (Casanueva et al., 2020). En particular, Blázquez y Solman (2023) estudiaron el desempeño de los RCMs en reproducir la temperatura media y precipitaciones de verano e invierno, y reportaron que los RCMs presentan, en general, biases cálidos en la región central de Argentina y que aquellos modelos con mayores biases tienden a proyectar mayores niveles de calentamiento en el clima futuro. Resultados similares fueron reportados por Solman (2016) en base a una generación anterior de RCMs, recomendando la aplicación de técnicas de corrección de estos sesgos.

Es necesario entonces identificar y ajustar estos sesgos mediante distintas técnicas estadísticas, como el *bias adjustment*, que buscan alinear las salidas de los modelos con los datos observacionales, mejorando así la representatividad de las simulaciones frente a las observaciones. No obstante, para aplicar estas metodologías de manera adecuada, es fundamental caracterizar previamente los sesgos presentes en cada modelo, variable y región según la escala temporal de interés (diaria, mensual o estacional).

En este marco, el presente trabajo tiene como objetivo identificar y cuantificar los sesgos sistemáticos en los valores diarios de temperatura máxima, mínima y precipitación, simulados por modelos climáticos regionales para la región del sudeste de Sudamérica (SESA). Este diagnóstico permitirá aportar a una mejor interpretación de las salidas diarias de modelos climáticos globales y regionales, y sentar las bases para una posterior implementación de técnicas multivariantes de corrección de sesgos, orientadas a reducir la incertidumbre en las proyecciones climáticas.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para realizar este trabajo se utilizaron datos diarios de temperatura máxima (Tx), mínima (Tn) y acumulados de precipitación (PP) en punto de retícula de la base CPC Global Unified Temperature y Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation en el periodo 1979-2005 en el dominio geográfico comprendido entre longitud -65° W a -45°W y latitud -40°S a -18°S, correspondiente a SESA.

También se emplearon salidas diarias de Tx, Tn, y PP de los modelos climáticos regionales del proyecto CORDEX-CORE (Gutowski et al. 2016) y del modelo ETA (Chou et al. 2014) para las simulaciones de evaluación e histórica (1979- 2005) en una resolución espacial aproximada de 20 km. La Tabla 1 resume los modelos utilizados y los GCMs utilizados para forzarlos :

RCM	EVALUACIÓN	HISTÓRICA
REMO	ERA-Interim	MOHC-HadGEM2-ES , MPI-M-MPI-ESM-LR , NCC-NorESM1-M
REGCM3	ERA-Interim	MOHC-HadGEM2-ES , MPI-M-MPI-ESM-MR , NCC-NorESM1-M
ETA	ERA-Interim	CanESM2 , HadGEM_ES , MIROC5

Tabla 1: Modelos Climáticos regionales utilizados

El sesgo se calculó como la diferencia entre el valor simulado por el modelo y el observado correspondiente de la base CPC, según la siguiente expresión:

$$BIAS= X_{modelo} - X_{cpc}$$

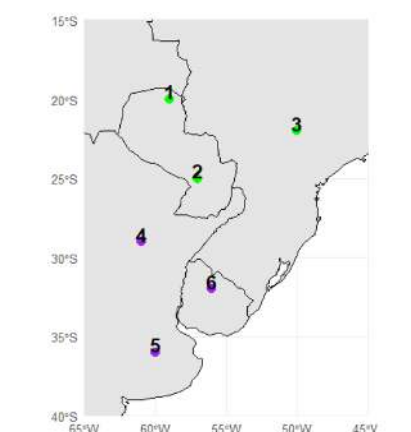


Figura 1: Mapa de SESA con puntos elegidos para analizar

Además, seis puntos de la región fueron seleccionados (Figura 1) con el fin de realizar un análisis más exhaustivo de los sesgos presentes en cada variable.

3) RESULTADOS

Dentro de los resultados, se observa que los modelos del grupo ICTP presentan una tendencia general a sobreestimar la temperatura máxima (Tx) y la temperatura mínima (Tn) en gran parte de la región de SESA, evidenciando sesgos positivos consistentes.

En cuanto al comportamiento del modelo ETA, se destaca que cuando es forzado con el modelo global MIROC5, tiende a subestimar la temperatura mínima (Tn), mientras que para la temperatura máxima (Tx) muestra una sobreestimación localizada en ciertas áreas.

Respecto a la precipitación (PP), los modelos del grupo GERICS presentan una marcada sobreestimación en gran parte de la región. Por el contrario, los modelos de ICTP tienden a subestimar la precipitación de manera más generalizada. En el caso del modelo ETA, el comportamiento es más variable, con zonas puntuales de subestimación, dependiendo del forzante global utilizado.

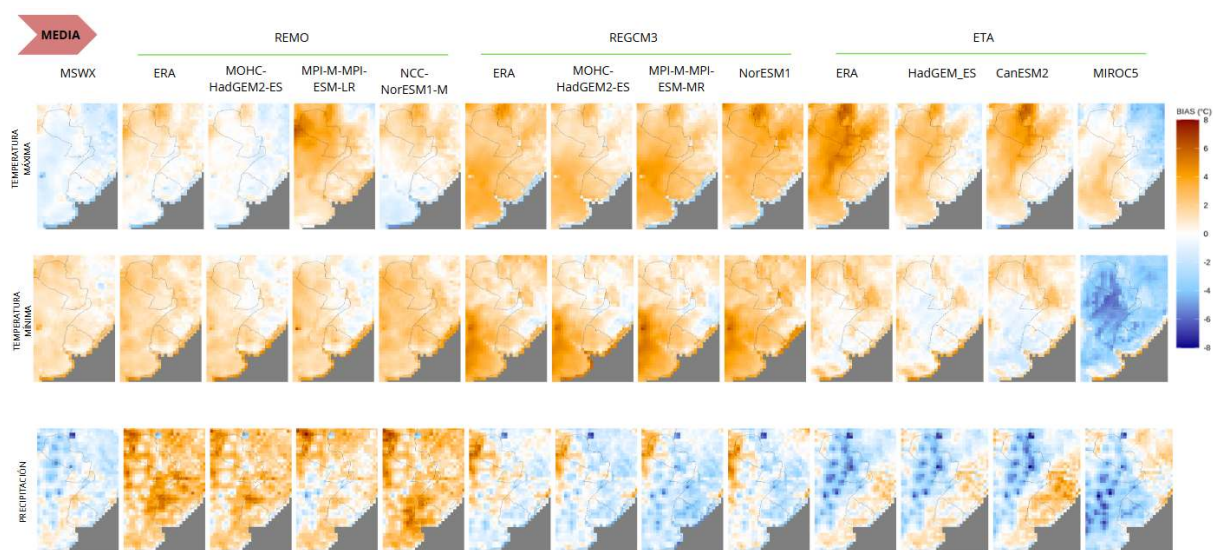


Figura 2: Mapas de BIAS diarios en la región de SESA, para el periodo 1979-2005, en las variables Tx, Tn y PP.

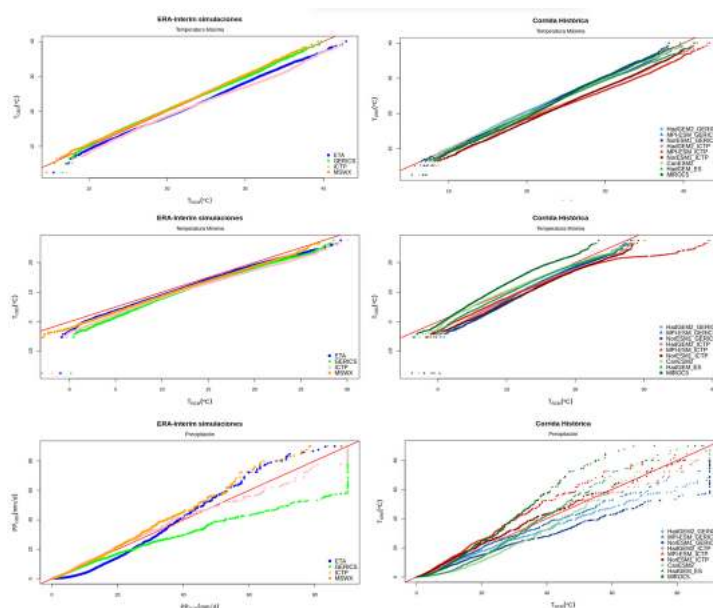


Figura 3: QQ-Plot comparando las variables Tx, Tn y PP diarias observadas y los modelos climáticos regionales (RCMs) en la región representada por el punto 4 (ver Figura 1), para el periodo 1979-2005.

4) CONCLUSIONES

El análisis realizado permitió evidenciar la presencia de sesgos sistemáticos (Bias) en los modelos climáticos regionales para la región de SESA, en las variables de temperatura máxima, mínima y precipitación diarias, no solo en términos medios si no también en términos distribucionales.

Estos resultados destacan la importancia de aplicar técnicas de ajuste de sesgo y respaldan la

necesidad de avanzar en su implementación para mejorar la confiabilidad de las proyecciones climáticas.

5) REFERENCIAS

Blázquez, J., Solman, S.A. (2023) Temperature and precipitation biases in CORDEX RCM simulations over South America: possible origin and impacts on the regional climate change signal. *Clim Dyn* 61, 2907–2920. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06727-5>

Casanueva et.al (2020) Testing Bias Adjustment methods for regional climate change applications under observational uncertainty and resolution mismatch. *Atmospheric Science Letters*, <https://doi.org/10.1002/asl.978>

Chou SC, Lyra A, Mourão C, Dereczynski C, Pilotto I, Gomes J, Chagas D (2014) Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. *Am J Clim Change* 3(05):438. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>

Solman, S.A. (2016) Systematic temperature and precipitation biases in the CLARIS-LPB ensemble simulations over South America and possible implications for climate projections. *Climate Research*. 68(2-3):117-136

Gutowski JW et al. (2016) WCRP COordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6. *Geosci Model Dev* 9(11):4087–4095. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4087-2016>

ANÁLISIS DE LA PREDICTIBILIDAD DEL EVENTO METEOROLÓGICO DE BAHÍA BLANCA DEL 7 DE MARZO DE 2025

Marcos A. SAUCEDO^{1,2}, Viviana E. LÓPEZ^{1,3,4}, Santiago GALGANO^{1,2}
msaucedo@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

² Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

³ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAGLP, UNLP)

⁴ Departamento Académico Ciencias Ambientales y Gestión del Agua (UNLC)

Palabras clave: Precipitaciones extraordinarias. Extreme forecast index (EFI). Río atmosférico.

1) INTRODUCCIÓN

El evento meteorológico ocurrido el 7 de marzo de 2025 en la ciudad de Bahía Blanca derivó en precipitaciones extraordinarias, las cuales constituyeron un récord de precipitación en 24 hs al superar el máximo de la serie histórica 1956-2025 (*Figura 1*). Esta situación particular fue la más intensa de una serie de eventos similares que acontecieron en las 2 semanas previas. Dicho periodo se caracterizó por el sucesivo pasaje de frentes y perturbaciones que al interactuar con una masa de aire sumamente húmeda e inestable dieron lugar a eventos de precipitaciones abundantes que derivaron en anegamientos e inundaciones en diferentes puntos del centro de Argentina. Se destaca la presencia del Jet Sudamericano de Capas Bajas (SALLJ por sus siglas en inglés), particularmente muy intenso en la jornada del evento, caracterizada por una fuerte inestabilidad en la atmósfera y la llegada de un frente frío, que se desplazó hasta el norte del país, y fue el responsable del abrupto cambio de masa de aire finalizando la semana.

A partir del análisis desarrollado, surgen diversos interrogantes relacionados con la probabilidad de que el evento pueda ser pronosticado. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es mejorar el conocimiento de los patrones sinópticos que puedan desencadenar precipitaciones extraordinarias en nuestra región.

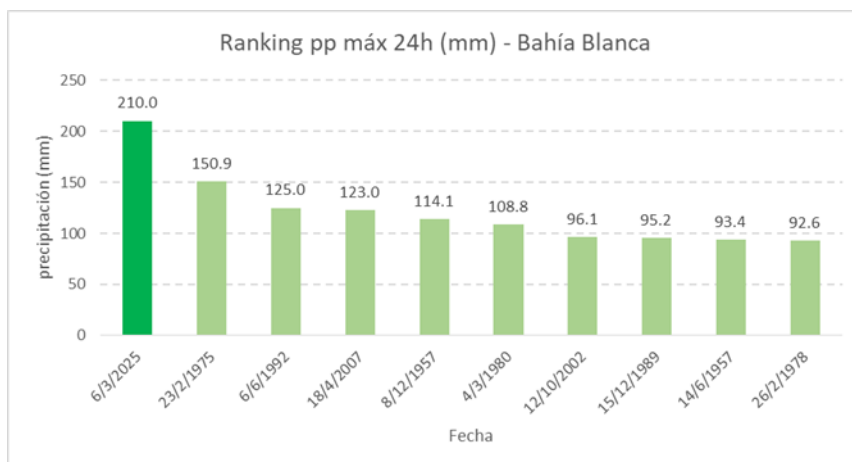


Figura 1: Ranking de precipitación en 24 hs para la ciudad de Bahía Blanca. Período 1956-2025. Imagen desarrollada por J. L. Stella, comunicación personal.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El estudio de este evento se concentra en un dominio que abarca entre el sudoeste de la provincia de Buenos Aires y el sudeste de La Pampa. Para el análisis de la evolución de la situación sinóptica, se utilizaron observaciones provistas por estaciones sinópticas de superficie del Servicio Meteorológico Nacional, sensores remotos y radiosondeos; como así también

información proporcionada por modelos numéricos de pronóstico (GFS, ECMWF y WRF), haciendo especial énfasis en los extremos de precipitación.

Asimismo, se evaluó el Transporte Integrado de Vapor de Agua (IVT por sus siglas en inglés) provisto por reanálisis del ERA5 (Hersbach et al., 2023) para determinar si esta variable, asociada a la presencia de Ríos Atmosféricos (Viale et al., 2018) podría dar información complementaria al pronosticador a la hora de evaluar la severidad del fenómeno a pronosticar.

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Desde días previos a la inundación repentina en Bahía Blanca, en niveles bajos de la atmósfera, la presencia del SALLJ transportó humedad (Nicolini et al., 2002) desde latitudes tropicales, hasta la franja central del país, en donde se generó un fuerte gradiente de humedad, favoreciendo los movimientos de ascenso de forma persistente. Por lo tanto, debido a este flujo del norte en capas bajas, sobre la región dominó una masa de aire muy húmeda, con valores de agua precipitable de 40 a 60 mm y además estuvo acompañada por el anticiclón semipermanente del Atlántico sur más intenso de lo normal.

Durante la mañana del día 7 ingresó un nuevo sistema frontal frío al centro del país, en una atmósfera caracterizada por extrema inestabilidad, considerando por ejemplo los valores de CAPE del orden de los 4000 J/kg. Este sistema, causante del abrupto cambio de masa de aire, estuvo acompañado en niveles medios por una vaguada de gran amplitud sobre el Océano Pacífico e interactuó además con la región de fuerte gradiente de humedad de niveles bajos.

Considerando los reanálisis del ERA5, se evidenció que el día del evento, el IVT alcanzó valores entre 1000 y 1250 $\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ (Figura 2). Dada esta magnitud significativa en el flujo de humedad, resulta de interés profundizar en su relación con la intensidad de este evento.

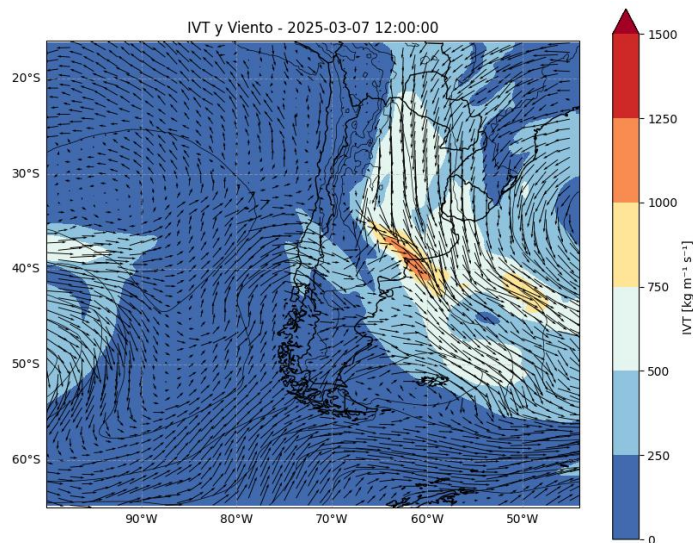


Figura 2: IVT y viento en 850 hPa para el día 7 de marzo de 2025 a las 12z en los reanálisis del ERA5.

El análisis de los modelos numéricos de pronóstico globales y regional (GFS, ECMWF y WRF), realizado previo al día 7 mostró que, si bien era previsible la ocurrencia de un evento de gran cantidad de lluvia sobre la región de estudio, no así los valores de precipitación que finalmente fueron registrados y que constituyeron el récord histórico de precipitación en 24 hs.

Por ejemplo, la Figura 3 muestra el producto EFI del Centro Europeo, inicializado el día 6 de marzo a las 00z, el cual indica para el día 7, un evento potencialmente extremo no solo sobre Bahía Blanca, sino además asociado a la disposición espacial del sistema frontal frío responsable del cambio de masa de aire.

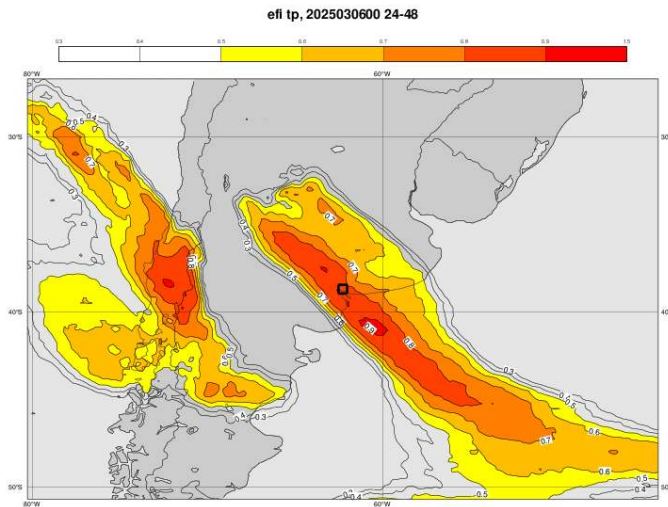


Figura 3: EFI (basado en el ensamble del IFS-9 km) de precipitación total para el día 7 de marzo de 2025.

En base a todo lo analizado, se concluye que, con la información provista por los modelos de pronóstico, no pudo ser previsible la magnitud de las precipitaciones extraordinarias sobre Bahía Blanca. No obstante, resulta relevante mencionar dos aspectos. Por un lado, los valores de precipitación diaria registrados en Bahía Blanca tienen una recurrencia de más de 400 años, considerando el Régimen Hidrológico julio-junio del período 1956-2023 (*J. L. Stella, en comunicación personal*) y, por otro lado, las características de la masa de aire y el intenso flujo de humedad proveniente de los trópicos, evidenciados en el desarrollo de sistemas convectivos a lo largo de la semana, sugerían la ocurrencia de un evento extremo, sin descartar que pudiera ocurrir uno extraordinario. Esto demuestra la importancia de comprender el entorno de una situación convectiva, independientemente de los resultados provistos por los modelos numéricos de pronóstico.

REFERENCIAS

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N., 2023: ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present.

Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI:

[10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47).

Nicolini M., Saulo A. C., Torres J. C., Salio P., 2002: Enhanced precipitation over southeastern South America related to strong low-level jet events during austral warm season. *Meteorológica*; 27; 1 y 2; 2002; 59-69.

Viale M., R. Valenzuela, R. Garreaud, and F.M. Ralph, 2018: Impacts of atmospheric rivers on precipitation over the southern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 19, 1671–1687.

VERIFICACIÓN DE PRONOSTICOS MARÍTIMOS SOBRE LA COSTA ARGENTINA

Santiago Galgano¹
sgalgano@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Servicio Meteorológico Nacional, Meteorología Marina, Prefectura Naval Argentina, Verificación de pronósticos.

1) INTRODUCCIÓN

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el organismo oficial del Estado Argentino responsable de la preparación y difusión de avisos de temporal y pronósticos meteorológicos marinos a plazos de 24 horas sobre el área que se extiende desde el paralelo 35° 50' S hasta el Polo Sur y desde el meridiano 67° 16' W hasta el meridiano de 20°W. Desde marzo del 2024, la Prefectura Naval Argentina (PNA) ha implementado un protocolo de recolección de datos meteorológicos a partir de las observaciones realizadas y reportadas por los buques que navegan en aguas de jurisdicción argentina. Estos datos son obtenidos mediante un procedimiento operativo coordinado por estaciones costeras en horarios establecidos. Esto asentó la base para la creación de una metodología de verificación de los boletines meteorológicos. Se presenta entonces en este documento la metodología y los primeros resultados obtenidos incluyéndose cálculos de estadísticos y de caracterización del viento costero observado.

2) METODOLOGÍA

Los boletines meteorológicos son preparados por los pronosticadores de la oficina de pronósticos regionales (CPR – SMN). Estos boletines constan de tres partes, una primera dedicada a los avisos de temporal, una segunda donde se describe la situación sinóptica y una tercera dedicada a los pronósticos. Este boletín está dividido en zonas costeras y áreas oceánicas. Para cada una de ellas, los principales parámetros que se describen son: La dirección e intensidad del viento, fenómenos meteorológicos y visibilidad. Los avisos de temporal se generan cuando el viento sea de fuerza de temporal (fuerza 8 de la escala de Beaufort) o mayor. Este producto se emite dos veces al día, a las 00:00 UTC y a las 12:00 UTC.

Los reportes provistos por PNA sobre el estado incluyen los siguientes parámetros: geolocalización del buque, dirección e intensidad del viento, estado del mar y presión. Estos reportes son estimaciones visuales realizadas por los capitanes.

Para la verificación se comparan los datos de intensidad y dirección del viento reportado por los buques contra lo pronosticado en el último boletín emitido en la zona costera en la que se encuentra el buque. Es válido aclarar que esta metodología está comparando pronósticos sobre áreas extensas (hasta más de 300mil km² en zonas costeras), con observaciones puntuales, es decir, el dato podría no representar toda la extensión del área. Debe considerarse, además, la subjetividad de la observación. Esta aclaración es de importancia ya que la verificación es muy exigente para alta para juzgar la calidad del pronóstico. Debido a la limitada robustez de los datos en algunos meses, es factible que los resultados no sean totalmente representativos. En ocasiones donde hay escasez de datos, un nivel de precisión mensual cercano al 0 puede ser provocado por un solo caso de no acierto en todo el mes.

Este informe analiza de forma generalizada el comportamiento del producto para comenzar a entender su comportamiento, el comportamiento propio de las observaciones marítimas y, además, incentivar análisis posteriores. La métrica utilizada para la verificación es el porcentaje de aciertos. Se considera **acierto** cuando el pronóstico emitido coincide en intensidad y dirección con el reporte. Además, se considera **acierto** cuando el pronóstico coincide en dirección y se sobreestima (1) nivel de la escala Beaufort.

Se considera **desacierto** cuando el pronóstico cumple alguna las siguientes situaciones: no coincide en dirección cualquiera sea la intensidad, cuando pronóstico subestima el viento reportado en 1 o más Beaufort, cuando el pronóstico sobreestima 2 niveles (o más) en la escala Beaufort. Cabe aclarar que este criterio considera que las situaciones del tipo “sorpresas” implican un mayor riesgo para la navegación que las del tipo “falsas alarmas”. Esa decisión considera de gravedad el escenario donde un buque se encuentre con viento mayor al pronosticado, en particular, casos de temporal que no hubieran sido pronosticados.

Utilizando una serie de scripts en Python se consultan los reportes a través de una API de la PNA, se extraen y ordenan los boletines del Centro de Información Meteorológica (CIM - SMN), se cruzan y se calculan los aciertos.

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

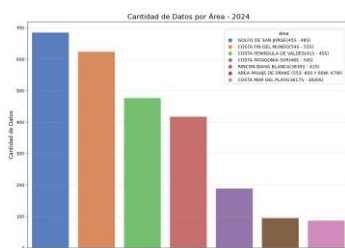


Figura 1: Cantidad de datos reportados por área desde marzo hasta diciembre del 2024

Se muestra en la figura *Figura 1* la cantidad de reportes de cada área desde marzo hasta diciembre del 2024. El área con mayor cantidad de datos fue Golfo San Jorge. Notar el mínimo sobre las áreas de Pasaje de Drake y Mar del Plata. Este tipo de análisis es importante porque permite detectar mínimos que afectan al análisis posterior (*Figura 2*), ya que el porcentaje de aciertos no sería representativo.

En la *Figura 2* se muestra la cantidad de datos de pronóstico para cada zona diferenciados según si el viento es subestimado en 1 nivel o más, si coincide en dirección e intensidad, y si sobrestima por 1, 2 o 3 categorías. Finalmente en la sección “Aciertos” vemos el porcentaje de pronósticos acertados. En general, los aciertos se ubican por encima de 28,4% y por debajo del 56,7%. Se destaca Bahía Blanca como la región con mayor porcentaje de aciertos con un 56,7%. Mientras que Pasaje de Drake es la región de menor tasa de aciertos con 28,4%.

En la *Figura 3* se presenta la distribución de direcciones de viento para cada área. Allí se destaca que durante el 2024 la dirección suroeste fue la predominante sobre Costa Fin del Mundo. A modo de ejemplo en la *Figura 4* se muestra la distribución de direcciones e intensidad sobre el Golfo San Jorge, en la cual se observa que los vientos del suroeste con intensidades de entre 4 y 6 Beaufort son característicos de la zona.

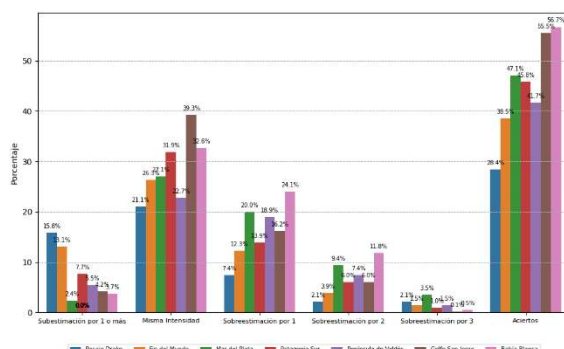


Figura 2: De Izquierda a derecha, Porcentajes de pronósticos que: subestimaron por un nivel o más, tuvieron igual dirección e intensidad que lo reportado, que sobrestimaron por un nivel, por 2 niveles, por 3 niveles o más, (Aciertos), Suma de los porcentajes.

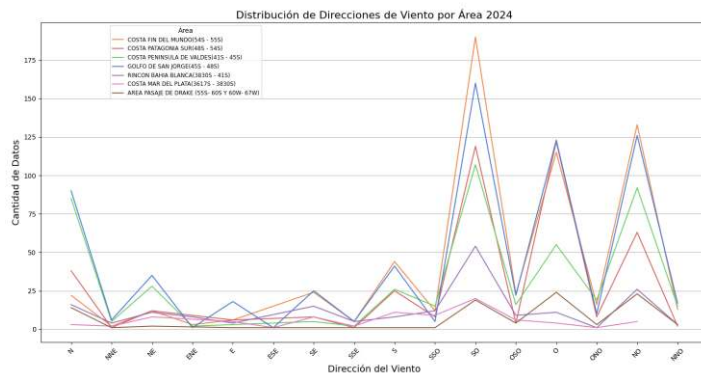


Figura 3: Frecuencia de direcciones de viento reportadas durante el periodo marzo – diciembre 2024.

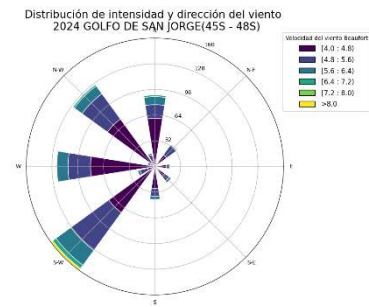


Figura 4: Distribución las frecuencias de intensidades de viento reportadas en escala Beaufort desde marzo hasta diciembre del 2024 sobre Golfo San Jorge.

Dado los resultados presentados, en este trabajo se expone que este tipo de análisis es de vital importancia para mejorar el entendimiento de los parámetros del tiempo en áreas marítimas. Además, se destaca la relevancia de asegurar la continuidad y desarrollo de dicha metodología, así como también la necesidad de contar con mayor cantidad de datos de calidad para los fines de verificación de pronósticos.

REFERENCIAS

Convenio SOLAS, 1980: Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1974. Organización Marítima Internacional.

Organización Meteorológica Mundial, 2012: Manual de Servicios Meteorológicos Marinos (OMM, 558), disponible en https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5538

Organización Meteorológica Mundial, 2018: Guía de Servicios Meteorológicos Marinos (OMM, 471), disponible en https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5471

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo fue posible gracias a la cooperación de la Dirección de Tráfico Marítimo, Fluvial y Lacustre (PNA), la Dirección de Informática y comunicaciones (PNA), CIM-SMN, Nicolás Pérez, Alicia Cejas, Marcos Saucedo (CPR-SMN), cuyo apoyo y compromiso han sido fundamentales.

ESTUDIO DEL POTENCIAL DE LA ASIMILACIÓN DE DESCARGAS ELÉCTRICAS EN LOS MODELOS METEOROLÓGICOS

Federico Cutraro¹, María Eugenia Dillon^{1,2}, Juan Ruiz^{3,4,5}

fcutraro@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²CONICET

³Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA, CONICET-UBA)

³CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos. Buenos Aires, Argentina.

⁵Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA

Palabras clave: GLM, WRF, LETKF.

1) INTRODUCCIÓN

Numerosos estudios han mostrado que la asimilación de datos regional tiene un gran impacto en los pronósticos de precipitación, especialmente en casos en que utilizan observaciones de la escala convectiva como las de radar. La actividad eléctrica en las tormentas guarda relación con la convección profunda y su intensidad, y por este motivo, diversos estudios han abordado la asimilación de observaciones de actividad eléctrica con resultados alentadores (Kong et al. 2020; entre otros). El presente trabajo se propone entonces evaluar el potencial de la asimilación de observaciones del sensor Geostationary Lightning Mapper (GLM) montado en el GOES-16 (Goodman et al. 2013) utilizando como operador de las observaciones la red neuronal desarrollada por Cutraro y otros (2024).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El caso de estudio empleado para evaluar el sistema de asimilación es el 19 de marzo de 2024, el cual presentó tormentas intensas en el norte de la provincia de Buenos Aires (Figura 1a). En particular se eligió este caso debido a que los pronósticos de modelos regionales no lograron representar de manera correcta la convección (Figura 1b).

Para evaluar el potencial impacto de las observaciones de actividad eléctrica, se analizó la estructura de la covarianzas entre la actividad eléctrica y las variables de estado del modelo vinculadas a través del operador de las observaciones. Para ello, se utilizó un ensamble de 20 miembros empleando el modelo WRF, con una resolución de 4 km, y utilizando el modelo global GEFS como condición inicial y de borde. La estimación de la actividad eléctrica pronosticada se realizó a través del operador de las observaciones desarrollado por Cutraro y otros (2024).

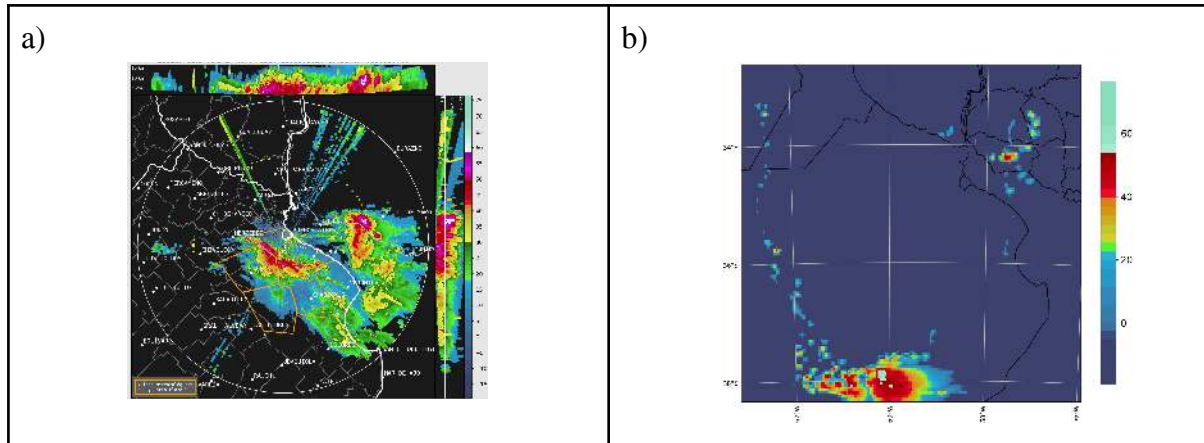


Figura 1: Observación del radar RMA2 para las 19:50 HOA del 19 de marzo del 2024 (a) y los pronósticos de reflectividad máxima de radar del WRF empleando condiciones iniciales y de borde de un miembro del GEFS (b).

3. ANÁLISIS DE COVARIANZAS

Para ejemplificar el potencial de asimilar observaciones de actividad eléctrica se emplean los pronósticos por ensamble para el 19 de marzo de 2024 a las 19:50 HOA, en la Figura 2 se pueden ver cortes zonales a la latitud de -38.1°S de las covarianzas obtenidas entre la actividad eléctrica pronosticada por el modelo y el contenido de graupel (a) y la temperatura (b). Para el caso del graupel, se obtiene una clara relación positiva entre la cantidad de este y la tasa de rayos, e iguales covarianzas se observan para los otros hidrometeoros pronosticados (no se muestra). En el caso de la temperatura, se pueden destacar las covarianzas negativas en niveles bajos y positivas en niveles medios. Las primeras están asociadas a la pileta de aire frío generada por la evaporación de la precipitación, mientras que la segunda a la liberación de calor latente. Los resultados observados para ambas variables están claramente asociados a una intensificación (disminución) de la convección en los casos en que se observen valores de actividad eléctrica mayores (menores) a los pronosticados.

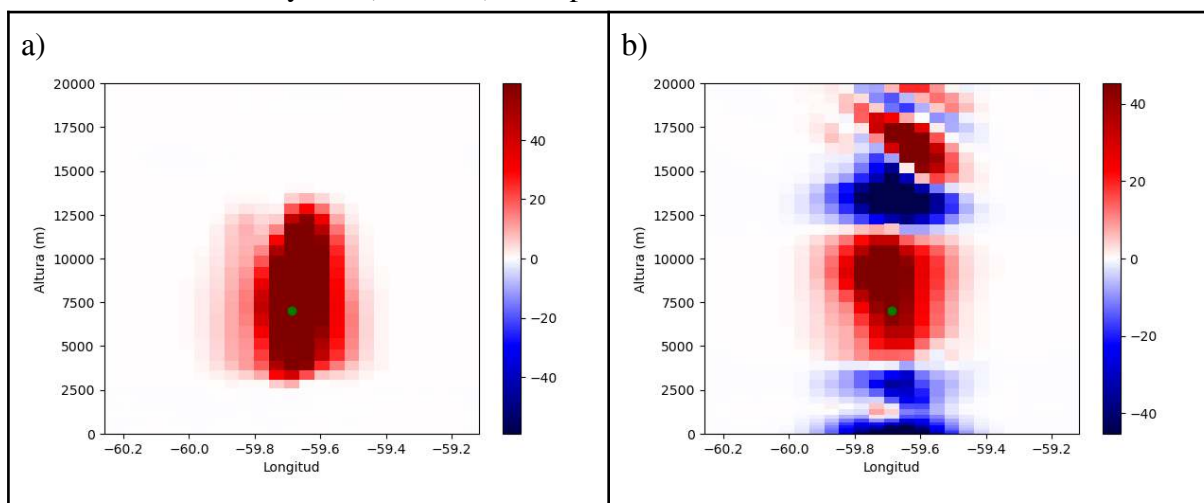


Figura 2: Corte zonal a los -38.1°S de las covarianzas obtenidas entre la tasa de rayos y la cantidad de graupel (a) y la temperatura (b). El punto verde indica la ubicación de la potencial observación a asimilar.

4. EXPERIMENTO DE ASIMILACIÓN

Dados los buenos resultados obtenidos a partir del análisis de las covarianzas, se plantea el experimento idealizado en el que se emplea una simulación del modelo WRF con una resolución de 2 km utilizando el reanálisis ERA5 como condición inicial y de borde que reproduce la ocurrencia de convección profunda en el norte de Buenos Aires, aunque no en la ubicación observada (Figura 3). A partir de esta simulación, se generan pseudo-observaciones empleando el operador de Cutraro y otros (2024) para ser asimiladas en el WRF empleando la metodología Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF). La elección de este método se basa en la vasta experiencia local y los buenos resultados obtenidos en observaciones en escala convectiva como las de radar (Matsudo y otros, 2024). Los resultados de este experimento serán presentados en el congreso.

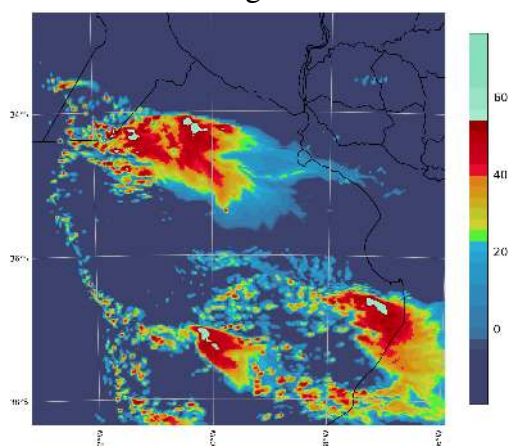


Figura 3: Pronóstico de reflectividad máxima de radar del WRF empleando condiciones iniciales y de borde del ERA5 para las 19:50 HOA del 19 de marzo del 2024.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha contado con el apoyo parcial del proyecto PREVENIR, ejecutado por la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional y la Agencia Japonesa de Ciencia y Tecnología en el marco del Programa de Asociación de Investigación Científica y Tecnológica para el Desarrollo Sostenible.

REFERENCIAS

- Cutraro, F. J., Ruiz, J. J., Dillon, M. E., Sacco, M., Amemiya, A., 2024, Operador de las observaciones para la asimilación de actividad eléctrica utilizando redes neuronales, Reunión sobre Sistemas de Alerta Temprana para Inundaciones Repentinas,
- Goodman, S. J., and Coauthors, 2013: The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM). Atmos. Res., 125–126, 34–49, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006>.
- Kong, R., M. Xue, A. O. Fierro, Y. Jung, C. Liu, E. R. Mansell, and D. R. MacGorman, 2020: Assimilation of GOES-R Geostationary Lightning Mapper Flash Extent Density Data in GSI EnKF for the Analysis and Short-Term Forecast of a Mesoscale Convective System. Mon. Wea. Rev., 148, 2111–2133, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0192.1>.
- Matsudo, C., Maldonado, P., Dillon, M. E., Casaretto, G., Sacco M., Cutraro, F., Righetti, S., Alvarez Imaz, M., García Skabar, Y., Ruiz, J., Osore, S., 2025: Evaluación del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: impacto de los análisis regionales en la inicialización del pronóstico por ensambles. Nota Técnica SMN 2025-193.

REGIONALIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DEL SISTEMA PARA EL MODELADO DEL MAR ARGENTINO: ANIDAMIENTO DINÁMICO

Federico N. Lillo^{1,2,3}, Matias G. Dinápoli^{1,2,3}, Claudia G. Simionato^{1,2,3}

federicolillo9@gmail.com

¹Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET–UBA

²Instituto Franco-Argentino Para el Estudio del Clima y Sus Impactos (IRL 3351 IFAECI)

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA

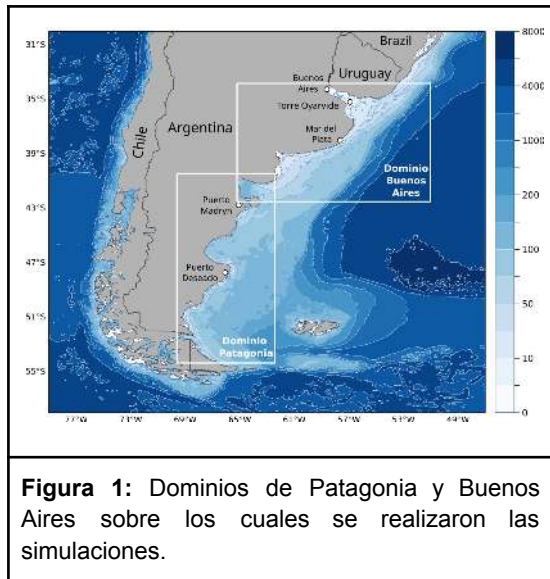
Palabras clave: Plataforma Continental Argentina, Modelado Numérico, Pronósticos

1) INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES

Debido a la extensión, la dinámica y la complejidad de los sistemas marinos la producción de esa información sólo puede resolverse mediante el uso extensivo de modelos físico-matemáticos (numéricos) combinados con observaciones (asimilación de datos), que son capaces de producir operativamente datos sobre las condiciones presentes, futuras y pasadas del estado del mar (Alvarez Fanjul, 2022). Si bien existen herramientas a escala global, tales como HYCOM (<https://hycom.org>) o MERCATOR (<http://www.mercator-ocean.fr>), la mayoría no proporcionan información apropiada para las plataformas continentales y regiones costeras y estuarios (Vousdoukas et al., 2018). Es por ello que hoy en día sigue siendo necesario desarrollar modelos regionales que, similarmente a lo que ocurre en meteorología, proporcionen información con la resolución espacial y temporal y la calidad necesarias para las aplicaciones locales y regionales.

En este contexto surgió el proyecto PIDT A5 “Pronosticando el Mar Argentino (PronoMAr)” financiado por la iniciativa interministerial “Pampa Azul” y que se ejecutó en el periodo 2023-2025. Su objetivo fue formar una red institucional de organizaciones de ciencia y técnica que desarrolle, implemente y de soporte a un sistema de pronóstico oceánico operativo en coproducción con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). En particular, PronoMAr se centró en el desarrollo e implementación de sistemas de pronóstico oceánicos operativos al estado del arte del nivel del mar y olas con el fin de promover la gestión y explotación sostenible de los recursos marinos en nuestro país.

Hasta el momento el proyecto cuenta con un sistema para modelado numérico, al estado del arte, para el nivel del mar y las olas denominado “Sistema para el Modelado del Mar Argentino” (SiMMAr) que fue transferido al SMN y es ejecutado de manera operativa-experimental. El modelo numérico del nivel del mar se basa en una regionalización (con una resolución promedio de 13 km) en la Plataforma Continental Argentina (PCA) del modelo de la comunidad científica Coastal and Regional Ocean COMMunity model (CROCO, <https://www.croco-ocean.org/>; Debreu et al., 2012) el cual, además, fue modificado para resolver el sistema de ecuaciones de aguas someras (Dinápoli y Simionato, 2025a, y referencias allí). Esta herramienta fue validada y utilizada para el estudio de los procesos físicos asociado a la componente barotrópica de la PCA y el estuario del Río de la Plata (Dinápoli y Simionato, 2025a, y referencias allí). Si bien este proyecto ha significado un gran avance en la temática del desarrollo de herramientas oceánicas operativas para la provisión de información confiable del estado de los océanos, aún es necesario generar productos que realicen un refinamiento dinámico con el fin de (i) mejorar la calidad de las soluciones

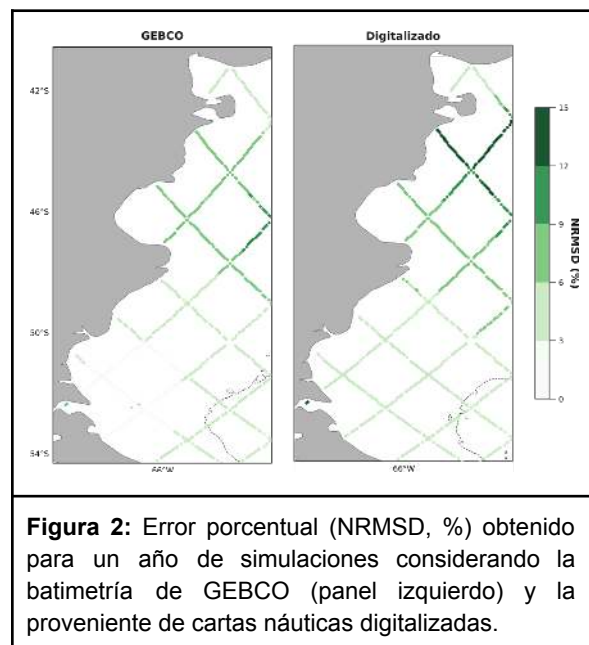


numéricas en ambientes costeros y (ii) abrir las puertas al estudio de la dinámica de procesos que ocurren en escalas regionales (por ejemplo, resonancia de cuencas). En base a esa premisa, este trabajo presenta un estudio de sensibilidad al anidamiento dinámico para la mejora de las soluciones SiMMAR sobre toda la PCA. Para ello, se propone la creación de dos dominios (con una resolución promedio de 4 km) que se focalizan en la región patagónica y la costa bonaerense (Figura 1). La elección de estas regiones se hizo en base a los resultados obtenidos por Dinápoli y Simionato (2025b), quienes demostraron que al sur la dinámica barotrópica es prácticamente marea, mientras que al norte es una combinación entre la marea y el efecto meteorológico.

2) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

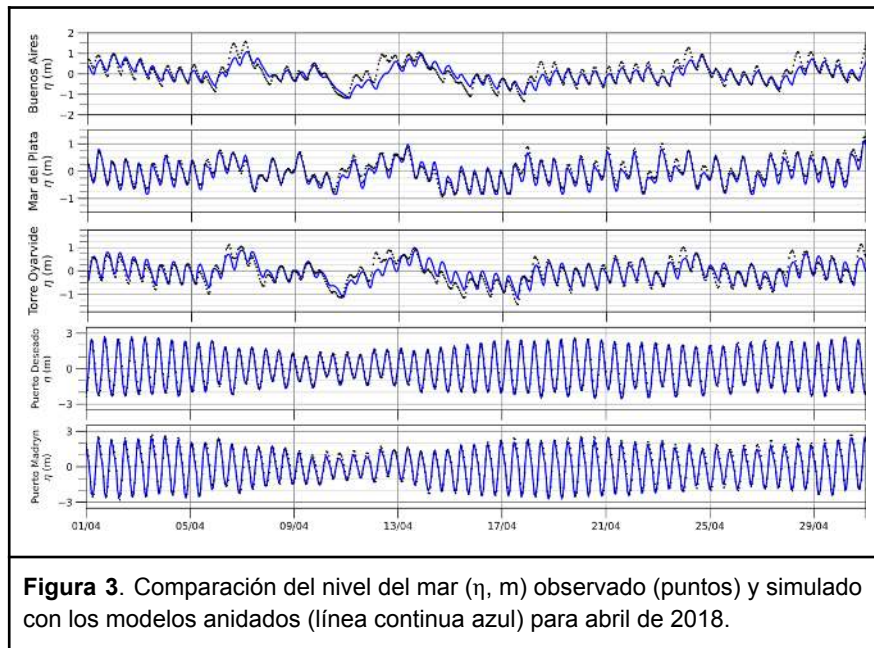
En primer lugar se estudió la sensibilidad ante la información batimétrica y los límites del dominio. Dado que estos son parámetros que determinan la dinámica de marea (la dinámica más robusta y de base) se procedió a analizar soluciones del dominio patagónico. En primer lugar se evaluó la sensibilidad ante la precisión del dato batimétrico en base a dos simulaciones, una con información batimetimétrica brindada por GEBCO (<https://www.gebco.net/>) y otra teniendo en cuenta una batimetría derivada a partir de datos de GEBCO para profundidades mayores a 200 metros y digitalización de cartas náuticas en plataforma. Además, se estudió la sensibilidad ante la posición del borde sur ya que es por donde entran las ondas atrapadas por la costa, cuya dinámica es compleja ya que ocurre un salto batimétrico y un angostamiento de la cuenca. El análisis, así, se basa en la intercomparación de estadísticos que permiten intercomparar objetivamente las cuatro simulaciones.

Se obtuvieron soluciones óptimas al considerar un límite inferior sobre la PCA. Esto se debe a que se evita el fuerte cambio batimétrico y no se pierde energía de marea por cuestiones numéricas. En cuanto a la sensibilidad al dato batimétrico, la Figura 2 muestra la comparación del error porcentual (NRMSE) entre las soluciones numéricas con la batimetría derivada de datos de la base GEBCO (izquierda) y lo de combinación de datos con cartas náuticas (derecha). Las soluciones fueron contrastadas contra series sintéticas de marea



derivadas de datos altimétricos (<https://www.legos.omp.eu/ctoh/ctoh-products/>). La Figura 2 muestra que el error porcentual es, en general, menor al incorporar los datos de GEBCO, por lo cual se concluyó que esta es la mejor opción a la hora de realizar simulaciones al menos en esta escala. Por consistencia, el dominio para la costa bonaerense fue construido con esta base de datos.

La Figura 3 muestra la comparación entre las simulaciones de los modelos anidados y observaciones directas del nivel del mar en distintas estaciones a lo largo de la PCA para abril de 2018. A partir de la comparación de un año de soluciones horarias se obtuvo un error cuadrático medio promedio de 0,30 m (aprox. un error de 5,4%) y una correlación lineal de 0.97 metros para Puerto Deseado y Puerto Madryn (dominio patagónico), mientras que para Mar del Plata, Buenos Aires y Torre Oyarvide el RMSE promedio fue 0,12 m (aprox. un error de 8,2%) y la correlación lineal fue 0,90. Si se lo compara con los valores reportados por Dinápoli y Simionato (2025a), se tiene una reducción del error en un 15%, lo que respalda esta aplicación de anidamiento dinámico.



4)REFERENCIAS

- Alvarez Fanjul, E., Ciliberti, S. y Bahurel, P. (eds), 2022: Implementing Operational Ocean Monitoring and Forecasting Systems. Paris, France, IOC-UNESCO, 376pp. & Annexes, (GOOS-275). DOI:<https://doi.org/10.48670/ETOOFS>.
- Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E. et al., 2018: Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. Nat Commun 9, 2360. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w>.
- Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P., y Cambon, G., 2012: Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. Ocean Modelling, 49–50, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.03.003>
- Dinapoli, M. G., y Simionato, C. G., 2025a: On the impact of Southeastern Pacific-generated storm surges on the Southwestern Atlantic Continental Shelf: Interoceanic connections through coastally trapped waves. Journal of Geophysical Research: Oceans, 130, e2024JC021685. <https://doi.org/10.1029/2024JC021685>
- Dinapoli, M. G., y Simionato, C. G., 2025b: On the magnitude and mechanisms of occurrence of nonlinear tide-surge interactions in the Southwestern Atlantic Continental Shelf. Estuarine, Coastal and Shelf Science, en prensa.

GENERACIÓN DE PRONÓSTICOS PROBABILÍSTICOS DE PRECIPITACIÓN USANDO REDES NEURONALES

Maximiliano A. Sacco¹, Juan J. Ruiz^{2,3,4}, Manuel A. Pulido^{4,5}, Paola V. Salio^{2,3,4}

msacco@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

² Dep. de Cs. de la atmósfera y los océanos - FCEyN - UBA

³ Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (UBA-CONICET)

⁴ Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL
IFAEI/CNRS-IRD-CONICET-UBA)

⁵ Departamento de Física - FACENA-UNNE

Palabras clave: redes neuronales, incertidumbre, pronósticos probabilísticos, precipitación.

1) INTRODUCCIÓN

El pronóstico cuantitativo probabilístico de la precipitación sigue siendo un desafío crítico en meteorología debido a la naturaleza no gaussiana de las distribuciones de precipitación. Aunque técnicas como el promediado bayesiano de modelos (Bayesian Model Averaging, BMA) se han aplicado con éxito a los pronósticos por ensamble para variables meteorológicas como la temperatura [Raftery et al. 2005], su extensión a la precipitación requiere un tratamiento especial, como muestra [Sloughter et al. 2007]. Su enfoque combina la regresión logística para la probabilidad de precipitación con distribuciones gamma produciendo distribuciones de precipitación calibradas.

Este trabajo propone un enfoque innovador donde redes neuronales artificiales (RNA) son entrenadas con una función de costo basada en la verosimilitud negativa de la distribución gamma para generar pronósticos probabilísticos de precipitación a partir de campos simulados de reflectividad de radar.

2) METODOLOGÍA

La motivación surge de la necesidad de capturar la naturaleza altamente no lineal de la precipitación y proporcionar una estimación de la incertidumbre asumiendo una distribución gamma y estimando sus parámetros α (shape) y β (rate).

2.1) Datos y conjunto de entrenamiento

Se utilizan datos de reflectividad simulada con el ensamble de modelo WRF 4.0 operativo del Servicio Meteorológico Nacional. El conjunto de datos está formado por casos históricos de pronósticos horarios a 24hs inicializados 4 veces al día entre enero del 2020 y octubre del 2024 que tuvieran más de 10 píxeles con reflectividad mayor a 30 dbz en el dominio [longitud=-55 ~ -68 y latitud=-25 ~ -37].

De esta selección se obtuvieron 25424 campos de reflectividad por miembro representados por imágenes de 332 x 346 puntos y se reservó el 70% para el conjunto de entrenamiento, 20% para validación y 10% para el conjunto de verificación.

2.2) Arquitectura del modelo

Se implementa una red tal que en su entrada reciba un campo de reflectividad X_{radar} y su salida tenga 3 canales asociados a cada pixel de entrada: el primero (p) para la clasificación binaria del pixel en lluvia/no lluvia, y dos canales para estimar los parámetros α y β de la distribución gamma asociada a la probabilidad de precipitación. Así, una predicción de la red está dada por:

$$p, \alpha, \beta = f_{\text{RNA}}(X_{\text{radar}}).$$

En los experimentos preliminares, la arquitectura de red utilizada fue una red de 3 capas convolucionales de 32, 64 y 64 canales respectivamente, pero se están realizando experimentos para encontrar la arquitectura más adecuada para el problema.

2.3) Función de costo

En [Sacco et al 2022] se utilizó una función de costo basada en la distribución normal para estimar los parámetros de la distribución del error de pronóstico. Siguiendo la misma línea de trabajo, utilizamos la verosimilitud negativa de la distribución gamma para estimar los parámetros α y β con el agregado adicional del término correspondiente a la probabilidad de lluvia (p):

$$\mathcal{L}(Y|p, \alpha, \beta) = BCE(p, Y) + I_{Y \neq 0} [(1 - \alpha) \log Y + Y\beta - \alpha \log \beta + \log \Gamma(\alpha)]$$

donde **BCE** es la función de costo *Binary Cross Entropy*, Γ es la función gamma y $I_{Y \neq 0}$ es la función indicador que vale 1 si $Y \neq 0$ y 0 si $Y = 0$.

3) ENFOQUE EXPERIMENTAL

Con el objetivo de evaluar la capacidad de las redes neuronales para aprovechar información espacial en la estimación probabilística de precipitación, diseñamos dos experimentos complementarios. En primer lugar, entrenamos una red neuronal convolucional (*espacial*) que procesa campos bidimensionales de reflectividad para estimar directamente los parámetros α y β de la distribución gamma que modela la probabilidad de precipitación. Como contrapunto, desarrollamos una segunda arquitectura que opera únicamente sobre valores escalares de reflectividad (*escalar*), manteniendo la misma salida paramétrica. Esta comparación nos permite discernir hasta qué punto el contexto espacial aporta información significativa para la caracterización probabilística de la precipitación.

Para contextualizar el desempeño de ambos modelos, establecemos dos líneas base de referencia: 1) la estimación de incerteza obtenida mediante un ensamble de modelos numéricos, y 2) la probabilidad condicional climatológica derivada de relaciones históricas entre reflectividad y tasa de precipitación (dBZ-R). Esta estructura experimental no sólo valida la utilidad de los enfoques basados en redes neuronales, sino que particularmente cuantifica el valor añadido de incorporar información espacial frente a aproximaciones tradicionales basadas en observaciones puntuales.

4) RESULTADOS PRELIMINARES

La fig. 1 muestra los resultados de los primeros experimentos donde se puede ver en la figura central superior, el histograma en gris correspondiente a los valores históricos de precipitación asociados, en este caso, al valor de reflectividad 33.27 correspondiente a la posición indicada por la cruz roja en el gráfico de reflectividad ubicado arriba a la izquierda. La curva azul corresponde a la distribución de probabilidad de precipitación correspondiente a los parámetros inferidos por la red *escalar* que vincula un único valor escalar de reflectividad con la precipitación. Es notable cómo esta distribución distribuye las probabilidades prácticamente igual al histograma climatológico. Este resultado es el esperable ya que el histograma y la red *escalar* vinculan los mismos datos de entrada con los de salida. La curva roja corresponde a la red *espacial* y a diferencia de la curva azul, asigna más masa a los valores altos de precipitación generando una cola de distribución más pesada. Esta diferencia en el comportamiento de ambas redes podría atribuirse al análisis de la vecindad del punto sugiriendo que grandes áreas de precipitación tienen más probabilidad de precipitar valores mayores.

Los gráficos de la parte inferior de la fig. 1 muestran, de izquierda a derecha, los campos de

probabilidad de superar un umbral de $2 \text{ (mm/h)} \frac{1}{3}$ de precipitación de la red *espacial* (derecha), la red *escalar* (centro) y la probabilidad producida por un ensamble de modelos numéricos de 20 miembros *ens* (derecha). En estos puede verse que la distribución espacial de probabilidad tanto en la red *espacial* como en el ensamble tienen bordes difusos indicando una incertidumbre espacial asociada, mientras que la red *escalar* presenta bordes bien marcados de áreas de precipitación y no precipitación lo que en principio no parece muy realista. Otra clara diferencia entre la red *espacial* y *escalar* es que la primera asocia valores más altos de probabilidad, similares a los pronosticados por el ensamble. Esto está en correlación con la cola más pesada de la distribución estimada en el gráfico superior central.

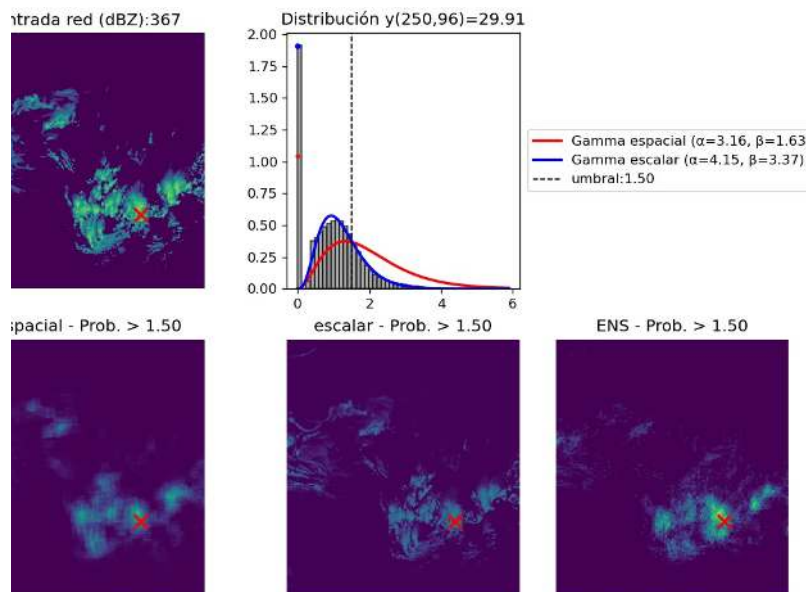


Figura 1: El gráfico superior izquierdo muestra el campo de reflectividad usado como entrada para la red. El gráfico superior central muestra en gris el histograma correspondiente a los valores de precipitación asociados a un valor de reflectividad (33.27dBZ) indicado por la cruz roja. Las líneas roja y azul representan respectivamente la distribución de probabilidad generado con los parámetros estimados por la red *espacial* y *escalar*. Los gráficos inferiores muestran los campos de probabilidad de superar un umbral reconstruidos a partir de la red *espacial* (izquierda), la red *escalar* (central) y un ensamble de modelos numéricos (derecha)

4) CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que las redes son capaces de aprender los parámetros de la distribución de probabilidad de la precipitación comparado con los resultados obtenidos de un análisis climatológico y un ensamble de modelos numéricos. Por otro lado, la red *espacial* es capaz de integrar información del contexto y corregir la distribución asociada al punto geográfico en función de lo que ocurre en la vecindad del mismo. Estos resultados son muy alentadores pero necesitan ser corroborados con métricas estadísticas que permitan analizar el comportamiento general de estos pronósticos en distintas situaciones, como por ejemplo los diagramas de confiabilidad y CRPS entre otros.

AGRADECIMIENTOS:

Al Servicio Meteorológico Nacional, por proporcionar los datos y financiar la participación al congreso.

Al proyecto de colaboración Suizo-Argentina **SPIRIT** por el financiamiento de la investigación que dio lugar a este trabajo.

REFERENCIAS

A. E. Raftery, T. Gneiting, F. Balabdaoui, and M. Polakowski. Using bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles., 2005.

Maximiliano A. Sacco, Juan J. Ruiz, Manuel Pulido, and Pierre Tandeo. Evaluation of machine learning techniques for forecast uncertainty quantification. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 148(749):3470–3490, 2022.

J. Mc Lean Slughter, Adrian E. Raftery, Tilmann Gneiting, and Chris Fraley. Probabilistic quantitative precipitation forecasting using bayesian model averaging. Monthly Weather Review, 135(9):3209 – 3220, 2007.

¿COMO FUNCIONA EL SISTEMA DE ASIMILACION DE DATOS Y PRONÓSTICO NUMERICO DEL SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL?: ESTADO ACTUAL Y RETOS FUTUROS

Paula Maldonado¹, Federico Cutraro¹, María Eugenia Dillon^{1,2}, Yanina García Skabar¹, Cynthia Matsudo¹, Maximiliano Sacco¹, Milagros Alvarez Imaz¹, Silvina Righetti^{1,3}, Soledad Osore¹

pmaldonado@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

Palabras clave: Asimilación, Pronóstico, SAP.SMN

1) INTRODUCCIÓN

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) tiene como parte clave de su misión brindar información y pronósticos meteorológicos con el objeto de proteger a la población. En este sentido, desde 2016, el SMN proporciona pronósticos numéricos determinísticos regionales en alta resolución utilizando el modelo numérico WRF (Skabar y otros, 2018). Gracias a la adquisición de un sistema de cómputo de alto rendimiento (HPC) en 2018, el SMN incorporó la generación de pronósticos numéricos probabilísticos o por ensambles que permiten cuantificar la incertidumbre asociada a la dinámica de la atmósfera (Dillon y otros, 2020). Desde diciembre de 2024, el Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del SMN (SAP.SMN) incorporó a sus procesos operativos un sistema regional de asimilación de datos basado en ensambles que permite mejorar las condiciones iniciales a partir de las cuales se generan los pronósticos numéricos. De esta forma, el SAP.SMN ha evolucionado rápidamente en la última década proporcionando una mejora considerable en la precisión de los pronósticos ofrecidos (Matsudo y otros, 2025). En este trabajo se presenta el estado actual del SAP.SMN, focalizando en los avances realizados desde comienzos de 2024, haciendo hincapié en los recursos computacionales necesarios para llevar adelante un sistema de estas características, analizando el impacto de las mejoras realizadas para un caso de estudio ocurrido en marzo de 2025 en Bahía Blanca, y planteando los retos y desafíos futuros en busca de la mejora continua del SAP.SMN.

2) ESTADO ACTUAL DEL SAP.SMN

El SAP.SMN cuenta con 3 componentes principales: i) la componente de asimilación de datos SAP.SMN-ANA; ii) la componente probabilística SAP.SMN-ENS y iii) la componente determinística SAP.SMN-DET, las cuales se ejecutan en el HPC del SMN.

La componente SAP.SMN-ANA fue desarrollada con el fin de agregar valor a los pronósticos regionales operativos mediante la inclusión de información de diferentes fuentes observacionales. El SAP.SMN-ANA acopla el modelo WRF con el método de asimilación de datos basado en ensambles *Local Ensemble Transform Kalman Filter*, el cual ha sido evaluado en múltiples contextos en nuestra región (Dillon y otros, 2021; Maldonado, 2023). De este sistema se obtienen 40 análisis horarios con 4 km de resolución horizontal y 45 niveles verticales, considerando un esquema de ciclos parciales en el que todos los días a las 12 UTC se parte de una condición inicial provista por el modelo global GEFS, del cual se obtienen además las condiciones de borde. Entre las observaciones asimiladas se encuentran datos de estaciones meteorológicas convencionales (ADPSFC, SFCSHF) y automáticas (ADPAUT,

AWOS), radiosondeos (ADPUPA), aviones (AIRCFT), estimaciones satelitales de viento (ASCATW, GEODMW), perfiles verticales de temperatura y humedad estimados por satélites polares (AIRSRT, NUCAPS) y geoestacionarios (GEOSND) y reflectividad de radar (RADARC). A modo de ejemplo, la Figura 1 muestra la distribución espacial de estas observaciones en un ciclo de asimilación.

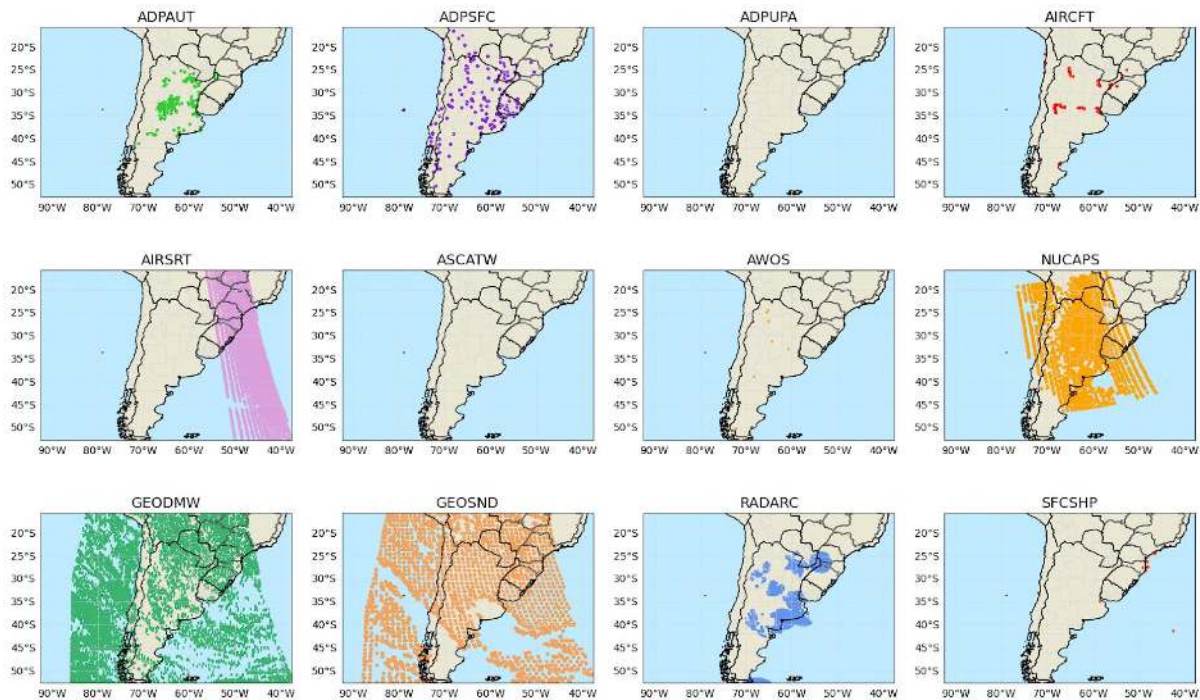


Figura 1: Distribución espacial de las observaciones asimiladas en un ciclo de asimilación (18Z del 06/03/2025).

Las componentes SAP.SMN-ENS y SAP.SMN-DET generan 4 pronósticos diarios, a 48 h y 72 h, respectivamente. Actualmente, el SAP.SMN-ENS emplea como condición inicial 20 análisis regionales del SAP.SMN-ANA, mientras que el SAP.SMN-DET emplea como condición inicial el análisis global del modelo GFS de 0.25° de resolución. Uno de los desafíos continuos que presenta el SAP.SMN (en todas sus componentes) está relacionado con la generación de productos derivados que resulten innovadores y agreguen valor a la ejecución del pronóstico, destacándose el desarrollo del pronóstico del nivel de alerta del Sistema de Alerta Temprana (SAT) del SMN, de pronósticos aeronáuticos TAF y de sistemas convectivos caracterizados por ascendentes rotantes.

A modo de ejemplo del desempeño del SAP.SMN, la Figura 2 muestra la probabilidad de precipitación acumulada en 12 h pronosticada por el SAP.SMN-ENS inicializado a las 00 UTC del 7 de marzo de 2025. Durante la madrugada y la mañana de ese día, la ciudad de Bahía Blanca y sus alrededores se vio afectada por eventos convectivos de gran magnitud con intensas precipitaciones. El SAP.SMN-ENS fue capaz de pronosticar correctamente la ubicación del sistema convectivo, no así su intensidad si se compara con el registro de 290 mm en 12 h medido en la estación meteorológica local.

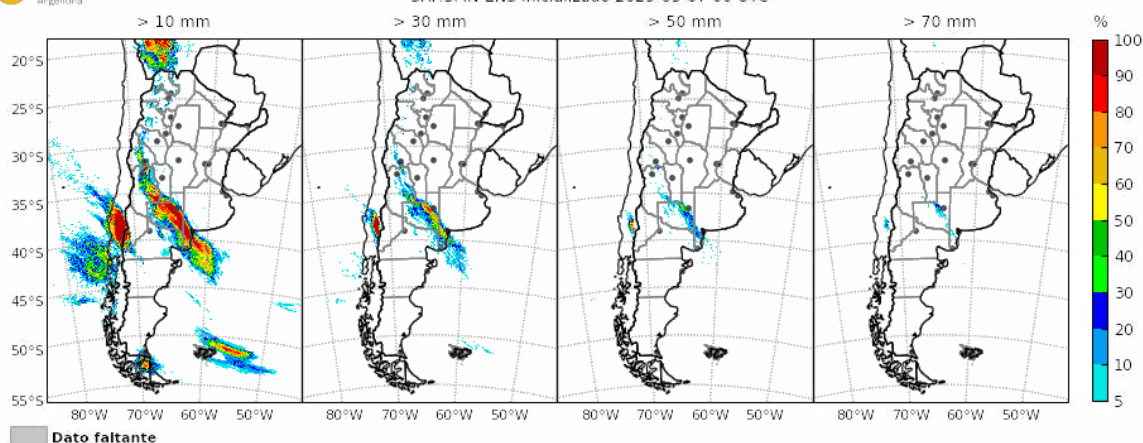


Figura 2: Probabilidad de precipitaciones acumulada en 12 h superior a 10 mm, 30 mm, 50 mm, y 70 mm (paneles de izquierda a derecha, respectivamente) pronosticada por el SAP.SMN-ENS inicializado a las 00 UTC del 7 de marzo de 2025.

3) RETOS FUTUROS DEL SAP.SMN

En vistas de continuar el proceso de mejora continua en lo que respecta a la precisión de los pronósticos numéricos brindados por el SMN, existen múltiples retos a futuro. Actualmente se está trabajando en completar la actualización del SAP.SMN, de forma de emplear los análisis regionales como condición inicial en la componente SAP.SMN-DET. Asimismo, se siguen evaluando mejoras en los análisis generados considerando la inclusión de nuevas observaciones (e.g., velocidad Doppler estimada por radar), mejoras en los procesos de control de calidad de estas y analizando la sensibilidad a los parámetros de *superobbing* y *thinning* para maximizar el beneficio en el uso de las observaciones con mayor densidad espacial como son las observaciones satelitales. A más largo plazo y proyectando una posible adquisición de nuevos recursos computacionales, la implementación de la técnica EFSOI para evaluar el impacto de las observaciones asimiladas en los pronósticos, facilitaría la evaluación de los cambios implementados. Por último, la sinergia con los desarrollos realizados en el marco del proyecto PREVENIR (prevenir.smn.gob.ar) resultan fundamentales para la mejora del SAP.SMN en conjunto.

REFERENCIAS

- Dillon, M.E., C. Matsudo, Y. García Skabar, M. Sacco y M. Alvarez Imaz, 2020:** Implementación del sistema de pronóstico numérico en el HPC: Configuración del ensamble. Nota Técnica SMN 2020-79.
- Dillon, M. E., P. Maldonado; P. Corrales; Y. García Skabar; J. J. Ruiz, M. Sacco, F. Cutraro, L. Mingari, C. Matsudo, L. Vidal, M. Rugna, M. P. Hobouchian, P. Salio, S. Nesbitt, A.C. Saulo, E. Kalnay, T. Miyoshi, 2021:** A rapid refresh ensemble based data assimilation and forecast system for the RELAMPAGO field campaign. Atmospheric Research. vol.264 n°. p1 - 19.
- García Skabar Y., C. Matsudo, M. Sacco, J. Ruiz, S. Righetti, 2018:** Implementación modelo de pronóstico numérico WRF. Nota Técnica SMN 2018-45.
- Maldonado, P., 2023:** Implementación y evaluación de un sistema de asimilación de datos de radar meteorológico en escala convectiva para el desarrollo de un sistema de pronóstico por ensambles a muy corto plazo. Tesis de doctorado, DCAO, FCEyN, UBA.
- Matsudo, C., P. Maldonado, M. E. Dillon, G. Casaretto, M. Sacco, F. Cutraro, S. Righetti, M. Alvarez Imaz, Y. García Skabar, J. Ruiz, S. Osore, 2025:** Evaluación del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: impacto de los análisis regionales en la inicialización del pronóstico por ensambles. Nota Técnica SMN 2025-193.

PREDICTIBILIDAD Y DESEMPEÑO DE PRONÓSTICOS ESTACIONALES DE VIENTO EN ARGENTINA

Carla Viazzo¹, Emilio Bianchi², Marisol Osman^{1,3,4}
cviazzo@at.fcen.uba.ar. Autora correspondiente.

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO)

²Universidad Nacional de Río Negro (UNRN)

³Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)

⁴Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IFAECI)

Palabras clave: pronóstico estacional, modelos climáticos globales, pronósticos determinísticos, probabilidad

1) INTRODUCCIÓN

Durante la última década, la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables se ha incrementado sostenidamente en Argentina. Entre ellas, la energía eólica es la segunda con mayor potencia instalada en el país. Esta transición energética responde tanto a compromisos ambientales como a oportunidades económicas, especialmente considerando el gran potencial eólico en regiones como la Patagonia y la Pampa (Schaube et al., 2018). Sin embargo, la intermitencia del viento en distintas escalas temporales plantea desafíos para su integración en la matriz energética, aumentando la demanda de pronósticos precisos (Guozden et al., 2020). Hasta el momento, los estudios en Argentina se han enfocado en la variabilidad de alta frecuencia (escalas micro-meteorológica y sinóptica; e.g., Waimann, 2016), sin evaluaciones realizadas para pronósticos de viento a escala estacional.

Este trabajo presenta la primera evaluación y comparación de la predictibilidad y desempeño de pronósticos estacionales de intensidad de viento en Argentina. El estudio se realiza para el trimestre de verano (Diciembre-Enero-Febrero, DEF) comparando dos sistemas de pronóstico estacionales. Se hace especial énfasis en regiones con alta densidad de parques eólicos con el objetivo de explorar el potencial de estos pronósticos en el sector energético.

2) DATOS y METODOLOGÍA

Se evalúan los ensambles de pronósticos estacionales de intensidad viento a 10 m de altura provenientes del European Center for Medium-Range Weather Forecasts, system 5 (ECMWFs5) y el Climate Forecast System, version 2 (CFSv2), emitidos con un mes de anticipación al trimestre de validez. La variable considerada es el promedio trimestral de DEF y se estudia el periodo 1994-2017.

Para verificar los pronósticos se usan datos de intensidad de viento provenientes del Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2).

La predictibilidad se evalúa mediante la correlación modelo perfecto, calculada como el coeficiente de correlación de anomalías (ACC) entre cada miembro del ensamble y el promedio de los restantes, promediando luego todas las correlaciones. La significancia estadística de esta métrica se testea mediante un test t-student a cola derecha con un nivel de confianza del 95%.

El desempeño determinístico se analiza a partir de la media del ensamble, utilizando tres métricas: el error medio (bias), la raíz del error cuadrático medio normalizada (NRMSE) y el ACC, los dos últimos calculados usando validación cruzada con una ventana de un año:

$$BIAS = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (x_t - y_t) \quad (1)$$

$$NRMSE = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x} - y_t + \bar{y})^2}}{\sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

$$ACC = \frac{\sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x}_t) \cdot (y_t - \bar{y}_t)}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y}_t)^2 \sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x}_t)^2}} \quad (3)$$

donde T es el total de años pronosticados, x_t es el valor pronosticado en el año t (la media del ensamble del año t), y_t es el valor de referencia, $\bar{x}_t$ e $\bar{y}_t$ representan los promedios temporales para la media del ensamble y el reanálisis, respectivamente, calculadas excluyendo el año t. El ACC es testeado con un test t-student a cola derecha con un nivel de confianza del 95%.

Además, se estudia el desempeño probabilístico en tres regiones con alta densidad de parques eólicos: el sudeste de la provincia de Buenos Aires (región 1); el noreste de la provincia de Chubut (región 2); y la costa del golfo San Jorge, entre las provincias de Chubut y Santa Cruz (región 3).

Los terciles y la mediana se estiman aplicando validación cruzada con una ventana de 3 años, definiendo las siguientes categorías de pronóstico: (i) tres categorías (inferior, normal, superior); y (ii) dos categorías (inferior y superior a la mediana). Las probabilidades se estiman como la fracción de miembros de ensamble contenidas en cada categoría.

Para evaluar el desempeño probabilístico, se utilizan curvas ROC, que permiten caracterizar la capacidad de discriminación entre aciertos (HR) y falsas alarmas (FAR), y diagramas de confiabilidad, que muestran la correspondencia entre la frecuencia observada y la probabilidad pronosticada.

4) RESULTADOS

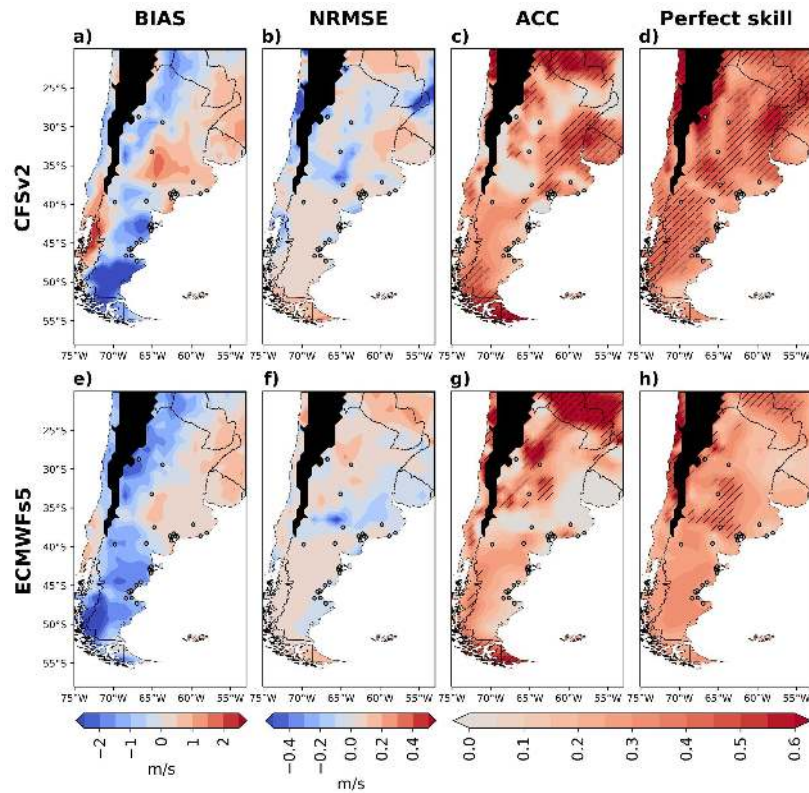


Figura 1: BIAS (a, e), NRMSE (b, f), ACC (c, g) y correlación modelo perfecto (d, h) para CFSv2 (primer fila: a, b, c, d) y ECMWFs5 (segunda fila: e, f, g, h). Áreas con ACC y correlaciones modelo perfecto significativas se indican con rayas (test t-student a cola derecha con una confianza del 95%).

La Figura 1 muestra los resultados del desempeño determinístico y la predictibilidad. En el este del país y la Patagonia ambos modelos presentan sesgos negativos de hasta -2 m/s (Fig. 1a,e), mientras que en el oeste los sesgos son positivos. El NRMSE (Figura 1b,f) indica que el error cuadrático es, en general, menor que la varianza de referencia, lo que sugiere que los modelos aportan valor respecto a la climatología.

El desempeño determinístico según el ACC es mayor en CFSv2 (Figura 1c), con correlaciones significativas en Mesopotamia, sur de Patagonia y gran parte de Buenos Aires. ECMWFs5 (Figura 1g)

presenta valores más moderados y menos puntos de retícula con valores significativos.

La predictibilidad estimada mediante la correlación modelo perfecto (Figura 1d,h) es mayor en CFSv2, con valores significativos en la mayor parte del país, mientras que ECMWFs5 muestra predictibilidad más moderada, con escasos puntos con valores significativos.

Los resultados del análisis del desempeño probabilístico en las tres regiones consideradas indican, en general, un desempeño moderado para ambos modelos durante DJF. En el caso de las tres categorías basadas en terciles, se observa una baja capacidad de discriminación entre aciertos y falsas alarmas, así como discrepancias entre las probabilidades pronosticadas y las frecuencias relativas observadas. Ambos modelos muestran un mejor desempeño en la región 3 al simplificar las categorías a eventos de viento por encima y por debajo de la mediana. En la región 2, CFSv2 presenta un mejor desempeño en el pronóstico de eventos definidos usando los terciles.

5) CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo evidencian que la predictibilidad y el desempeño de los pronósticos estacionales de viento en superficie en Argentina durante el verano son moderados. En particular, la predictibilidad y el desempeño son mayores para CFSv2. Aun así, los valores obtenidos son en general menores a los reportados en otras regiones como Europa, Norteamérica (e.g., Torralba et al., 2017) o China (e.g., Lockwood et al., 2019).

Además, la predictibilidad y el desempeño documentados para el viento en Argentina resultan menores a los observados para otras variables de superficie como la precipitación y la temperatura (e.g., Andrian et al., 2022). Por otra parte, el análisis de pronósticos probabilísticos en regiones con alta densidad de parques eólicos muestra que, si bien estos añaden valor al considerar la incertidumbre representada por el conjunto de miembros del ensamble, el desempeño sigue siendo en general moderado. Se observan mejoras al considerar eventos por encima y por debajo de la mediana, los cuales muestran mejor desempeño en comparación con categorías equiprobables basadas en terciles.

REFERENCIAS

Andrian, L., Osman, M. y Vera, C., 2022: Climate predictability on seasonal timescales over South America from the NMME models. *Climate Dynamics*, 60, 1–16. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-022-06506-8>.

Guozden, T., Carbajal, J.P., Bianchi, E. y Solarte, A., 2020: Optimized balance between electricity load and wind-solar energy production. *Frontiers in Energy Research*, 8. doi:<https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00016>.

Lockwood, J., Thornton, H., Dunstone, N., Scaife, A., Bett, P., Li, C. y Ren, H., 2019: Skilful seasonal prediction of winter wind speeds in China. *Climate Dynamics*, 53, 3937–3955. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-019-04763-8>.

Schaube, P., Ortiz, W. y Recalde, M., 2018: Status and future dynamics of decentralised renewable energy niche building processes in Argentina. *Energy Research & Social Science*, 35, 57–67. doi:<https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.037>.

Torralba, V., Doblas, F., Macleod, D., Christel Jiménez, I. y Davis, M., 2017: Seasonal climate prediction: A new source of information for the management of wind energy resources. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56, 5, 1231–1247. doi:<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0204.1>.

Waimann, C., 2016: Desarrollo de un sistema de pronóstico estocástico-dinámico de producción de energía eólica basado en el modelo WRF/CIMA. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

SISTEMA DE NOWCASTING CON ASIMILACIÓN DE DATOS DE RADAR METEOROLÓGICO COMO FORZANTE DE UN MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA EN EL MARCO DEL PROYECTO PREVENIR

Aldana Arruti¹, Shigenori Otsuka², Marina Lagos³, Martin Rugna¹, Luciano Vidal¹, Juan José Ruiz^{4,5,6}, Yanina García Skabar¹, Sebastián Lopez⁷

aarruti@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²iTHEMS - RIKEN Center for Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences

³Instituto Nacional del Agua (INA)

⁴Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-UBA)

⁵Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO-FCEyN-UBA)

⁶CNRS-IRD-CONICET-UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos

⁷Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT-CONICET-UNC)

Palabras clave: Pronóstico a muy corto plazo, precipitación, radar.

1) INTRODUCCIÓN

El proyecto PREVENIR es un proyecto de cooperación internacional de 5 años de duración entre Argentina y Japón en el marco del programa de la Asociación de Investigación en Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Sostenible (SATREPS). El objetivo principal de PREVENIR es desarrollar un sistema de alerta temprana de inundaciones urbanas repentinas diseñado para dos cuencas urbanas altamente vulnerables: una ubicada en la provincia de Buenos Aires y la otra en la provincia de Córdoba. Uno de los objetivos del WP2 consiste en desarrollar e implementar de manera operativa un sistema de pronóstico a muy corto plazo (*nowcasting*) de la precipitación estimada con radar que sirva como forzante de un modelo hidrológico. El objetivo de este trabajo es mostrar los avances sobre este sistema para un caso de estudio en la cuenca Sarandi-Santo Domingo (SSD) ubicada en la zona sur de la Región Metropolitana de Buenos Aires.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El evento hidrometeorológico comenzó en las últimas horas del 19 de marzo de 2024 y se extendió por más de 2 días, provocando desbordes de arroyos y anegamientos. Los datos del radar RMA2-Ezeiza fueron sometidos a un control de calidad para luego estimar la precipitación (RQPE). La misma fue calculada utilizando la metodología descrita en Cancelada et al. (2024) donde se realiza primero un control de calidad sencillo sobre el diferencial de fase, se calcula el diferencial de fase específico (KDP) y finalmente se estima la tasa instantánea de precipitación con la relación R-KDP propuesta en Kitahara et al. (2023). Finalmente, se interpolan múltiples campos de RQPE con un minuto de resolución temporal para acumularlos en ventanas fijas de 10 minutos.

Posteriormente, se emplea un sistema de nowcasting aplicado al campo RQPE, basado en un sistema advectivo que emplea la asimilación de datos para poder utilizar información de campos de movimiento previos del sistema de precipitación (Otsuka et al., 2016). La extrapolación del campo de precipitación se basa en la estimación de los vectores de movimiento (VM) que caracterizan la dinámica del sistema precipitante a través en la técnica TREC (Tracking Radar Echoes by Correlation; Rinehart and Garvey, 1978). La asimilación de datos, basada en la asimilación del campo de movimiento mediante Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF), se utiliza para mejorar los VM estimados mediante TREC. La asimilación de datos es robusta frente a VM ruidosos porque combina de manera óptima la información previa y los movimientos "observados", teniendo en cuenta las estadísticas de error. La advección del campo de precipitación se realiza a través un esquema advectivo de quinto orden WENO (weighted essentially non-oscillatory) y la advección del campo de movimiento se lleva a cabo mediante un esquema de primer orden corriente arriba para advectar

el campo de movimiento, al cual se le impone además una condición de no divergencia con el fin de garantizar la estabilidad de los VM (Otsuka et al., 2016).

Por último, estos pronósticos son utilizados como forzante del modelo hidrológico-hidráulico desarrollado con el software Storm Water Management Model (SWMM). Este es un modelo semidistribuido de alta resolución preexistente, desarrollado por el INA, y ampliamente empleado para la simulación de sistemas de drenaje urbano. El modelo sigue un enfoque 1D/1D para representar el sistema dual de drenaje, que incluye el escurrimiento superficial (calles, canales y arroyos) y el subsuperficial (conductos pluviales). Fue calibrado y validado previamente con observaciones de niveles hidrométricos en dos secciones de los principales cursos de agua de la cuenca. (Re, 2022).

3) RESULTADOS

A modo de ejemplo, la Figura 1 muestra el campo de precipitación de un miembro del ensamble correspondiente a los 90 minutos de pronóstico (22UTC), donde se puede observar abundante precipitación sobre el área de la cuenca que impacta en el incremento del nivel de agua en los 3 puntos de observación de los sensores hidrométricos (Fig. 2).

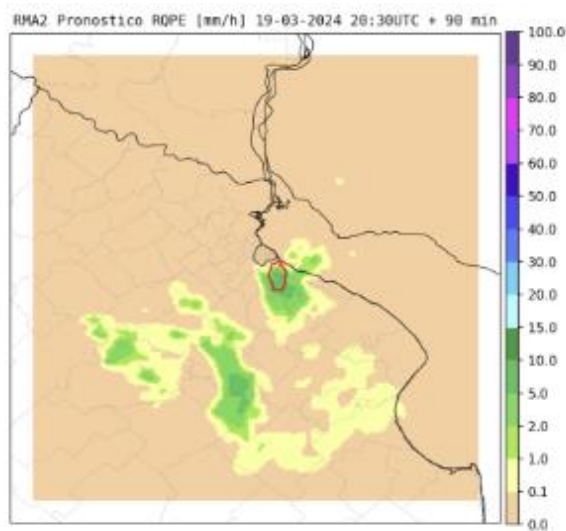


Figura 1: Campo de precipitación pronosticado para los 90 minutos de pronóstico, para la inicialización de las 20:30 UTC del 19 de marzo de 2024. En rojo se delimita el área de la cuenca SSD.

En la Figura 2 se observan los niveles hidrométricos pronosticados, asociados al nowcasting inicializado a las 20:30 UTC del día 19 de marzo de 2024, en las tres secciones correspondientes a la ubicación de los sensores activos durante el evento en estudio. Los niveles simulados, tanto para la condición antecedente utilizando campos de RQPE, como para los plazos pronosticados, se representan con línea punteada. Por su parte, los niveles registrados por los sensores se indican con línea continua. Se observa una buena concordancia entre los niveles observados y los simulados a partir de la RQPE, lo que permite establecer condiciones iniciales adecuadas para el pronóstico a 2 horas. En cuanto a los niveles pronosticados, se logró anticipar correctamente los ascensos pronunciados de nivel, aunque con desfases temporales respecto de las observaciones.

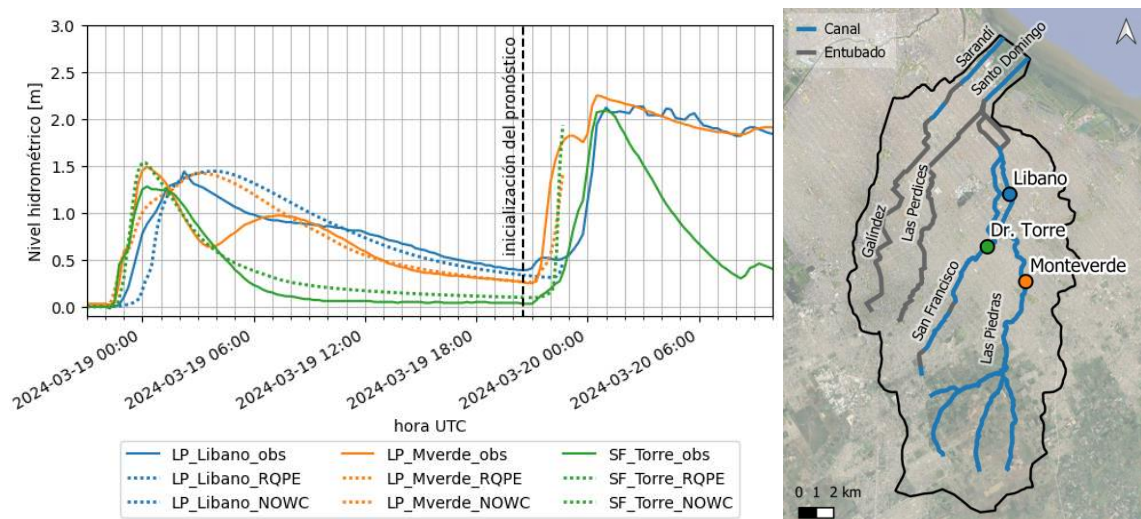


Figura 2: Comparación de niveles registrados por sensores hidrométricos, y niveles simulados a partir de la RQPE (antes de la inicialización del pronóstico [línea punteada vertical]) y del nowcasting (izq.). Ubicación de los sensores correspondientes (der.).

4) CONCLUSIONES

El estudio presentado en el marco del proyecto PREVENIR demostró la efectividad de un sistema de nowcasting con asimilación de datos de radar meteorológico para mejorar los pronósticos de precipitación y su aplicación en modelos hidrológicos e hidráulicos. En conclusión, este trabajo representa un avance significativo en la integración de tecnologías de radar, nowcasting y modelado hidrológico-hidráulico para la prevención de inundaciones urbanas. Los resultados alentadores refuerzan la importancia de continuar desarrollando y optimizando estos sistemas en el marco de proyectos colaborativos como PREVENIR, con el fin de mitigar los impactos de eventos extremos en áreas vulnerables.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha realizado en el marco del Proyecto PREVENIR (prevenir.smn.gob.ar).

REFERENCIAS

Cancelada, M., and Coauthors, 2024: Development of an operational system for quantitative precipitation estimation from C-band polarimetric radars in the framework of the PREVENIR project in Argentina. 12th European Conference on Radar in meteorology and hydrology (ERAD 2024).

Kitahara, D., and Coauthors, 2023: KDP Estimation Based on Spline Smoothing with the Self-Consistency Principle. 40th AMS Conference on Radar Meteorology.

Otsuka, S., Kotsuki, S. y Miyoshi T., 2016: Nowcasting with data assimilation: A case of global satellite mapping of precipitation. *Weather and Forecasting*, 31(5),1409-1416.

Re, M., and Coauthors, 2022: Assessment of crowdsourced social media data and numerical modelling as complementary tools for urban flood mitigation, *Hydrological Sciences Journal*, DOI: 10.1080/02626667.2022.2075266.

Rinehart, R., and E. Garvey, 1978: Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, 273, 287–289.ana1234.

ANÁLISIS DE IMPACTOS ASOCIADOS A EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS

Valentina Rabanal¹, S. Carina Bolzi¹, Carolina Cerrudo¹, Daniela D'Amen¹, Diana Domínguez¹, Viviana López¹, Paola Paschetta¹, Mercedes Poggi¹, Paula Romero¹, Priscila Sosa¹

vrabanal@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Argentina

Palabras clave: Tabla de impactos, Base de datos, Sistema de Alerta Temprana

1) Introducción

Desde 2021, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) trabaja en el fortalecimiento del Sistema de Alerta Temprana (SAT), con el objetivo de implementar mejoras sustanciales (Mellaned y Sosa, 2023). En este marco, se ha impulsado el desarrollo de capacidades técnicas y la consolidación de colaboraciones interinstitucionales orientadas a la implementación de Pronósticos Basados en Impacto (IBF, por sus siglas en inglés), de acuerdo con lo recomendado en las *Directrices de la OMM sobre servicios de predicción y aviso multirriesgos que tienen en cuenta los impactos* de la Organización Meteorológica Mundial (WMO-1150). El hito final será la emisión de alertas y avisos basados en impactos a partir de las conclusiones alcanzadas, capacidades generadas y datos recolectados por el SMN que no solo considere la severidad del fenómeno sino también sus posibles consecuencias.

En el marco de esta iniciativa, se conformó un grupo de trabajo interdisciplinario que investigó y analizó las tablas de impacto ya implementadas en otros países, para luego poder desarrollar una propia que contenga información de posibles impactos esperables, asociados a los distintos tipos de fenómenos meteorológicos que se alertan desde el SMN. Esta información, clasificada en una matriz, sería insumo tanto para el pronosticador y los organismos tomadores de decisión, como así también para el público en general, ya que se adaptaría su contenido para ser visualizado junto con los alertas emitidos.

El objetivo de este trabajo es mostrar los avances de las actividades llevadas a cabo por el subgrupo a cargo de la creación de las tablas de impacto. A continuación, una revisión de las principales acciones realizadas.

2) Análisis comparativo de las tablas de impacto ya existentes

Como primera medida, el grupo de trabajo realizó una revisión de las tablas de impacto ya existentes en los países seleccionados como antecedentes de relevancia. Se observó que la mayoría de las tablas analizadas coincidían en la existencia de cuatro niveles de impacto, aunque con diferentes denominaciones:

- **Met Office (Reino Unido):** Muy bajo, bajo, medio, alto.
- **NOAA (Estados Unidos):** Guía general con manuales específicos para tormentas severas y tornados.
- **BoM (Australia):** Bajo, moderado, alto, extremo, con escala adicional (0, 1, 2, 3)
- **SAWS (Sudáfrica):** Mínimo, menor, significativo, severo, con subniveles específicos para diferentes fenómenos meteorológicos.

Además, se identificaron diferencias en la clasificación de los fenómenos y consecuente diseño de las tablas. Por ejemplo, Met Office y SAWS tienen tablas separadas para diferentes fenómenos meteorológicos como lluvia, tormentas y viento, mientras que BoM utiliza una única tabla para todos los fenómenos, dividida en amenazas y exposición.

Estas observaciones iniciales sirvieron de base para elaborar la primera tabla de impactos de nuestro país, estructurada preliminarmente según un sistema de semáforo, tal como opera el SAT actual: verde, amarillo, naranja y rojo (Figura 1).

El sistema consta de 4 colores definidos de forma estática:

VERDE TRANQUILIDAD	No se esperan fenómenos que impliquen riesgos. El verde indica que no hay amenazas y será el color con el que también se represente el cese de una situación adversa.
AMARILLO INFORMATE	Posibles fenómenos con capacidad de daño. Riesgo de interrupción momentánea de las actividades cotidianas. Con este nivel de alerta, la población debería estar atenta e informarse, ya que el evento que monitoreamos podría requerir algún tipo de acción en el corto o mediano plazo. Este será el nivel de alerta más común y es de esperar que surja en más del 90 % de los alertas emitidos. Es importante tener en cuenta que, que un alerta de color amarillo no implica que no puedan registrarse eventos cuya intensidad sea severa, especialmente cuando se trata de eventos de tormenta.
NARANJA PREPÁRATE	Se esperan fenómenos meteorológicos peligrosos para la sociedad, la vida, los bienes y el ambiente. En este caso, estamos hablando de eventos particularmente intensos y es esperable que menos del 10 % de los niveles de alerta que se emitan sean de este color.
ROJO SEGUÍ INSTRUCCIONES OFICIALES	Se esperan fenómenos meteorológicos excepcionales con potencial de provocar emergencias o desastres. Este caso está reservado para situaciones muy particulares en donde la intensidad del fenómeno esperado estaría cerca de su máximo climatológico, por lo que esperamos que este nivel de alerta surja en el 1 % de los casos o menos.

Figura 1: Colores del SAT actual. Extraído de “Sistema de Alerta Temprana: manual de uso para organismos de gestión del riesgo de desastres”. Servicio Meteorológico Nacional. Imagen, p. 7.

La tabla de impactos inicialmente (Figura 2) fue pensada de manera uniforme para todo el territorio nacional y adoptó una estructura similar a la implementada en Australia, al incorporar en el análisis factores como la exposición y duración del evento y describir los impactos esperados en distintas tipologías tales como vida, propiedad, prestación de servicios, transporte, etc. Para cada tipología, en formato texto, se incorporó como ejemplo una descripción de los posibles impactos que podrían ocurrir según cada nivel de intensidad.

3) **Reevaluación y adaptación del enfoque**

A través de intercambios con integrantes de los otros grupos de trabajo de la iniciativa, se identificó como un aspecto a mejorar el texto descriptivo de los impactos, dado que resultaba demasiado ambiguo, lo que dificultaba la adopción de un criterio uniforme para describir sintéticamente los impactos de cada fenómeno en las distintas regiones argentinas. Ante el desafío que implica la heterogeneidad climática del país, se acordó entre los integrantes adoptar una regionalización de las tablas de impacto, obedeciendo a la distribución utilizada por los pronosticadores. De esta forma, se elaboraría una tabla de impactos por cada uno de los tres grandes dominios del SAT -Cordillera, Patagonia y Llanura-, para reflejar mejor la diversidad de condiciones climáticas del país.

Sin embargo, al analizar la información de impactos, se consideró que la evidencia disponible era insuficiente para determinar los impactos que generaría cada fenómeno en los diferentes dominios y así poder discriminar los mismos según su nivel de intensidad. En línea con este desafío, el SMN decidió impulsar los proyectos piloto dentro de la iniciativa que, junto con organismos municipales de gestión del riesgo, buscaron registrar los impactos ante cada alerta emitido para esas ciudades. Esta estrategia permite, por un lado, robustecer la Base de Datos de Amenazas Meteorológicas y sus Impactos de América del Sur (o SAMHI por sus siglas en inglés) que se utiliza como fuente de información y por el otro, generar insumos específicos para la tabla de impactos.

Luego de este desafío, se retomó la construcción de tablas a nivel nacional, pero discriminadas por fenómeno para contar con mayor detalle de la información en función del alerta emitido (Figura 2). Actualmente se está trabajando en la adaptación de las tablas para cada uno de los cinco fenómenos que se consideran capaces de producir eventos meteorológicos extremos y, en consecuencia, producir impactos: viento, lluvia, tormenta, nieve y viento Zonda.

Grado N°	1	2	3	4
	MUY BAJO	BAJO	MEDIO	ALTO
NIVEL DEL IMPACTO	MUY BAJO	BAJO	MEDIO	ALTO
Impacto a la población y daño a los medios de vida	Muy baja afectación.	Mínimo peligro para la vida o la salud.	Peligro leve a moderado para la vida o la salud.	Peligro significativo para la vida o la salud.
Daño en viviendas (estructuras con fines habitacionales)	Muy baja afectación.	Daño localizado a vivienda (ventanas)	Daño extendido a vivienda (voladura de techos)	Daño general a vivienda (voladura de techos, paredes colapsadas)
Daño a infraestructura, medios y vías de transporte	Muy baja afectación.	Desvíos en vías de circulación locales, con breves retrasos en los tiempos de viajes. También se anticipan demoras en los aeropuertos.	Corte en vías de circulación. Suspensión de vuelos.	Cierre de rutas, caminos, puertos y aeropuertos.
Daño a infraestructura urbana y afectación de servicios esenciales	Mínima afectación de servicios esenciales.	Daño en señalización urbana y cartelera.	Daño en postes de media o baja tensión. Suspensión de clases o interrupción de actividades normales en centros de salud.	Interrupciones de suministros de electricidad, gas o agua. Daños materiales a escuelas o centros de salud.
Daño a la actividad agrícola y/o ganadera	Muy baja afectación.	Afectación a pequeña escala de cultivos.	Pérdida parcial de cultivos y animales heridos.	Pérdida total de cultivos y mortandad de animales.
Daño a árboles	Muy baja probabilidad de afectación al terreno y la vegetación	Afectación leve o localizada en ramas y árboles.	Daño moderado: posible caída de árboles y ramas de gran porte.	Afectación extendida al arbolado: caída masiva de árboles.
Daño a vehículos	Muy baja afectación.	Daño leve o superficial a vehículos	Daño moderado a vehículos.	Daño generalizado o daño severo a vehículos, volcadura o destrucción completa.

Figura 2: Extracto de Tabla de Impacto. Servicio Meteorológico Nacional. (2024)

4) Conclusiones

El análisis y la comparación de las tablas de impacto implementadas por otros servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales proporcionaron valiosos aprendizajes para planificar y diseñar tablas adecuadas para la Argentina. La implementación inicial de una tabla de impactos nacional mostró la necesidad de un enfoque más detallado y específico, considerando las características geográficas y climáticas de un país tan extenso. Así, la diversidad de fenómenos e impactos esperables en las distintas regiones del país, y la falta de datos que generen una evidencia representativa al respecto, siguen siendo un desafío central para la implementación de la iniciativa.

El trabajo interdisciplinario permitió identificar dos lineamientos clave que deben equilibrarse, para no entrar en conflicto: por un lado, la necesidad de que el contenido textual de las tablas de impacto sea representativo y aporte información útil para sus usuarios, y por otro, la importancia de no complejizar ni comprometer las tareas operativas de los pronosticadores.

En este sentido, la continuidad de los proyectos piloto para el registro e implementación de tabla de impactos y el aumento de volumen de información de impactos en la base de datos SAMHI permitirán en un futuro contar con un corpus de información representativo que utilice una categorización homogénea de impactos en un período sostenido de tiempo.

Estas iniciativas son fundamentales para poder avanzar en una herramienta más precisa y validada por actores clave, tales como los organismos de Gestión del Riesgo de Desastres, en línea con las recomendaciones propuestas por OMM, que incluyen la comunicación efectiva y accesible a la sociedad sobre riesgos asociados a eventos meteorológicos.

Referencias

Matías Menalled, Priscila Sosa (2023). Sistema de Alerta Temprana: manual de uso para organismos de gestión del riesgo de desastres. Servicio Meteorológico Nacional.

Organización Meteorológica Mundial (2015). Directrices de la OMM sobre servicios de predicción y aviso multirriesgos que tienen en cuenta los impactos (WMO-1150).

CAMBIOS PROYECTADOS EN LA FRECUENCIA DE EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTREMA EN EL SUDESTE DE SUDAMÉRICA

Daiana M. Martínez ^{1,2,3}; Silvina A. Solman ^{1,2,3}

daiana.martinez@cima.fcen.uba.ar

¹Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO). Buenos Aires, Argentina.

²CONICET-Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI)-IRL 3351-CNRS-CONICET-IRD-UBA. Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: eventos extremos, cambio climático, modelos análogos

1) INTRODUCCIÓN

El Sudeste de Sudamérica (SESA) se caracteriza por ser una de las regiones con mayor frecuencia de tormentas intensas asociadas con convección profunda, principalmente durante la primavera y el verano (Zipser y otros, 2006). Estos sistemas de tormentas convectivas inducen eventos de precipitación extrema (EPE) generando daños significativos. En las últimas décadas, los eventos de precipitación extrema han aumentado en intensidad y frecuencia en SESA (Olmo y otros, 2020). Asimismo, las proyecciones climáticas basadas en modelos climáticos globales (MCG) o regionales (MCR) coinciden en que se espera un aumento significativo de la intensidad, frecuencia, duración y extensión espacial de las precipitaciones extremas como respuesta al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (Blázquez y Solman 2020). Sin embargo, la capacidad de los modelos climáticos para reproducir las estadísticas de la precipitación extrema aún es limitada. Por lo tanto, es relevante desarrollar metodologías alternativas para obtener estimaciones robustas de la ocurrencia de eventos extremos de precipitación en las proyecciones futuras. Considerando que los modelos climáticos de última generación son capaces de capturar razonablemente bien los patrones de circulación a escala sinóptica en América del Sur (Olmo y Bettolli 2021), el objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño de un modelo de análogos, basado en la ocurrencia de patrones sinópticos (PS), para detectar la frecuencia de ocurrencia de eventos de precipitación extrema en las proyecciones futuras de un MCR.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

La identificación de los PS y la calibración del modelo de análogos se realizó utilizando el conjunto de datos diarios del Reanálisis ERA5 (Hersbach y otros, 2020), con una resolución horizontal de 0.25° x 0.25° en el periodo 1979-2005. Para identificar una serie de SP precursores de EPE, se utilizó la clasificación obtenida a partir de la metodología de análisis de componentes principales en modo T con rotación ortogonal. A partir de esta clasificación se obtuvieron dos patrones sinópticos. A partir de los patrones detectados, se desarrolló el método de análogos basado en dos criterios de detección: por un lado, que el coeficiente de correlación entre los campos de anomalías diarias estandarizadas y los PS sea superior a un umbral (criterio de correlación), y por otro, que exista coherencia entre el signo de las anomalías de las variables meteorológicas diarias y el signo de los patrones en determinados

puntos de retícula (criterio de hotspot). El modelo análogo considera dos listas alternativas de variables, una considera las anomalías de: la componente meridional del viento en 850 hPa ($v'850$), la altura geopotencial en 850 hPa ($z'850$) y en 500 hPa ($z'500$), la intensidad del viento en 200 hPa ($int'V200$) y la temperatura potencial equivalente en 850 hPa ($titaae'850$), denominado análogo termodinámico y otra sin incluir $titaae'850$ denominada análogo no termodinámico.

El modelo de análogos, derivado a partir del reanálisis ERA5, se aplicó a las salidas del modelo REMO2015 del conjunto CORDEX-CORE, anidado en 3 MCGs, para el escenario RCP8.5 (Giorgi y otros, 2021). Se analizaron los periodos histórico (1979-2005) y futuro (2074-2100 o 2073-2099, dependiendo de la simulación) con el objetivo de detectar los cambios proyectados en la frecuencia de ocurrencia de EPE en los MCRs. Asimismo, se analizó la frecuencia de ocurrencia de EPE dados por la precipitación del MCR. Se definió como EPE, a un día donde la precipitación diaria en un punto de retícula supera el percentil 95 (P95), computado a partir de la climatología del periodo 1979-2005 del MCR (se tuvieron en cuenta los días con precipitación superior a 1 mm/día). Para tener en cuenta los EPE con una extensión espacial con áreas de no menos de 100 x 100 km², el criterio adicional que se impuso fue que la precipitación diaria exceda el P95 en al menos cuatro puntos adyacentes al punto identificado de la retícula.

3) RESULTADOS

El cambio hacia final de siglo en el P95 (no mostrado) de la precipitación diaria del modelo en la estación de octubre a diciembre (OND) mostró, en general para las tres simulaciones, un aumento en la intensidad y con los valores máximos en la zona noreste de SESA. Este resultado es congruente con estudios previos que prevén un aumento en la intensidad de los eventos extremos de precipitación en SESA (Reboita y otros, 2022).

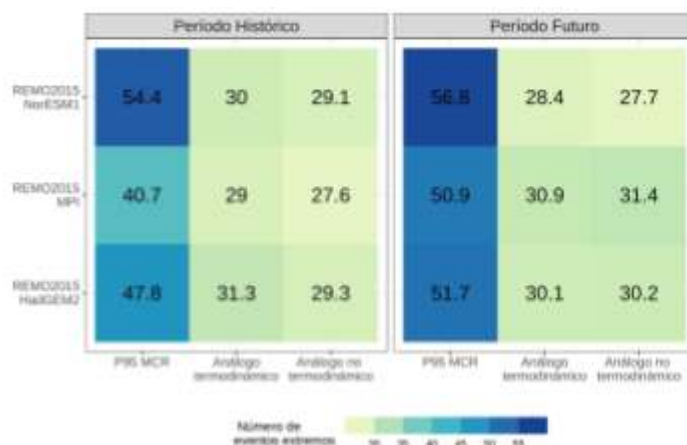


Figura 1: frecuencia de ocurrencia (por año) de eventos extremos detectados a partir del percentil 95 del modelo regional (P95) y de los modelos análogos (termodinámico y no termodinámico) para el periodo 1979-2005 (Periodo Histórico) y fin del siglo XXI (Periodo Futuro) para las tres simulaciones del modelo REMO2015.

La Figura 1 muestra la frecuencia de ocurrencia (por año) de eventos extremos de precipitación en las tres simulaciones del modelo REMO2015 en el periodo histórico y futuro. Como se mencionó en la sección 2) la frecuencia de ocurrencia fue calculada de dos formas, por un lado, a partir de la precipitación y P95 del MCR y, por otro lado, a partir de la aplicación del modelo análogo termodinámico y no termodinámico. Para el periodo histórico (Fig. 1, cuadro izquierdo), la frecuencia de extremos detectada por el P95 del modelo varía aproximadamente entre 40 y 55 eventos por año, con un

valor máximo de 54.4 eventos para el modelo REMO2015-NorESM1. En cambio, para este periodo, los modelos análogos (termodinámico y no termodinámico) detectaron una frecuencia de ocurrencia que resultó entre 27 y 31 eventos por año, con el valor máximo dado por el análogo termodinámico correspondiente al modelo REMO2015-HadGEM2. Este resultado demuestra que existe mayor dispersión en la frecuencia detectada por el P95 con respecto a la frecuencia capturada por los modelos análogos. Además, teniendo en cuenta que

la frecuencia observada (no mostrada), detectada con la base de precipitación diaria CPC, resultó ser de aproximadamente 34 eventos por año se puede destacar que la metodología de detección a partir del P95 sobrestima el número de eventos extremos y en cambio los modelos análogos ofrecen una estimación más cercana a la frecuencia observada.

Con respecto a los cambios proyectados, se detectó que la frecuencia de ocurrencia dada por el P95 se encontraría entre 51 y 59 eventos por año para el periodo futuro (Figura 1, cuadro lado derecho), mostrando un posible aumento. El mayor cambio se detectó para el modelo REMO2015-MPI que mostró un aumento de 10 eventos por año hacia fin de siglo. Los modelos análogos, en cambio, mostraron frecuencias similares a las detectadas para el periodo histórico. Asimismo, no se observó un acuerdo en el comportamiento del cambio de la frecuencia de los eventos extremos, debido a que en el modelo REMO2015-MPI se detectó un aumento en la frecuencia de entre 2 y 4 eventos por año, para el análogo termodinámico y no termodinámico, respectivamente; sin embargo en el modelo REMO2015-NorESM1 se observó una disminución en la frecuencia de extremos capturados por los dos modelos análogos. El modelo REMO2015-HadGEM2 identificó una menor (mayor) frecuencia de ocurrencia en el futuro cuando se aplica el análogo termodinámico (no termodinámico).

4) CONCLUSIONES

Los modelos análogos permitieron detectar la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos de precipitación. En el periodo histórico, los análogos detectaron una estimación más cercana a la frecuencia observada con respecto a la frecuencia obtenida a partir de la precipitación y el P95 del MCR. En los cambios proyectados en cambio, no se observó un acuerdo en el comportamiento del cambio de la frecuencia de los eventos extremos detectado a partir de los modelos análogos.

REFERENCIAS

- Blázquez J y Solman S, 2020:** Multiscale precipitation variability and extremes over South America: analysis of future changes from a set of CORDEX regional climate model simulations. *Climate Dynamics*, 797 55:2089–2106. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05370-8>
- Giorgi, F. y otros, 2021:** Editorial for the CORDEX-CORE experiment I special issue. *Climate Dynamics*, 57, 1265–1268
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, y otros, 2020:** The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.*; 146:1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Olmo, M. y Bettolli, M.L., 2021:** Extreme daily precipitation in southern South America: statistical characterization and circulation types using observational datasets and regional climate models. *Climate Dynamics*, 57, 895–916. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05748-2>
- Olmo, M. y otros, 2020:** Atmospheric circulation influence on temperature and precipitation individual and compound daily extreme events: spatial variability and trends over southern South America. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100267. 859 <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100267>
- Reboita M.S, y otros, 2022:** Future Projections of Extreme Precipitation Climate Indices over South America Based on CORDEX-CORE Multimodel Ensemble. *Atmosphere*, 13, 1463. <https://doi.org/10.3390/atmos13091463>
- Zipser EJ y otros, 2006:** Where are the most intense thunderstorms on Earth? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87, 1057–1071.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MODELOS MPAS Y WRF DURANTE EL EVENTO DE ALTO IMPACTO DEL 16 DE DICIEMBRE DE 2023 EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Gastón Ramírez¹, María Eugenia Dillon^{1,2}, Josefina Blazquez^{2,3}, Maximiliano Sacco¹, Cynthia Matsudo¹, Paula Maldonado¹, Federico Cutraro¹

gramirez@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Grupo de Investigación en Clima Variabilidad y Extremos (CLAVE). Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG), UNLP.

Palabras clave: MPAS, WRF, pronóstico numérico.

1) INTRODUCCIÓN

Los modelos de pronóstico numérico del tiempo son una de las herramientas más importantes utilizadas diariamente por las oficinas de pronóstico. En el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina se ejecuta de manera operativa el modelo Weather Research and Forecasting (WRF; Skamarock y otros, 2019) con 4 km de resolución horizontal desde 2016, el cual fue teniendo distintas actualizaciones y hoy en día integra el Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico SAP.SMN, que provee pronósticos regionales determinísticos y probabilísticos por un plazo de 72 y 48 hs, respectivamente (Matsudo y otros, 2022; Matsudo y otros, 2025). Si bien el desempeño de este sistema es bueno y en la última década hubo variados estudios y mejoras aplicadas en nuestra región, es de interés explorar modelos utilizados en otros centros.

El Model for Prediction Across Scales (MPAS; Skamarock y otros, 2012) fue desarrollado en el National Center for Atmospheric Research (NCAR) y se encuentra en pleno crecimiento. Una de las grandes diferencias con el WRF es la definición de la retícula: en el MPAS se usa una malla de Voronoi desestructurada, la cual permite mayor flexibilidad y potencialmente una ejecución del modelo más veloz.

El objetivo de este trabajo es comparar el desempeño de los modelos WRF y MPAS en una configuración regional de alta resolución para un caso de estudio, evaluando ventajas y desventajas de la aplicación de ambos modelos en Argentina.

2) CASO DE ESTUDIO

En los días 16 y 17 de diciembre de 2023 una serie de tormentas severas afectó significativamente la región central de Argentina, abarcando las provincias de La Pampa, Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos (Saucedo y otros, 2024). En la Figura 1 se puede observar la evolución de los sistemas mediante las imágenes de topes nubosos de GOES-16.

Durante el día 16 de diciembre, una vaguada en altura ingresaba al país con su frente asociado en superficie desplazándose sobre la región patagónica. La zona central del territorio argentino estaba afectada por vientos persistentes del sector Norte, elevados valores de temperatura y altos índices de inestabilidad, observándose actividad convectiva en la zona central del país como en el norte de Río Negro y Córdoba mostrando señales de severidad, según las imágenes satelitales.

En la tarde del mismo día, sobre el Sur de Río Negro y Sur Oeste de la provincia de Buenos Aires una línea de inestabilidad comenzó a formarse, tomando forma de arco (Bow-Echo) y con ráfagas de aproximadamente 150 km/h, que provocó múltiples incidentes, incluyendo

caída de árboles y víctimas fatales en la ciudad de Bahía Blanca.

La línea continuó desplazándose por el centro del país con granizo, fuertes vientos y lluvias intensas asociadas, llegando al noreste de la Provincia de Buenos Aires en la madrugada del domingo 17 y registrándose en el área metropolitana vientos con ráfagas de hasta 135 km/h.

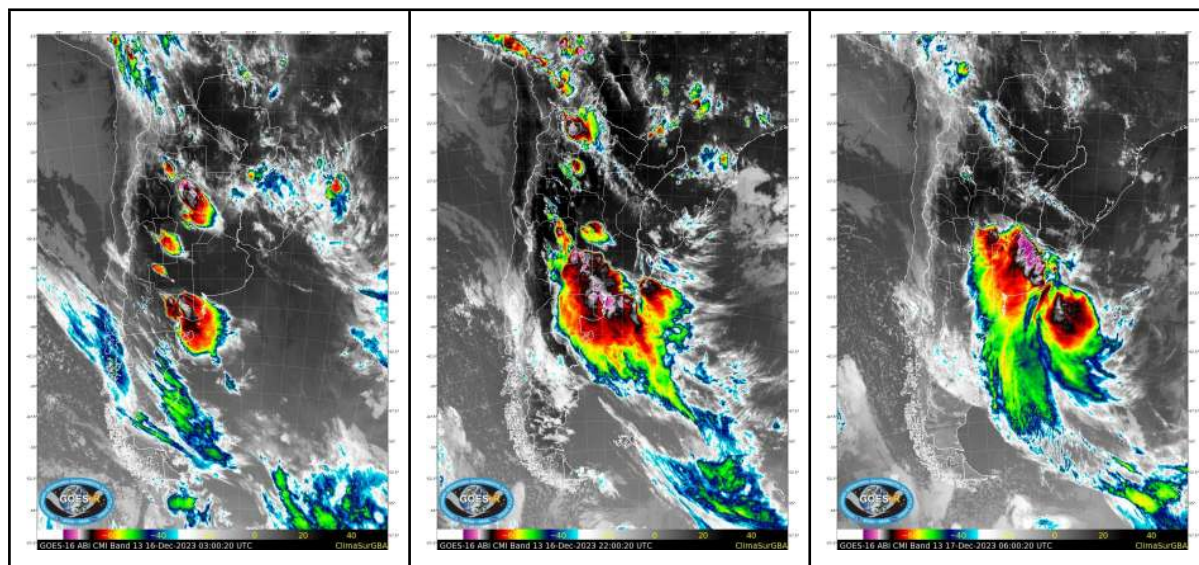


Figura 1. Topes nubosos de GOES-16 del 16 de diciembre de 2023 a las 03 y 22 UTC, y del 17 de diciembre de 2023 a las 06 UTC.

3) CONFIGURACIÓN DE LOS MODELOS Y RESULTADOS

La componente determinística del SAP.SMN utiliza el WRF con 4 km de resolución horizontal, 45 niveles verticales y una proyección Lambert, en el dominio mostrado en la Figura 2. Para las condiciones iniciales y de borde se usa el modelo Global Forecasting System (GFS) de 0.25° de resolución. La convección se resuelve de manera explícita y las parametrizaciones más relevantes utilizadas son: WSM6 para la microfísica; RRTMG para la radiación de onda corta y larga; MYJ para la capa límite planetaria; Noah-MP para el suelo.

Con el fin de diseñar una configuración del MPAS que sea comparable con la del WRF, se definió el dominio mostrado en la Figura 2, con 4 km de resolución horizontal aproximadamente. Teniendo en cuenta que las opciones de física disponibles aún son escasas en el MPAS, para la capa límite planetaria se escogió la parametrización MYNN (que está basada en la MYJ), para el suelo se utilizó el modelo Noah (que es una versión previa al Noah-MP), y para las parametrizaciones de microfísica y de radiación se pudieron usar las mismas opciones que en WRF (WSM6 y RRTMG, respectivamente).

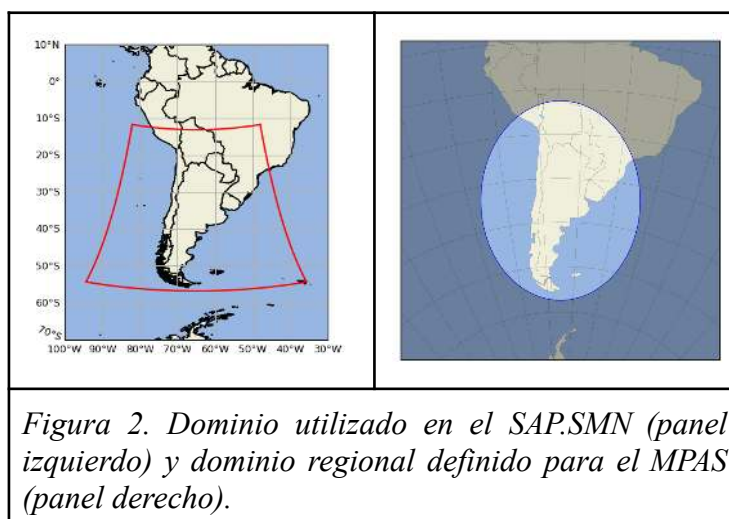


Figura 2. Dominio utilizado en el SAP.SMN (panel izquierdo) y dominio regional definido para el MPAS (panel derecho).

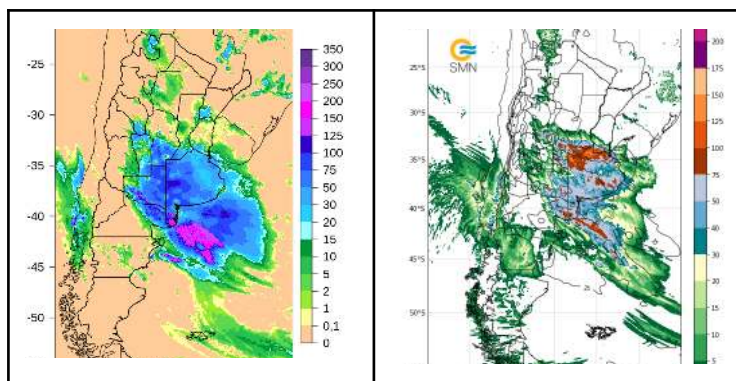


Figura 3. Precipitación acumulada en 24 hs [mm] válida a las 12 UTC del 17 de diciembre, estimada por SQPE-OBS (panel izquierdo) y pronosticada por el SAP.SMN (panel derecho).

En la Figura 3 se muestra la precipitación acumulada en 24 horas válida para las 12 UTC del 17 de diciembre estimada por SQPE-OBS (Hobouchian y otros, 2021) y pronosticada por el SAP.SMN inicializado a las 12 UTC del 16 de diciembre. Realizando una comparación de la franja central del país se pueden notar diferencias en la intensidad, extensión y distribución de los acumulados. El SAP.SMN muestra un patrón definido de precipitaciones intensas, con acumulados superiores a los 100

mm distribuidos en dos zonas: una banda orientada de NW a SE en el sudoeste de Buenos Aires y este de La Pampa y una zona localizada en el noroeste de Buenos Aires, sur de Entre Ríos, sur de Santa Fe y sur de Córdoba. Mientras que SQPE-OBS muestra una zona de precipitación especialmente intensa sobre el sur de La Pampa y sudoeste de Buenos Aires con acumulados mayores a 125 mm y otra zona con menores acumulados, entre 75 mm y 10 mm en el este de La Pampa y oeste de Buenos Aires. El resto de la región estima un patrón más extendido y continuo de precipitación intensa, dando valores de alrededor de 50 a 75 mm.

En general el SAP.SMN logra ubicar el evento y algunos máximos locales, pero sobreestima la precipitación en algunas regiones en particular.

REFERENCIAS

- Hobouchian, M.P., G. Díaz, L. Vidal, Y. García Skabar, L. Ferreira, M. Maas, M. S. Rossi Lopardo, H. Veiga y M. Rugna, 2021: Ajuste de la estimación de precipitación satelital IMERG con observaciones pluviométricas en Argentina. Nota Técnica SMN 2021-105. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1694>
- Matsudo, C., García Skabar Y., Righetti S., Cutraro F., Sacco M., Dillon M.E., Alvarez Imaz M., Maldonado P., Salles A., 2022: Sistema de Asimilación y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: componente operativa. CONGREGMET XIV.
- Matsudo, C., Maldonado P., Dillon M.E., Casaretto G., Sacco M., Cutraro F., Righetti S., Alvarez Imaz M., García Skabar Y., Ruiz J., Osorio S., 2025: Evaluación del Sistema de Asimilación y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: impacto de los análisis regionales en la inicialización del pronóstico por ensambles. Nota Técnica SMN 2025-193.
- Saucedo, M., R. de Elía, L. Vidal, C. Matsudo, S. Righetti, A. Cajas, D. Díaz, N. Pérez, P. Hobouchian, R. Vasques Ferro, C. Ribero, M. Patanella, P. Irurzun, H. Bechis, D. D'Amen, P. Salio, Y. García Skabar, S. Pérez, C. Sánchez, C. Fiol, R. Vidal, 2024: Evento de vientos destructivos sobre el centro de Argentina durante el 16 y 17 de diciembre de 2023. Nota Técnica SMN 2024-191.
- Skamarock, W.C., Klemp J.B., Duda M.G., Fowler L.D., Park S.-H., Ringler T., 2012: A multiscale nonhydrostatic atmospheric model using centroidal Voronoi tessellations and C-grid staggering. Mon. Wea. Rev., 140, 3090-3105, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00215.1>
- Skamarock, W.C., Klemp J.B., J. Dudhi, D. Gill, Z. Liu, J. Berner, X.Y. Huang, 2019: A description of the advanced research WRF model version 4. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 145(145), 550.

INFLUENCIA DE EVENTOS EXTREMOS DE TEMPERATURA EN EL AUMENTO DE FLORACIONES DE CIANOBACTERIAS NOCIVAS EN EMBALSES SUBTROPICALES

Haakonsson, S¹., Montesino Y.², Renom, M.², Aubriot, L¹.

shaakonsson@fcien.edu.uy.

¹Grupo de Fisiología y Ecología de Fitoplancton, Sección Limnología, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

²Departamento de la Atmósfera y Física de los Océanos, Instituto de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Palabras claves: Variabilidad interanual, veranos cálidos, modelos predictivos

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se ha reportado un aumento en la frecuencia de floraciones de cianobacterias nocivas. Las mismas ocurren en general en ecosistemas acuáticos con alta carga de nutrientes (eutrofizados), durante períodos cálidos y con alta estabilidad de la columna del agua (Bormans et al., 1997; Rolland et al., 2013). Condiciones que también ocurren durante las olas de calor en verano. La dinámica de las floraciones puede presentar una alta variabilidad interanual tanto en ocurrencia como en biomasa, a veces explicado por patrones de la hidrodinámica y el clima (Chapra et al., 2017). Sin embargo, faltan estudios que evalúen el efecto de la variabilidad interanual de la temperatura sobre el desarrollo de floraciones en ecosistemas subtropicales. Investigamos la dinámica interanual de floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas en dos embalses subtropicales. Los objetivos fueron: 1) Determinar la relación entre la dinámica de floraciones de cianobacterias y los eventos extremos cálidos de temperatura del aire 2) Estimar la probabilidad de ocurrencia de floraciones según la temperatura máxima del aire y el nivel de agua de los embalses.

2. METODOLOGÍA

Los embalses, Rincón del Bonete (BON) (superficie: 1070 km²; profundidad máxima aprox.: 25 m), y Palmar (PAL) (superficie: 320 km²; profundidad máxima aprox.: 30 m), fueron construidos entre 1945 y 1982 para la generación hidroeléctrica, pero también brindan otros servicios ecosistémicos, como turismo, abastecimiento de agua potable (para humanos y animales), riego y pesca (recreativa y comercial).

Utilizamos el visualizador desarrollado por el Ministerio de Ambiente Uruguay (<https://observatorioan.users.earthengine.app/view/visualizador-floraciones-dinacea>) para identificar las floraciones de cianobacterias durante seis años (2017–2023). Para analizar la climatología e identificar olas de calor (OCs), utilizamos cuatro conjuntos de datos derivados del Instituto Uruguayo de Meteorología (Fig. 1, triángulos). Los días cálidos se definieron como aquellos en los que la temperatura máxima del aire superó el percentil 90 correspondiente al día del año, calculado mediante una ventana móvil de 5 días centrada en el día de interés. Las olas de calor (OCs) se identificaron como períodos de tres o más días consecutivos en los que tanto las temperaturas máximas como mínimas superaron sus respectivos percentiles 90 diarios (Rusticucci et al., 2016).

Se desarrollaron dos modelos logísticos Bayesianos para predecir la probabilidad de ocurrencia de floraciones: uno según la temperatura del aire y nivel de agua de los embalses y otro según los eventos de ola de calor. Los modelos se corrieron utilizando el paquete de R brms (Burkner, 2017). Los ajustes y convergencias de los modelos fueron evaluados siguiendo Gelman et al. (2014) y McElreath (2020).

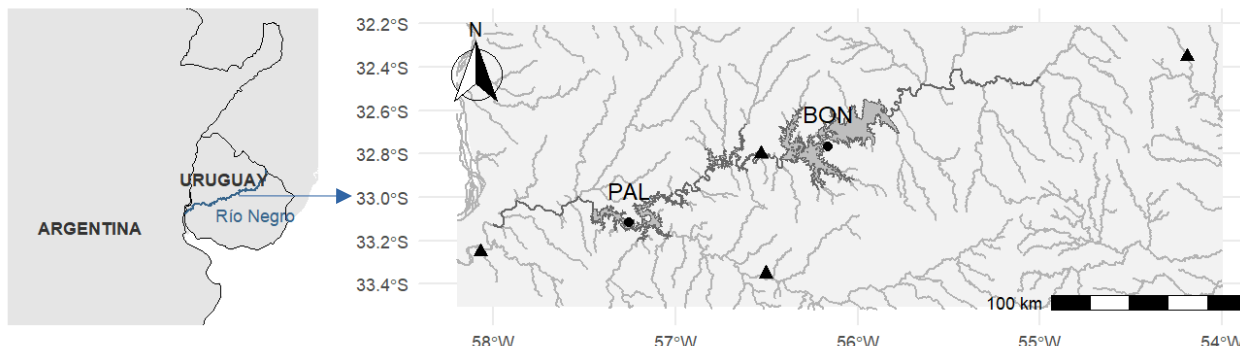


Figura 1. Los dos embalses hidroeléctricos sobre el Río Negro (Uruguay). PAL: Embalse de Palmar; BON: Embalse de Rincón del Bonete

3. RESULTADOS

Durante los seis años de estudio se registraron un total de 231 floraciones en los dos embalses del río Negro, las que ocurrieron entre diciembre y mayo. La frecuencia de floraciones (proporción de floraciones/registros totales entre diciembre y mayo) varió ampliamente entre años (0.04–0.91), pero con patrones anuales generales similares entre ambos embalses (Fig. 2). Se observó una mayor frecuencia de floraciones en los períodos donde se determinaron el mayor número de días cálidos (máximo mayor al percentil 90 diario) (Fig. 2). Los resultados del primer modelo indican que tanto la temperatura máxima del aire como los niveles de agua son predictores de la ocurrencia de floraciones de cianobacterias. En general, la ocurrencia de floraciones es más probable a bajo nivel del agua de los embalses y en períodos con temperaturas altas. Sin embargo, en el embalse más eutrofizado (PAL), el efecto del aumento de la temperatura fue limitado bajo condiciones de bajo nivel del agua (Fig. 3), y la probabilidad de floración se mantuvo alta (>0.50) a lo largo de todo el rango de temperatura (Fig. 3). Se registraron 12 olas de calor, en las cuales se observó una mayor frecuencia de floraciones. A pesar de que el efecto de las olas de calor fue positivo, no fue posible aislar estadísticamente su efecto del de los años con mayor cantidad de días cálidos, debido a que estos coincidieron temporalmente.

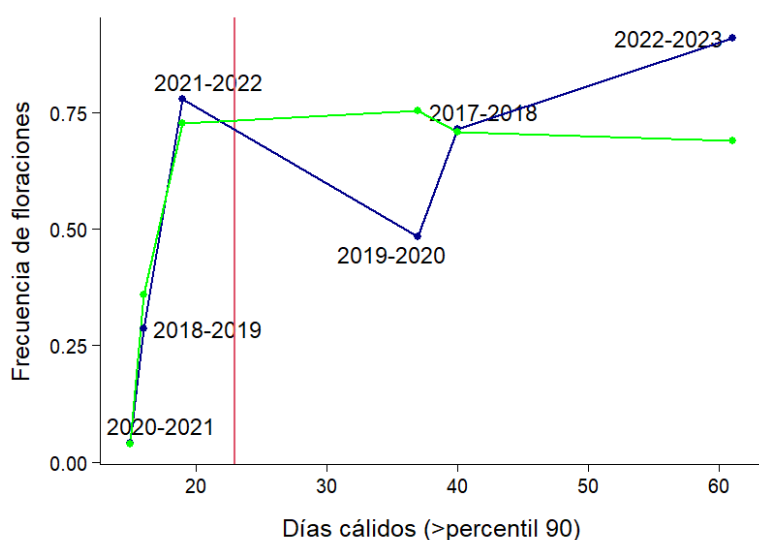


Figura 2. Frecuencia de floraciones de cianobacterias (0-1) según la cantidad de días cálidos en el período de floraciones (diciembre-mayo). Azul = Rincón del Bonete, Verde = Palmar. Línea vertical roja = mediana de cantidad de días cálidos (2000-2023).

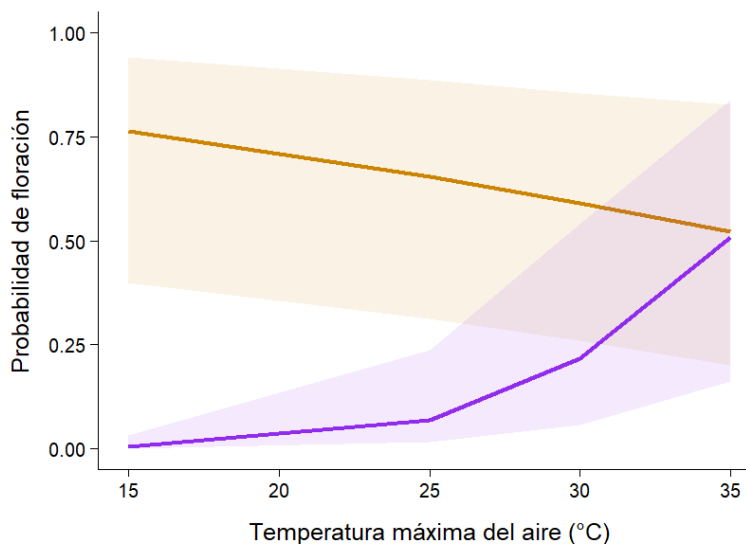


Figura 3. Probabilidad de floración de cianobacterias en el embalse de Palmar a un nivel del agua (cota) bajo (<Percentil 10, naranja) y alto (>Percentil 90, violeta) según la temperatura máxima del aire.

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que las variaciones interanuales de la temperatura máxima impactan notablemente en la dinámica de las floraciones en embalses con clima subtropical húmedo. En la región aún no

se han reportado estudios que vinculen los veranos extremadamente cálidos y las olas de calor con un aumento en la frecuencia de floraciones de cianobacterias.

La respuesta a los efectos de las temperaturas elevadas varía en función del estado trófico y el nivel del agua de los embalses. Este trabajo sugiere que se requerirá de una reducción más exigente de los niveles de nutrientes en los embalses subtropicales para compensar el efecto del aumento sostenido de la temperatura y de la frecuencia de las olas de calor.

REFERENCIAS

- Bormans, M., Maier, H., Burch, M., Baker, P. (1997).** Temperature stratification in the lower River Murray, Australia: Implication for cyanobacterial bloom development. *Marine and Freshwater Research*, 48(6), 647–654. <https://doi.org/10.1071/MF97022>
- Bürkner, P. C. (2017).** *brms: An R package for Bayesian multilevel models using Stan*. *Journal of Statistical Software*, 80(1), 1–28. <https://doi.org/10.18637/jss.v080.i01>
- Chapra, S. C., Boehlert, B., Fant, C. W., Bierman, V. J., Henderson, J., Mills, D., Mas, D., Rennels, L., Jantarasami, L., Martinich, J., Strzepek, K., Paerl, H. W. (2017).** Climate change impacts on harmful algal blooms in U.S. freshwater: A screening-level assessment. *Environmental Science & Technology*, 51(16), 8933–8943. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01498>
- Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A., Rubin, D. B. (2014).** *Bayesian data analysis* (3rd ed.). CRC Press.
- McElreath, R. (2017).** *Statistical rethinking: A Bayesian course with examples in R and Stan* (2nd ed.). CRC Press.
- Rolland, D. C., Bourget, S., Warren, A., Laurion, I., Vincent, W. F. (2013).** Extreme variability of cyanobacterial blooms in an urban drinking water supply. *Journal of Plankton Research*, 35(3), 744–758. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbt028>
- Rusticucci, M., Kysely, J., Almeida, G., Lhotka, O. (2016).** Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3–4), 679–689. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1445-7>

DETECCIÓN Y MODELADO DE UNA PLUMA FLUVIAL EN EL LITORAL BONAERENSE A PARTIR DE OBSERVACIONES SATELITALES Y SIMULACIONES NUMÉRICAS

Matías Nahuel De Oto Proschle¹, Diana Marina Rodríguez²

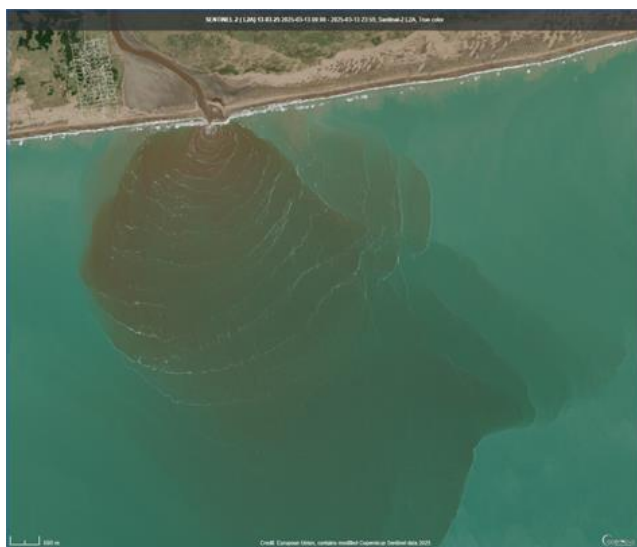
mdeoto@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Pluma Fluvial Superficial, Open Drift, Geocolor

1) INTRODUCCIÓN

Durante marzo de 2025 se registró una descarga fluvial excepcional en el litoral bonaerense como consecuencia de las intensas precipitaciones que afectaron al sudoeste de la Provincia de Buenos Aires¹. Posteriormente, las lluvias generaron un marcado



aumento de caudales en ríos y arroyos del área, como el río Quequén-Salado cuya pluma fluvial superficial (PFS, Fig. 1) alcanzó el Mar Argentino en las proximidades del Balneario Playa Marisol. En este trabajo se analiza la evolución de dicha PFS durante el 13 de marzo de 2025 mediante simulaciones de dispersión forzadas por viento, corrientes oceánicas y descargas artificiales, combinadas con imágenes satelitales del sensor ABI/GOES-16 para su verificación.

Figura 1: Imagen RGB (producto L2A) de la PFS asociada a la descarga del río Quequén-Salado tomada el 13 de marzo de 2025 a las 13:24 UTC por el sensor MSI/Sentinel-2 con una resolución espacial de 10 m².

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se realizaron un total de 35 simulaciones lagrangianas de la PFS mediante el software de código abierto OpenDrift (Dagestad y otros, 2018). Estas simulaciones presentan una fuente de descarga puntual generada artificialmente que es forzada por pronósticos de viento a 10 m del WRF-SMN (Matsudo y otros, 2022) y de corrientes barotrópicas del SIMMAR-PCA (Dinapoli y otros, 2020). Con el fin de reproducir distintas condiciones ambientales, las simulaciones fueron separadas en 5 experimentos de sensibilidad al forzante y de las condiciones iniciales. En la Tabla 1 se muestran las características del primer experimento. Por otra parte, para la detección de la PFS, se utilizó el producto GeoColor³ de disco completo del sensor ABI/GOES-16 (Schmit y otros, 2017) en formato TIFF, obtenido del repositorio de AWS⁴. Este producto combina información de canales

¹<https://www.smn.gob.ar/noticias/4-8-marzo-informe-de-lluvias-inundacion-bahia-blanca>

² <https://www.copernicus.eu/es>

³ https://www.star.nesdis.noaa.gov/goes/documents/QuickGuide_CIRA_Geocolor_20171019.pdf

⁴ <https://noaa-goes16-imagery.s3.amazonaws.com>

de onda corta y larga en una composición RGB con hasta 2 km de resolución espacial permitiendo identificar sedimentos y variaciones en la coloración del agua durante el periodo diurno. La elección de este producto se debió a su alta resolución temporal de 10 min., considerablemente superior a la de los sensores en órbita polar, facilitando el estudio de procesos de alta frecuencia en la plataforma continental (ver por ejemplo, De Oto Proschle y otros, 2025).

Tabla 1: Características del experimento 1.

Caso	Corrientes	Viento	Descarga fluvial	Observaciones
A	Si	Si	Si	Todos los forzantes activos
B	Si	No	Si	Sin viento
C	No	Si	Si	Sin corrientes oceánicas
D	Si	Si	No	Sin descarga fluvial
E	No	No	Si	Solo descarga fluvial
F	Si	No	No	Solo corrientes oceánicas
G	No	Si	No	Solo viento

A partir de las imágenes GeoColor se delimitaron polígonos vectoriales en QGIS⁵ con una frecuencia de 20 minutos (descartando aquellas afectadas por nubosidad), que representaron cambios espectrales asociados a la Pluma Fluvial Superficial (PFS) del río Quequén-Salado. Para sortear las limitaciones en zonas costeras debido a la generación artificial de la banda verde en este producto, se emplearon datos del sensor MSI/Sentinel-2 (ver Fig. 1), los cuales se compararon con las delimitaciones obtenidas a partir de GeoColor a fin de validar la detección de la PFS.

3) RESULTADOS

La Figura 2a muestra el pronóstico de concentración de partículas para el experimento 1b (Tabla 1) a las 20:50 UTC del 13 de marzo de 2025, evidenciando el desplazamiento hacia el oeste de la PFS desde la desembocadura del río Quequén-Salado. A partir de un umbral de 150 partículas/km² se generó, mediante AlphaShape, un polígono simulado (azul) que se encuentra mayormente contenido dentro del observado (rojo).

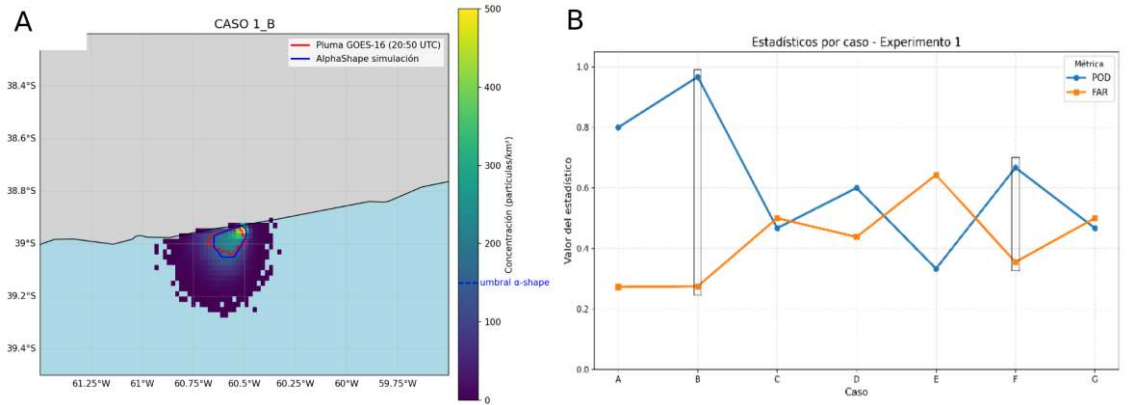


Figura 2. (a) Concentración de partículas por km² (sombreado), polígono simulado (azul) y observado (rojo) para las 20:50 UTC del 13 de marzo de 2025. (b) Estadísticos POD (azul) y FAR (naranja) para las simulaciones comprendidas en el experimento 1. Los recuadros negros indican a las corrientes marinas como el principal forzante.

⁵<https://qgis.org/>

Con base al polígono observacional, generado con la imagen GeoColor de las 20:50 UTC, se calcularon los estadísticos POD (probabilidad de detección) y FAR (falsa alarma) (Fig. 2b). El caso 1b, forzado con corrientes y una descarga fluvial sintética, mostró la mejor performance (POD: 0.96, FAR: 0.27), mientras que otros casos, como E que solo presenta la descarga de una pluma sintética o G que sólo contiene el viento a 10 m, evidencian un menor ajuste, incluso si sólo se fuerza únicamente con corrientes marinas (caso 1F) el desempeño resulta mayor.

4) CONCLUSIONES

Se realizaron 35 simulaciones de una Pluma Fluvial Superficial (PFS) asociada a la descarga del río Quequén-Salado, validadas con polígonos observacionales generados a partir de imágenes GeoColor del sensor ABI/GOES-16. Se presentaron 7 casos correspondientes al experimento 1, donde se evidenció que la inclusión de corrientes marinas (exp. 1b) mejora sustancialmente la representación de la pluma. En contraste, en algunos casos el viento aislado la deteriora, lo cual puede atribuirse a que el modelo de corrientes SIMMAR-PCA ya incorpora el viento como forzante. Se destaca que la calidad de los pronósticos depende críticamente no solo de contar con buenos campos de corriente regionales, sino también con información en tiempo real, especialmente relevante para aplicaciones operativas como búsqueda y rescate (SAR). Modificaciones en parámetros de dispersión, como errores aleatorios o cambios en la turbulencia horizontal (no mostradas), generaron una variabilidad menor en los estadísticos POD y FAR en comparación con la inducida por los forzantes externos. La comparación entre imágenes RGB de MSI/Sentinel-2 y GeoColor de ABI/GOES-16 mostró resultados consistentes en la detección de la PFS, evidenciando el potencial de este sensor para estudios regionales de alta frecuencia, como la estimación de velocidades superficiales. Finalmente, se señala que una mejor caracterización de la descarga puntual requiere datos más precisos sobre la velocidad inicial del río o emisario, dado su impacto en la forma y propagación de la pluma.

REFERENCIAS

- Dagestad, K. F., J. Röhrs, Ø. Breivik, and B. Ådlandsvik, 2018:** OpenDrift v1.0: a generic framework for trajectory modelling. *Geosci. Model Dev.*, 11, 1405–1420.
- Dinápoli, M. G., C. G. Simionato, and D. Moreira, 2020:** Development and validation of a storm surge forecasting/hindcasting modelling system for the extensive Río de la Plata Estuary and its adjacent Continental Shelf. *Nat. Hazards*.
- Matsudo, C. M., Y. García Skabar, S. A. Righetti, F. Cutraro, M. Sacco, M. E. Dillon, M. Álvarez Imaz, P. Maldonado, y M. A. Salles, 2022:** Sistema de pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional, CONGREMET XIV, Buenos Aires, Argentina.
- Proschle, M. D. O., S. Munoz, V. Valdeomillos, y J. P. Pisoni, 2025:** Characterizing the surface spatial distribution and variability of the San Matias Meridional Front from a geostationary satellite perspective. *Reg. Stud. Mar. Sci.*, 81.
- Schmit, T. J., M. M. Gunshor, W. P. Menzel, J. J. Gurka, J. Li, y A. S. Bachmeier, 2005:** Introducing the next-generation Advanced Baseline Imager on GOES-R. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 1079–1096.

DESARROLLO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN SUBESTACIONAL DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN LA REGIÓN SUR DE URUGUAY

Nicolás Díaz¹, Marcelo Barreiro¹, Madeleine Renom¹, Camila de Mello¹

nicolas.diaz@fcien.edu.uy. Autor/a correspondiente.

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los océanos, Facultad de Ciencias (UDELAR)

Palabras clave: Pronósticos subestacionales, Análogos de Circulación, Generador estocástico del Tiempo.

1) INTRODUCCIÓN

Diferentes actividades humanas requieren de información meteorológica para las próximas semanas. El comportamiento caótico de la atmósfera es conocido, y la incertidumbre en la predicción del tiempo aumenta de forma tal que los pronósticos meteorológicos brindan información hasta los 7-10 primeros días. Asimismo, las predicciones estacionales que proveen información sobre las anomalías esperadas para un trimestre, no permiten planear en horizontes de 2 a 4 semanas, comprendidas dentro de la escala subestacional (10 a 90 días). Hasta hace poco esta escala era considerada un desierto de predictibilidad. No obstante, en las últimas décadas se ha reconocido la relevancia que tienen algunos fenómenos con variabilidad intraestacional en proveer predictibilidad al clima; e.g.: la Oscilación de Madden-Julian (OMJ), los paquetes de ondas de Rossby y los procesos de interacción entre la estratósfera y la tropósfera como los “Sudden Stratospheric Warmings”. Así, las predicciones subestacionales han suscitado un gran interés dentro de la comunidad científica.

En Uruguay existe una importancia creciente en los pronósticos subestacionales debido a la transición en la matriz energética. Actualmente casi el 100% de la energía eléctrica de la matriz uruguaya proviene de fuentes renovables, dependientes de las condiciones del tiempo y del clima. Si bien a nivel nacional se realizan pronósticos del tiempo y climáticos trimestrales de temperatura del aire y precipitación, aún no se realizan pronósticos subestacionales. En este sentido, recientemente el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos (DCAFO, Facultad de Ciencias) ha investigado dos principales fuentes de predictibilidad subestacional: la OMJ y los paquetes de ondas de Rossby. Respecto a la OMJ, se ha estudiado su predictibilidad (Silini et al 2021, 2022) e impacto sobre las temperaturas y precipitaciones de nuestro país (Barreiro et al 2018; Díaz et al 2020, 2022; Ungerovich et al 2021), indicando un potencial para realizar predicciones subestacionales de temperatura y precipitación en Uruguay.

En este trabajo, presentamos el desarrollo de modelos de pronóstico en la escala subestacional basado en el método de los análogos. Analizamos la habilidad de los modelos en predecir precipitación y temperatura – del aire y del mar – y estudiamos su habilidad condicionada a las fases de El Niño Oscilación Sur (ENOS) y la OMJ. A su vez, estudiamos la dependencia estacional de la habilidad de los modelos desarrollados.

2) METODOLOGÍA

Para el desarrollo de los modelos de pronósticos subestacionales, hacemos uso de un generador estocástico de patrones basado en análogos de circulación (Krouma et al 2021). El modelo se construye considerando el campo medio diario de altura de geopotencial en 500 hPa (Z500) proveniente del reanálisis ERA5 para el período 1979-2023. Para un día dado t se

determina la similitud de Z500 con todos los días t' que están en un año diferente, pero dentro de los 30 días calendario centrados en t . La similitud se cuantifica mediante la distancia euclídea. Los 20 días t' que presentan mayor similitud con t determinan el conjunto de mejores análogos. Para asegurar una similitud en la evolución temporal, se considera una serie de $T=4$ días, y se minimiza la distancia entre $X(t)=(Z500(t), Z500(t+1), \dots, Z500(t+T))$ y $X(t')$. Los pronósticos diarios se realizan mediante reordenamientos aleatorios de los análogos, permitiendo generar un conjunto de ($N=100$) pronósticos para cada día y una predicción probabilística de las variables de interés (temperatura, proveniente del reanálisis ERA5) y precipitación (MSWEP). Finalmente se promedian/acumulan los valores diarios cada 5 días (hasta 45 días) y se evalúa la habilidad del pronóstico en las ventanas temporales definidas.

La capacidad del modelo en pronosticar las variables se testea mediante el *Continuous Ranked probability skill score* (CRPSS, Hersbach 2000) que evalúa la distribución de probabilidad pronosticada con respecto a un pronóstico climatológico de referencia – valores positivos indican una habilidad del modelo superior a la referencia. Teniendo en consideración la influencia de distintos modos climáticos en la región del Sudeste de Sudamérica (SESA), se estudia la habilidad del modelo de pronóstico condicionado a las distintas fases de El Niño Oscilación Sur (ENOS) y de la Oscilación de Madden-Julian. Esto nos permite evaluar la posibilidad de realizar pronósticos de oportunidad con mayor habilidad que el promedio, teniendo como condicionante la ocurrencia de estos modos de variabilidad climática.

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN PRELIMINARES

Con el fin de mostrar la potencialidad del método desarrollado en generar pronósticos con habilidad dentro de la escala subestacional, presentamos a continuación dos ejemplos concretos.

Para la región mostrada en la Fig.1A, se identificaron los 20 mejores análogos de Z500 para cada día en el período 1979-2023. Los resultados muestran estructuras similares en el campo de Z500 para los análogos identificados, así como en las variables a pronosticar. A modo de ejemplo, la Fig.1A muestra el comportamiento espacial de Z500 para el día 15 de abril de 2016 y el de su mejor análogo (Fig. 1C). Adicionalmente las precipitaciones para el día 15 de abril de 2016 y de su mejor análogo se muestran en los paneles B y D de la figura. Se observa cómo patrones semejantes de circulación, dan lugar a patrones semejantes en las precipitaciones, lo cual constituye el elemento esencial para la construcción del pronóstico estocástico.

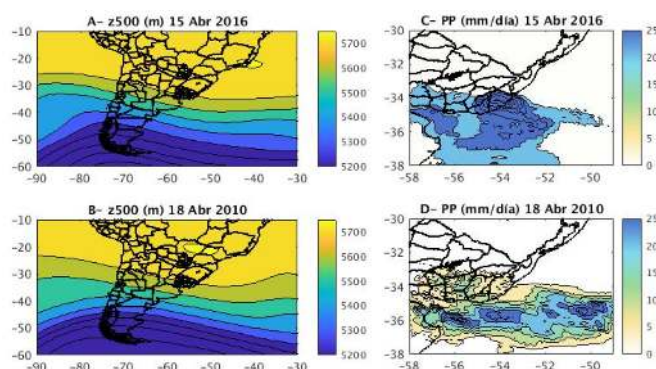


Fig. 1. A- Campo de Z500 [m] para el día 15 de abril de 2016 y de su mejor análogo (C). B y D- precipitaciones [mm/día] sobre Uruguay para las mismas fechas.

En la Fig. 2A, se muestra un ejemplo de región utilizada para pronosticar la temperatura del aire (aT), mientras que en el panel B se muestran los resultados obtenidos para el CRPSS durante el trimestre Diciembre-Enero-Febrero (DEF), condicionado por las fases de ENOS. Los resultados muestran que en una escala de 5-25 días, los modelos presentan habilidad para hacer pronósticos subestacionales en relación a los pronósticos climatológicos, en particular, durante años Niño (verde). La Fig. 2C por su parte, muestra los resultados para el DEF de 1982-1983, correspondiente a un año Niño. Como se puede ver en el panel inferior, durante el mes de Diciembre el modelo presenta habilidad incluso hasta una escala de 35 días.

Estos ejemplos ilustran la capacidad del método propuesto para capturar señales relevantes en la escala subestacional, destacando su potencial aplicación operativa en contextos de pronóstico climático.

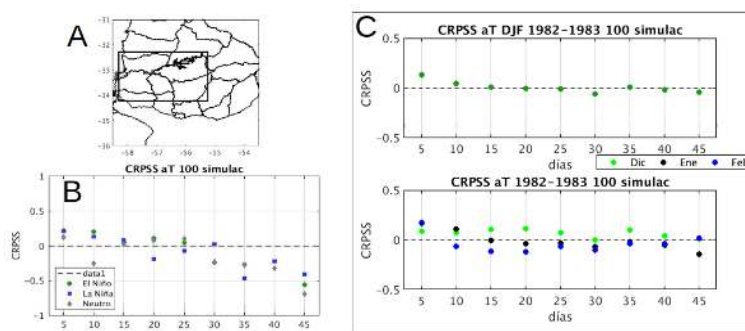


Fig. 2.A- Área utilizada para pronosticar temperatura (rectángulo interno). B- CRPSS según la fase de ENOS para todos los días. C- CRPSS para un evento Niño durante DEF y separado por mes.

REFERENCIAS

- Barreiro M., L. Sitz, S. de Mello, R. Fuentes Franco, M. Renom, R. Farneti, 2018:** Modeling the role of air-sea interaction in the impact of MJO on South American climate Int. J. Climatology, doi: 10.1002/joc.5865.
- Barreiro M., F. Arizmendi, R. Trinchín, 2019:** Variabilidad observada del clima en Uruguay. Producto 2 del Proyecto “Fortalecer las capacidades de Uruguay para la adaptación al cambio climático en la zona costera”. <https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/Producto-2.pdf>
- Barreiro M, F. Arizmendi, N. Diaz, R. Trinchin, 2022:** Análisis del clima y escenarios de cambio y variabilidad climática en Uruguay. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/>
- Diaz N., M. Barreiro, N. Rubido, 2022:** The distinct influence of two Madden-Julian’s trajectory classes on the South American Dipole. J. Climate doi.org/10.1175/JCLI-D-21-1001.1.
- Hersbach, H. 2000:** Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems, Weather and Forecasting, 15, 559–570.
- Krouma M., P. You, C. Deandreis, S. Thao, 2021:** Assessment of stochastic weather forecast of precipitation near European cities, based on analogs of circulation. Geo. Model. Develop. <https://doi.org/10.5194/gmd-2021-36>.
- Silini, R., M. Barreiro , C. Masoller, 2021:** Machine learning prediction of the Madden-Julian Oscillation. Nature Climate and Atmospheric Science 4, 57.
- Ungerovich, M, M. Barreiro, C. Masoller, 2021:** Influence of Madden–Julian Oscillation on extreme rainfall events in Spring in southern Uruguay. Int. J. Climatol., <https://doi.org/10.1002/joc.7022>.

PROYECTO PREVENIR: AVANCES Y PERSPECTIVAS HACIA LA IMPLEMENTACIÓN OPERATIVA

**Yanina García Skabar¹, Juan Ruiz^{2,3,4}, Luciano Vidal¹, Takemasa Miyoshi⁵,
Milagros Alvarez Imaz¹, Arata Amemiya⁵, Daniela D'Amen¹, María Eugenia Dillon^{1,6},
Marcelo García⁷, Pablo García⁸, Leandro David Kazimierski⁸, Romina Mezher¹,
Shigenori Otsuka⁵, Manuel Pulido⁹, Mariano Re⁸, Federico Robledo^{2,3,4}, Paola Salio^{2,3,4}**

ygarciaskabar@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Dep. de Cs. de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN-UBA).

³CIMA (CONICET – UBA)

⁴CNRS–IRD–CONICET–UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos

⁵iTHEMS - RIKEN Center for Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences

⁶Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁷IDIT (CONICET-U. Nacional de Córdoba)

⁸Instituto Nacional del Agua (INA)

⁹IMIT (CONICET-U. Nacional del Nordeste)

Palabras clave: Inundaciones, pronóstico hidrometeorológico.

1) INTRODUCCIÓN

El proyecto PREVENIR (Pronóstico y Alerta de Eventos de Inundaciones Urbanas Repentinas – prevenir.smn.gob.ar) es un proyecto de cooperación internacional entre Japón y Argentina (2022-2027), ejecutado en el marco del programa “Asociación para la Investigación Científica y Tecnológica para un Desarrollo Sostenible” (SATREPS, por sus siglas en inglés), en colaboración con la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) y la Agencia de Ciencia y Tecnología de Japón (JST). PREVENIR cuenta con la participación de instituciones japonesas: el Centro interdisciplinario de Ciencias Teóricas y Matemáticas (iTHEMS) de RIKEN, la Universidad de Osaka, el Centro Internacional para la Gestión de Riesgos y Amenazas relacionadas con el Agua (ICHARM) y la Agencia Meteorológica de Japón (JMA). Estas instituciones trabajan en estrecha colaboración con sus contrapartes argentinas: el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Instituto Nacional del Agua (INA), el CONICET, e instituciones de los gobiernos provinciales de Córdoba y Buenos Aires. Las inundaciones urbanas son una de las mayores amenazas asociadas con la precipitación intensa en todo el mundo (Grimmond et al., 2019). Estudios recientes indican además que la frecuencia de eventos de precipitación intensa en cortos períodos de tiempo que pueden desencadenar inundaciones urbanas ha ido en aumento en la región (Reboita et al., 2022). El objetivo del proyecto es, a partir de un abordaje integral, desarrollar un sistema de pronóstico y alerta temprana de inundaciones repentinas diseñado para dos cuencas urbanas altamente vulnerables: la cuenca de los arroyos Sarandí- Santo Domingo (SSD; Buenos Aires) y la cuenca del río Suquía Villa Paez (SVP; Córdoba). En este trabajo se presenta una visión general de los avances del proyecto.

2) AVANCES EN LAS ACTIVIDADES DEL PROYECTO

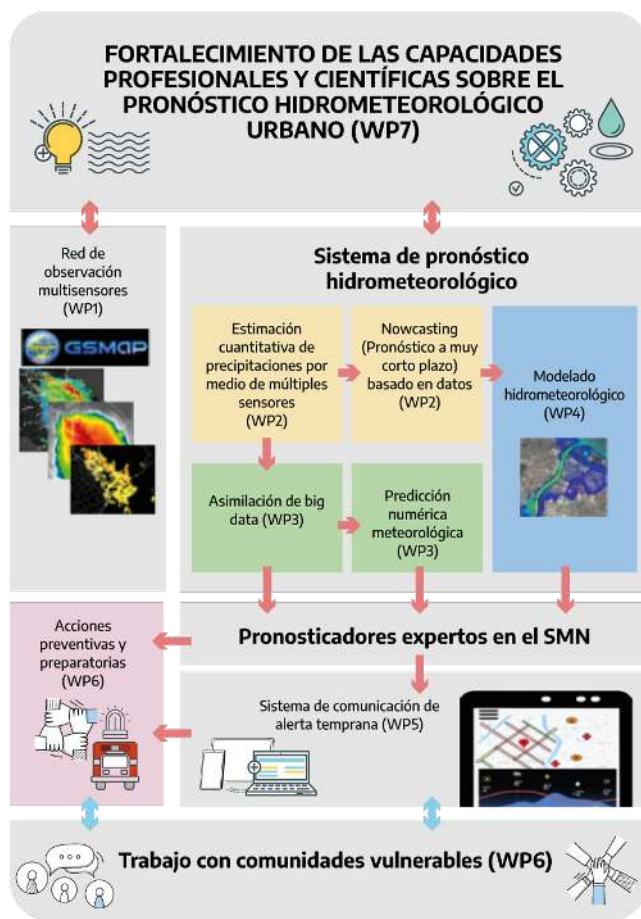


Figura 1: Esquema de los grupos de trabajo del proyecto (WP, por sus siglas en inglés) y la articulación entre ellos.

En la Figura 1 se presenta un esquema de las actividades del proyecto, organizadas en diferentes paquetes de trabajo (WP, por sus siglas en inglés), cuyas actividades específicas se describen brevemente a continuación.

WP1 – Sistema de observación hidrometeorológico: La obtención de datos de calidad y fiables en tiempo real es fundamental para realizar pronósticos precisos. PREVENIR trabaja para la integración de datos de redes existentes como por ejemplo el Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SINARAME), información satelital, las redes operacionales del INA y del SMN, redes de terceros, entre otros. El proyecto además busca ampliar las capacidades de observación actuales dentro de las dos cuencas. Actualmente se han instalado 5 sensores de nivel en la cuenca SSD y 4 cámaras en la cuenca SVP que permiten medir caudal en forma continua a partir de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV, por sus siglas en inglés; Fujita et al., 1998).

WP2 – Estimación cuantitativa de la precipitación y nowcasting: Con el fin

de mejorar el monitoreo de la precipitación en tiempo real y con la mayor frecuencia temporal y resolución espacial posible se desarrollaron y evaluaron nuevos algoritmos de estimación de precipitación utilizando datos de radares (RQPE) y satélites meteorológicos (SQPE). Asimismo, se desarrollaron técnicas de vanguardia en extrapolación de datos (*nowcasting*), para el pronóstico por un plazo de 2 horas, incorporando una cuantificación de la incertidumbre. Tanto en el *nowcasting* como en RQPE se están evaluando también técnicas de Machine Learning.

WP3 – Pronósticos meteorológicos a corto plazo: Se generan pronósticos probabilísticos a 10 horas de variables clave (ej., tasa de precipitación) con una resolución de 2 km inicializados por un sistema de asimilación de datos frecuente que incorpora, entre otros, datos de radar meteorológico. Se utiliza el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) junto con la metodología Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) para el proceso de pronóstico y asimilación de datos.

WP4 – Pronósticos hidrológicos: Se realizan ensambles de pronósticos hidrológicos basados en diferentes forzantes atmosféricos generados por el proyecto, para predecir el nivel de los ríos y arroyos y sus caudales en diferentes puntos de las cuencas relevantes para el pronóstico de inundaciones repentinas. Se utiliza en la cuenca SVP el modelo RRI

(Rainfall-Runoff-Inundation; López et al., 2023) y en la cuenca SSD el modelo SWMM (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales; Rossman, 2015).

WP5 - Comunicación eficiente de pronósticos y alertas: Comunicar pronósticos y alertas de manera clara es esencial para una toma de decisiones eficiente y acciones de prevención efectivas. Se está desarrollando un portal web y una API para distribuir los productos generados por el proyecto. Se han realizado 3 talleres de simulación y 5 talleres de testeo con el fin de co-diseñar con los gestores de emergencias y las oficinas de riesgo el canal de comunicación para garantizar un uso efectivo de la información en tiempo real proporcionada por el sistema de pronóstico.

WP6 - Conciencia ciudadana: Aquí se promueven actividades con diferentes niveles educativos y organizaciones sociales para sensibilizar a la sociedad con un enfoque particular en las comunidades más vulnerables que están altamente expuestas a los riesgos de inundación. El conocimiento de los riesgos existentes y las posibles acciones de mitigación son fundamentales para reducir el impacto de las inundaciones repentinas. Se han entregado 18 EMAs y 92 pluviómetros a escuelas y organizaciones sociales en ambas cuencas. Actualmente se están realizando talleres de capacitación para su instalación y uso de los mismos. También se generó un [cuadernillo de orientación para docentes](#) enfocado en la cuenca SSD y se está diseñando una versión con foco en la cuenca SVP.

WP7 - Creación de capacidad: La formación de la próxima generación de investigadores, técnicos y pronosticadores es fundamental para la sostenibilidad y la expansión futura de los sistemas de alerta temprana de crecidas repentinas. Se han realizado cursos y reuniones científicas sobre la temática y se realizaron estadias de investigación, incluyendo el intercambio de expertos entre Japón y Argentina.

3) PERSPECTIVAS

Actualmente se está trabajando en la implementación operativa del sistema de pronóstico hidrometeorológico. Se espera contar con una versión operativa ya en funcionamiento para junio de 2026. Durante el 2026 se contempla la realización de un simposio internacional sobre inundaciones urbanas repentinas. El proyecto tiene por objetivo de mayor alcance que este tipo de sistemas de pronóstico hidrometeorológico se pueda replicar en otras cuencas del país y del mundo.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto PREVENIR (prevenir.smn.gob.ar)

REFERENCIAS

Grimmond S., and Coauthors, 2019: Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services Vol I: Concept and Methodology. WMO Tech Note 1234.

Reboita, M.S., and Coauthors, 2022: Future Projections of Extreme Precipitation Climate Indices over South America Based on CORDEX-CORE Multimodel Ensemble. Atmosphere, 13, 1463. <https://doi.org/10.3390/atmos13091463>

INFORMACIÓN CUANTITATIVA DE CENIZA VOLCÁNICA, EL FUTURO DE LA AERONAVEGACIÓN ANTE ERUPCIONES VOLCÁNICAS

Soledad Osoreo¹, Eliana Vazquez¹, Juan Augusto Diaz¹, Federico Cutraro¹, Diana Rodriguez¹, Luciano Vidal¹, Martín Rugna¹, Leonardo Mingari², Arnau Folch²
msosores@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Argentina

² Geociencias Barcelona (GEO3BCN), España

Palabras clave: Concentración, Ceniza, VAAC.

1) INTRODUCCIÓN

En 2010 el volcán Eyjafjallajokull ubicado en Islandia hizo erupción y la ceniza cubrió gran parte del espacio aéreo europeo, uno de los corredores con mayor tráfico aéreo del Mundo y la aplicación del criterio de “Tolerancia cero” a la presencia de ceniza, paralizó el tráfico aéreo europeo durante 6 días. Este evento impulsó la demanda por parte de la comunidad aeronáutica de repensar los criterios internacionales. En base a los requerimientos de los usuarios y el avance de la ciencia, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) avanzó con el desarrollo y la planificación de la Capacidad Operativa Inicial de la Información Cuantitativa de Ceniza Volcánica (QVA, por sus siglas en inglés), que en los VAAC tendrán que producir en los próximos años (OACI, 2022). En esta línea, el SMN ha comenzado a trabajar en el desarrollo de la Información QVA del VAAC Buenos Aires. Luego, el objetivo del presente trabajo es presentar los avances del desarrollo, la aplicación a un evento y el futuro del nuevo servicio que se proveerá en el marco de la Vigilancia de Volcanes en Aerovías Internacionales.

2) CAPACIDAD OPERATIVA INICIAL QVA

La información QVA consiste en pronósticos numéricos determinísticos y probabilísticos de dispersión de cenizas para erupciones que generen un impacto generalizado en las operaciones de las aeronaves y la navegación aérea (OACI, 2022). Los pronósticos determinísticos consisten en una única simulación numérica de dispersión, mientras que los pronósticos probabilísticos son resultado de simulaciones por ensambles y la probabilidad se calcula para los umbrales de 10, 5, 2 y 0.2 mg m⁻³, en base a estudios de impacto en aeronaves (Clarkson y otros, 2016).

La información QVA se proporcionará en dos formatos: uno reticulado NetCDF y el otro en esquema IWXXM como polígonos. Tendrá una resolución horizontal de 0.25°, y resultados en capas de 5000 pies de espesor desde superficie hasta el nivel del vuelo 600 (~18200 m) y plazo de pronóstico hasta 24 horas con un paso de tiempo de 3 horas. La información QVA se actualizará como mínimo cada 6 horas y coexistirá con el Aviso de Cenizas Volcánicas hasta que se pase a la Capacidad Operativa Completa.

3) QVA en VAAC Buenos Aires

En el VAAC Buenos Aires se utiliza el modelo FALL3D (Folch y otros, 2021) que es un modelo Euleriano tridimensional que resuelve la ecuación de advección, difusión y sedimentación para simular el transporte y depósito de partículas de tefra. El modelo FALL3D requiere de condiciones iniciales y de borde de datos meteorológicos y la definición del término fuente, que consiste en datos propios del volcán tales como la ubicación geográfica del cráter y las características de la emisión.

En el SMN se utilizan para el dominio del VAAC Buenos Aires el pronóstico meteorológico del Global Forecasting System (GFS) del National Centers for Environmental Prediction

(NCEP) de 0.25° de resolución horizontal, con 41 niveles verticales, con un plazo de pronóstico a 24 horas y pasos temporales cada 1 hora. La corrida control es el resultado determinístico de QVA. El ensamble se genera perturbando los parámetros del término fuente más sensibles del modelo de dispersión, es decir la altura de columna y el parámetro de forma A de Suzuki (Osores, 2017). La altura de columna eruptiva se perturba en un 30% respecto de la altura control asumiendo una distribución de probabilidad uniforme. Y el parámetro de forma A-Suzuki, se perturba tomando valores aleatorios en un rango de 2 respecto del valor control también asumiendo una distribución uniforme. Como resultado se obtienen la concentración 3D y la carga de masa que es la integración en la vertical de la concentración, para cada miembro y la probabilidad de superar los umbrales mencionados para la concentración por capas y la probabilidad de superar los 0.2 g m^{-2} de carga de masa.

4) EJEMPLO QVA: VOLCAN UBINAS

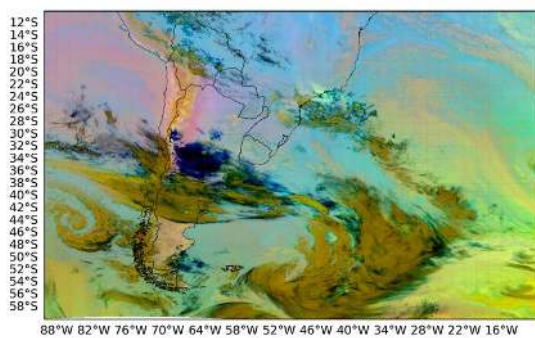


Figura 1: RGB de ceniza del 20 de julio a las 12:00 UTC. En tonos rojos o magentas se observa la presencia de ceniza, en amarillos la presencia mixta de ceniza y SO₂, y en verdes la presencia de SO₂.

Se presenta la aplicación de la Información QVA para la erupción del volcán Ubinas (Perú), que inició a las 7:30 UTC del 19 de julio de 2019 alcanzando una altura de más de 10 km sobre nivel del mar. A las 12:00 UTC la estación de La Paz ubicada en Bolivia registró la presencia de humo y una reducción de visibilidad de 8 km, que se sostuvo en el registro de las 15:00 UTC y para las 18:00 UTC comenzaba a dominar la nubosidad meteorológica y luego a llover. La emisión volcánica se redujo por la tarde del mismo día y el material inyectado fue transportado corriente abajo, llegando a la mañana del 20 de julio a las costas del sur de Brasil (Fig. 1).

El resultado determinístico de QVA se muestra en la Figura 2a, en donde se puede observar que la concentración entre FL400/450 coincide con la posición de la pluma observada. Y la probabilidad de superar el umbral de 0.2 mg m^{-3} muestra una probabilidad alta de encontrar concentraciones por encima de dicho umbral. Aunque la pluma modelada pareciera sobreestimar la extensión horizontal de la pluma observada. Esto puede deberse a que corriente arriba la pluma de ceniza está presente, pero es transparente por lo que no es posible destacar la presencia de ceniza claramente.

5) CONCLUSIONES

La Información QVA comenzará a proveerse pronto por parte de los VAACs y VAAC Buenos Aires ha avanzado en su desarrollo. Se ha mostrado la implementación del sistema en el caso del volcán Ubinas, presentando resultados alentadores. No obstante, es necesario continuar mejorando el sistema QVA, incorporando alguna técnica de fusión de datos para reducir la propagación de errores, y tener mejores condiciones iniciales para los pronósticos sucesivos.

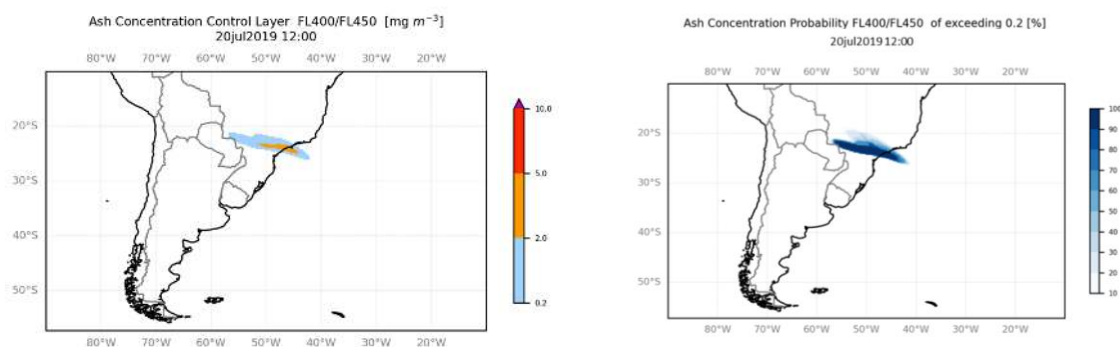


Figura 2: Concentración de la corrida determinística y probabilidad de superar el umbral de 0.2 mg m^{-3} para el 20 de julio a las 12:00 UTC en la capa FL400/450.

REFERENCIAS

Clarkson, R. J., Majewicz, E. J., y Mack, P., 2016: A re-evaluation of the 2010 quantitative understanding of the effects volcanic ash has on gas turbine engines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 230(12), 2274-2291.

Folch A., Mingari L., Gutierrez N., Hanzich M., Macedonio G. y Costa A., 2021: FALL3D-8.0: a computational model for atmospheric transport and deposition of particles, aerosols and radionuclides—Part 1: Model physics and numerics Geoscientific Model Development 13 (3), 1431-1458.

OACI, 2022: Quantitative Volcanic Ash (QVA) Concentration Information First edition – 13 September 2022.

Osores, M. S., 2017: Evaluación de estrategias para el pronóstico numérico por ensambles de dispersión de ceniza volcánica en Sudamérica. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

SEMIAUTOMATIZACIÓN DE PRONÓSTICOS TAF A PARTIR DEL SAP.SMN

Maximiliano Vita Sanchez^{1,2}, Silvina Righetti^{1,3}, Federico Cutraro¹

mvitasanchez@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - Universidad Nacional de La Plata

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos - FCEyN – Universidad de Buenos Aires

Palabras clave: Pronóstico aeronáutico, automatización, WRF.

1) INTRODUCCIÓN

El mensaje TAF (Terminal Aerodrome Forecast) es un pronóstico que se realiza en el ámbito aeronáutico. Dicho pronóstico tiene validez de 24 horas y en el mismo se informan velocidad e intensidad de viento en nudos, visibilidad en metros, tiempo presente (lluvia, tormenta, neblina, niebla, etc), base y cantidad de nubosidad en pies, temperatura máxima y mínima en grados centígrados. El mismo se realiza cada 6 horas, incluye indicadores de cambio (BECMG, TEMPO) de la evolución temporal del pronóstico y probabilísticas (PROB30, PROB40).

Actualmente, en las oficinas de pronóstico del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) el TAF se realiza manualmente a partir de un análisis de la situación sinóptica y considerando los modelos numéricos disponibles. Con el fin de optimizar el tiempo de elaboración y reducir errores de formato, se propone la creación de un mensaje TAF semi-automático, generado a partir de las salidas del modelo numérico Weather Research and Forecasting (WRF) del Sistema de Asimilación y Pronóstico del SMN (SAP.SMN; Matsudo y otros, 2022). Este producto busca ser una primera aproximación para los pronosticadores. En este contexto, el objetivo del presente trabajo es presentar el producto, describiendo los algoritmos utilizados para su generación y su forma de presentación al usuario.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Los pronósticos meteorológicos empleados en la generación del producto provienen de la componente determinística del SAP.SMN (SAP.SMN-DET), del cual se consideran solamente sus primeras 48 horas de simulación. Las variables utilizadas fueron la dirección e intensidad de viento (calibrada), las temperaturas máxima y mínima (calibradas), la precipitación y las ráfagas de viento. Aquellas variables que no son directamente pronosticadas por el modelo WRF, como la visibilidad, el fenómeno (en este producto, sólo se pronostican los fenómenos asociados a la lluvia) y la cobertura nubosa, son calculadas a partir de distintas metodologías. La visibilidad se estima mediante la parametrización FRAM-L (Gultepe and Milbrandt, 2010), que considera la humedad relativa en el nivel más bajo del modelo, complementada con un esquema de reducción por precipitación que sigue los estándares internacionales. Los fenómenos meteorológicos significativos se determinan principalmente a partir de la precipitación pronosticada, clasificándose en categorías como llovizna, lluvia o tormenta, según umbrales de intensidad establecidos en la documentación de la OMM. Por último, para estimar la nubosidad (en la horizontal y en la vertical) se utiliza la variable *cloud fraction* del modelo WRF. La estimación de la cobertura nubosa se realiza aplicando la metodología de *maximum random overlap*, la cual asume superposición máxima entre niveles contiguos de nubes y superposición aleatoria entre capas distintas (Söderberg, 2016). Para determinar la

altura de la base de nubes, se identificó la altura más baja con un valor de *cloud fraction* mayor a cero. Además, con el fin de representar adecuadamente distintos niveles de nubosidad, se distinguen dos capas: una por debajo y otra por encima de los 1500 pies, aplicando los cálculos correspondientes a cada una.

Para cada uno de los aeropuertos y aeródromos de Argentina (excepto Antártida) se considera el punto más cercano del modelo y un entorno de 12 km alrededor del mismo, para así tener en cuenta también las condiciones en las cercanías. Vale la pena mencionar que al considerar los entornos esto podría generar inconvenientes en aquellos aeropuertos que se encuentren cerca de las costas, ya que se estaría incluyendo puntos sobre el agua lo que modificaría el comportamiento de las variables meteorológicas. Para salvar esta situación se utiliza una máscara de tierra-agua de modo de analizar las variables solamente sobre tierra.

Otra situación que se incorpora al considerar un entorno a cada aeropuerto, tiene que ver con la forma de reducir toda la información a un solo valor que represente toda esa área. El criterio para calcular dicho valor varía según la variable. Para ráfagas, temperatura máxima, fenómeno significativo y cobertura nubosa se considera el valor máximo del entorno, para visibilidad, temperatura mínima y altura de nubes se toma el mínimo, para intensidad del viento el valor medio, y para la dirección del viento se tomó directamente el valor del punto más cercano al aeropuerto.

El producto además incorpora los indicadores de cambio BECMG, que se activan ante variaciones significativas en las condiciones meteorológicas. Estos incluyen rotaciones del viento superiores a 60 grados acompañadas de velocidades de al menos 5 nudos, cambios de 10 nudos o más en la velocidad del viento o ráfagas, modificaciones en la visibilidad que crucen umbrales operacionales (150, 350, 600 metros, entre otros), o alteraciones en el estado de la nubosidad. Adicionalmente, se implementa la codificación CAVOK para aquellos casos donde la visibilidad supera los 10 kilómetros, no se presentan fenómenos meteorológicos significativos y la cobertura nubosa no representa restricciones para la operación aérea.

3) RESULTADOS

Para presentar el producto a los usuarios se desarrolló un visualizador utilizando Shiny Apps en R (Figura 1), que despliega un mapa con la ubicación de los aeródromos y aeropuertos (puntos rojos), junto con los límites de las Regiones de Información de Vuelo (líneas color cyan), facilitando la rápida localización del aeropuerto a consultar. En función de la disponibilidad del SAP.SMN-DET, se incorporaron cuatro botones correspondientes a los horarios de corrida del modelo: 00, 06, 12 y 18 UTC. (Los horarios de disponibilización de las corridas se muestran en la Tabla 1). Luego, se presentan dos columnas: la izquierda muestra la salida del producto (con posibilidad de visualizar TAFs para distintos plazos de validez) y la derecha corresponde a la salida horaria del modelo en formato METAR.

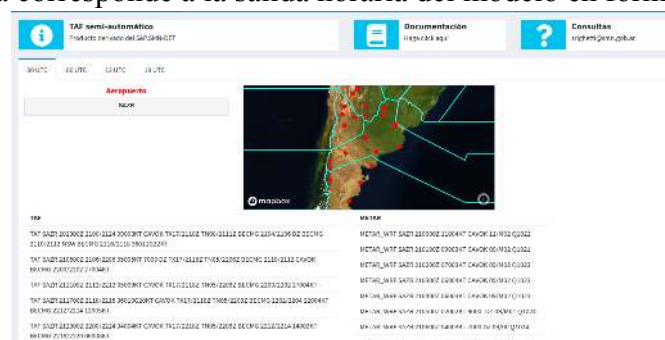


Figura 1: Visualizador del producto .

<i>Horario de corrida</i>	<i>Disponibilidad</i>
<i>00 UTC</i>	<i>04:00 HOA</i>
<i>06 UTC</i>	<i>10:00 HOA</i>
<i>12 UTC</i>	<i>16:00 HOA</i>
<i>18 UTC</i>	<i>22:00 HOA</i>

Tabla 1: Disponibilidad aproximada en horario de Argentina del producto

4) CONCLUSIONES

Mediante la elaboración de diversas encuestas y reuniones con pronosticadores, se llegó a la conclusión de que el producto presenta mucho potencial para brindar soporte a la hora de elaboración del pronóstico aeronáutico. También se identificaron regiones (como la Patagonia) donde los pronosticadores suelen dar uso a otro modelo como el GFS o el ECMWF. Esto refuerza la importancia de adaptar las herramientas a las preferencias y necesidades operativas regionales, consolidando al TAF semi-automático como una iniciativa estratégica para la mejora continua del pronóstico aeronáutico en Argentina.

Entre las limitaciones actuales del sistema destaca la ausencia del indicador TEMPO, que describe variaciones temporales de corta duración en las condiciones meteorológicas. Esta característica convierte al producto en una herramienta de apoyo para los pronosticadores más que en un reemplazo completo del proceso manual de elaboración de TAFs. No obstante, el sistema ha demostrado ser valioso como primera aproximación al pronóstico aeronáutico, particularmente por incorporar técnicas de calibración que reducen los sesgos sistemáticos del modelo numérico base. El desarrollo futuro contempla la inclusión de más fenómenos meteorológicos y la mejora continua de los algoritmos de procesamiento.

REFERENCIAS

Gultepe, I. and Milbrandt, J. A., 2010: Probabilistic Parameterizations of Visibility Using Observations of Rain Precipitation Rate, Relative Humidity, and Visibility. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 49, 36– 46.

Matsudo, C., García Skabar, Y., Righetti, S., Cutraro, F., Sacco, M., Dillon, M. E., Álvarez Imaz, M., Maldonado, P. y Salles, A., 2022: Sistema de Asimilación y Pronóstico Numérico del Servicio Meteorológico Nacional: Componente operativa. XIV Congreso Argentino de Meteorología. Buenos Aires, Argentina. 7 al 11 noviembre 2022. Sesión de posters.

Organización Mundial Meteorológica [OMM]., 2022: Informes de aeródromo y Pronósticos: Manual del usuario de los códigos. OMM N°782.

Organización de Aviación Civil Internacional [OACI]., 2016: Anexo 3 al convenio sobre Aviación Civil Internacional. Servicio Meteorológico para la navegación aérea internacional. 19 edición.

Söderberg, F., 2016: Cloud Overlap Assumption and Cloud Cover Validation for HARMONIE-AROME.

DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE ASIMILACIÓN Y PRONÓSTICO DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL: RESULTADOS DE VERIFICACIÓN EN EL PERIODO 2020-2024

Cynthia Matsudo¹, Silvina Righetti ^{1,2}, Yanina García Skabar ¹, Federico Cutraro ¹,
María Eugenia Dillon ³, Paula Maldonado ¹, Maximilano Sacco ¹, Milagros Alvarez
Imaz ¹, Soledad Osore ¹
matsudo@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

² Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras clave: WRF, calidad, SMN.

1) INTRODUCCIÓN

La capacidad de los sistemas de pronóstico numérico en detectar la posible ocurrencia de eventos meteorológicos de alto impacto para la población depende, en gran parte, de su habilidad para resolver los procesos termodinámicos que suceden en la atmósfera. Los pronósticos de alta resolución (escala del kilómetro) mejoran el detalle y realismo de los procesos atmosféricos (Kain et al., 2006), pero enfrentan desafíos como la imprecisión en la representación de los procesos de subgrilla y una rápida pérdida de predictibilidad, donde el crecimiento de los errores en escalas grandes domina progresivamente (Durrán y Gingrich, 2014; Nielsen y Schumacher, 2016). Todo esto manifiesta la necesidad de contar con enfoques probabilísticos y esquemas de verificación que evalúen tanto la agudeza (precisión) como la confiabilidad (calibración) de los ensambles, mitigando las limitaciones inherentes a la alta resolución.

La componente operativa del Sistema de Asimilación y Pronóstico del SMN (SAP.SMN, Matsudo et al., 2022) implementada en 2020 provee pronósticos determinísticos y probabilísticos con 4 km de resolución horizontal. Desde ese entonces se ha desarrollado un esquema de verificación para cuantificar los errores utilizando métricas estadísticas acordes para mostrar el desempeño de sus pronósticos.

El objetivo de este trabajo es analizar la calidad del SAP.SMN del ciclo de 06 UTC para el periodo 2020-2024. Cuando resulta posible, se incluye una comparación con un modelo global de menor resolución como el GFS. Se plantearán las ventajas y desafíos en el desempeño de los modelos regionales de alta resolución.

2) METODOLOGÍA

El SAP.SMN posee una componente determinística (SAP.SMN-DET) y otra probabilística (SAP.SMN-ENS) basadas en el modelo numérico WRF-ARW versión 4.0 (Skamarock et al., 2019). El dominio cubre toda Argentina (excepto Antártida), con una resolución horizontal de 4 km y 45 niveles verticales (tope 10hPa) resolviendo la convección de forma explícita. El SAP.SMN-ENS posee 20 miembros generados por la combinación de 3 parametrizaciones de capa límite (MYJ, YSU, SH) y dos microfísicas de 1 momento (WSM6, LIN). El SAP.SMN provee salidas horarias hasta 72 h (SAP.SMN-DET) y 48 h (SAP.SMN-ENS) y las condiciones iniciales y de borde provienen de los análisis y pronósticos del Global Forecasting System (GFS/GEFS).

El desempeño de los pronósticos se midió con las observaciones de 101 estaciones de la red de estaciones convencionales de superficie del SMN para el periodo 2020-2024. Más detalles

sobre la configuración del SAP.SMN y las métricas utilizadas para la verificación se pueden encontrar en Matsudo et al. (2023).

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 (a) muestra los estadísticos categóricos del SAP.SMN-DET. El bias en frecuencia toma valores cercanos a 1 para todos umbrales excepto para el de 1 mm donde hay una leve sobrestimación de la cantidad de eventos. Y para el plazo 54 h se ven menores valores de POD que para el plazo 30 h, sin embargo, se reduce también la cantidad de falsas alarmas. En cuanto a las $T_{\min}$ y $T_{\max}$, la figura 1 (b) muestra los porcentajes de acierto de las variables calibradas y sin calibrar. Se considera acierto a los pronósticos cuyo error absoluto se aleja hasta 2°C del valor observado. En líneas generales, las $T_{\max}$ logran un desempeño de aproximadamente el 9% más alto que las $T_{\min}$ en el caso del SAP.SMN-DET y un impacto de la calibración que supera el 10%.

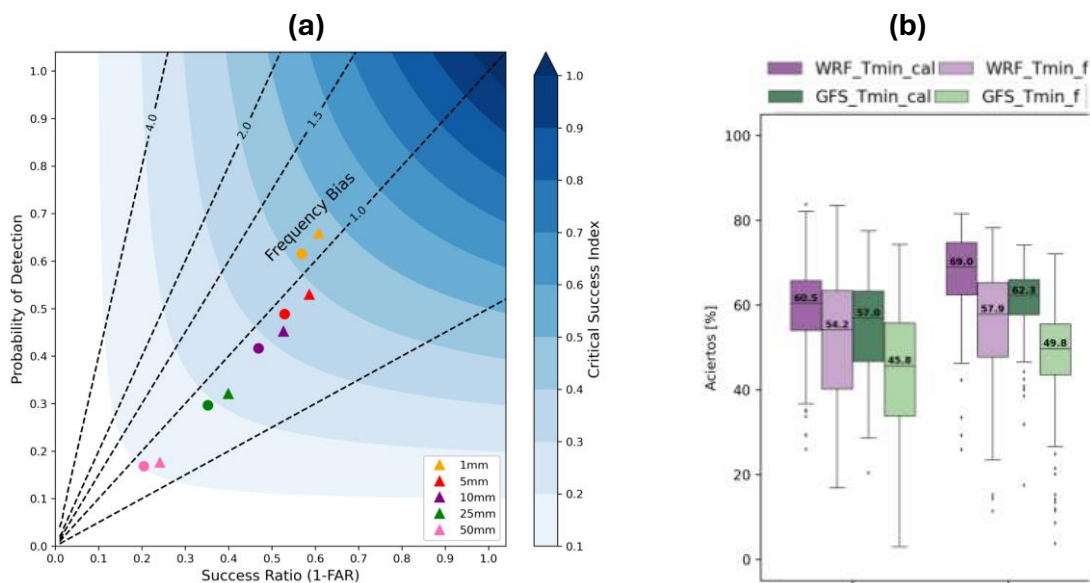


Figura 1. (a) Diagrama de desempeño de PP24 para el SAP.SMN-DET para distintos umbrales para los plazos 30 h (triángulos) y 54 h (círculos). **(b)** Boxplots del porcentaje de acierto de las $T_{\min}$ (izq.) y las $T_{\max}$ (der.) para el plazo 24 h para el SAP.SMN-DET y GFS. Los colores oscuros indican variables calibradas.

La distribución de los pronósticos probabilísticos de PP24 de las estaciones del SMN (figura 2 a) muestran que los valores de spread del SAP.SMN-ENS tienen mayor correspondencia con el error que los del ensamble de GFS. Sin embargo, se puede ver que el spread sobrestima los valores de error lo que resulta en un ensamble sobre confiado. Este comportamiento también se ve en el diagrama de confiabilidad (no se muestra) donde para las probabilidades pronosticadas superiores al 30% sobrestiman la frecuencia de eventos observados para los umbrales analizados.

Por otra parte, en la figura 2 (b) se puede ver que la calibración de la temperatura a 2 metros (T_2) disminuye la magnitud de la sobrestimación a medida que el plazo aumenta y el RMSE se reduce en aproximadamente 1°C . Después de 9 h de la inicialización del pronóstico, el spread alcanza a representar al error, aunque durante las horas de máxima temperatura lo supera, haciendo que el ensamble se torne sobre dispersivo.

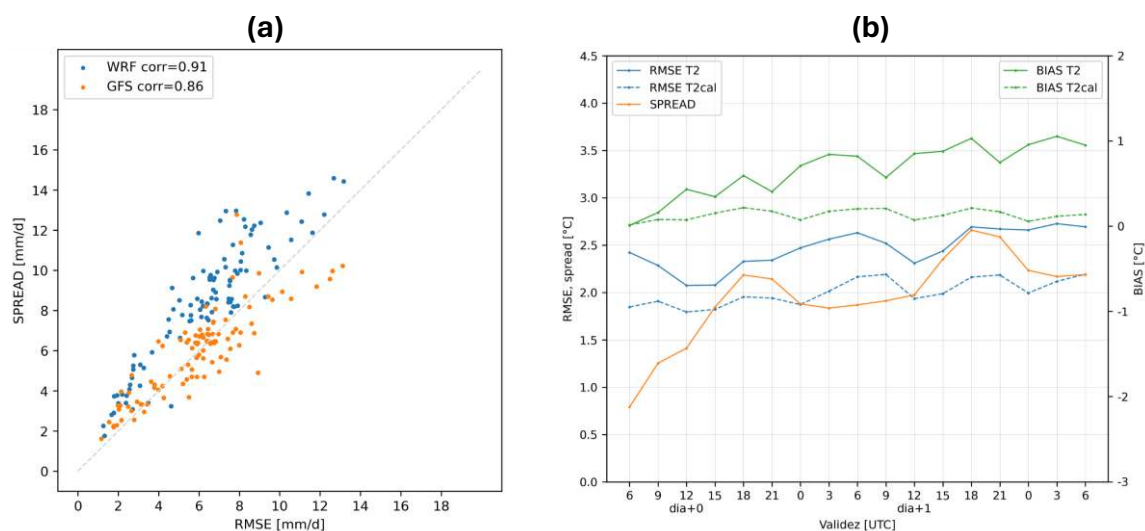


Figura 2. (a) Diagrama de dispersión que muestra relación entre el SPREAD y RMSE de los pronósticos probabilísticos de PP24 para SAP.SMN-ENS y GEFS (plazo 30 h). Se agrega en el recuadro el valor del coeficiente de correlación lineal de Pearson. **(b)** Series de RMSE, SPREAD y BIAS de la T2 del SAP.SMN-ENS.

Estos resultados nos impulsan a continuar avanzando en el desarrollo de mejoras continuas como la implementación en diciembre de 2024 de un sistema de asimilación de datos para el SAP.SMN-ENS. En el trabajo a presentar se ampliarán los resultados, incluyendo el análisis de otras variables como magnitud del viento a 10 m, un análisis regional de la variabilidad de los errores y una primera exploración del impacto de la asimilación de datos en el SAP.SMN-ENS.

REFERENCIAS

- Durran, D. R., and M. Gingrich, 2014:** Atmospheric predictability: Why butterflies are not of practical importance. *J. Atmos. Sci.*, 71, 2476–2488, doi:10.1175/JAS-D-14-0007.1.
- Kain, J. S., S. J. Weiss, J. J. Levit, M. E. Baldwin, and D. R. Bright, 2006:** Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather: The SPC/NSSL Spring Program 2004. *Wea. Forecasting*, 21, 167–181, doi:10.1175/WAF906.1.
- Matsudo C., García Skabar Y., Righetti S., Cutraro F., Sacco M., Dillon M. E., Alvarez Imaz M., Maldonado P., Salles A., 2022:** Sistema De Pronóstico Numérico Del Servicio Meteorológico Nacional: Componente Operativa. XIV Congreso Argentino de Meteorología. Buenos Aires, Argentina. 7 al 11 noviembre 2022. Sesión de posters.
- Matsudo C., Y. Garcia Skabar, 2023:** Verificación de los pronósticos del Sistema de Asimilación y Pronóstico numérico del SMN para el período 2020-2022. Nota Técnica SMN 2023- 145. 13 páginas.
- Nielsen, E. R., and R. S. Schumacher, 2016:** Using convection-allowing ensembles to understand the predictability of an extreme rainfall event. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 3651–3676, doi:10.1175/MWR-D-16-0083.1.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang W., Powers J., Duda M., Barker D. y X. Huang, 2019:** A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4 (No. NCAR/TN-556+STR).

IMPROVING NONLINEAR OBSERVATION ASSIMILATION THROUGH ITERATIVE FILTERS: IDEALIZED EXPERIMENTS WITH RADAR-LIKE OPERATORS

Jorge Gacitúa Gutiérrez^{1, 2*}, Juan Ruiz^{1, 2, 3}, Manuel Pulido⁴, Maria Eugenia Dillon^{5, 6}, Yanina Garcia Skabar⁵, Paula Maldonado⁵, Shigenori Otsuka⁷, Arata Amemiya⁷, Renato Pajarola⁸, Takemasa Miyoshi⁷
Jorge.gacitua@cima.fcen.uba.ar

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina

² CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina

³ CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

⁴ Instituto de Modelado e Innovación Tecnológica, CONICET-UNNE, Corrientes, Argentina.

⁵ Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires, Argentina.

⁶ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina.

⁷ iTHEMS - RIKEN Center for Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences, Kobe, Japan

⁸ University of Zürich, Zurich, Switzerland.

Keywords: ensemble Kalman filter, nonlinearity, radar data assimilation

1) INTRODUCTION

Assimilating nonlinear observations—such as radar reflectivity—into ensemble-based systems remains a challenge. Standard ensemble Kalman filters, including LETKF, are derived under assumptions of linearity and Gaussianity. However, when the observation operator is highly nonlinear, it often leads to filter divergence or poor performance (Lawson and Hansen, 2004). Recent advances have explored the use of iterative or tempered techniques to enhance robustness in such regimes (Carrassi et al., 2018). Likelihood tempering, in particular, has shown promise by progressively assimilating observational information in multiple steps, thereby reducing the impact of nonlinearity in any single update (Kurosawa and Poterjoy, 2021). In this study, we apply and evaluate this technique in a simplified yet dynamically relevant context using the Lorenz-96 model with a radar-like observation operator.

2) METHODOLOGY

We implement a tempered version of the Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) and evaluate its performance under idealized scenarios using the Lorenz-96 model. The nonlinearity is introduced through a radar-like observation operator that transforms state variables into reflectivity-like observations. A tempering approach is

applied using multiple assimilation steps, where each step introduces a portion of the likelihood, modulated by a slope parameter (α_s) that controls how sharply information is weighted across steps. The experiments systematically vary the number of tempering steps, the value of α_s , the observational error variance (σ_o^2), ensemble size (N_{ens}), and the spatial density of observations.

3) RESULTS

Single-variable experiments show that three tempering iterations (ETKF-T3) better capture the posterior distribution induced by nonlinear observation operators compared to the standard ETKF. For small observational errors (σ_o^2), tempering notably reduces RMSE (Figure 1). Even for larger errors (e.g., $\sigma_o^2 = 25$), improvements persist but are less pronounced.

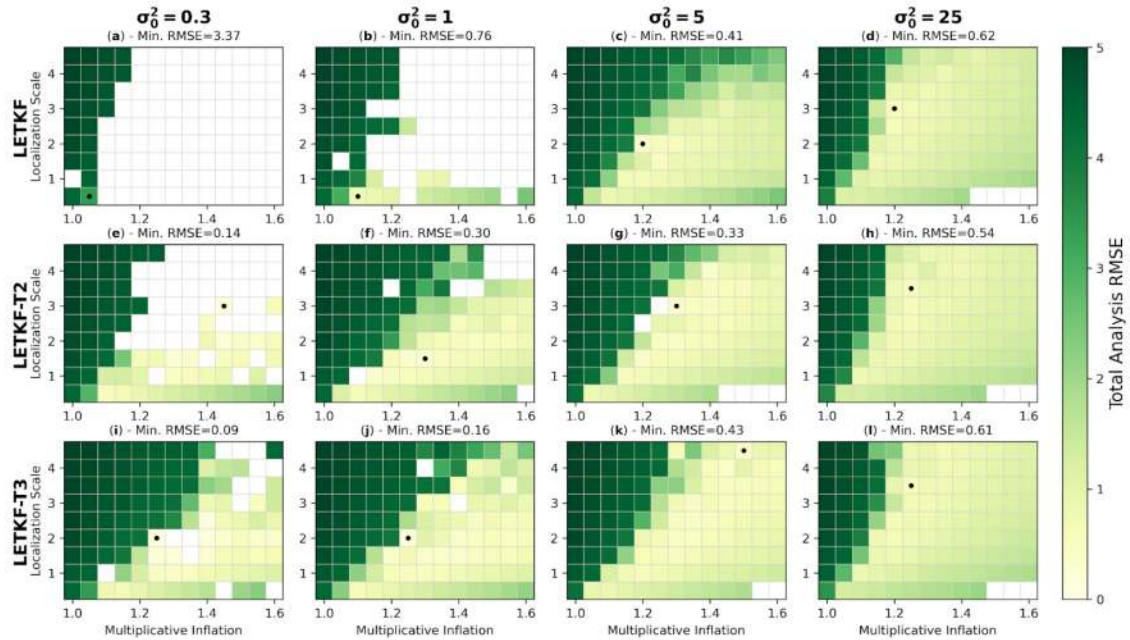


Figure 1: Time-averaged analysis RMSE as a function of multiplicative inflation (x -axis) and localization scale (y -axis), for varying σ_o^2 and assimilation configurations. Rows: LETKF (top), LETKF-T2 (middle), LETKF-T3 (bottom). Columns: increasing σ_o^2 . The black dots indicate the location of minimum RMSE for each case.

As shown in Figure 2, the tempering parameter experiments show that α_s around 2.0 typically provides more optimal results across different cases, while a uniform weighting ($\alpha_s = 0$) underperforms in comparison. Meanwhile, ensemble size experiments show that tempering outperforms traditional LETKF, especially when $N_{\text{ens}} < 40$. This agrees with the findings of Lawson and Hansen (2004), who noted that ensemble filters become increasingly suboptimal under nonlinear dynamics. The tempered filter also helps prevent

filter divergence in sparse-data settings, and when the model is not perfect (not shown), suggesting its applicability in real-world settings.

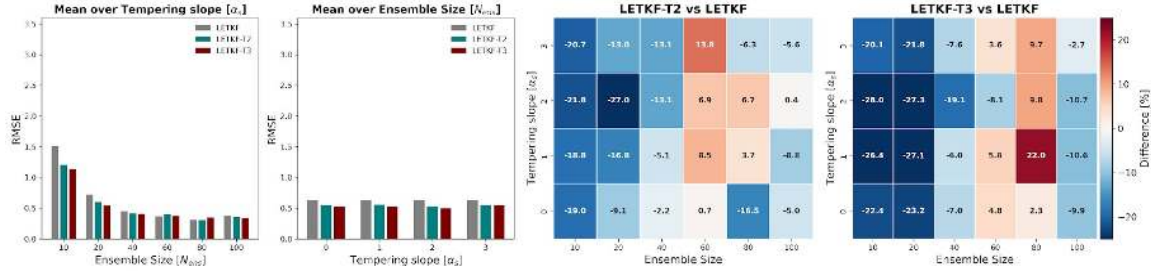


Figure 2: RMSE analysis summary for the fully observed case with $\sigma_o^2 = 5.0$. a) RMSE averaged over tempering slope α_s as a function of ensemble size. b) RMSE averaged over ensemble size as a function of α_s . Right: Relative RMSE reduction (%) from LETKF to LETKF-T2 (c) and LETKF-T3 (d). Negative values indicate improvement.

4) CONCLUSIONS

The results strongly support likelihood tempering as a practical enhancement for ensemble Kalman filters, particularly under nonlinearity and limited ensemble size. Most of the gain is achieved with only 2–3 iterations and a slope parameter α_s around 2.0. The technique stabilizes the filter, improves accuracy, and enhances robustness against both observation operator nonlinearity and model error. Tempered LETKF is a promising candidate for convective-scale and radar data assimilation systems, where traditional filters are prone to instability.

ACKNOWLEDGMENTS

This study is conducted under the SNF SPIRIT PROJECT: “UnWeather Vizard: Uncertainty Visualization and Analysis of High-Resolution Numeric Weather Forecasts” and PREVENIR project under the Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS) program jointly funded by the Japan International Cooperation Agency (JICA) and the Japan Science and Technology Agency (JST).

REFERENCES

- Carrassi, A., et al. (2018). *Data assimilation in the geosciences: An overview*. *WIREs Climate Change*, 9(5), e535.
- Kurosawa, K., & Poterjoy, J. (2021). *Data assimilation challenges posed by nonlinear operators: A comparative study*. *Monthly Weather Review*, 149, 2369–2389.
- Lawson, W. G., & Hansen, J. A. (2004). *Implications of stochastic and deterministic filters as ensemble-based data assimilation methods in varying regimes of error growth*. *Monthly Weather Review*, 132(8), 1966–1981.

APLICACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL AL PRONÓSTICO DEL TIEMPO: SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE TEMPERATURA DURANTE 2023 EN EL CENTRO-ESTE DE ARGENTINA

Lucas Zapata

lezapata@fcaglp.unlp.edu.ar

Grupo de Modelado Numérico de la Atmósfera
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - Universidad Nacional de La Plata

Palabras clave: IA, Pangu-Weather, WRF.

1) INTRODUCCIÓN

El pronóstico del tiempo es una herramienta esencial para la toma de decisiones en numerosos sectores productivos y sociales. Tradicionalmente, estos pronósticos se han basado en modelos numéricos de predicción del tiempo, que utilizan ecuaciones complejas y requieren una considerable capacidad de cómputo. En los últimos años, los avances en inteligencia artificial, han impulsado el desarrollo de nuevos modelos capaces de generar pronósticos aceptables con un costo computacional significativamente menor.

En este contexto, el presente trabajo evalúa el desempeño de Pangu-Weather (Bi, 2023) un modelo de pronóstico global basado en algoritmos de inteligencia artificial desarrollado por Huawei. El objetivo del presente trabajo fue simular y validar un año completo de pronósticos de temperatura de superficie. Para ello, se compararon los pronósticos generados por Pangu-Weather con observaciones de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y con los pronósticos obtenidos mediante el modelo WRF, evaluando su desempeño mediante métricas estadísticas.

2) METODOLOGÍA

Pangu-Weather es un modelo global de pronóstico del tiempo basado en inteligencia artificial que emplea redes neuronales profundas con una arquitectura tipo transformer tridimensional. Esta arquitectura está diseñada específicamente para el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos atmosféricos, permitiendo la generación de predicciones con alta eficiencia computacional. El modelo fue entrenado utilizando 43 años de datos del reanálisis ERA5 (Bi, 2022) del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF), y opera con una resolución espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Para el presente estudio, Pangu-Weather fue instalado en los servidores del Grupo de Modelado Numérico de la Atmósfera (MNA) de la FCAG. Allí, se llevó a cabo la simulación de un año completo (2023) de pronósticos. La simulación se configuró para generar salidas cada 6 horas, con una anticipación de 48 horas, emulando las condiciones operativas de un entorno de pronóstico real mediante la ejecución diaria de las predicciones.

La variable de interés seleccionada para este estudio fue la temperatura a 2 metros, debido a su relevancia en el monitoreo de las condiciones meteorológicas a nivel regional. La validación del desempeño de Pangu-Weather se realizó mediante la comparación de sus pronósticos con datos de observaciones obtenidos de 28 estaciones meteorológicas pertenecientes al SMN y ubicadas en la región centro-este de Argentina (Figura 1).

Adicionalmente, para evaluar el rendimiento de Pangu-Weather en relación con un modelo

numérico convencional, se realizó una comparación con WRF-ARWv4.2 (Skamarock y otros 2019) que resulta ampliamente utilizado para pronósticos locales y regionales, configurado con una resolución horizontal de 10 km. Las condiciones iniciales y de borde para las simulaciones de WRF fueron tomadas a partir de los pronósticos generados por el modelo Global Forecast System (GFS) con resolución de 0.5° cada 3 horas.

Los resultados generados fueron comparados directamente con los obtenidos por Pangu-Weather en la misma región y período. Se utilizaron diversas métricas estadísticas (Wilks, 2006) para evaluar el desempeño de ambos modelos, incluyendo: Error Absoluto Medio (MAE), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), entre otras.

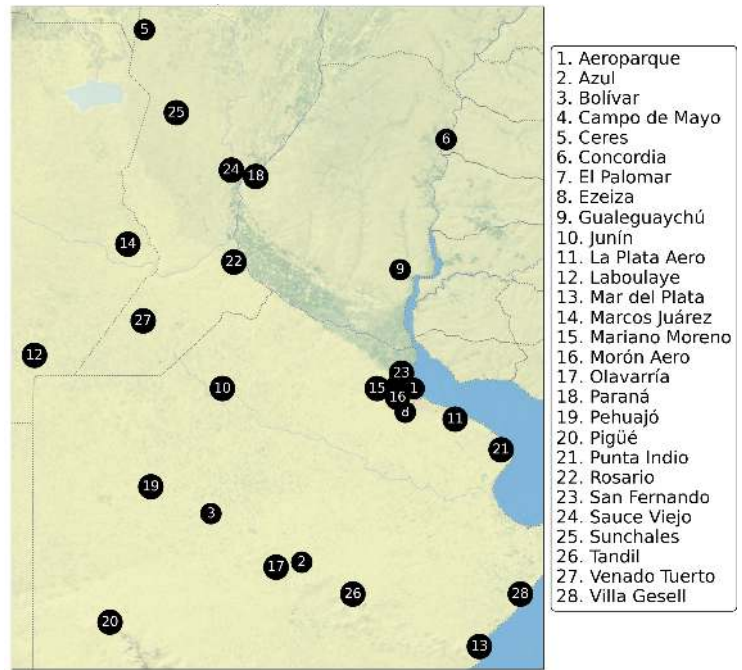


Figura 1: Mapa de estaciones meteorológicas consideradas.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - o_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2}$$

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación, se presentan los resultados del análisis de errores de temperatura para ambos modelos. En la Figura 2 se comparan el MAE y el RMSE en los pronósticos de temperatura a 2 metros cada 6 horas, para cada una de las estaciones consideradas. Se muestran los errores correspondientes a los pronósticos a 24 y 48 horas, permitiendo evaluar no sólo la precisión de cada modelo, sino también cómo evoluciona su desempeño con el horizonte temporal del pronóstico. Los resultados muestran que el modelo de inteligencia artificial Pangu-Weather (IA) presentó un mejor desempeño que el modelo WRF en la predicción de temperatura a 2 metros, tanto a 24 y como a 48 horas.

En el pronóstico a 24 horas (Figura 2 a y b), el modelo IA mostró errores menores (MAE y RMSE) en la mayoría de las estaciones, con diferencias destacadas en lugares como Sauce Viejo, Gualeguaychú y Bolívar. A 48 horas (Figura 2 c y d), ambos modelos muestran errores mayores, sin embargo, el modelo IA mantuvo un rendimiento más estable.

En la Figura 2 podemos observar que los errores del modelo IA son más homogéneos y generalmente menores, mientras que WRF presenta mayores errores, especialmente en zonas del litoral y el norte de Buenos Aires. En zonas más alejadas de la costa, los errores de ambos modelos resultan menos dispares.

Si bien aún existen desafíos en cuanto a la interpretabilidad física de los modelos de IA y su integración con sistemas atmosféricos complejos, los resultados obtenidos sugieren una capacidad que merece ser explorada en más detalle. En este marco, las estrategias híbridas que combinen IA con modelos numéricos tradicionales se perfilan como una vía prometedora

para mejorar la calidad del pronóstico del tiempo.

En conclusión, el modelo basado en IA demostró capacidad para pronosticar la temperatura con razonable exactitud y de manera eficiente, con resultados comparables y en algunos casos superiores a los del modelo WRF.

Gracias a su bajo costo computacional y buen desempeño, sugiere ser una herramienta útil para complementar sistemas de pronóstico existentes.

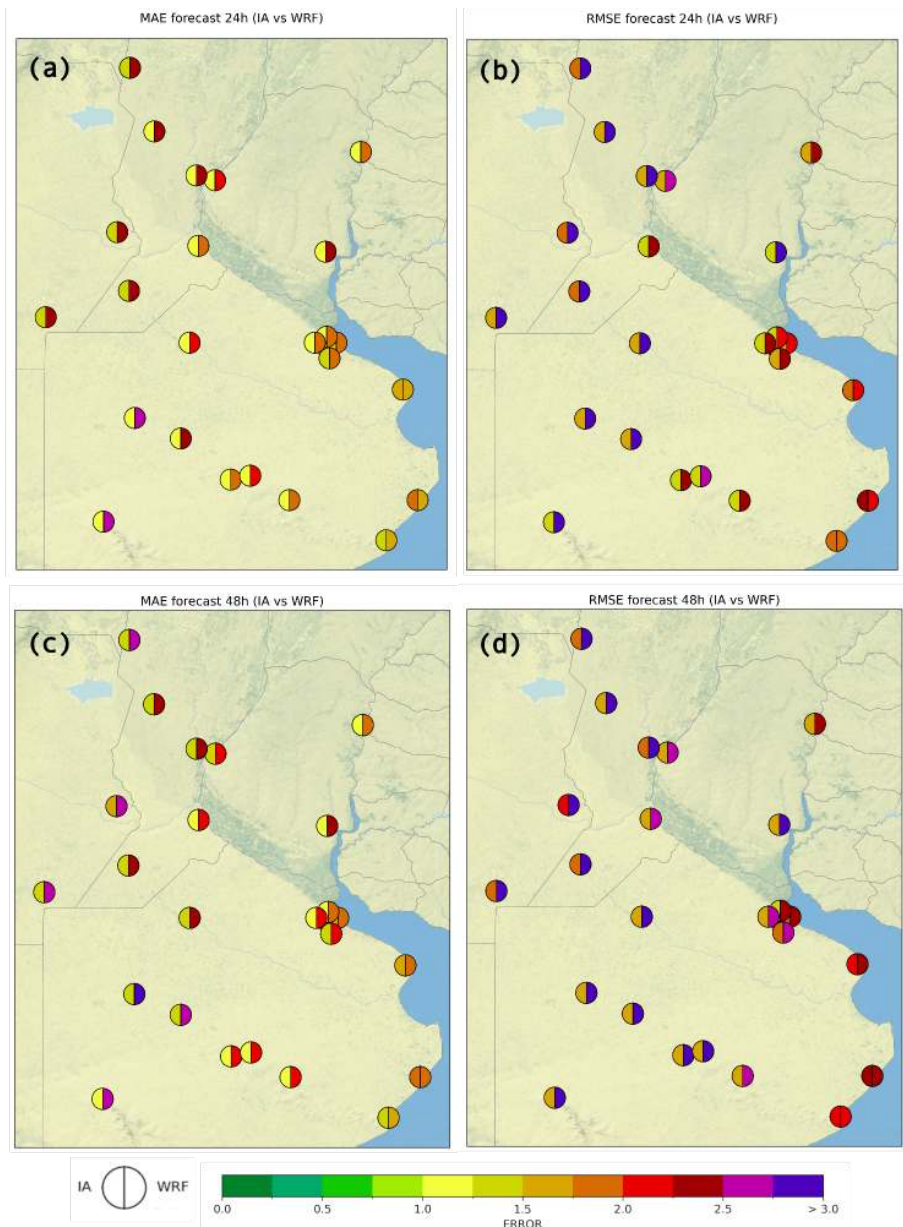


Figura 2: Comparación de MAE y RMSE en el pronóstico de temperatura a 2m, cada 6 h, para pronósticos a 24 h (a y b) y 48 h (c y d).

REFERENCIAS

Bi K., Xie L., Zhang H. y otros, 2022: Pangu-Weather: A 3D High-Resolution System for Fast and Accurate Global Weather Forecast. TECHNICAL REPORT. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02556>.

Bi K., Xie L., Zhang H. y otros, 2023: Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks. *Nature* 619, 533–538. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06185-3>.

D.S. Wilks, 2006: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second Edition. INTERNATIONAL GEOPHYSICS SERIES.

Skamarock W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J. y otros, 2019: A description of the advanced research WRF version 4. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.

IMPACTO DE LAS OBSERVACIONES EN LOS PRONÓSTICOS POR ENSAMBLE (EFSOI) DE UN EVENTO METEOROLÓGICO DE ALTO IMPACTO UTILIZANDO UN SISTEMA DE ASIMILACIÓN DE DATOS CON RESOLUCIÓN CONVECTIVA.

Gimena Casaretto^{1,2,5}, María Eugenia Dillon^{1,2}, Yanina García Skabar^{2,3}, Federico Cutraro², Paula Maldonado², Maximiliano Sacco², Juan Ruiz^{3,4,5}, Maite Cancelada^{1,2,3}, Takemasa Miyoshi⁶

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

² Servicio Meteorológico Nacional

³ Instituto Franco-Argentino para el estudio del clima y sus impactos (CNRS–IRD–CONICET–UBA)

⁴ Centro de Investigaciones del mar y la atmósfera, CONICET-UBA

⁵ Departamento de ciencias de la atmósfera y los océanos, FCEyN, UBA

⁶ iTHEMS - RIKEN Center for Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences

gcasaretto@smn.gob.ar

Palabras clave: asimilación de datos, impacto de observaciones, pronóstico del tiempo.

1 Introducción

El análisis de redes de observación en sistemas de asimilación de datos (DA) es fundamental para mejorar la precisión de los pronósticos. Para identificar las observaciones beneficiosas y perjudiciales, y promover sistemas de observación efectivos, es crucial evaluar la contribución de cada tipo de observación asimilada en un sistema DA específico.

La metodología Forecast Sensitivity to Observations Impact (FSOI) cuantifica cómo cada observación individual afecta la predicción. Kalnay et al. (2012) simplificaron y ampliaron FSOI para ensambles (EFSOI) para poder aplicar el método a cualquier variación del filtro de Kalman por ensambles, reduciendo el costo computacional. El impacto de las observaciones se define como la diferencia de errores entre dos pronósticos posteriores considerando la misma verdad de referencia, por ejemplo, el análisis u observaciones independientes (Necker et al., 2018).

El objetivo de este trabajo es cuantificar el impacto de asimilar datos de reflectividad de radar y observaciones de estaciones meteorológicas de superficie en un pronóstico convectivo sobre las Sierras de Córdoba, Argentina, utilizando EFSOI y comparar los resultados utilizando distintas métricas de error.

2 Metodología

Se implementó un sistema de asimilación de datos acoplado al modelo Weather Research and Forecasting (WRF), utilizando el Ensemble de Filtro de Kalman Localizado y Transformado (LETKF). Se utilizaron los análisis y previsiones del Global Forecast System (GFS) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica estadounidense, incluyendo las perturbaciones del ensamble, para las condiciones de contorno. El dominio se ejecutó con una resolución de 2 km y 60 niveles verticales sigma-p, con un tope del modelo fijado en 10 hPa (ver Fig. 1). Los análisis a escala convectiva se obtuvieron cada 5 minutos asimilando datos de reflectividad (dbz) del radar de banda C RMA1 y observaciones en superficie de estaciones meteorológicas automáticas (AWS), que incluyen humedad relativa (rhs), temperatura (ts), viento zonal (us) y meridional (vs), y presión en superficie (ps). Se

construyó un conjunto multifísico de 40 miembros combinando diferentes parametrizaciones de la microfísica y de la capa límite planetaria (PBL).

El experimento se realizó durante 5 horas, comenzando el 13 de diciembre de 2018 a las 23 UTC y finalizando el 14 de diciembre a las 03 UTC, para simular un evento de precipitación de alto impacto.

La contribución de cada observación asimilada en el tiempo $t=0$ a la reducción o aumento del error de pronóstico en un momento posterior se cuantifica mediante el EFSOI. El impacto de asimilar una observación (y_0) en $t=0$ se cuantifica por la diferencia de los errores de la previsión inicializada en $t=0$ y en $t=-5$ en un tiempo de evaluación determinado. Dichos errores se cuantifican en base a una métrica respecto a un campo de verificación.

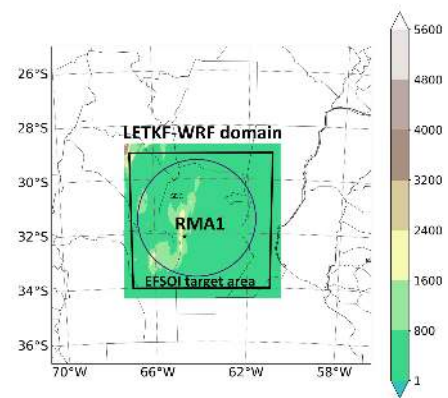
En este estudio se aplicó el error de energía MTE considerando el análisis medio del propio sistema (Err_MTE) y un análisis independiente (Err_MTEind). El análisis independiente fue obtenido utilizando 60 miembros de física múltiple, y se asimilaron observaciones del radar Doppler de banda C, manteniendo las configuraciones del sistema mencionadas previamente. A su vez, se utilizó la estimación cuantitativa de la precipitación por radar (RQPE) como valor de referencia para calcular el error de pronóstico mediante el BIAS (Err_BIAS) y el Fractions Skill Score FSS (Err_FSS).

3 Resultados y discusión

La Figura 2 muestra el porcentaje de impacto beneficioso, calculado como el cociente entre el número de observaciones beneficiosas y el total de observaciones asimiladas, según los cálculos obtenidos mediante las 4 configuraciones de EFSOI considerando los plazos de evaluación del pronóstico de 15 y 30 minutos.

Se observa que, en todas las configuraciones, las observaciones de radar presentan un porcentaje superior al 50%. Se destaca que Err_MTE muestra valores porcentuales superiores a Err_MTEind, un resultado esperado, ya que el uso del análisis propio como campo de verificación introduce un sesgo al calcular el error del pronóstico inicializado a partir del análisis propio del sistema de asimilación. Los valores de porcentaje de impacto beneficioso de Err_BIAS son los más bajos entre los experimentos, dado que se está exigiendo demasiado al pronóstico al utilizar una métrica punto a punto como medida de error en la precipitación. Sin embargo, al emplear una métrica con suavizado espacial, como el FSS en Err_FSS, los valores porcentuales se asemejan a los obtenidos en las otras configuraciones.

Al aumentar el plazo de evaluación del pronóstico de 15 a 30 minutos, las observaciones de radar disminuyen su porcentaje de impacto beneficioso en todas



las configuraciones. Los valores más elevados de porcentaje beneficioso para las observaciones de radar se encuentran para Err_FSS y el plazo de evaluación de pronóstico de 15 minutos. Esto era esperable, ya que se trata de una métrica de error más adecuada para observaciones de precipitación. Estos comportamientos no se observan para las observaciones de superficie.

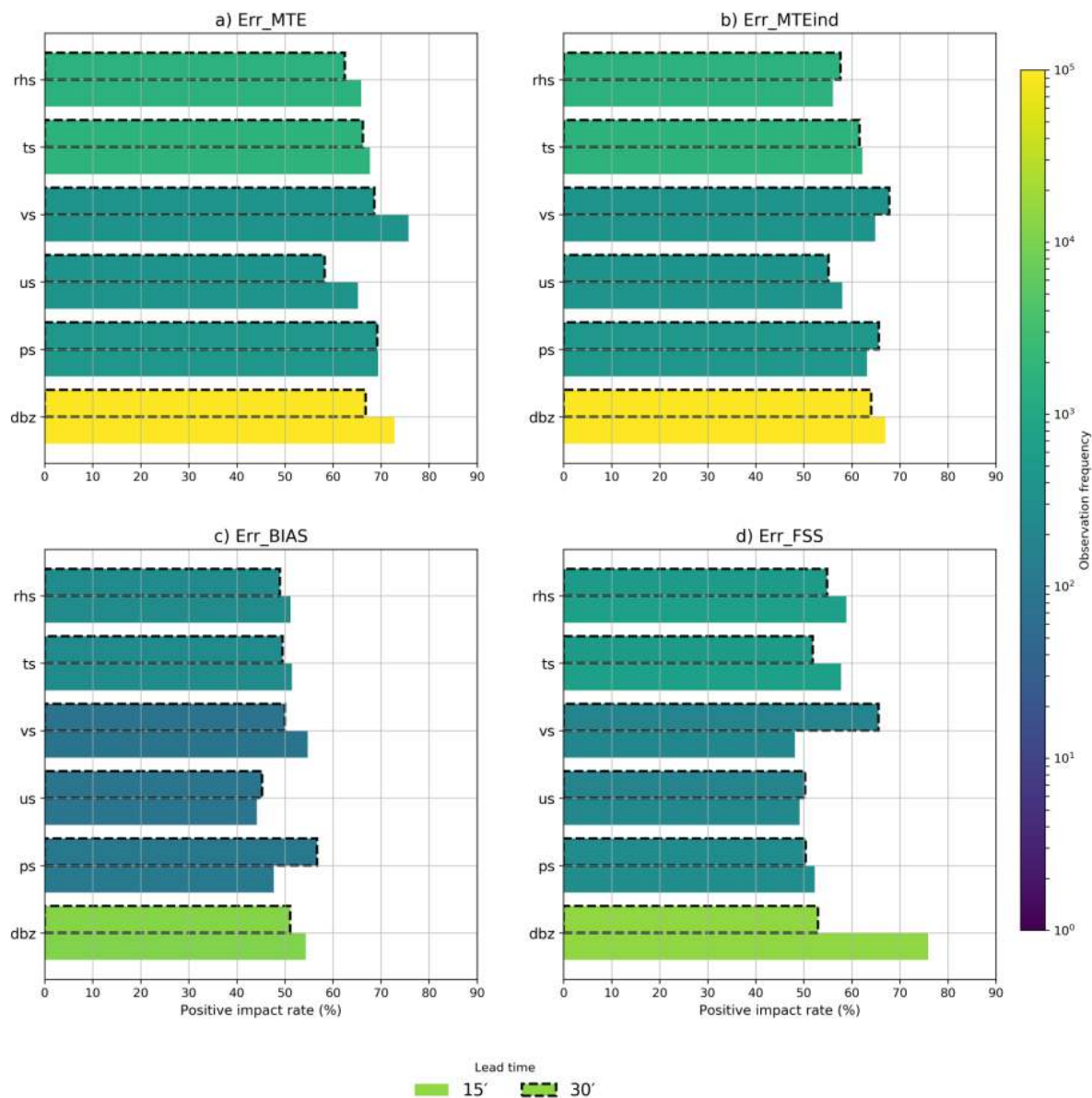


Figura 2: Porcentaje de impacto beneficioso para ambos plazos de evaluación de pronóstico 15 (sin contorno) y 30 (contorno punteado) minutos por variable de las observaciones asimiladas para las configuraciones de EFSOI(a) Err_MTE, (b) Err_MTEind, (c) Err_BIAS y (d) Err_FSS.

Referencias

Kalnay, E., Ota, Y., Miyoshi, T., Liu, J., 2012. A simpler formulation of forecast sensitivity to observations: application to ensemble kalman filters. *Tellus A: Dynam. Meteorol. Oceanogr.* 64, 18462. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.18462>.

Necker, T., Weissmann, M., Sommer, M., 2018. The importance of appropriate verification metrics for the assessment of observation impact in a convection-permitting modelling system. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 144, 1667–1680. <https://doi.org/10.1002/qj.3390>.

SIMULACIÓN DE UN CASO DE MCS EN LA REGIÓN CENTRAL ARGENTINA UTILIZANDO DIFERENTES PARAMETRIZACIONES DE MICROFÍSICA DE NUBES CON WRF

Guillermina P. Anasimele^{1,2}, Lucas Zapata³
ganasi@fcaglp.unlp.edu.ar

¹ Centro de Meteorología espacial, Atmósfera terrestre, Geodesia, Geodinámica, diseño de Instrumental y Astrometría (MAGGIA), Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG), Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina

³ Grupo de Modelado Numérico de la Atmósfera (MNA) FCAG-UNLP

Palabras clave: Modelado numérico, sistema convectivo de mesoescala, momentos.

1) INTRODUCCIÓN

Los sistemas convectivos de mesoescala (MCS) tienen un impacto significativo en la población y representan un desafío para el modelado numérico atmosférico, ya que involucran fenómenos extremos difíciles de representar por las parametrizaciones físicas de los modelos. Esto se debe a que integran una amplia variedad de complejos procesos en diferentes escalas temporales y espaciales, que abarcan desde la microfísica de nubes hasta la dinámica atmosférica regional.

Entre las distintas parametrizaciones físicas que se utilizan en los modelos, las de microfísica de nubes cumplen un papel fundamental en la representación de los MCS. En general, estas parametrizaciones se pueden clasificar en esquemas de un momento (1mom) y de dos momentos (2mom), aunque también existen variantes más complejas. Las de un momento modelan únicamente la masa de mezcla de cada tipo de hidrometeoro, mientras que las de dos momentos la predicen de manera simultánea junto con la concentración del mismo, permitiendo que la solución numérica evolucione en el espectro del tamaño. Esto repercute en la representación de la formación de la precipitación y otros procesos como la interacción entre fases. Simulaciones de un mismo evento meteorológico pueden presentar grandes diferencias si se aplica una u otro tipo de parametrización, principalmente afectando las distribuciones para parámetros como la temperatura de tope de nube (CTT), la reflectividad máxima (mdbz) y la precipitación (rainnc). (Morrison et al., 2009)

El objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño de parametrizaciones de microfísica de nubes de uno y dos momentos mediante una serie de simulaciones con el modelo WRF, aplicadas a un caso de estudio de MCS. El análisis se centra en la representatividad de los parámetros de interés ya mencionados.

2) CASO DE ESTUDIO

Durante los días 13 y 14 de diciembre de 2018, un MCS impactó de manera significativa principalmente en la región central de Argentina y Uruguay, donde se registraron tormentas localmente severas, fuerte actividad eléctrica, con registros de fenómenos ópticos en la

atmósfera superior (Transient Luminous Events, TLEs), abundante caída de agua en cortos períodos, ráfagas intensas y caída de granizo (liso de más de 50 mm de diámetro). También se registraron inundaciones, principalmente en las provincias de Córdoba, Buenos Aires y en distintas regiones de Uruguay.

Para las simulaciones con WRF se utilizaron como condiciones iniciales y de borde los análisis del modelo *Global Forecast System* (GFS) con resolución 0.25°. Se configuraron dos dominios anidados: D01, con una resolución de 9km, y D02, con una resolución de 3km, centrados en Córdoba, Argentina.. Se obtuvieron simulaciones horarias para un período que abarca desde el día 12 de diciembre de 2018, 18:00 UTC al 15 de diciembre, 00:00 UTC. Se realizaron dos grupos de simulaciones enfocados en la aplicación de parametrizaciones microfísicas: en el primer grupo se aplicaron los esquemas de un momento *Aerosol-aware & Hail/Graupel/Aerosol Thompson* (TAA) (Thompson and Eidhammer, 2014) y *WRF Single-moment 6-class* (WSM6) (Hong and Lim, 2006); luego, en el segundo grupo de simulaciones se utilizaron los esquemas *Morrison 2-moment* (M2) (Morrison et al., 2009) y *WRF Double Moment 6-class* (WDM6) (Lim and Hong, 2010).

Las estimaciones de CTT y mdbz obtenidas con WRF se contrastaron cualitativamente con mapas de infrarrojo de onda larga de GOES-16, canal 13 y mosaicos de reflectividad de radares, extraídos del repositorio de la misión Relámpago. Las estimaciones de precipitación fueron contrastadas con datos observacionales provenientes de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

3) PRIMEROS RESULTADOS

Se compararon las estimaciones horarias correspondientes al dominio D02 de las parametrizaciones TAA (1mom) y M2 (2mom) para el período que abarca desde la 01:00 UTC a las 07:00 UTC.

En la Figura 1 se muestra una comparación de las estimaciones del parámetro CTT donde puede observarse que en gran parte del área de interés, el esquema TAA tendió a subestimar los valores mostrados por el satélite, mientras que los resultados del esquema M2 fueron más representativos de la distribución real. Esta tendencia también se repite en las estimaciones de rainnc cuando se compara con la precipitación acumulada en 24 hs a partir del 13-12-2018 09:00 UTC. En cambio, para el parámetro mdBZ, las simulaciones que utilizan el esquema M2 tienden a sobreestimar los valores registrados en los datos de radar.

Los primeros resultados obtenidos indican que, en el caso de los esquemas de un momento analizados, se ve limitada la representación de la temperatura de tope de nube para este caso de estudio particular. Sin embargo, se observa una mejora en la estimación de la reflectividad máxima durante la hora de mayor intensidad de la tormenta.

Por otro lado, las simulaciones que utilizan esquemas de dos momentos tienden a sobreestimar la reflectividad máxima, aunque logran una mejor representación de la precipitación.

Si bien los esquemas de doble momento ofrecen un desempeño razonablemente bueno, lo hacen a un costo computacional más alto en términos de tiempo de simulación y uso de recursos. La elección entre uno u otro dependerá tanto de los objetivos específicos del estudio como de los recursos computacionales disponibles.

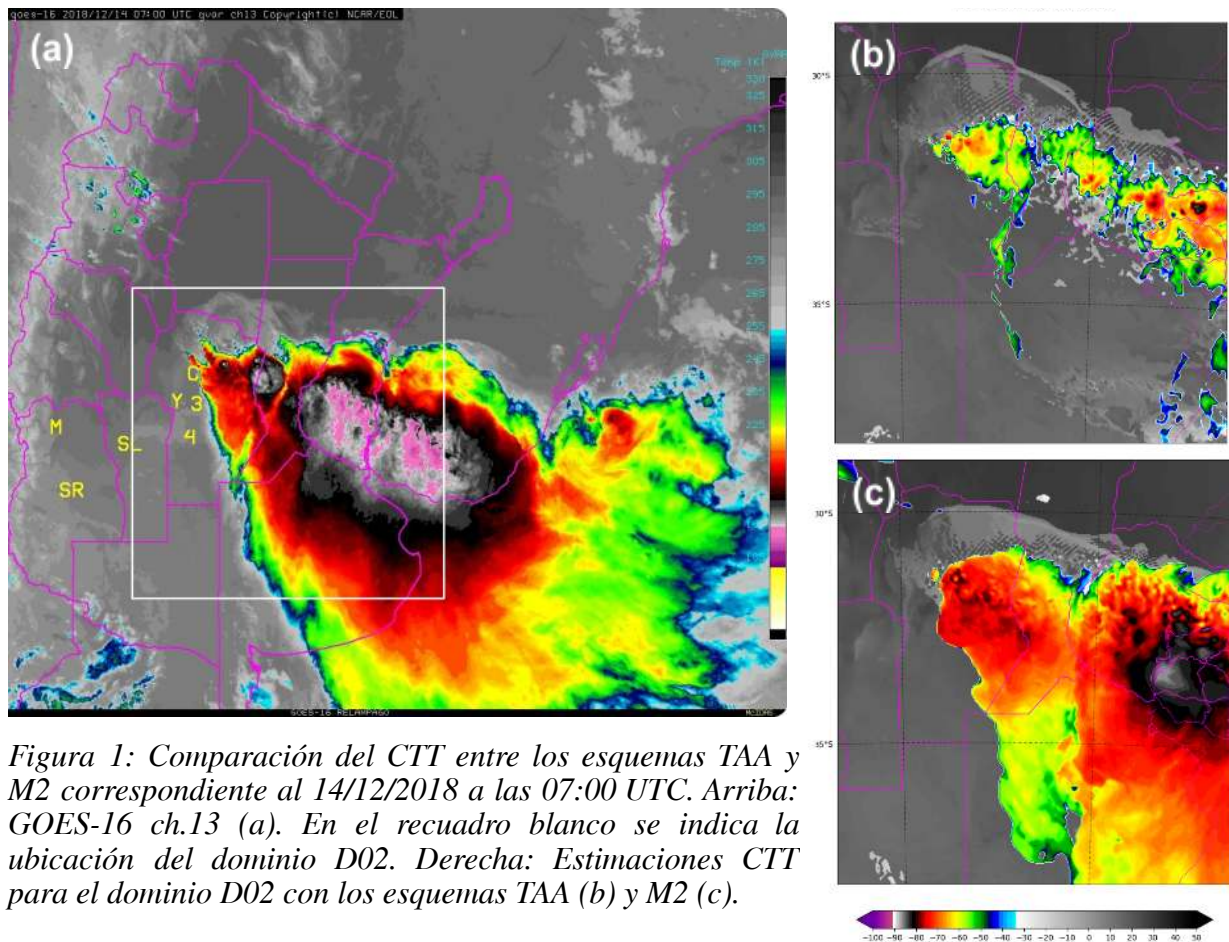


Figura 1: Comparación del CTT entre los esquemas TAA y M2 correspondiente al 14/12/2018 a las 07:00 UTC. Arriba: GOES-16 ch.13 (a). En el recuadro blanco se indica la ubicación del dominio D02. Derecha: Estimaciones CTT para el dominio D02 con los esquemas TAA (b) y M2 (c).

RECONOCIMIENTOS

Los resultados del presente estudio fueron realizados como parte de los trabajos prácticos del curso de Modelado Numérico de la Atmósfera dictado en la FCAG en 2024.

REFERENCIAS

Hong S.-Y. y Lim J.-O. J., 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129–151.

Lim, K.-S. S., y Hong S.-Y., 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587–1612.

Morrison H., Thompson G. y Tatarskii V., 2009: Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 991–1007.

Thompson G. y Eidhammer T., 2014: A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **71.10**, 3636–3658.

LA CIUDAD DE BUENOS AIRES Y EL CAMBIO CLIMÁTICO: IMPACTOS POTENCIALES DE LA GEOINGENIERÍA SOLAR COMO ESTRATEGIA DE ACCIÓN CLIMÁTICA

Inés Camilloni^{1,2,3}, Gabriela Raggio¹, Malena Lozada Montanari^{1,2,3},
Ana Belén Sánchez Schütze^{1,2,3}, Rafael Seoane⁴
ines@cima.fcen.uba.ar. Autor/a correspondiente.

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina

⁴Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Veterinarias, Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua (CETA). Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: Cambio climático, intervención climática, Buenos Aires

1) INTRODUCCIÓN

En diciembre de 2015, la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) propuso a través del Acuerdo de París que los países implementen acciones con el objetivo de mantener el calentamiento global por debajo de 2°C respecto al período preindustrial, y apeló a que se realicen esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1,5°C. Sin embargo, existe una preocupación creciente acerca de la efectividad del Acuerdo de París para contener las emisiones de gases de efecto invernadero y en consecuencia el calentamiento global por debajo de los límites que establece, ya que las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) actuales no serían suficientes (United Nations Environment Programme, 2024). En este contexto, la geoingeniería solar y en particular la Modificación de la Radiación Solar (MRS) a partir de la inyección de aerosoles en la estratósfera es propuesta como una intervención a corto plazo y en paralelo con la reducción de emisiones que podría limitar el aumento de la temperatura global y, en consecuencia, los efectos negativos de la interferencia antropogénica en el sistema climático (MacMartin et al., 2018). Sin embargo, la MRS plantea, además de cuestiones éticas, morales y de gobernanza, numerosos interrogantes acerca de sus potenciales efectos. En este trabajo se evalúan los riesgos y beneficios que esta tecnología aportaría al clima urbano de Buenos Aires en comparación con los del cambio climático actual y previsto.

2) METODOLOGÍA

La MRS a través de la inyección aerosoles en la estratósfera introduce cambios en las condiciones atmosféricas que en este estudio son cuantificados y evaluados para la ciudad de Buenos Aires mediante el *downscaling* estadístico de las simulaciones climáticas del proyecto ARISE-SAI-1.5 (Richter et al. 2022). Estas simulaciones se realizaron con un conjunto de 10 experimentos usando el modelo climático CESM2 con el componente atmosférico WACCM6 y fueron diseñadas para ser relevantes en el contexto del Acuerdo de París, ya que su objetivo es mantener gracias a la MRS la temperatura global en ~1,5°C por encima de los niveles preindustriales bajo el escenario de emisiones intermedio SSP2-4.5. La estrategia de MRS utilizada en el proyecto ARISE-SAI-1.5 consiste en la inyección de dióxido de azufre en cuatro puntos (15°S, 15°N, 30°S, 30°N) a 21,5 km de altura entre los años 2035 y 2069.

La información cuantitativa sobre los efectos en el clima de Buenos Aires bajo escenarios con y sin MRS es estimada a partir de la aplicación de diferentes metodologías estadísticas de

downscaling y corrección de sesgo (DQM: *Detrended Quantile Matching*, EQM: *Empirical Quantile Mapping*, QDM: *Quantile Delta Mapping*, Scaling, LOCI: *Local intensity scaling of precipitation* y PTR: *Power transformation of precipitation*) a las simulaciones de ARISE-SAI-1.5. Para cada variable (temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación) se seleccionaron los tres métodos de *downscaling* que proveen los mejores ajustes a los datos observados en la estación Buenos Aires Observatorio Central en el período 1998-2014. La selección fue realizada considerando diferentes métricas (tendencias, promedios, RMSE, etc.) resultando los métodos DQM, EQM y Scaling para las temperaturas mínima y máxima, y DQM, EQM y PTR para la precipitación. A partir de los datos corregidos se computaron los escenarios de clima futuro medio y extremo para Buenos Aires con y sin MRS para dos intervalos de tiempo futuro: 2035-2049 y 2055-2069. Para caracterizar los extremos de temperatura y precipitación se consideraron los índices TNx (máxima temperatura mínima diaria del año), SU (número de días de con temperatura máxima superior a 25°C) y R20mm (número de días con precipitación mayor a 20 mm) propuestos por el Equipo de Expertos en Detección e Índices del Cambio Climático (ETCCDI, Zhang et al. 2011).

3) RESULTADOS

La implementación de la MRS según la estrategia propuesta por el proyecto ARISE-SAI-1.5 muestra un efecto de enfriamiento o “calentamiento evitado” a nivel regional que alcanza 1°C en el período 2055-2069 tanto para la temperatura mínima como para la temperatura máxima y se reduce a aproximadamente 0,5°C para el corto plazo (Figura 1). Asimismo, el escenario sin MRS está asociado a más precipitación que el que incluye MRS particularmente en 2055-2069 pero este efecto no es significativo estadísticamente en el área donde está emplaza Buenos Aires.

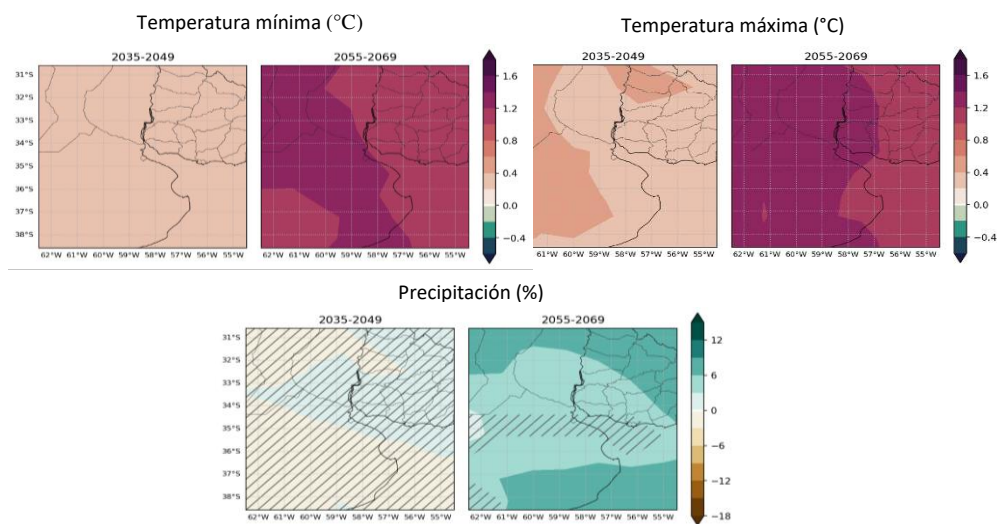


Figura 1. Diferencia en los promedios anuales de la temperatura mínima (°C), la temperatura máxima (°C) y la precipitación (%) entre el escenario de emisiones sin MRS y con MRS a corto plazo (2035-2049) y mediano plazo (2055-2069). Las líneas indican las zonas donde la diferencia no es significativa estadísticamente.

La evolución anual de las temperaturas mínima y máxima, la precipitación y los índices de extremos TNx, SU y R20mm bajo los escenarios con y sin MRS para el período 2035-2069 se presentan en la Figura 2. Para cada variable se indican los valores computados por los tres métodos estadísticos de *downscaling* y corrección de sesgo seleccionados en cada caso encontrándose que la dispersión asociada a éstos es menor para las variables térmicas que para las de precipitación en ambos escenarios. Asimismo, el efecto de enfriamiento o “calentamiento

evitado” de la MRS es significativo en las temperaturas mínima y máxima y en el índice SU, mientras que el efecto sobre la precipitación es menos evidente (Tabla 1).

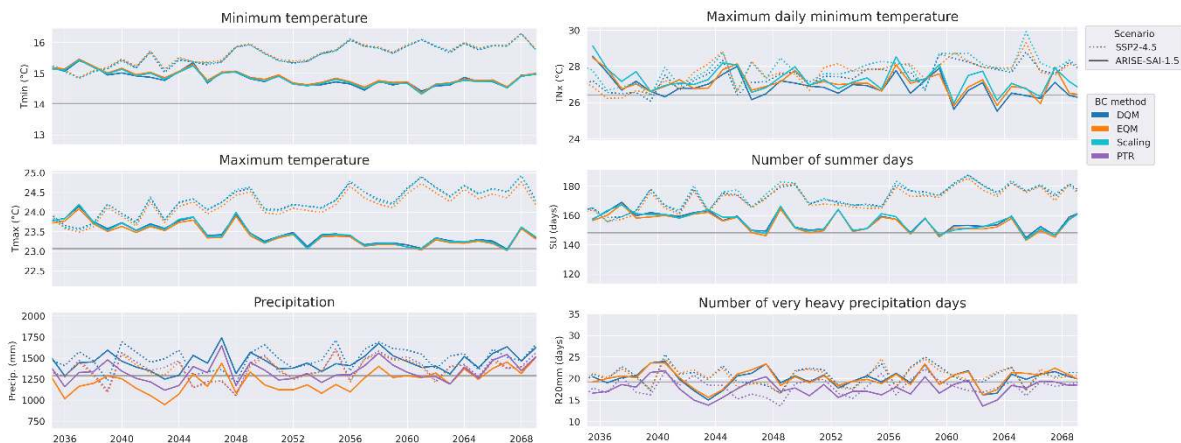


Figura 2: Evolución de los valores anuales de las temperaturas mínima y máxima, la precipitación y los índices de extremos TNx, SU y R20mm bajo escenarios con y sin MRS para el período 2035-2069.

Período	Tmín (°C)	Tmáx (°C)	Precip (%)	TNx (°C)	SU (días)	R20mm (días)
2035-2049	0,3	0,4	1	0	10	2
2055-2069	1,2	1,2	7	1,2	23	5

Tabla 1. Diferencia entre los promedios anuales de las temperaturas mínima y máxima, la precipitación y los índices de extremos TNx, SU y R20mm bajo escenarios con y sin MRS para el período 2035-2069 para la ciudad de Buenos Aires. Se indica en negrita las diferencias significativas estadísticamente.

4) CONCLUSIONES

La aplicación de métodos de *downscaling* y corrección del sesgo mejora la representación del clima medio y extremo de Buenos Aires. Los resultados obtenidos permiten estimar que el calentamiento evitado en el escenario con MRS en comparación con el escenario sin MRS es de 0,3°C (0,4°C) para la temperatura mínima (máxima) a corto plazo y de 1,2°C a mediano plazo. También se esperan efectos de enfriamiento significativos si se implementa la MRS a través de la reducción de los días de verano y de la temperatura mínima máxima diaria (sólo a medio plazo). El escenario sin MRS es más húmedo que el escenario con MRS a corto y mediano plazo, y el número de días con precipitaciones intensas (mayores a 20 mm) es mayor en el escenario sin MRS. Sin embargo, estas diferencias no son estadísticamente significativas.

REFERENCIAS

- MacMartin, D.G., Ricke, K.L. y Keith, D.W., 2018: Solar geoengineering as part of an overall strategy for meeting the 1.5°C Paris target. *Phil. Trans. R. Soc. A*.37620160454
- Richter, J. H., Vioni, D., MacMartin, D. G., Bailey, D. A., Rosenbloom, N., Dobbins, B., Lee, W. R., Tye, M., y Lamarque, J.-F., 2022: Assessing Responses and Impacts of Solar climate intervention on the Earth system with stratospheric aerosol injection (ARISE-SAI): protocol and initial results from the first simulations, *Geosci. Model Dev.*, 15, 8221–8243, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8221-2022>.
- United Nations Environment Programme, 2024: Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments. Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>.
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P.D., Klein Tank, A., Peterson, T.C., Trewin, B. and Zwiers, F.W., 2011: Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*, 2, 851-870, doi:10.1002/wcc/147.

PROTOTIPO DEL SISTEMA DE ACTUALIZACIÓN RÁPIDA DE ASIMILACIÓN DE DATOS Y PRONÓSTICO NUMÉRICO DEL PROYECTO PREVENIR: APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO

María Eugenia Dillon^{1,2}, Paula Maldonado¹, Juan Ruiz^{3,4,5}, Arata Amemiya⁶, Federico Cutraro¹, Jorge Gacitua Gutierrez³, Gimena Casaretto^{1,2,4}, Cynthia Matsudo¹, Maximiliano Sacco¹, Emanuel Alfie⁴, Manuel Pulido⁷, Yanina García Skabar¹, Takemasa Miyoshi⁶
mdillon@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Centro de Investigación del Mar y la Atmósfera (CIMA)

⁴Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (UBA)

⁵Instituto Franco-Argentino para el estudio del clima y sus impactos (UMI-IFAECI/CNRS)

⁶THEMS-RIKEN Center for Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences cluster for Pioneering Research

⁷IMIT (CONICET-U. Nacional del Nordeste)

Palabras clave: PREVENIR, pronóstico numérico, precipitación

1) INTRODUCCIÓN

PREVENIR es un proyecto de cooperación entre Argentina y Japón (2022-2027) cuyo objetivo es desarrollar un sistema de alerta temprana enfocado en los impactos causados por precipitación intensa e inundaciones urbanas. En la actualidad, el Sistema de Asimilación y Pronóstico numérico del tiempo del Servicio Meteorológico Nacional (SAP.SMN) consiste de pronósticos determinísticos y probabilísticos de 4 km de resolución horizontal, inicializados 4 veces al día en una región que abarca el sur de Sudamérica (Matsudo et al., 2022; 2025). Con el fin de obtener pronósticos más precisos y con una mayor frecuencia de actualización, en el marco de PREVENIR se está desarrollando un sistema de asimilación de datos de actualización rápida con una resolución temporal y espacial mayor a la del SAP.SMN, poniendo el foco en las cuencas de Sarandí Santo Domingo (SSD) (provincia de Buenos Aires) y Suquía Villa Paez (SVP) (provincia de Córdoba).

Utilizando el método Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF; Hunt et al, 2007) y los modelos Weather Research and Forecasting (WRF) y Scalable Computing for Advanced Library and Environment (SCALE), se llevaron a cabo dos casos de estudio en los que se encontraron tanto resultados alentadores como algunas limitaciones en el diseño y la evaluación del sistema (Dillon et al, 2024).

El objetivo de este trabajo es proponer un sistema LETKF-WRF con características más ajustadas al problema y mostrar su desempeño para un nuevo caso de estudio.

2) CASO DE ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Entre el 19 y el 22 de marzo de 2024 se registraron distintos sistemas precipitantes que afectaron la cuenca de SSD, produciendo evacuaciones en algunas áreas. En particular, el día 19 por la tarde se formó una supercelda de larga duración en la provincia de Buenos Aires que fue avanzando en dirección este-noreste entre las 18 y las 23 UTC, dejando en su camino granizo, precipitación y ráfagas de hasta 100 km/h (Figura 1c). En la figura 1a se muestra la reflectividad máxima de la columna del radar RMA2 para las 23 UTC del 19, cuando el

sistema estaba llegando a la cuenca, mientras que en la figura 1b se presenta la precipitación acumulada entre las 19:30 UTC del 19 de marzo y las 00 UTC del 21 de marzo estimada por radar (RQPE), que alcanza valores de 90 mm dentro del área de SSD.

En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo diario de las simulaciones. Los pronósticos probabilísticos SAP.SMN-ENS a 48 horas se inicializan cada 6 horas a partir de análisis regionales generados con frecuencia

horaria con el sistema WRF-LETKF, en un esquema cíclico parcial que todos los días a las 12 UTC vuelve a tomar como condiciones iniciales los análisis globales del GFS/GEFS. Las observaciones asimiladas son las de estaciones de superficie (automáticas y convencionales), barcos y boyas, aviones, radiosondeos, estimaciones satelitales de viento (ASCAT, GOES), perfiles satelitales de temperatura y humedad (AIRS, NUCAPS, GOES), reflectividad de radares.

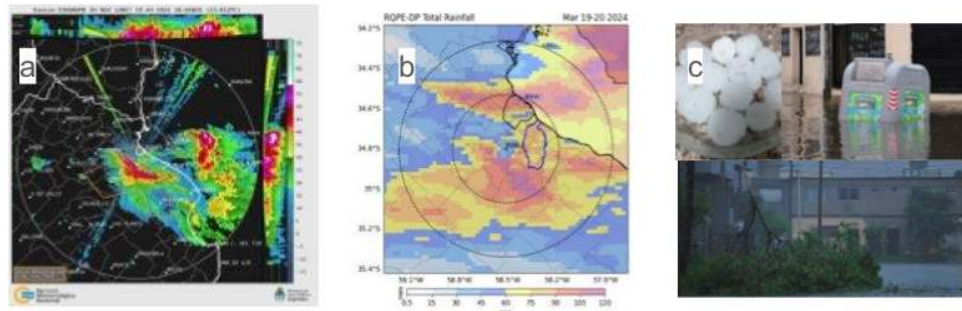


Figura 1. Reflectividad máxima de la columna [dBZ] a las 23 UTC del 19/03/24 (a) y estimación cuantitativa de precipitación por radar [mm] acumulada entre las 19:30 UTC del 19 de marzo y las 00:00 UTC del 21 de marzo de 2024 (b), del radar RMA2. Imágenes de impactos registrados en artículos periodísticos (c).

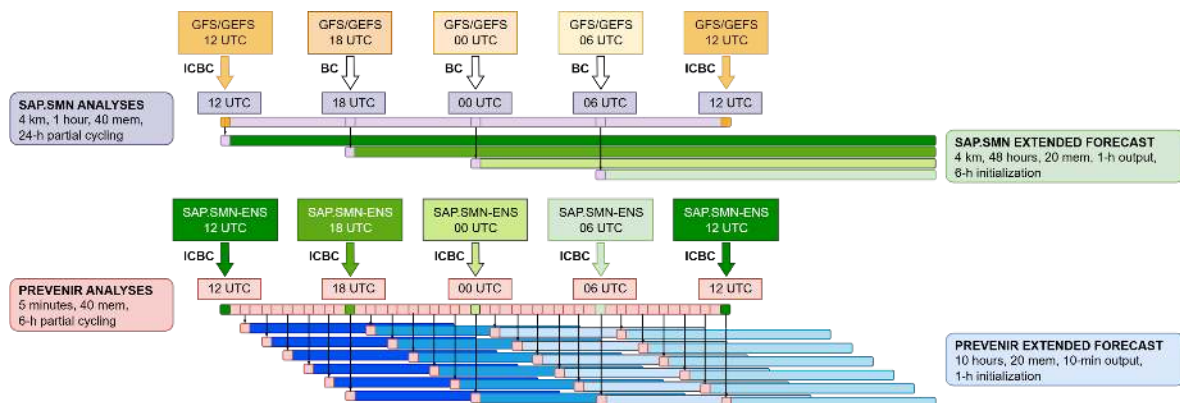


Figura 2. Esquemas de los sistemas de asimilación y pronóstico por ensemble operativo (SAP.SMN) y propuesto para PREVENIR (ver el texto para más detalles).

Para el sistema prototipo de PREVENIR se propone utilizar dichos pronósticos como condiciones de borde en un dominio que abarque las dos cuencas piloto (Figura 3). Se plantea realizar análisis cada 5 minutos asimilando datos de radar (reflectividad y velocidad Doppler) y de estaciones de superficie automáticas (temperatura, humedad, viento, presión de superficie), en un esquema cíclico parcial que cada 6 horas vuelve a tomar como condiciones iniciales los análisis del SAP.SMN. A su vez, se generarán pronósticos a 10 horas con frecuencia horaria. La resolución horizontal será de entre 2 y 3 km, dependiendo de los recursos computacionales y los tiempos operativos requeridos.

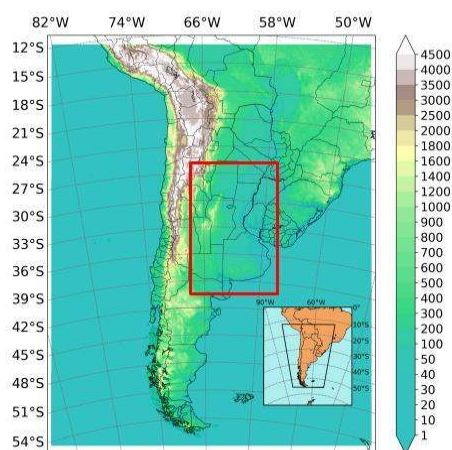


Figura 3. Dominio del SAP.SMN y del sistema PREVENIR (contorno rojo). Topografía [m] en sombreado.

3) RESULTADOS

En la Figura 4 se muestran resultados de experimentos preliminares en donde se compara la estructura de niveles bajos simulada por un sistema WRF-LETKF de 4 km similar al SAP.SMN, y dos sistemas WRF-LETKF con las características descritas en la sección 2 para el prototipo de PREVENIR utilizando resoluciones de 2.5 y 2 km. Se observa que con 4 km no se logra representar el sistema convectivo que ya se estaba desarrollando en la región. Mientras que al aumentar la frecuencia de asimilación (de 60 a 5 minutos) y la resolución espacial (tanto a 2 como a 2.5 km), las características del sistema convectivo son simuladas. También se vio una mejora sustancial en el pronóstico de la precipitación del prototipo de PREVENIR en comparación del SAP.SMN (no mostrado).

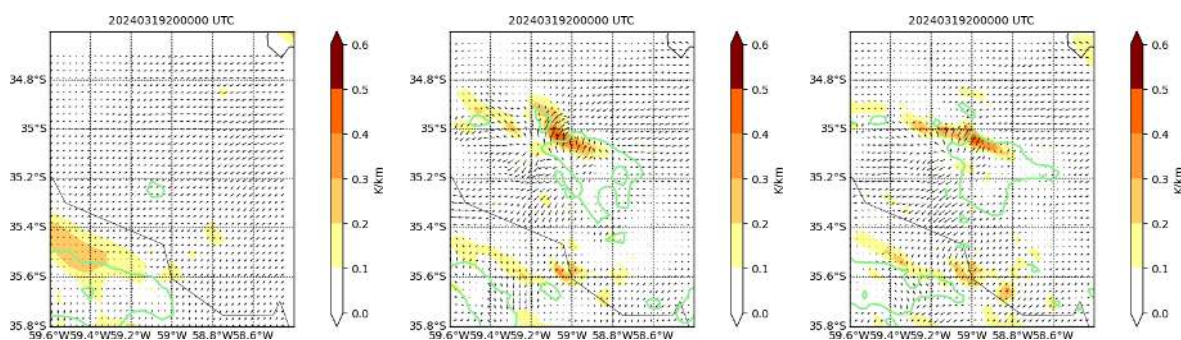


Figura 4. Análisis medio válido a las 20 UTC del 19/03/24 de sistemas WRF-LETKF con resolución horizontal de 4, 2.5 y 2 km (paneles izquierdo, central y derecho, respectivamente). Gradiente horizontal de T2m (sombreado), vectores de viento en 10m, contorno de 30 dbZ en 2000m de altura.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha realizado en el marco del Proyecto PREVENIR (prevenir.smn.gob.ar)

REFERENCIAS

- Dillon, M.E., y coautores, 2024:** Development of a rapid-update big data assimilation and short-range numerical weather prediction system in the context of the PREVENIR Project. PREVENIR Reunión sobre sistemas de alerta temprana para inundaciones repentinas. Buenos Aires, 7 al 9 de agosto de 2024.
- Hunt, B.R., Kostelich E.J., Szunyogh I., 2007:** Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, 230, 112-126, doi:10.1016/j.physd.2006.11.008
- Matsudo, C., García Skabar Y., Righetti S., Cutraro F., Sacco M., Dillon M.E., Alvarez Imaz M., Maldonado P., Salles A., 2022:** Sistema de Asimilación y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: componente operativa. CONGREMET XIV.
- Matsudo, C., Maldonado P., Dillon M.E., Casaretto G., Sacco M., Cutraro F., Righetti S., Alvarez Imaz M., García Skabar Y., Ruiz J., Osorio S., 2025:** Evaluación del Sistema de Asimilación y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: impacto de los análisis regionales en la inicialización del pronóstico por ensambles. Nota Técnica SMN 2025-193.

VERIFICACIÓN DE LOS PRONÓSTICOS SEMANALES DE TEMPERATURA MEDIA GENERADOS CON LA TÉCNICA DE REGRESIÓN POR ANÁLOGOS

Laura S. Aldeco^{1,2}, Ramón de Elía¹, Juan J. Ruiz^{3,4}
aldeco@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional.

² Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

³ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA.

⁴ Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET/FCEyN-UBA

Palabras clave: Pronóstico semanal, Calibración, Verificación

1) INTRODUCCIÓN

Los pronósticos semanales son de gran valor socioeconómico para sectores como la agricultura y la energía, lo que impulsó a los centros climáticos globales y a los servicios meteorológicos a desarrollarlos en respuesta a sus necesidades, generando pronósticos en plazos de 4 semanas o más. Pero como el desempeño de los modelos numéricos disminuye a medida que aumenta el plazo de pronóstico, el uso de ensambles es la mejor manera de trabajar con pronósticos en estos plazos (Kalnay, 2003). Sin embargo, las salidas en crudo de los modelos numéricos por ensamble también presentan errores debidos a la presencia de imperfecciones en los modelos, ya que los métodos de pronósticos por ensambles actuales no son capaces de representar adecuadamente la presencia, evolución e interacción de las diferentes fuentes de incertidumbre dentro del pronóstico. Una forma de abordar esta problemática es mediante métodos de calibración basados en un post-procesamiento estadístico que incorpora dichas fuentes de incertidumbre a posteriori. Este post-procesamiento estadístico se utiliza de manera cada vez más extendida en los servicios meteorológicos del mundo con el fin de reducir los errores sistemáticos provenientes de los modelos (Vannitsem y otros, 2021). Sobre nuestra región, estudios de estas características fueron realizados por Righetti y otros (2024), entre otros, quienes aplicaron diferentes técnicas de calibración a pronósticos diarios de temperatura y precipitación, logrando así mejorar la calidad de los mismos. Por otro lado, en la escala semanal, Aldeco y otros (2022) calibraron pronósticos semanales de precipitación y Godoy y Cutraro (2024) calibraron temperaturas máxima y mínima en plazos de hasta 2 semanas, obteniendo una notable mejora en el desempeño de los pronósticos. Para que una calibración sea robusta, es necesario tener una buena estadística de los errores sistemáticos, lo cual requiere un historial extenso de pronósticos, como los pronósticos retrospectivos (Hamill y otros, 2006). Tanto en Aldeco (2011) como en Ruiz y otros (2018) se documentó la ventaja que representa utilizar pronósticos calibrados con la técnica de regresión por análogos respecto de utilizar las salidas de pronósticos sin calibrar. El objetivo de este trabajo es verificar los pronósticos de temperatura media operativos en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), generados mediante la técnica de regresión por análogos, y analizar su desempeño en el período 2021-2024.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para la aplicación de la técnica de análogos se utilizaron una base de datos de pronósticos retrospectivos y una base de datos observados en estaciones meteorológicas del SMN y del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Los pronósticos retrospectivos utilizados corresponden al GEFS (Global Ensemble Forecast System) versión 12 del Centro Nacional de Predicciones Ambientales (NCEP) de EE.UU., (<https://noaa-gefs->

retrospective.s3.amazonaws.com/index.html). Los mismos cuentan con un ensamble de 5 miembros, una resolución espacial horizontal de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 25 niveles verticales y son inicializados una vez al día a las 00Z. Por otro lado, los datos observados utilizados son de temperatura media semanal para 125 estaciones meteorológicas. La semana 1 de pronóstico se cuenta como el promedio semanal de los días 1 al 7 de plazo, mientras que para la semana 2 se utilizan los días 8 al 14. La longitud de la base de datos de pronósticos retrospectivos y de observaciones es de 20 años, en el período 2000-2019. Una ventaja de utilizar la técnica de regresión por análogos es que calibra los pronósticos a medida que los va generando (Aldeco, 2011).

Para verificar los pronósticos de temperatura media semanal se calculó, por un lado, el coeficiente de correlación de Pearson de anomalías, o CORA por sus siglas en inglés, y por otro la Raíz del Error Cuadrático Medio o RMSE por sus siglas en inglés. CORA correlaciona las anomalías pronosticadas por la técnica de análogos con las anomalías observadas, brindando una medida de la asociación lineal entre los pronósticos y las observaciones. Una de sus ventajas es que se remueve el ciclo estacional tanto de pronósticos como de observaciones al restar sus respectivas medias climatológicas, y su uso se encuentra bastante extendido en estudios de verificaciones de pronósticos semanales, tanto de precipitación, como de temperatura (Coelho y otros, 2018, entre otros). El RSME se calculó también para los pronósticos sin calibrar, es decir las salidas del modelo en crudo previo a la aplicación de la regresión por análogos. Un pronóstico con buen desempeño debería tener RMSE bajos y correlaciones altas.

3) RESULTADOS

En la Figura 1 se presentan los mapas de correlación de anomalías de las semanas 1 y 2 del pronóstico realizado con la regresión por análogos, en el período febrero 2021-diciembre 2024. De acuerdo a los resultados, las correlaciones entre anomalías pronosticadas y anomalías observadas de temperatura media son mayores en la semana 1 de pronóstico respecto de la semana 2, en todas las estaciones utilizadas, lo cual es consistente con lo hallado en trabajos previos. La mayoría de los valores de CORA en la semana 1 oscilan entre 0.7 y 0.9, mientras que en la semana

2 estas correlaciones se encuentran entre 0.3 y 0.7. En ambas semanas de pronóstico se observan las máximas correlaciones en el noreste del país: Misiones, Corrientes y este de Chaco y de Formosa. Álvarez y otros (2014) estudiaron esta región y encontraron que un buen porcentaje de la variabilidad es explicada por oscilaciones en la escala subestacional. Las menores correlaciones se observan en las estaciones del oeste y noreste de la Patagonia con valores inferiores a 0.4 en la mayoría de las estaciones en la semana 2.

En la Figura 2 se muestra el RMSE de la temperatura media para la semana 2, en el período febrero 2021- diciembre 2024, tanto para el pronóstico sin calibrar como para el pronóstico calibrado con la regresión por análogos. El RMSE del pronóstico calibrado disminuye respecto del no calibrado, tanto en la semana 1 (no mostrado) como en la semana 2 de pronóstico. En la

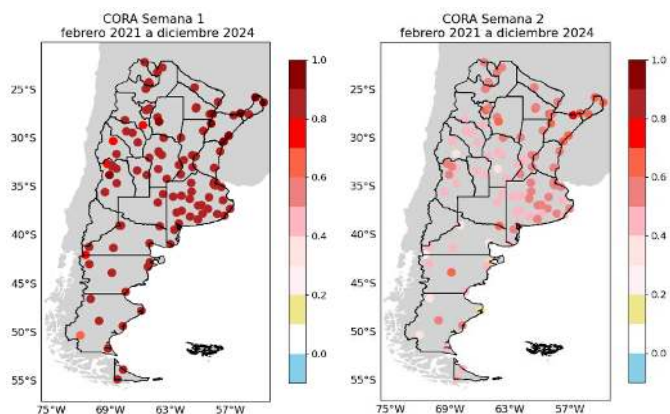


Figura 1: Correlación de anomalías (CORA) para los pronósticos de temperatura media generados con la técnica de regresión por análogos de la semana 1 (izquierda) y de la semana 2 (derecha) desde febrero 2021 hasta diciembre 2024.

semana 2 los errores son mayores respecto de la semana 1, pero aun así se obtiene una disminución de los RMSE luego de la calibración. En el pronóstico calibrado, se observa en la región central del país (Buenos Aires y este de La Pampa) una amplia zona con menores RMSE, que corresponde a correlaciones entre 0.4 y 0.6, indicando un mejor desempeño de los pronósticos en dichas regiones. En la Patagonia se observan menores RMSE pero allí las correlaciones son inferiores a 0.4.

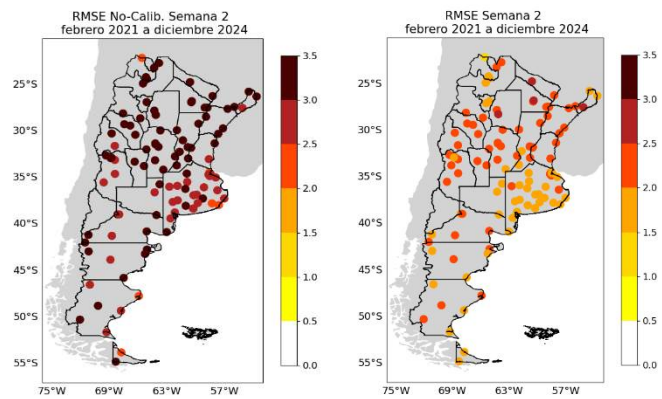


Figura 2: Error Cuadrático Medio (RMSE) para los pronósticos de temperatura media de la semana 2 del pronóstico sin calibrar (izquierda) y del pronóstico de regresión por análogos (derecha) desde febrero 2021 hasta diciembre 2024.

4) CONCLUSIONES

Los resultados muestran que hay alta correlación entre anomalías pronosticadas y observadas, siendo menores en la semana 2 de pronóstico, aunque se mantienen superiores a 0.4 en la mayoría de las estaciones en este plazo. Para ambas semanas, las mayores correlaciones se encuentran en el noreste del país. Por otro lado, los campos de RMSE muestran una clara disminución de los errores luego de la calibración. En ambas semanas de pronóstico, los pronósticos calibrados con la técnica de regresión por análogos logran disminuir los errores de los pronósticos sin calibrar, obteniendo pronósticos de temperatura media de mejor desempeño.

5) REFERENCIAS

- Aldeco, L., 2011:** Aplicación de la técnica de análogos a la generación de pronósticos probabilísticos de precipitación sobre algunas estaciones de la Argentina. Tesis de Licenciatura del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, Universidad de Buenos Aires.
- Aldeco, L., De Elía, R., Ruiz J., 2022:** Pronósticos semanales calibrados de precipitación y temperatura media operativos en el Servicio Meteorológico Nacional. Actas del XIV Congreso Argentino de Meteorología.
- Álvarez, M.S., Vera, C.S., Kiladis, G.N., Liebmann, B., 2014:** Intraseasonal variability in South America during the cold season *Climate Dynamics*. 42 (11-12):3253-3269
- Coelho, C. A., Firpo, M. A., & de Andrade, F. M., 2018:** A verification framework for South American subseasonal precipitation predictions. *Meteorologische Zeitschrift*, 27(6), 503-520.
- Godoy, A. A., F. Cutraro, 2024:** Evaluación de pronósticos numéricos calibrados de la temperatura semanal. *Nota Técnica SMN 2024-159*.
- Hamill, T., Whitaker, J. y Mullen, S., 2006:** Reforecasts. An important data set for improving weather predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 33-46.
- Kalnay, E., 2003:** *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge University Press, 341 pp.
- Righetti, S., F. Cutraro, Y. García Skabar y M. Sacco, 2024:** Calibración de los pronósticos de precipitación acumulada diaria. *Nota Técnica SMN 2024-164*.
- Ruiz, J., Aldeco L., Diehl A., García Skabar Y., Matsudo C., Osman M., Pelorosso L., Saulo C., Vera C., 2018:** Capítulo 37: Aplicaciones en Argentina. *Física del caos en la predicción meteorológica*. <http://dx.doi.org/10.31978/014-18-009-X.37>
- Vannitsem, S., and Coauthors, 2021:** Statistical Postprocessing for Weather Forecasts: Review, Challenges, and Avenues in a Big Data World. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 102, E681–E699. <https://doi.org/10.1175/BAMSD-19-0308.1>

REDES NEURONALES PARA EL POSPROCESAMIENTO DE PRONÓSTICOS CUANTITATIVOS DE PRECIPITACIÓN

Fernando Huaranca^{1,4}, Juan Ruiz^{1,2,3}

fernando.huaranca99@gmail.com, jruiz@cima.fcen.uba.ar

¹Dep. de Cs. de la atmósfera y los océanos - FCEyN - UBA

²Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (UBA-CONICET)

³Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL IFAECI/CNRS-IRD-CONICET-UBA)

⁴Aires Renewables

Palabras clave: precipitación, aprendizaje automático, pronósticos retrospectivos

1) INTRODUCCIÓN

Los modelos numéricos de la atmósfera son un componente fundamental de los sistemas de pronóstico numérico modernos implementados en los diferentes servicios meteorológicos del mundo. Estos utilizan el conocimiento de la física del sistema para anticipar su evolución y se han beneficiado a lo largo de los años del incremento de la accesibilidad de datos observacionales y la incorporación de fenómenos de distintas escalas espacio-temporales, lo cual ha generado que su complejidad vaya en aumento. No obstante estos avances, los sistemas de pronósticos están sujetos a errores aleatorios y sistemáticos que se originan en la incertidumbre asociada con las condiciones iniciales y de borde, así como en las simplificaciones introducidas en la representación de procesos de pequeña escala. Para reducir los errores mencionados, se han desarrollado técnicas que buscan caracterizar y corregir el comportamiento de estos errores basándose en el desempeño del modelo en casos anteriores; estas correcciones son denominadas técnicas de posprocesamiento (Vannistern et al. 2021).

Recientemente, las técnicas de postprocesamiento basadas en aprendizaje automático han recibido mucha atención debido a la capacidad de los modelos para aprender relaciones complejas entre conjuntos de datos multivariados en donde la cantidad de predictores y predictandos puede ser muy grande (ej., Rojas Campos et al. 2023). En particular se destacan arquitecturas complejas como las redes convolucionales, diseñadas para extraer eficientemente patrones espaciales y temporales. Por otra parte, la existencia de bases de datos globales sistematizadas, de pronósticos numéricos y observaciones, representa una oportunidad única para el entrenamiento de sistemas complejos de posprocesamiento basados en redes profundas, que puedan utilizar como predictores campos de diferentes variables sobre una región relativamente amplia.

El objetivo de este trabajo es diseñar, implementar y evaluar un modelo de aprendizaje automático basado en redes convolucionales profundas para el postprocesamiento de los pronósticos de precipitación. En particular, el modelo utiliza como predictores la precipitación acumulada en las 24 horas de pronóstico, estimada a partir de un modelo numérico global, y genera un campo de precipitación donde los sesgos del modelo numérico estén parcialmente corregidos. En la evaluación del modelo y en la selección de diferentes aspectos relacionados con el entrenamiento y la arquitectura, se pone particular énfasis en la detección de eventos de precipitación extrema, los cuales ocasionan grandes impactos socio-ambientales.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Las bases de datos utilizadas en este trabajo son, por un lado, el conjunto de pronósticos retrospectivos globales (GFS, Hamill et al. 2013), que provee pronósticos por ensambles a 2 semanas de plazo inicializados una vez al día y, por otro lado, las estimaciones

de precipitación basadas en la constelación de satélites de microondas pasivos (GSMaP, Kubota et al. 2020). Dichas estimaciones proveen precipitación acumulada a escala casi global con una resolución temporal de 30 minutos.

La metodología propuesta consiste en definir un modelo basado en aprendizaje automático entrenado con una estrategia de entrenamiento denominada modelo de control. A partir de esta configuración, se realizarán experimentos en los que se introducirán variaciones controladas en la arquitectura y en la configuración del entrenamiento. Es importante destacar que estas modificaciones se aplicarán de forma individual, de modo que cada experimento evalúe el impacto de un único factor sobre el desempeño del modelo resultante. Llamaremos hiperparámetros a aquellos parámetros cuyo valor afecta el proceso de entrenamiento del modelo (ej., la tasa de aprendizaje o el tamaño del batch). Por otro lado, los parámetros de diseño serán aquellos vinculados a los cambios en la arquitectura del modelo (ej., el tamaño de los kernels convolucionales o el número de canales utilizados en una capa de convolución). En este estudio se plantean dos arquitecturas: una de tipo Encoder-Decoder y U-Nets.

El desempeño de los modelos obtenidos en cada entrenamiento se evalúa utilizando diferentes métricas como el Equitable Threat Score (ETS), Frequency Bias (FB), Probability of Detection (POD) y False Alarms Ratio (FAR). Dado el interés en los eventos de precipitación extremos, se utiliza como criterio de selección el área bajo la curva ETS en rangos altos (superiores a los 100 mm acumulados por día) como medida integrada de rendimiento del modelo.

3) RESULTADOS

La validación de los diferentes modelos muestra que los modelos basados en aprendizaje automático poseen un mejor desempeño en latitudes medias de Sudamérica, respecto a los pronósticos del GFS. En particular, los pronósticos corregidos a través de los modelos de machine learning produjeron mejores ETS para la totalidad de los umbrales de precipitación considerados, y mostraron un mejor desempeño a la hora de anticipar eventos de precipitación extrema (no se muestra). Por otra parte, en latitudes tropicales, los modelos basados en machine learning no pudieron superar el desempeño del modelo numérico en términos de los diferentes índices analizados.

A modo de ejemplo, en la Figura 1 se muestra la precipitación acumulada y pronosticada en tres eventos de precipitación intensa. En esta figura se comparan las predicciones obtenidas directamente del GFS (columna 1) y aquellas corregidas utilizando redes basadas en una arquitectura encoder-decoder (columna 3) y dos redes basadas en arquitecturas U-Net, una entrenada con una cantidad de épocas fija (columna 4) y otra entrenada utilizando un criterio de early stopping (columna 5). La técnica basada en la arquitectura Encoder-Decoder es más suave que las U-Nets, las cuales presentan mayor variabilidad espacial y extremos de precipitación más altos (sobre todo cuando son entrenadas durante una cantidad de épocas mayor a la que indica el criterio de early stopping utilizado). Esta característica es esperable, ya que las redes U-Net permiten representar mejor patrones con varias escalas espaciales. Las redes en general permiten mejorar la intensidad de los extremos de precipitación, aunque no introducen cambios significativos en su ubicación. Con respecto a las métricas de validación, la arquitectura encoder-decoder fue la que obtuvo los mejores resultados (no se muestra).

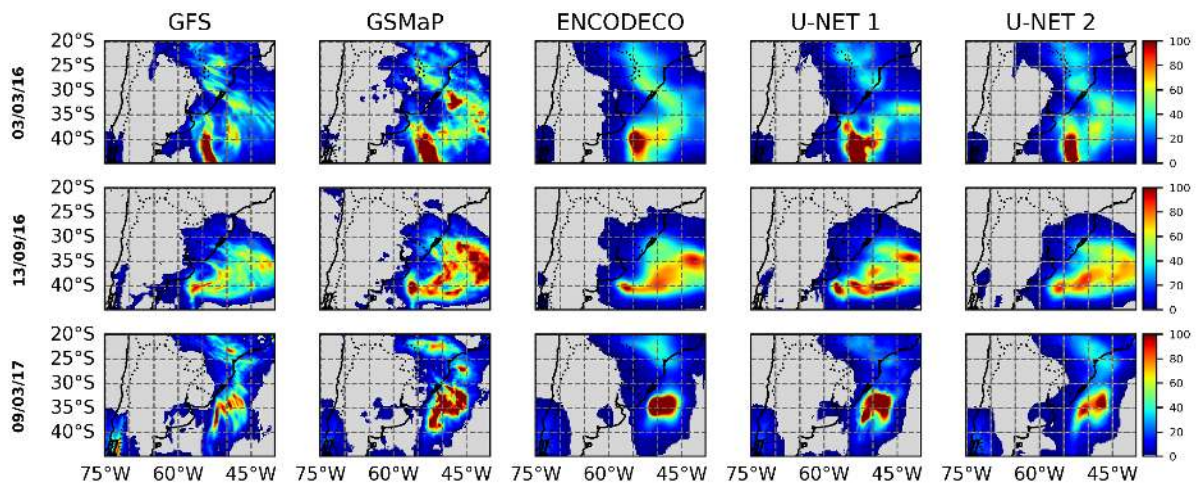


Figura 1: Precipitación acumulada en 24 horas de acuerdo con: el pronóstico del modelo GFS a 24 horas de plazo (columna 1), la estimación de precipitación GSMap (columna 2), la arquitectura encoder-decoder (columna 3), la arquitectura U-Net entrenada con una cantidad fija de épocas (columna 4) y la arquitectura U-Net entrenada con un criterio de early stopping.

Los resultados obtenidos confirman el potencial de las técnicas de postprocesamiento basadas en redes neuronales. En trabajos futuros se desarrollarán modelos que permitan incorporar una mayor cantidad de predictores, ya sea provenientes de simulaciones numéricas globales o de otros conjuntos de datos.

4) REFERENCIAS

- Hamill, T. M., Bates, G. T., Whitaker, J. S., Murray, D. R., Fiorino, M., Galarneau, T. J., Jr., Zhu, Y., & Lapenta, W. (2013). NOAA's Second-Generation Global Medium-Range Ensemble Reforecast Dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(10), 1553-1565. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00014.1>
- Kubota, T. et al. (2020). Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMap) Products in the GPM Era. In: Levizzani, V., Kidd, C., Kirschbaum, D.B., Kummerow, C.D., Nakamura, K., Turk, F.J. (eds) *Satellite Precipitation Measurement. Advances in Global Change Research*, vol 67. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_20
- Rojas-Campos, A., Wittenbrink, M., Nieters, P., Schaffernicht, E. J., Keller, J. D., & Pipa, G. (2023). Postprocessing of NWP Precipitation Forecasts Using Deep Learning. *Weather and Forecasting*, 38(3), 487-497. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-21-0207.1>
- Vannitsem, S., and Coauthors, 2021: Statistical Postprocessing for Weather Forecasts: Review, Challenges, and Avenues in a Big Data World. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **102**, E681–E699, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0308.1>.

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA ASIMILACIÓN DE DATOS DE RADAR EN UN CASO DE PRECIPITACIÓN INTENSA EN LA ZONA DEL AMBA

Emanuel Alfie¹, Juan Jose Ruiz^{1,2,3}, Yanina Garcia Skabar⁴
emanuelalfie@hotmail.com

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN-UBA), Argentina.

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos. Buenos Aires, Argentina.

⁴Servicio Meteorológico Nacional

Palabras clave: pronósticos por ensambles, WRF, sensores remotos.

1) INTRODUCCIÓN

La constante expansión de los conglomerados urbanos en Sudamérica y la deficiencia en su infraestructura llevan a que la ciudadanía quede expuesta a fenómenos meteorológicos de alto impacto. En particular, el centro norte de Argentina es propenso a tener fuertes tormentas, las cuales incluyen vientos intensos, granizo, tornados, actividad eléctrica y precipitaciones abundantes ([Salio et al. 2024](#)). Los sensores remotos y, en particular, los radares meteorológicos, son una herramienta capaz de dar información sobre las características internas de las nubes, como las especies de hidrometeoros presentes, sus formas y tamaños para intervalos de tiempo breve sobre grandes extensiones, así como una estimación de la velocidad del viento en la dirección radial.

En Argentina, el [SiNaRaMe](#) y el [INTA](#) administran actualmente 18 radares meteorológicos Doppler en Banda C, la mayoría de los cuales son polarimétricos. Tanto los datos que proveen los satélites como los radares meteorológicos han demostrado tener un gran potencial al ser combinados de forma exitosa con modelos de predicción numérica del tiempo que representan el flujo atmosférico en la mesoescala ([Gustaffson et al. 2018](#)).

Uno de los desafíos de la previsión numérica en alta resolución es la generación de condiciones iniciales adecuadas, particularmente aquellas que contengan información útil de las nubes convectivas. Los datos aportados por los radares y satélites pueden ayudar a determinar condiciones iniciales más precisas para la generación de pronósticos numéricos en la mesoescala. En el presente trabajo se busca evaluar el impacto de la asimilación de datos de radar en un caso de precipitación intensa en la zona del AMBA, con el fin de mejorar el aprovechamiento de los datos de radar para la inicialización de pronósticos por ensambles en la meso-γ. El presente trabajo forma parte de los resultados preliminares de un proyecto de tesis de licenciatura que se desarrolla en el marco del proyecto [PREVENIR](#).

2) METODOLOGÍA

En el presente trabajo se analizan experimentos de asimilación de datos con modelos en 4 km de resolución. El sistema de asimilación utilizado es el sistema WRF-LEKTF acoplado con un operador de las observaciones de radar ([Maldonado et al. 2021](#)). Los experimentos de asimilación se realizaron para un caso de estudio correspondiente a la tormenta del 19 de marzo de 2024 en donde se registró un evento de lluvia intensa e inundaciones urbanas en la región del AMBA.

Para este caso de estudio se realizaron experimentos numéricos sobre un dominio amplio en la región central de Argentina. A partir de los análisis generados asimilando datos de radar, se inicializan pronósticos por ensambles a corto plazo utilizando la misma resolución espacial que el análisis. Todos los experimentos, además de las observaciones provistas por la red de

radares del SiNaRaMe, también asimilan las mismas observaciones que incorpora el sistema de asimilación operativo en el SMN (Matsudo et al., 2025). En este trabajo se analiza el impacto de las observaciones de reflectividad y de velocidad Doppler a través de los siguientes experimentos:

- **Experimento 1:** donde se asimila solo reflectividad, pero requiriendo que al menos el 30% de los miembros del ensamble tengan una reflectividad mayor a 0 para assimilar datos de reflectividad mayores a 0.
- **Experimento 2:** donde solo se asimila reflectividad, pero a diferencia del Exp. 1 se requiere que solo el 3% de los miembros del ensamble tengan una reflectividad mayor a 0 para assimilar los datos de reflectividad mayores a 0.
- **Experimento 3:** como el experimento 2, pero asimilando también la velocidad Doppler (V_r).
- **Experimento libre:** es un pronóstico inicializado a partir de los pronósticos globales sin realizar asimilación de datos a escala regional.

Los experimentos 1, 2, 3 y el libre tienen 4 km de resolución horizontal, condiciones iniciales y de borde provistas por el ensamble global GFS (30 miembros), ensambles de 60 miembros y ciclos de asimilación cada una hora desde las 6 UTC del 19/04/24 hasta las 5 UTC del 20/03/24. Los ensambles son multifísica, con 6 configuraciones de parametrizaciones de procesos de escala sub-reticular (microfísica y capa límite).

Para que los datos de reflectividad mayores a 0 (es decir, aquellos que indican la presencia de nubosidad y eventualmente precipitación) sean efectivamente asimilados, se define una cantidad mínima de miembros que presenten reflectividad mayor a cero para cada punto de retícula del modelo. Este umbral mínimo de miembros cambia según el experimento, siendo de 30% para el Exp 1 y de 3% en los experimentos 2 y 3. Cuanto mayor es este umbral, se supone que estamos más cerca de la hipótesis de Gaussianidad en la distribución de probabilidad de reflectividad que se asume en el EnKF.

3) RESULTADOS:

En la Figura 1 se ilustran los campos de máxima reflectividad correspondiente a las 20 UTC de las observaciones y las medias de los ensambles de pronósticos a 1 hora (experimentos 1, 2, 3 y libre) y sus respectivos análisis (experimentos 1, 2 y 3). Como se puede observar, este tiempo corresponde a un tiempo previo a la llegada del sistema a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

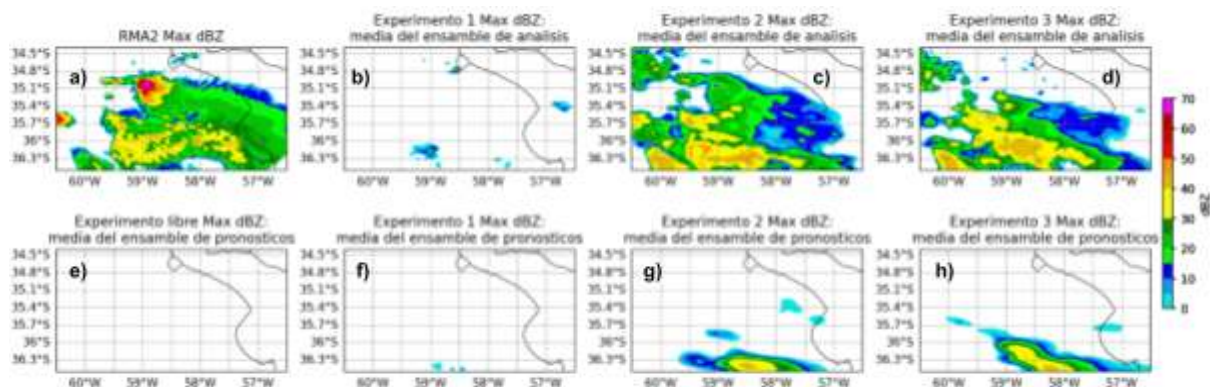


Figura 1: máxima reflectividad en la columna a las 20 UTC del 19/03/2024. RMA2 (a), media del ensamble de análisis del experimento 1 (b), 2 (c) y 3 (d). Media del ensamble de pronósticos del experimento libre (e), 1 (f), 2 (g) y 3 (h).

El experimento libre no pudo iniciar la convección de interés ni mostrar una evolución consistente con las observaciones. Por lo cual, en esta situación en particular, iniciar el ensamble de pronóstico a partir de un downscaling del modelo global no fue suficiente para

iniciar y sostener la convección a lo largo del tiempo. Esto demuestra que, dada la complejidad de este caso, fue fundamental recurrir a la asimilación de datos de radar a escala regional para corregir la evolución de la simulación.

Por otra parte, se encontraron diferencias significativas en los pronósticos de precipitación a 1 hora en cada uno de los experimentos. En términos generales, se observa que en el experimento 1 hubo un pobre impacto de las observaciones de reflectividad, debido a que probablemente hubo pocos datos efectivamente asimilados. Esta poca cantidad de datos asimilados se debe a que en este experimento las condiciones para asimilar valores positivos de reflectividad son más exigentes. Además, casi todos los miembros presentan una reflectividad baja en comparación con las observaciones.

En el experimento 2, las observaciones tuvieron un mayor impacto en tiempos de análisis debido a que la cantidad de datos asimilados fue superior; no obstante, no hubo cambios sustanciales en la representación de la intensidad y longevidad de las celdas convectivas en los pronósticos a 1 hora. Aún más, el experimento 2 fue el que mostró mayores complicaciones en mantener la intensidad de las celdas convectivas en los tiempos de pronóstico, mostrando en algunos casos miembros en donde la intensidad de la convección decayó totalmente en el plazo de 1 hora. Se podría decir que la asimilación exclusiva de reflectividad de radar con estas configuraciones no mostró tener un impacto en el entorno convectivo, ya que si bien en los tiempos de análisis el experimento 2 mostró cierto incremento respecto del 1, este impacto no fue propagado en los tiempos de pronósticos de forma consistente respecto de las observaciones.

El experimento 3 mostró los mejores resultados. En este caso los análisis son muy similares a los del experimento 2, ya que se asimiló la misma cantidad de datos de reflectividad. Pero, a diferencia de dicho experimento, el experimento 3 sí logró mantener la intensidad y longevidad de la convección más consistentemente con las observaciones.

4) REFERENCIAS

Gustafsson, N., Janjić, T., Schraff, C., Leuenberger, D., Weissmann, M., Reich, H., ... & Fujita, T. (2018). Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(713), 1218-1256.

Maldonado, P., Ruiz, J., & Saulo, C. (2020). Parameter sensitivity of the WRF–LETKF system for assimilation of radar observations: Imperfect-model observing system simulation experiments. *Weather and Forecasting*, 35(4), 1345-1362.

Matsudo, C., P. Maldonado, M. E. Dillon, G. Casaretto, M. Sacco, F. Cutraro, S. Righetti, M. Alvarez Imaz, Y. Garcia Skabar, J. Ruiz, S. Osore, 2025: Evaluación del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional, Impacto de los análisis regionales en la inicialización del pronóstico por ensambles. Nota técnica SMN 2025-193: <http://hdl.handle.net/20.500.12160/2955>

Salio, P., Bechis, H., Ribeiro, B. Z., de Lima Nascimento, E., Galligani, V., Garcia, F., ... & Villagrán Asiares, C. I. (2024). Toward a South American high-impact weather reports database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(7), E1204-E1217.

Snyder, C., & Zhang, F. (2003). Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 131(8), 1663-1677.

CALIBRACIONES DE PREDICCIONES ESTACIONALES DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO PARA ARGENTINA, 1993-2016

María Mercedes Poggi¹, María Laura Bettolli²,
César Azorín-Molina³, María de los Milagros Skansi¹
mpoggi@smn.gob.ar

¹Dirección Central del Monitoreo del Clima, Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

³Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CIDE, CSIC-UV-GVA), Climate, Atmosphere and Ocean Laboratory (Climatoc-Lab), Moncada, Valencia, España.

Palabras clave: Observaciones, pronóstico climático, post-procesamiento.

1) INTRODUCCIÓN

La predicción estacional consiste en prever las condiciones climáticas medias durante un período de varios meses con una anticipación de semanas, derivando su habilidad predictiva de factores que cambian gradualmente, y cómo la atmósfera interactúa y se ve influida por dichos factores. A su vez, la predictibilidad a medio plazo de una variable específica, como la velocidad del viento, depende de la región, la estación del año, el tiempo de anticipación, el período de pronóstico y su relación con los principales modos de variabilidad.

Los Modelos de Circulación General (MCGs) son herramientas fundamentales para la predicción en esta escala temporal, ya que representan la interacción entre los distintos componentes del sistema climático. En los últimos años, las predicciones estacionales de los MCGs han experimentado avances significativos, logrando generar previsiones hábiles incluso en regiones extratropicales, donde anteriormente no mostraban habilidad sustancial (Osman y Vera, 2017). Sin embargo, todavía presentan errores sistemáticos y sus resoluciones espaciales no son lo suficientemente altas para aplicaciones prácticas. Por ello, es necesario aplicar técnicas de post-procesamiento. Entre ellas, se destacan el *bias adjustment* (BA) y el *ensemble recalibration* (RC), los cuales ajustan los pronósticos crudos de la variable de interés, para hacerlas compatibles con las observaciones históricas. Estas técnicas son menos costosas computacionalmente dado que, por ejemplo, no requieren la identificación de predictores, pudiendo ser adecuados para su uso operativo.

En Argentina, la predicción estacional de la velocidad del viento es una línea de investigación incipiente, recién explorada por Viazzo (2024). Sin embargo, aún no se han desarrollado estudios que apliquen técnicas de post-procesamiento a las predicciones estacionales de los MCGs para esta variable. Las investigaciones existentes se han centrado, principalmente, en el *downscaling estadístico y dinámico* de temperatura y precipitación (Bettolli et al., 2021). Esta temática es sumamente relevante para el sector de la energía eólica, entre otros, más aún cuando estudios como el de Torralba et al. (2017) han demostrado que las predicciones climáticas pueden aportar un valor adicional a sus aplicaciones. Frente a este contexto, los objetivos del presente trabajo son:

a) Evaluar las predicciones estacionales de MGCs que integran el Servicio de Cambio Climático de Copernicus.

b) Aplicar métodos de BA, RC y de *machine learning* (ML) para corregir las predicciones estacionales de los MGCs considerados, y evaluar su desempeño.

2) DATOS

Se utilizaron predicciones estacionales de velocidad de viento a 10 m provenientes de distintos MGCs, incluyendo GloSea6 de UKMO, System 8 de Météo-France, GCFS2.1 de DWD, SPS3.5 de CMCC, CPS3 de JMA, SEAS5 de ECMWF y CFSv2 de NCEP, con estos dos últimos ya habiendo sido evaluados por Viazzo (2024), pero utilizando datos del reanálisis MERRA2 como referencia. Se consideraron las predicciones con un mes de anticipación para el verano, otoño, invierno y primavera. Estas predicciones constan de un período retrospectivo común de 24 años, desde 1993 a 2016, y un número común de 10 miembros.

Se utilizaron las series mensuales de la velocidad del viento correspondientes a 86 estaciones meteorológicas convencionales de la red del Servicio Meteorológico Nacional para el período 1993-2016. Estas series fueron homogeneizadas y agregadas estacionalmente, y empleadas tanto para la calibración como para la verificación de los pronósticos. Cabe destacar que las salidas de los MGCs fueron interpoladas a las ubicaciones de las estaciones, utilizando el punto de retícula más cercano.

3) METODOLOGÍA

Siguiendo a Manzananas et al. (2019), para la corrección de los pronósticos crudos de los MGCs se aplicaron dos métodos de BA: *mean/variance adjustment* (MVA) y *empirical quantile mapping* (EPQM); y cuatro métodos de RC: *climate conserving recalibration* (CCR), *ratio of predictable components* (RPC), *linear regression* (LM) y *non-homogeneous Gaussian regression* (NGR). Además, se incorporaron tres métodos de ML, con diferentes configuraciones: *random forest* (RF), *support vector machine* (SVM_LIN, SVM_RAD, SVM_SIG) y *neural network* (NN_LOG) y (NN_TAN). Todos los métodos se aplicaron utilizando la validación cruzada del tipo *leave-one-year-out*.

Para la verificación, se consideraron distintas métricas: la correlación de Pearson entre las medias de los ensembles y las observaciones; el *Continuous Ranked Probability Score* y *Skill Score* (CRPS y CRPSS), el *Ranked Probability Score* y *Skill Score* (RPS y RPSS); así como el *ROC Score* y *Skill Score* (ROC, ROCSS). Cabe destacar que las métricas de CRPSS, RPSS y ROCSS permiten comparar el desempeño de los pronósticos calibrados respecto a los pronósticos crudos, indicando mejoras cuando sus valores son positivos.

4) RESULTADOS

La Figura 1 muestra, para el verano, el CRPS del pronóstico crudo del modelo CFSv2 de NCEP, junto con los valores de CRPSS de los pronósticos corregidos. Cabe destacar que las métricas de verificación se presentan únicamente en aquellas estaciones con correlaciones positivas y significativas con el pronóstico crudo (es decir, con “habilidad”), siguiendo lo propuesto por Manzananas et al. (2019). Se observa que predominan los valores de CRPSS superiores a 0, representados en azul, lo que sugiere que, según esta métrica, los pronósticos corregidos mediante los distintos métodos mejoran generalmente el pronóstico crudo, como consecuencia de un ajuste efectivo de los sesgos. También se advierte que los métodos de ML muestran un rendimiento inferior en ciertas localidades.

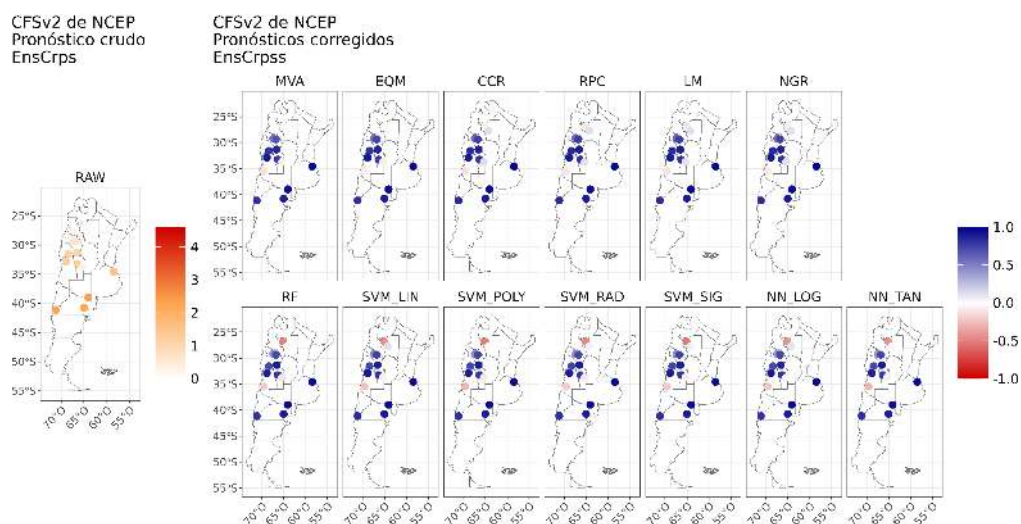


Figura 1: CRPS del pronóstico crudo del modelo CFSv2 de NCEP (izq.) y CRPS de los pronósticos corregidos (der.) para el verano.

5) DISCUSIÓN

Se encontró que los métodos de BA, RC y ML corrigieron eficazmente los sesgos de los pronósticos crudos. Si bien se observaron mejoras en métricas sensibles al sesgo, como el CRPS, también se registraron degradaciones en la verificación probabilística.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se desarrolló en el marco del proyecto RED-CLIMA 2 (programa LINGLOBAL - CSIC, Ref. LING24042).

REFERENCIAS

Bettolli, M. L., Solman, S. A., Da Rocha, R. P., Llopart, M., Gutierrez, J. M., Fernández, J., ... y Cuadra, S. V., 2021: The CORDEX Flagship Pilot Study in southeastern South America: a comparative study of statistical and dynamical downscaling models in simulating daily extreme precipitation events. *Climate Dynamics*, 56, 1589-1608.

Manzanas, R., Gutiérrez, J. M., Bhend, J., Hemri, S., Doblas-Reyes, F. J., Torralba, V., Penalba, E., y Brookshaw, A., 2019: Bias adjustment and ensemble recalibration methods for seasonal forecasting: A comprehensive intercomparison using the C3S dataset. *Climate Dynamics*, 53, 1287-1305.

Osman, M. y Vera, C.S; 2017: Climate predictability and prediction skill on seasonal time scales over South America from CHFP models. *Clim Dyn* 49, 2365–2383.

Torralba, V., Doblas-Reyes, F. J., MacLeod, D., Christel, I., y Davis, M., 2017: Seasonal climate prediction: a new source of information for the management of wind energy resources. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(5), 1231-1247.

Viazzo, C. D., 2024: Estudio de las variaciones estacionales de la predictibilidad del viento de Argentina en escala trimestral. Tesis de Grado, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

PROYECCIONES FUTURAS DE LOS EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN Y SU IMPACTO EN LAS PLANTACIONES BANANERAS EN LA VERTIENTE DEL CARIBE DE COSTA RICA

Ricardo A. Orozco-Montoya¹, Olga C. Penalba², Vanesa Pántano^{2,3}

ricardo.orozco.montoya@una.cr .

¹Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Costa Rica (UNA)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG-UNLP)

Palabras clave: precipitación extrema, modelado climático, banano

1) INTRODUCCIÓN

Las características climáticas de la vertiente del Caribe de Costa Rica (VC), sumado a la topografía plana de sus llanuras, la humedad de los suelos y su estructura física, le confieren condiciones ideales para el desarrollo del agro. En el sector agrícola sobresale el banano (*Musa spp.*), el cual es el principal producto agrícola de exportación de Costa Rica, siendo el 8% del total de bienes exportados (SEPSA, 2023). Considerando que la producción nacional de este producto se desarrolla casi en su totalidad en la VC (98%), y que la región está expuesta a eventos de precipitación extrema, es donde se acrecienta la importancia de su estudio y su rol fundamental en la economía. Históricamente, la región ha estado expuesta a eventos de lluvias en exceso. Entre 1970 y el 2021, en la base de datos de desastres DesInventar (UNDRR, 2023), se han registrado 2408 efectos de desastres en la región, de los cuales el 53% corresponden a inundaciones y el 25% a lluvias intensas (78% relacionado a excesos). Del total de impactos registrados en la VC, 77 han afectado directamente a los cultivos de banano. Los trabajos de Giorgi, (2006); y Baumbach et al. (2021), entre otros, han plasmado que la VC y Centroamérica, son de las regiones más expuestas al cambio climático a nivel mundial. Las mismas son consideradas “hotspots” en vista del aumento previsto de las temperaturas medias y de la proyección futura de lluvias. Un estudio realizado por Bouroncle et al. (2015), indicó que el sector agrícola de la VC es el más vulnerable del país a los cambios en el clima. Para el cultivo de banano, Varma y Bebbber (2019) y Noleppa et al. (2021), indicaron que la producción bananera en la VC podría presentar disminuciones en el rendimiento de hasta un 3% para el 2050 debido a los cambios en los regímenes de precipitación y a la ocurrencia de eventos extremos de precipitación frente al cambio climático. Esta investigación se centra en 2 meses clave para el banano que presentaron comportamientos opuestos y significativos en el análisis de tendencias: septiembre (negativo) y diciembre (positivo) (Orozco-Montoya y Penalba, 2023). Por lo tanto, se analizan los cambios futuros en las precipitaciones para la región y sus implicaciones para las plantaciones de banano.

2) METODOLOGÍA

Para la evaluación de las proyecciones futuras mensuales de precipitación y eventos extremos en la VC, se utilizaron salidas de Modelos Climáticos Regionales (RCM, por sus siglas en inglés) proporcionando información más detallada que los Modelos Climáticos Globales (GCM, por sus siglas en inglés), en áreas con orografía más completa, como es el caso de Centroamérica. Los modelos CORDEX-CORE (Gutowski et al. 2016) proporcionan un conjunto comparable de proyecciones de alta resolución, que es de aproximadamente 22 km para América Central y el Caribe (CAM-22). En esta investigación se utilizaron 3 RCMs (RegCM4-7, REMO2015 y CRCM5) forzados por 3 GCM diferentes cada uno, para la precipitación en la VC. Se analizaron las precipitaciones mensuales y extremas mensuales

(percentil 25 y 75) en el experimento histórico (1985-2005) y el escenario RCP8.5 para 2 horizontes temporales: 2040-2069 y 2070-2099. Los resultados se interpolaron a una cuadrícula común de $0,25^\circ$ por $0,25^\circ$. La validación se realizó utilizando una base de datos de calidad de 28 estaciones meteorológicas.

3) RESULTADOS

Los resultados de la validación de septiembre (diciembre) muestran, en general, una sobreestimación (subestimación) de las precipitaciones mensuales. En cuanto a las precipitaciones extremas, el percentil 25 (75) en septiembre (diciembre) agrava el error encontrado en el valor medio y muestra valores inversos a las observaciones (*Figura 1*).

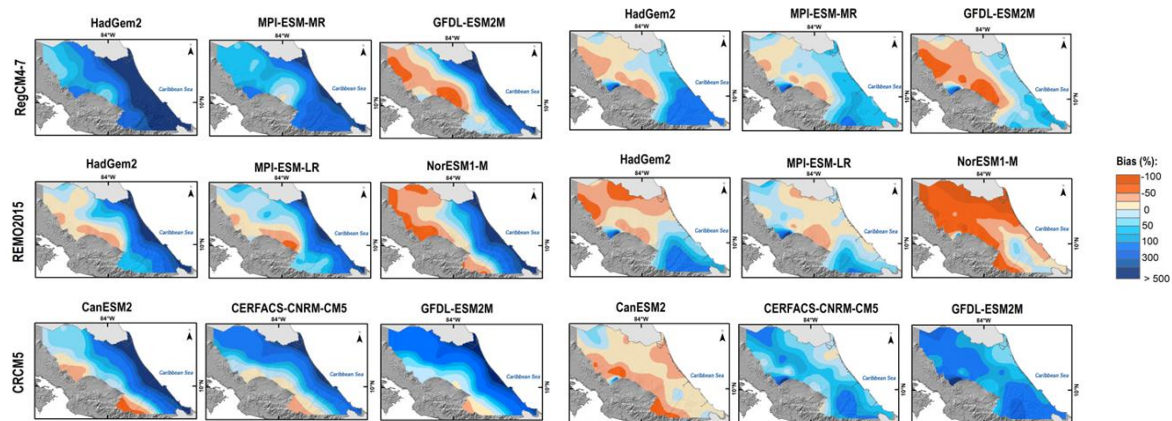


Figura 1: Bias porcentual (%) del percentil 25 de la precipitación de septiembre (izquierda) y del percentil 75 de la precipitación de diciembre (derecha) por RCM.

En cuanto a las proyecciones futuras (*Figura 2*), tanto para septiembre como para diciembre, la mayoría de los modelos presentan aumentos de la precipitación media hacia el este-sureste y una mayor variabilidad entre modelos hacia el oeste-noroeste para el periodo futuro próximo. En general, para septiembre, los aumentos o disminuciones se profundizan, mientras que, para diciembre, la disminución se profundiza en la mayoría de los modelos (5) para el segundo horizonte con respecto al primero. En septiembre, los cambios en el futuro próximo del percentil 25 son positivos en casi toda la región de estudio según 5 RCM, negativos para 2 RCM y heterogéneos espacialmente para el resto. La señal cambia de signo en 5 de los 9 RCM en el segundo horizonte respecto al primero (*Figura 2*). En diciembre, los cambios futuros próximos para el percentil 75 son negativos según la mayoría de las RCM, lo que presenta una profundización del descenso de las precipitaciones en el segundo horizonte (*Figura 2*). Por último, la señal de cambio futuro es inferior al sesgo analizado durante la etapa de validación, lo que indica la elevada incertidumbre que entrañan las proyecciones.

4) CONCLUSIONES

En la región costera, zona productiva del banano las proyecciones para el percentil 25 (septiembre), muestran aumentos para la región costera y disminuciones sobre la cordillera para el primer horizonte, profundizándose en el segundo periodo. Tomando como base estas proyecciones de aumentos en la costa, podría decirse que es positivo para el cultivo de banano, que precisamente se ubica en esta área. En las proyecciones se vislumbran aumentos en esta región entre el 0.1 y 40% (mayor a 50%) para el futuro cercano (lejano). Las proyecciones para el percentil 75 (diciembre), muestran disminuciones para casi toda la región en el primer horizonte, que se profundizan para el segundo y son mayores en la parte norte y noroeste de la VC. En este contexto, para el cultivo de banano que necesita que las máximas precipitaciones no superen los 500mm, podría decirse que las reducciones vistas en los modelos son beneficiosas para el cultivo. La señal de cambio futuro es inferior al sesgo analizado durante la

etapa de validación, lo que indica la elevada incertidumbre que entrañan las proyecciones. Es difícil indicar si las lluvias aumentan o disminuyen según las proyecciones para cada mes seleccionado, ya que existe poco acuerdo entre los resultados. Sin embargo, en septiembre, existen señales un poco más claras (de aumento) que las vistas en diciembre (híbrido).

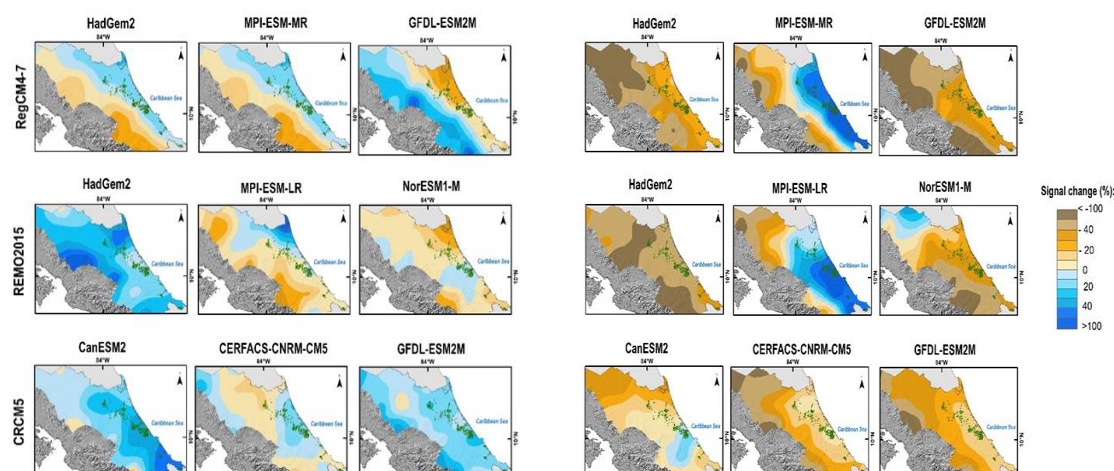


Figura 2: Señal de cambio del percentil 25 de la precipitación de septiembre (izquierda) y del percentil 75 de la precipitación de diciembre (derecha) para el periodo 2040-2069. Polígonos en verde representan las plantaciones de banana.

REFERENCIAS

- Baumbach, L., Warren, D. L., Yousefpour, R., y Hanewinkel, M., 2021:** Climate change may induce connectivity loss and mountaintop extinction in Central American forests. *Communications Biology*, 4, 869.
- Bouroncle, C., Imbach, P., Läderach, P., Rodríguez, B., Medellín, C., Fung, E., et al., 2015:** La agricultura de Costa Rica y el cambio climático: ¿Dónde están las prioridades para la adaptación? CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Copenhagen, Dinamarca.
- Giorgi, F., 2006:** Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33, 1–4, doi:10.1029/2006GL025734.
- Gutowski, W. J., Giorgi, F., Timbal, B., Frigon, A., Jacob, D., Kang, H. S., Raghavan, K., Lee, et al., 2016:** WCRP Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9 (11), 4087-4095, doi:10.5194/gmd-9-4087-2016.
- Noleppa, S., Gornott, C., Luttringhaus, S., Hackenberg, I., y Gleixner, S., 2021:** Climate change and its effects on banana production in Colombia, Costa Rica, the Dominican Republic, and Ecuador. German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ) Division 122.
- Orozco-Montoya, R. A., y Penalba, O. C., 2023:** Spatial and temporal rainfall variability in the Caribbean coast of Costa Rica. *Theoretical and Applied Climatology*, 151, 1585–1599, doi:10.1007/s00704-022-04342-8.
- SEPSA., 2023:** Desempeño del sector agropecuario 2022.
- UNDRR., 2023:** Base de datos de Desastres DesInventar, Costa Rica. Disponible en: <https://db.desinventar.org/DesInventar/profiletab.jsp?countrycode=cra&continue=y>
- Varma, V., y Bebbber, D. P., 2019:** Climate change impacts on banana yields around the world. *Nature Climate Change*, 9, 752–757, doi:10.1038/s41558-019-0559-9.

PREDICCIÓN PROBABILÍSTICA DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO BERMEJO

Sabrina Ayala^{1,2,3}, Marcela González^{2,3}
sabrina.ayala@cima.fcen.uba.ar.

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. Buenos Aires, Argentina.

³CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: precipitación, Bermejo, aprendizaje estadístico, pronóstico probabilístico

1) INTRODUCCIÓN

El sector argentino de la Cuenca del Río Bermejo (CRB) se ubica en sector norte del país y comprende las subcuencas Bermejo Superior y San Francisco (BS y SF, respectivamente, ubicadas en el extremo noroeste) y la subcuenca Media-Inferior (BMI, que se extiende hacia el noreste del país). Se trata de una región con un régimen hidrológico pluvial principalmente concentrado en la estación cálida austral. Además, es una zona relevante en la producción agropecuaria de secano de sorgo, soja, algodón, maíz y porotos (Subsecretaría de Agricultura, 2022).

El objetivo de este estudio es diseñar un conjunto de modelos estadísticos de predicción de la precipitación mensual para la CRB. Para ello, se considerarán un conjunto de técnicas lineales y no lineales de aprendizaje estadístico, lo que permitirá elaborar un pronóstico probabilístico de la precipitación mensual a mediano plazo durante el semestre de mayores acumulados pluviométricos (octubre-marzo).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

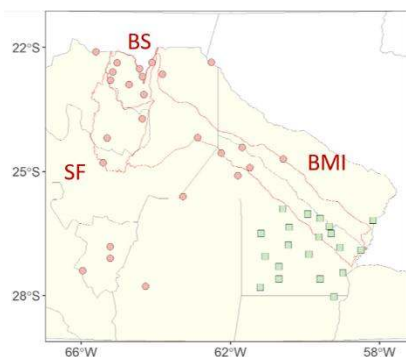


Figura 1: Localización de las estaciones que conforman los clusters 1 (rosa) y 2 (verde). En rojo se delimitan las subcuencas BS, SF, y BMI de la CRB.

Se emplearon datos de precipitación mensual provenientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Sistema Nacional de Información Hídrica (SNHI), y la Administración Provincial del Agua de Chaco (APA), correspondientes al semestre cálido entre octubre y marzo del período 1984/1985-2019/2020. Los datos atravesaron un proceso de control de calidad, admitiendo solamente aquellas estaciones de medición con una cota superior de faltantes del 10%. Las estaciones fueron agrupadas en dos áreas climáticamente homogéneas siguiendo la metodología de *k*-medoides, empleando como valor óptimo $k = 2$ considerando los criterios de suma total de cuadrados intra-cluster y ancho de silueta (Figura 1). En base a los clusters hallados, se obtuvieron las series temporales medias areales de precipitación mensual para el semestre cálido.

Se exploraron diversos predictores de la precipitación para cada mes del semestre y para ambos clusters. Esto se realizó mediante la construcción de índices que representaran forzantes

climáticos de gran escala y escala regional, y que exhibieran una correlación lineal significativa al 95% de confianza (test T-student) con la precipitación mensual del mes inmediatamente posterior. Los índices se construyeron a partir de datos medios mensuales del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2019) de temperatura superficial del mar, altura geopotencial (en 1000 hPa, 700 hPa, y 500 hPa), agua precipitable, flujo de radiación de onda larga saliente (OLR), y componentes zonal y meridional del viento en 850 hPa y 200 hPa. Los predictores fueron seleccionados manteniendo la independencia lineal entre ellos, y empleando la metodología de regularización de contracción mínima absoluta (LASSO).

En base a los predictores definidos para cada cluster, se entrenaron los modelos estadísticos de predicción de la precipitación mensual mediante la estrategia de validación cruzada de un elemento sobre el período 1984/1985-2019/2020. Las técnicas empleadas fueron la Regresión Lineal Múltiple (RLM), Modelos Aditivos Generalizados (GAM), Regresión de Vectores de Soporte (SVR), y Redes Neuronales Artificiales multicapa *feedforward* (ANN). Además, se seleccionaron aquellos modelos que presentaran un coeficiente de determinación ajustado (AdjR^2) mayor al 40% sobre la muestra de entrenamiento. El desempeño de los modelos sobre el pronóstico determinístico de la precipitación mensual para cada cluster fue verificado mediante la utilización de diagramas de Taylor. Finalmente, se evaluó la capacidad predictiva del pronóstico probabilístico de la precipitación por terciles (inferior a lo normal “*sub*”, normal “*nor*”, y superior a lo normal “*sobre*”) empleando como métricas de evaluación al Heidke Skill Score (HSS), diagramas de tendencia (DT), Brier Skill Score (BSS), y el área bajo la curva Relative Operating Characteristic (AUC). Dichas métricas sintetizan el desempeño de los pronósticos probabilísticos en términos de proporción de aciertos, resolución, sesgo no condicionado, confiabilidad y discriminación (Mason y Stephenson, 2008).

3) RESULTADOS

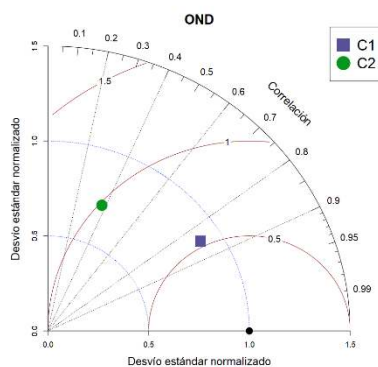


Figura 2. Diagrama de Taylor de los ensambles multimodelo del cluster 1 (cuadrado violeta) y 2 (círculo verde) en los meses que componen la primavera (OND).

Utilizando los datos del reanálisis ERA5, se definieron los predictores de la precipitación mensual para ambos clusters de la región de estudio mediante el análisis de correlación en conjunto con la técnica LASSO. Los mismos corresponden a cuatro grupos generales: en primer lugar, se hallaron predictores que representan la variabilidad en latitudes bajas de los océanos Pacífico e Índico. En segundo lugar, se identificaron predictores que representan la acción de trenes de onda en latitudes extratropicales. En tercer lugar, se identificaron predictores que representan las variaciones en intensidad y posición del anticiclón semipermanente del océano Atlántico sur. Por último, se definieron predictores vinculados a la evolución estival del sistema monzónico sudamericano y su aporte de humedad hacia el norte argentino.

Entre los modelos entrenados considerando los predictores identificados, se encontró que los modelos de tipo SVR y ANN muestran predominantemente valores de AdjR^2 mayores al 40% especialmente para el cluster 1, mientras que los modelos RLM y GAM muestran valores más bajos para esta métrica (Figura no mostrada). Si bien todos los modelos tienden a subestimar la variabilidad observada (desvío estándar de los modelos menor al observado), los modelos de ANN tienden a reproducir más fielmente la variabilidad de la precipitación mensual. En particular, el ensamble multimodelo para los meses de primavera (octubre a diciembre, OND) muestra valores mas favorables para el cluster 1 que para el cluster 2 en términos de desvío estándar normalizado, correlación con los valores observados, y error cuadrático medio normalizado (Figura 2). Para el verano (enero a marzo, EFM), el rendimiento de los modelos

del cluster 1 disminuye, y éstos se acercan al desempeño de los modelos para el cluster 2 (Figura no mostrada).

CLUSTER 1										
	HSS	Sub			Nor			Sobre		
		DT	BSS	AUC	DT	BSS	AUC	DT	BSS	AUC
Oct	0.34		*	*			*	*	*	*
Nov	0.50	*	*	*			*	*	*	*
Dic	0.11		*	*			*	*		*
Ene	0.15			*				*		*
Feb	0.42	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Mar	0.15			*			*	*	*	*

CLUSTER 2										
	HSS	Sub			Nor			Sobre		
		DT	BSS	AUC	DT	BSS	AUC	DT	BSS	AUC
Oct	0.42	*	*	*		*	*	*	*	*
Nov	0.23	*		*			*	*		*
Dic	0.07						*	*		*
Ene	0.0			*						*
Feb	0.27	*	*	*		*	*		*	*
Mar	0.07			*			*			*

Tabla I. Síntesis de las métricas de evaluación de desempeño para el pronóstico probabilístico de ambos clusters y para cada mes del semestre cálido. Las celdas con asterisco indican resultados favorables en comparación a la climatología para DT, BSS, y AUC.

En cuanto a la verificación desde el enfoque probabilístico, se emplearon diversas métricas incluidas en la Tabla I. En la misma, se indica para cada cluster los meses en los cuales el pronóstico probabilístico mostró resultados favorables comparado a la climatología (BSS > 0, AUC > 0.5, sesgo en DT < 10%). La Tabla I muestra que la mayor dificultad se concentra en el pronóstico de la categoría normal. Por otro lado, el cluster 1 presenta, en líneas generales, mejores métricas que el cluster 2.

Asimismo, el HSS alcanza valores más altos (más favorables) para el pronóstico de la precipitación en el sector centro-oeste que en el sector este de la región de estudio. Finalmente, existe cierta superioridad en el desempeño de los pronósticos de OND respecto a los de EFM.

4) CONCLUSIONES

En este estudio se elaboraron modelos estadísticos para la predicción probabilística de la precipitación mensual en la CRB. Se exploraron diversos predictores de gran escala y escala regional, y finalmente se obtuvieron modelos de predicción basados en las técnicas de RLM, GAM, SVR, y ANN. La verificación mostró un mejor rendimiento determinístico para los modelos basados en ANN. Por otro lado, se hallaron métricas de verificación probabilística favorables particularmente para el sector identificado como cluster 1, y en los meses que componen a la primavera.

REFERENCIAS

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., y Thépaut, J-N., 2019: ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Acceso < 01-06-2021>), 10.24381/cds.f17050d7
- Mason, S.J. y Stephenson, D.B., 2008: How Do We Know Whether Seasonal Climate Forecasts are Any Good? En: Troccoli, A., Harrison, M., Anderson, D.L.T., y Mason, S. (eds.) Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk (pp. 205-234). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Subsecretaría de Agricultura (Dirección Nacional de Agricultura), Estimaciones Agrícolas, disponible en <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. Consultado en noviembre de 2022.

VALIDACION DE PRONOSTICO DE TEMPERATURA Y PRECIPITACION DEL MODELO WRF EN EL CENTRO-ESTE DE ARGENTINA

Laura Paola Carrillo¹, Lucas Zapata¹, Guillermo Berri^{1,2}

lparrillo@fcaglp.unlp.edu.ar

¹ Grupo de Modelado Numérico de la Atmósfera

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - Universidad Nacional de La Plata

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Palabras clave: pronóstico operativo, verificación, métricas estadísticas

1) INTRODUCCION

El pronóstico meteorológico constituye un pilar clave en la gestión de actividades como la agricultura, el transporte, la planificación urbana y la respuesta ante emergencias. Su efectividad está estrechamente ligada al desempeño de los modelos numéricos, que deben captar con precisión los procesos atmosféricos en diversas escalas temporales y espaciales para brindar información confiable y útil para la toma de decisiones.

El modelo WRF (Weather Research and Forecasting) es ampliamente utilizado para la simulación de eventos meteorológicos y la generación de pronósticos operativos. Sin embargo, su desempeño puede variar considerablemente en función de la resolución espacial, la configuración física utilizada y la región de aplicación.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la precisión del modelo WRF en el pronóstico de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación diaria en el centro-este de Argentina, mediante la comparación con observaciones de estaciones meteorológicas de Argentina y Uruguay. Se analizan simulaciones realizadas con resoluciones de 3 km y 10 km, con el fin de identificar fortalezas, limitaciones y posibles mejoras en su implementación operativa.

2) METODOLOGIA

Las simulaciones del modelo (WRF) fueron realizadas por el grupo de Modelado Numérico de la Atmósfera (MNA) de la FCAG (UNLP), en el marco de sus pronósticos operativos diarios. El período de estudio abarca desde julio de 2024 hasta abril de 2025.

Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando la versión 4.2 del modelo WRF, configurado para generar pronósticos con 72 horas de anticipación, que se inició con GFS de 0 UTC. Se consideraron dos dominios con resoluciones espaciales distintas: uno de 10 km de resolución para la simulación regional y otro de 3 km para representar con mayor detalle la zona de interés específica.

Para la validación se utilizaron datos diarios de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación acumulada en 24 horas de 39 estaciones meteorológicas distribuidas en distintas provincias del centro-este de Argentina y en el sudoeste de Uruguay, obtenidos de la página Ogimet (<https://www.ogimet.com>).

Para la temperatura se empleó el sesgo (Bias) y error absoluto medio (MAE) (Wilks, 2006):

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i); \quad MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - o_i|$$

Para evaluar el desempeño del modelo en el pronóstico de precipitación, se construyó una matriz de contingencia 2×2 que clasifica los días según la ocurrencia o no ocurrencia de precipitación acumulada en 24 horas y el pronóstico o no de precipitación acumulada en 24 horas (Figura 1).

A partir de esta matriz, se calculó el índice Heidke Skill Score (HSS, Wilks, 2006), un indicador que permite cuantificar la habilidad del pronóstico al comparar la proporción de resultados correctos que brinda el modelo respecto de los aciertos que se lograrían mediante un pronóstico realizado en forma aleatoria.

		Observación	
		si	no
Pronóstico	si	a	b
	no	c	d

Figura 1: Matriz de acierto del pronóstico de ocurrencia de precipitación

$$HSS = \frac{2(ad-bc)}{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)}$$

El valor óptimo del HSS es 1, lo que representa un pronóstico perfecto. Valores positivos indican que los resultados del modelo superan el resultado al azar, mientras que valores negativos muestran un desempeño inferior al azar, con más errores que aciertos.

Las métricas se calcularon para distintos horizontes de pronóstico: 24 horas para las variables de temperatura, y 36 y 60 horas para precipitación.

Este enfoque permitió realizar una evaluación integral del modelo, analizando su comportamiento en distintos plazos de pronóstico y comparando el desempeño entre las dos resoluciones espaciales utilizadas.

3) RESULTADOS

a. Precipitación

El índice HSS muestra que el modelo tiene capacidad para predecir eventos de precipitación diaria con resultados positivos, que en solo una estación alcanzan a 0.5 (Figura 2a y 2b). En el dominio de 10 km, los pronósticos a 36 h muestran un desempeño algo mejor que los de 60 h, con valores de HSS levemente superiores a 0.4 en algunas estaciones del centro-este de Buenos Aires y sur de Entre Ríos.

En el dominio de 3 km (Figura 2c y 2d), los valores de HSS son comparables a los del dominio de menor resolución, sin una mejora

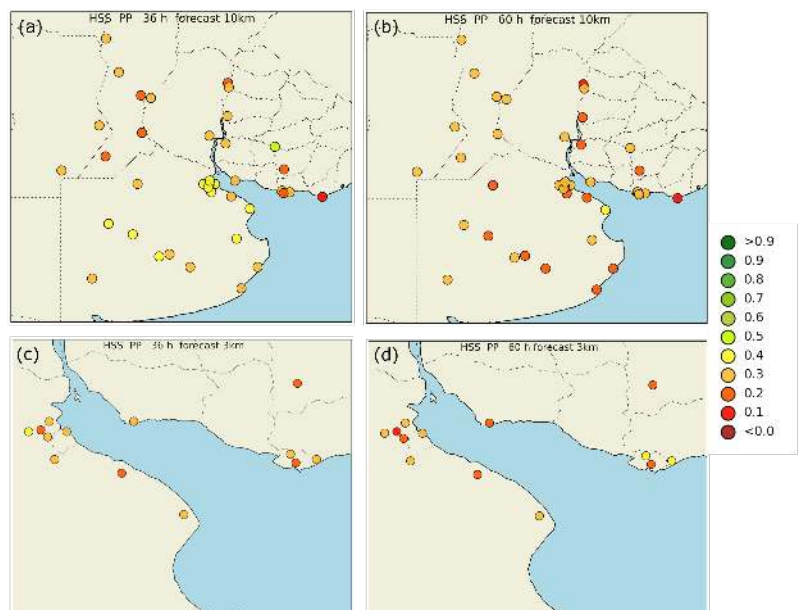


Figura 2: HSS del pronóstico de ocurrencia de precipitación diaria a 36 horas en el dominio de 10 km (a) y 3 km (c), y a 60 horas en el dominio de 10 km (b) y 3 km (d)

clara en la detección de eventos. La mayor resolución no se traduce directamente en un aumento de la habilidad predictiva para la precipitación.

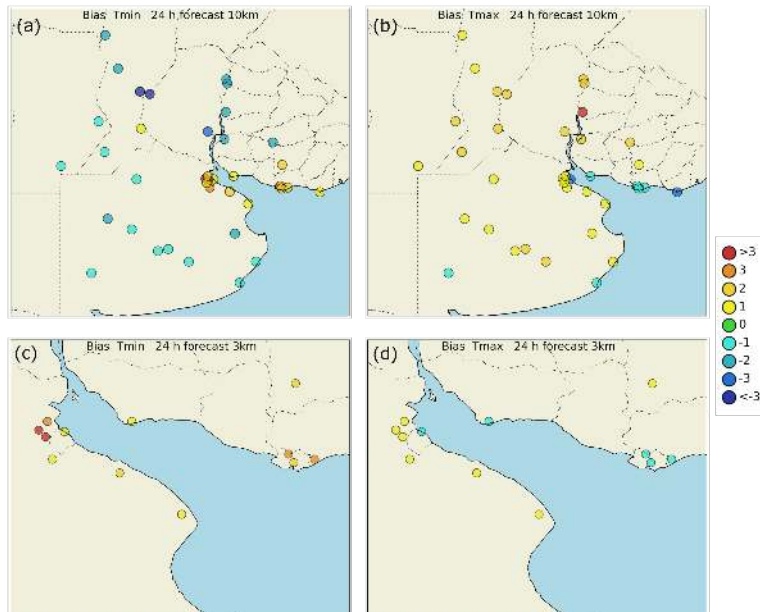


Figura 3: Bias del pronóstico a 24 horas de temperatura mínima (°C) en el dominio de 10 km (a) y 3 km (c), y de temperatura máxima (°C) en el dominio de 10 km (b) y 3 km (d)

b. Temperatura

Si observamos la Figura 3 en los pronósticos de 24 h, el sesgo en la temperatura mínima muestra una ligera subestimación generalizada en el dominio de 10 km (Figura 3a), excepto en el norte de Buenos Aires y sur de Uruguay donde observamos una sobrestimación. Para la temperatura máxima (Figura 3b), aparecen algunos sesgos positivos. En cambio, el dominio de 3 km muestra un mejor ajuste, con una distribución especial de los errores más homogénea, con un sesgo en Tmax (Figura 3d) menor que en Tmin (Figura 3c), positivo en ambos casos.

En la Figura 4, el MAE tiene valores por debajo de 2.5 °C en la mayoría de las estaciones tanto para Tmin (Figura 4a y 4c) como Tmax (Figura 4b y 4d). El modelo en 3 km reduce notablemente los errores respecto a la resolución de 10 km, especialmente para Tmax (Figura 4b).

Los resultados generales indican que el modelo WRF tiene un desempeño aceptable, con buena representación de las temperaturas extremas y una habilidad razonable para predecir la precipitación. La resolución de 3 km mejora la precisión en temperatura, pero no en precipitación, posiblemente por limitaciones en la parametrización de la convección. Estos resultados pueden guiar ajustes futuros en la configuración operativa del modelo.

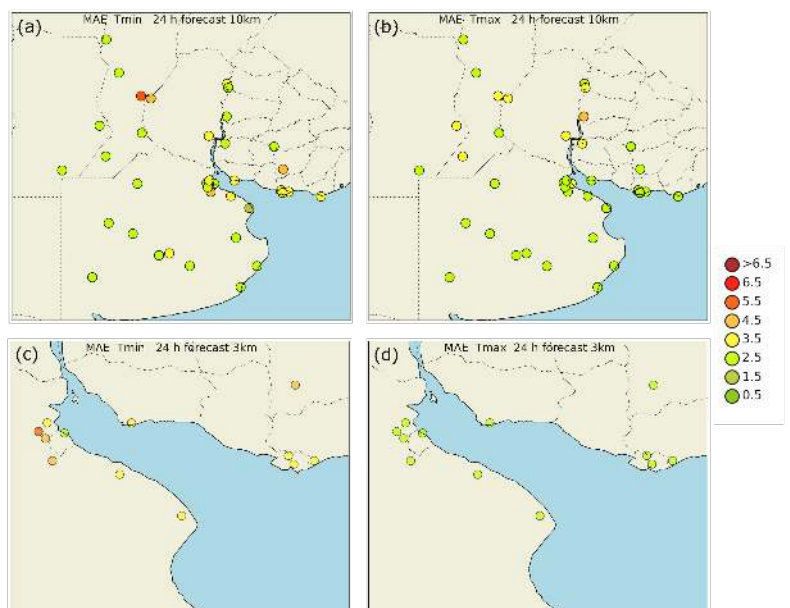


Figura 4: MAE del pronóstico a 24 horas de temperatura mínima (°C) en el dominio de 10 km (a) y 3 km (c), y de temperatura máxima (°C) en el dominio de 10 km (b) y 3 km (d)

REFERENCIAS

- Wilks, D. S. (2006):** Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second Edition. Academic Press.
- Skamarock W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J. y otros, 2019:** A description of the advanced research WRF version 4. NCAR/TN-556+STR TECHNICAL NOTE. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.

COMPARACIÓN DEL PRONÓSTICO DE ÍNDICE UV DE COPERNICUS-ECMWF CON MEDICIONES EN ARGENTINA

Fernando Nollas¹, Eduardo Luccini^{2,3}, Pablo Orte^{2,4}, Gerardo Carbajal Benitez¹, Elian Wolfram¹, María de los Milagros Skansi¹
fnollas@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³ Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica (UCA)

⁴ Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF).

Palabras clave: Índice UV, Servicio Meteorológico Nacional, red solarimétrica.

1) INTRODUCCIÓN

Conocer el comportamiento histórico de los valores de radiación solar ultravioleta (UV) en un determinado sitio permite adecuar políticas hacia el cuidado de la salud pública. Por otro lado, estimar con precisión los valores esperables de índice UV (UVI) permite tomar acciones preventivas a los tomadores de decisión para evitar daños por sobreexposición a la radiación UV. El programa Copernicus, del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) pone a disposición estimaciones de UVI con un horizonte temporal de hasta 137 hs, tanto para cielo claro como con nubosidad.

En el presente trabajo se realizó una comparación de los valores pronosticados de UVI a corto plazo, con anticipación de hasta 72 hs, con los datos medidos por la red solarimétrica del SMN.

2) METODOLOGÍA

Para el análisis de este trabajo se descargaron datos de pronóstico de UVI para 4 horizontes temporales diferentes correspondientes a la corrida de las 12 hs UTC: a corto plazo (el mismo día en cuestión), para el día siguiente (24 hs) y hasta 72 hs antes, completando 4 diferentes sets de datos a comparar contra las mediciones.

Para la comparación del pronóstico de UVI obtenido de ECMWF se utilizaron las estaciones de la red solarimétrica del SMN con datos disponibles entre 2022 y junio de 2024, debido a que son las fechas más cercanas a la última calibración de los radiómetros. Los datos utilizados en este trabajo corresponden a los sitios de La Quiaca, Tucumán, Mendoza, Pilar (prov. de Córdoba), CABA, Neuquén, Comodoro Rivadavia, Rio Gallegos y Ushuaia.

Se tuvo en cuenta que el pronóstico producido por ECMWF corresponde a valores instantáneos de las condiciones promedio. Cabe mencionar que, en condiciones de nubosidad, la radiación solar puede presentar una variabilidad muy grande en cortos períodos de tiempo (Gueymard, 2017). Por ello, en este trabajo se estableció que el valor correspondiente a una hora específica sea el promedio de las mediciones correspondiente a los valores de UVI en ± 15 minutos alrededor de cada hora. Una vez establecidos los valores horarios de las mediciones se realizó una comparación directa con los diferentes sets de pronósticos, los cuales se diferenciaron en la antelación del pronóstico con la idea de estudiar los desvíos estadísticos en función del horizonte del pronóstico. Las métricas utilizadas para la comparación fueron el desvío medio (MBD) y desvío cuadrático medio (RMSD).

Por otro lado, teniendo en cuenta que los días con cielo claro son los que mayor riesgo de sobreexposición pueden presentar para los seres vivos, se realizó un análisis comparativo bajo este tipo de condiciones de cielo. Para ello, se implementó la metodología de Reno y Hansen

(Reno and Hansen, 2016) combinado con el modelo paramétrico propuesto por Madronich (Madronic, 2007) para la detección de momentos de cielo claro previo a la comparación en los diferentes horizontes temporales. Una vez establecido si un determinado valor de UVI corresponde a condiciones de cielo claro, se utilizaron las mismas métricas para evaluar la performance del pronóstico a diferentes horizontes temporales.

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la Tabla I se muestran las métricas obtenidas de la comparación de los diferentes sets de datos de pronóstico considerando todo tipo de cielo.

ESTACIÓN/ OBSERVATORIO	PRONÓSTICO A CORTO PLAZO		PRONÓSTICO AL DIA SIGUIENTE		PRONÓSTICO A 48 hs		PRONÓSTICO A 72 hs	
	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD
La Quiaca	0.74 (12.2%)	1.37 (22.7%)	0.66 (11.0%)	1.34 (22.2%)	0.66 (10.9%)	1.38 (22.8%)	0.67 (11.3%)	1.40 (23.5%)
Tucumán	0.15 (3.6%)	1.84 (44.1%)	-0.07 (-1.7%)	1.92 (46.1%)	-0.05 (-1.2%)	1.95 (47.0%)	-0.15 (-3.7%)	2.03 (49.5%)
Pilar	-0.05 (-1.1%)	1.27 (27.6%)	-0.16 (-3.4%)	1.37 (29.7%)	-0.19 (-4.2%)	1.42 (30.7%)	-0.18 (-3.9%)	1.47 (32.2%)
Mendoza	0.41 (10.0%)	1.34 (32.5%)	0.29 (7.0%)	1.35 (32.8%)	0.27 (6.5%)	1.48 (36.0%)	0.28 (6.8%)	1.48 (36.1%)
Buenos Aires	0.39 (10.2%)	1.23 (32.3%)	0.41 (10.6%)	1.32 (34.7%)	0.37 (9.6%)	1.39 (36.5%)	0.36 (9.5%)	1.44 (38.1%)
Neuquén	0.14 (5.0%)	0.76 (27.7%)	0.17 (6.3%)	0.81 (29.5%)	0.18 (6.7%)	0.83 (30.3%)	0.22 (7.9%)	0.85 (30.8%)
Comodoro Rivadavia	0.14 (3.9%)	1.08 (30.7%)	0.18 (5.1%)	1.14 (32.5%)	0.18 (5.2%)	1.14 (32.5%)	0.18 (5.1%)	1.22 (34.9%)
Río Gallegos	-0.07 (-3.2%)	0.93 (46.1%)	-0.06 (-3.1%)	0.96 (47.8%)	-0.05 (-2.5%)	1.03 (51.4%)	-0.03 (-1.4%)	1.10 (54.8%)
Ushuaia	0.01 (0.8%)	0.86 (53.1%)	0.02 (1.1%)	0.91 (55.8%)	0.03 (1.8%)	0.9 (55.8%)	0.03 (2.0%)	0.95 (58.4%)

Tabla I. Métricas de la comparación entre los valores horarios de pronóstico y mediciones de UVI para todo tipo de cielo. Entre paréntesis se muestra el valor relativo al promedio de las mediciones.

De la Tabla I se deduce que, para la mayoría de los sitios, hay una leve mejora en las métricas para los horizontes temporales más cortos aunque poco significativa. Por otro lado, se observa una sobreestimación de los valores pronosticados El RMSD es una métrica más sensible a grandes desvíos de la predicción, por lo que obtener valores de este parámetro mayores a 1 en casi todos los sitios, indicaría dificultades para el modelo en pronosticar valores altos de UVI. En la Tabla II se presenta la comparación entre los valores horarios de pronóstico y mediciones de UVI para condiciones de cielo despejado. Se observa una mejora sustancial en las mismas respecto a todo tipo de cielo. Los valores de RMSD rondan en general el 10% bajo condiciones de cielo claro a excepción de Tucumán y Ushuaia.

En términos generales, Ushuaia es el sitio que menor correspondencia presenta entre el pronóstico y la medición, alcanzando un RMSD de 58.4% bajo condiciones de nubosidad, lo cual podría atribuirse a que la estación se encuentra cerca del mar y de las montañas, con una superficie cubierta por nieve durante muchos meses del año. Otro sitio que presenta métricas por encima del resto bajo condiciones todo tipo de cielo es Tucumán, sitio que se encuentra dentro de un valle, aunque sin superficie nevada por sus condiciones climáticas.

Considerando que el pronóstico de UVI provisto por ECMWF proviene de modelos numéricos del clima, las incertidumbres encontradas en este trabajo están dentro del rango encontrado incluso en otros parámetros radiativos para la región (Teixeira-Branco y otros, 2021).

	PRONÓSTICO A CORTO PLAZO		PRONÓSTICO AL DIA SIGUIENTE		PRONÓSTICO A 48 hs		PRONÓSTICO A 72 hs	
ESTACIÓN/ OBSERVATORIO	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD
La Quiaca	0.80 (15.0%)	0.99 (18.6%)	0.76 (14.4%)	0.95 (18.0%)	0.77 (14.6%)	0.97 (18.3%)	0.81 (15.5%)	1.00 (19.2%)
Tucumán	0.40 (8.2%)	0.62 (12.8%)	0.36 (7.4%)	0.59 (12.1%)	0.32 (6.6%)	0.58 (11.8%)	0.24 (5.4%)	0.47 (10.3%)
Pilar	0.04 (0.7%)	0.38 (7.6%)	-0.04 (-0.7%)	0.38 (7.6%)	-0.06 (-1.2%)	0.40 (7.9%)	-0.05 (-1.0%)	0.40 (7.9%)
Mendoza	0.45 (8.5%)	0.65 (12.3%)	0.44 (8.4%)	0.65 (12.3%)	0.44 (8.4%)	0.65 (12.3%)	0.43 (8.0%)	0.63 (11.6%)
Buenos Aires	0.15 (2.9%)	0.55 (10.7%)	0.08 (1.6%)	0.51 (10.1%)	0.09 (1.7%)	0.52 (10.2%)	0.12 (2.4%)	0.56 (11.2%)
Neuquén	0.04 (1.4%)	0.24 (7.9%)	0.09 (3.1%)	0.25 (8.2%)	0.11 (3.5%)	0.27 (8.7%)	0.13 (4.3%)	0.27 (8.9%)
Comodoro Rivadavia	0.07 (2.0%)	0.29 (8.4%)	0.09 (2.4%)	0.29 (8.3%)	0.10 (2.9%)	0.31 (8.8%)	0.09 (2.7%)	0.29 (8.4%)
Río Gallegos	0.03 (2.7%)	0.15 (12.5%)	0.04 (3.2%)	0.15 (12.6%)	0.04 (3.4%)	0.16 (13.3%)	0.04 (3.6%)	0.17 (13.9%)
Ushuaia	0.17 (19.3%)	0.28 (30.9%)	0.18 (20.2%)	0.29 (31.8%)	0.19 (20.8%)	0.29 (32.4%)	0.18 (19.9%)	0.28 (31.0%)

Tabla II. Métricas de la comparación entre los valores horarios de pronóstico y mediciones de UVI para condiciones de cielo claro. Entre paréntesis se muestra el valor relativo al promedio de las mediciones.

REFERENCIAS

Gueymard C., 2017. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance, *Solar Energy*. 153. 755–765.

Madronich S., 2007. Analytic Formula for the Clear-sky UV Index. *Photochemistry and Photobiology*, pp. 83: 1537–1538.

Reno M.J., Hansen C.W., 2016. Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements, *Renewable Energy*. 90 (2016) 520–531.

Teixeira-Branco, V., Alonso-Suárez, R., & David, M., 2021. Performance assessment of the ECMWF solar irradiation forecast in the Pampa Húmeda region of South America. *Proceedings of the ISES Solar World Congress*.

USO DE MODELOS BASADOS EN REDES NEURONALES RECURRENTE PARA EL PRONÓSTICO DE TEMPERATURA MEDIA MENSUAL EN ARGENTINA

Paula Oliveri¹, Marcela González²

poliveri@at.fcen.uba.ar. Autora correspondiente.

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEN, UBA)

²Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-UBA)

Palabras clave: pronóstico estacional, LSTMs, redes neuronales convolucionales.

1) INTRODUCCIÓN

Diferentes tipos de redes neuronales como perceptrón multicapa (MLP), redes neuronales recurrentes (RNN), long short-term memory (LSTM), redes neuronales convolucionales (CNN), etc., se han empleado en los últimos años para diseñar modelos de pronóstico de temperatura media en distintas escalas, con resultados muy prometedores (Tran et al., 2021). Dada la importancia de la predicción de la temperatura media, variable que afecta el consumo energético (Gil et al., 2005), durante el presente trabajo fueron desarrollados modelos de pronóstico para esta variable en escala mensual. Dichos modelos estuvieron basados en LSTMs y combinaciones de éstas con otros tipos de RNNs y con CNNs, para cinco estaciones meteorológicas de distintas regiones de Argentina.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se desarrollaron modelos de pronóstico de temperatura media mensual basados principalmente en redes neuronales recurrentes del tipo *Long short-term memory* (LSTM), para las estaciones meteorológicas: OCBA, Salta Aero, Posadas Aero, Córdoba Obs., y Comodoro Rivadavia Aero, cada una representativa de una región diferente de Argentina. Las LSTM se estudiaron en combinación con *Gated recurrent units* (GRUs), *Bidirectional LSTM* (BLSTM) y *Convolutional Neural Networks* (CNN), generando modelos de diversas arquitecturas.

Los siguientes datos fueron utilizados como inputs para las redes neuronales:

- a) Observaciones de estaciones meteorológicas de la red del Servicio Meteorológico Nacional.
- b) Índices de oscilaciones climáticas de gran escala provenientes de los datasets NOAA Climate Prediction Center, KNMI Climate Explorer y Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO).
- c) Índices que representan posición e intensidad de los anticiclones del Atlántico y Pacífico (AA y AP) definidos por Garbarini (2016). Los datos de altura geopotencial empleados pertenecen al reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2019)
- d) Otros varios índices definidos especialmente para este trabajo, que representan la variabilidad de los vientos meridionales de capas bajas (Oliveri y González, 2022), por un lado, y la variabilidad de la temperatura de superficie del mar de los océanos Pacífico y Atlántico cercanos a la región, por otro. Los datos utilizados para su cálculo pertenecen al reanálisis ERA5.

Los parámetros de los modelos se obtuvieron utilizando el período de entrenamiento 1980-2010. Para cada estación meteorológica por separado se realizó el ajuste de hiperparámetros en base al período de validación 2011-2016, teniendo en cuenta diferentes combinaciones de: funciones de activación, número de nodos, batch size, número de capas, dropout, entre otros. Las métricas consideradas para evaluar los modelos fueron: el RMSE y el RMSEss (skill score; con respecto a la climatología). La longitud temporal de los inputs se fijó en 2 meses, ya que en general se obtuvieron mejores resultados que con 1 y 3. Para cada estación meteorológica por separado se realizó una selección de predictores utilizando un algoritmo de *Permutation Feature Importance* (Fisher et al., 2019), el cual logró disminuir el tamaño del conjunto inicial de predictores, sin incrementar significativamente el error. Los años 2017 y 2018 fueron destinados a test.

3) RESULTADOS

La mejora de los modelos con respecto a la climatología fue en forma general muy leve, lo que se evidencia a partir de la dificultad de los mismos para representar los valores extremos. Los valores de RMSE para el período de validación (2011-2016) tuvieron valores entre 1.04 y 1.30°C, dependiendo de la estación. Para cada estación se eligieron los mejores modelos en base al valor de RMSEss de validación, para poder evaluar un ensamble además de cada modelo individual. La cota para elegir dichos modelos fue un RMSEss de 0.07, excepto para Córdoba Obs. que se tomó la cota de 0.04 debido a que los modelos tuvieron un desempeño inferior para esta estación, e incluso en ese caso sólo dos modelos la superaron. En la Fig.1 se muestra la serie de temperatura media mensual pronosticada por la media del ensamble, para la estación Comodoro Rivadavia Aero en el período de validación (el resto de las estaciones no se muestran). El ensamble de modelos también fue evaluado para el período de test (2017-2018). Aunque los RMSE para este último resultaron mayores a los del período de validación, también se observó una cierta mejora con respecto al pronóstico por climatología, sobre todo para la estación Posadas Aero. En la Tabla I se muestran los valores obtenidos de RMSE y RMSEss para la media del ensamble de cada estación, para los períodos de validación y test.

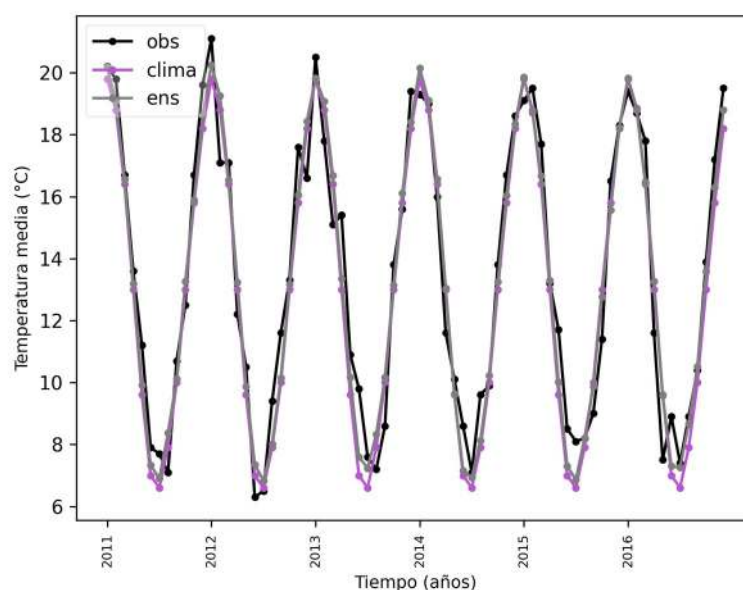


Figura 1. Series de temperatura media mensual de la estación Comodoro Rivadavia para el período 2011-2016: observada (negro), climatología (lila) y pronosticada por la media del ensamble (gris).

ESTACIÓN	Validación		Test	
	RMSE (°C)	RMSEss	RMSE (°C)	RMSEss
OCBA (7)	1.11	0.07	1.48	0.09
SALTA AERO (10)	1.12	0.08	1.65	0.08
POSADAS AERO (4)	1.21	0.09	1.45	0.22
CÓRDOBA OBS (2)	1.26	0.04	1.64	0.05
COMODORO RIVADAVIA AERO (14)	1.04	0.09	1.28	0.06

Tabla I. Valores de RMSE y RMSEss para la media del ensamble de cada estación. En la primera columna, entre paréntesis, se indica la cantidad de modelos en cada caso.

4) CONCLUSIONES

Los modelos de pronóstico de temperatura media mensual basados en redes neuronales recurrentes LSTM y distintas arquitecturas que combinan este tipo de redes con otras como GRU, BLSTM y CNN, que fueron estudiados en el presente trabajo, han logrado una mejora muy leve con respecto al pronóstico por climatología, en la mayoría de los casos en menos de 10 puntos porcentuales de RMSE. Esto es consecuente con la dificultad de los mismos para representar los valores extremos. No obstante, como parte de trabajo futuro, se seguirá intentando mejorar los resultados obtenidos, incluyendo el uso de otros hiperparámetros que aún no fueron abordados.

AGRADECIMIENTOS

A los proyectos UBACyT 20020190100090BA y CONICET 11220210100282CO por la financiación.

Al Servicio Meteorológico Nacional, ECMWF, NOAA Climate Prediction Center, KNMI y JISAO por los datos provistos.

REFERENCIAS

- Fisher, A., Rudin, C. and Dominici, F., 2019:** All Models Are Wrong, but Many Are Useful: Learning a Variable's Importance by Studying an Entire Class of Prediction Models Simultaneously. *Journal of Machine Learning Research: JMLR* 20: 177.
- Garbarini, E.M. , 2016:** Algunos indicadores para la predicción estadística de la precipitación estacional en Argentina. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Gil, S., Duperron, L. y Ruggero, R, 2005:** Evaluación del plan de ahorro de consumo de gas natural en Argentina, *Pretrotécnia (Revista del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas)* XLVI, N°3, (pág.48).
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., y Thépaut, J-N., 2019:** ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 10.24381/cds.6860a573
- Oliveri, P.C., González, M.H., 2022:** La relación entre el viento meridional en capas bajas y la variabilidad de la temperatura media en Argentina [Presentación de póster]. XIV Congreso Argentino de Meteorología (Buenos Aires, Argentina). https://cenamet.org.ar/congremet/wp-content/uploads/2023/02/LibroActas_compressed.pdf
- Tran, T.T.K.; Bateni, S.M.; Ki, S.J.; Vosoughifar, H., 2021:** A Review of Neural Networks for Air Temperature Forecasting. *Water* 2021, 13, 1294. 10.3390/w13091294.

CAMBIOS SIGNIFICATIVOS EN LA PRECIPITACIÓN SEGÚN LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO DE LA CUARTA COMUNICACIÓN NACIONAL DE COLOMBIA

Hernán D. Salas¹, Carolina Florian-Vergara¹
hernansalas@itm.edu.co. Autor/a correspondiente.

¹Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas, Departamento de Ciencias Ambientales y la Construcción, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia.

Palabras clave: Tendencias, Modelos Climáticos Globales, Hidroclimatología tropical.

1) INTRODUCCIÓN

El Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) destacó el papel crucial de las actividades humanas para comprender los impactos del cambio climático, así como la adaptación y la vulnerabilidad (IPCC 2022). En particular, Centro y Sur América enfrentan desafíos exacerbados debido a factores como la desigualdad, la pobreza y la deforestación. Esta situación intensifica los riesgos para los ecosistemas, el agua, la agricultura y la migración. Se anticipan impactos significativos en los ecosistemas, el agua y los alimentos, particularmente en la región noroeste de América del Sur, incluyendo los Andes (IPCC, 2022). En este sentido, las estrategias de adaptación eficaces requieren de datos hidroclimáticos de alta resolución espacial y temporal, políticas transversales, enfoques participativos y la integración de la adaptación basada en los ecosistemas y en la comunidad (IPCC, 2022). La falta de datos y análisis suficientes para la toma de decisiones de adaptación al cambio climático sigue siendo un obstáculo clave para abordar los desafíos hídricos en la región (Salas, et al., 2023; Florian-Vergara, et al. 2021).

Recientemente el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) presentó los Escenarios de Cambio Climático de la Cuarta Comunicación Nacional de Colombia, en adelante 4CN (IDEAM, 2024), en la cual se hizo la revisión de los cambios esperados para precipitación, temperatura (máxima, mínima y media), humedad relativa y entre otras variables climáticas, tanto para el periodo histórico 1981-2021, como para proyecciones futuras 2021-2100 de cuatro de los cinco escenarios SSP de los modelos CMIP6 de AR6 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5). Dicho estudio incluye la reducción de escala de los datos hidroclimáticos para 25 de los 80 modelos del CMIP6. Los datos tienen escala temporal diaria y a una resolución espacial de 10x10 km, tanto para el periodo histórico, como para el periodo futuro. En general, el reporte muestra cambios en las variables climáticas sobre el territorio colombiano. Para precipitación se presentan reducciones del 50% en algunos lugares y aumentos superiores al 50% en otros, mientras las temperaturas máximas muestran aumento generalizado en un rango de 0.5°C a 5°C cuya distribución también varía sobre el territorio nacional.

En este trabajo presenta la significancia estadística de cambios en la climatología de precipitación para los escenarios SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) en el periodo 2021-2100 con relación a los registros históricos 1981-2021. Además, se cuantifican las tendencias y su significancia estadística. Este enfoque complementa los resultados presentados en la 4CN y además ofrece información relevante para la toma de decisiones en las zonas hidrográficas del territorio colombiano que deben priorizarse para orientar planes y medidas de adaptación y mitigación en múltiples ámbitos sociales, económicos y ambientales.

2) MÉTODOS

Cuantificamos los cambios en la precipitación para los escenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) en el periodo 2021-2100 de la 4CN con relación a la climatología de los registros históricos, 1981-2021. Para tal fin, cuantificamos el cambio porcentual de la diferencia entre el promedio de largo plazo para cada escenario SSP con relación al histórico en términos porcentuales. Adicionalmente, identificamos las zonas que exhiben un cambio significativo en la climatología de los escenarios SSP con relación al histórico utilizando una prueba T. Para cada escenario también se cuantificaron las tendencias y su significancia utilizando la prueba de Mann-Kendall (Hamed & Rao, 1998).

4) RESULTADOS

En general, nuestros resultados evidencian cambios significativos sobre el territorio continental de Colombia. En particular, los cambios porcentuales en la precipitación media de largo plazo muestran variabilidad en rangos porcentuales entre -20% y 30%. Geográficamente, se evidencia una expansión de las zonas con cambio significativo para las regiones naturales de Colombia. En particular, los escenarios SSP1 y SSP2 muestran cambios en algunas zonas de las regiones Andina y Pacífico con cambios porcentuales del orden de 10%. El escenario SSP3 muestra alteraciones al norte de las regiones Pacífico y Orinoco con variaciones alrededor del 10%. Mientras el escenario SSP5 indica cambios significativos sobre todas las regiones de Colombia con cambio porcentuales del orden de 30% en algunas zonas, destacándose las regiones Andina, Pacífico, Caribe y el norte del Orinoco.

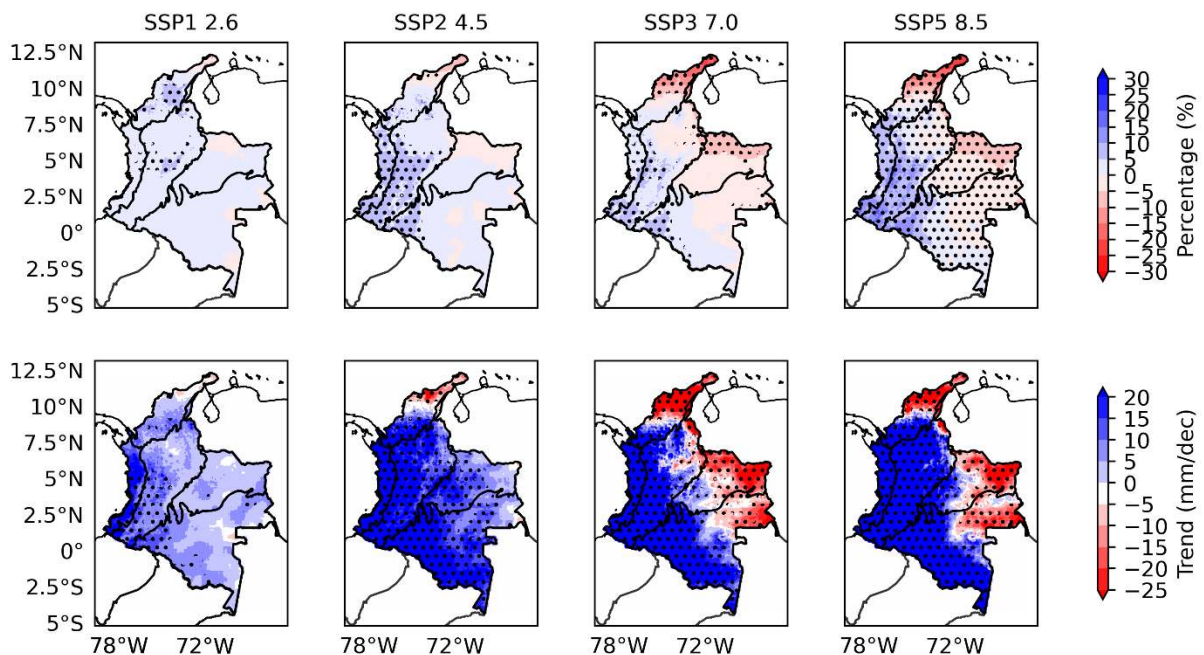


Figura 1. Zona de estudio y regiones naturales de Colombia. (arriba) Porcentaje de cambio de la precipitación promedio para el periodo 2021-2100 con relación a la precipitación promedio para el periodo histórico 1981-2021. Los puntos denotan los cambios significativos en la media según la prueba T. (abajo) Tendencias. Los puntos denotan las tendencias significativas según la prueba Mann-Kendall.

El análisis de tendencias muestra tendencias crecientes y decrecientes sobre Colombia, con valores que varían entre 20 mm/dec y -25 mm/dec. El escenario SSP1 indica cambios significativos al sur de la región Andina, mientras que el SSP2 muestra una significancia en las tendencias crecientes sobre gran parte del país del orden de 20 mm/dec. Los escenarios SSP3 y SSP5 muestran patrones coherentes con una zona de tendencias decrecientes hacia el oriente de las regiones Amazonas y Orinoco con tendencias de hasta 25 mm/dec. Al norte del país, se evidencian tendencias significativas para la región Caribe del mismo orden de magnitud.

Nuestros resultados complementan los resultados presentados por el IDEAM en la 4CN de Colombia y exhiben patrones importantes para el diagnóstico sobre el potencial impacto del cambio climático en la precipitación de las regiones naturales de Colombia. Además, ofrece información relevante para la toma de decisiones y la planeación estratégica de adaptación y mitigación del cambio climático para diversos sectores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Gobierno de Canadá “New Frontiers in Research Fund (NFRF), attributed to the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Social Sciences and Humanities Research Council of Canada (SSHRC), [NFRFI-2023-00561]”. Carolina Florian Vergara agradece el apoyo del programa Jóvenes Investigadores e Innovadores, convocatoria 2025000305 del ITM 2025.

REFERENCIAS

IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/ar6-syr/>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2024: Escenarios de cambio climático de la Cuarta Comunicación de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, Fundación Natura y Proyecto GEF-CBIT “Transparencia Climática Colombia”.

IDEAM, 2013: Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, Bogotá, D. C., Colombia. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, noviembre de 2013, Bogotá, D. C., Colombia.

Florian-Vergara, C. Salas, H.D., Builes-Jaramillo, A., 2021: Análisis de la precipitación y la evaporación en el Orinoco colombiano según los modelos climáticos regionales del experimento CORDEX-CORE, *TecnoLógicas*, vol. 24, nro. 52, e2144, 2021. <https://doi.org/10.22430/22565337.2144>

Salas, H.D., Builes-Jaramillo, A., Florian, C., Valencia, J., Tamayo, Y., Bermudez, M., Rodríguez, M., Echeverri, K., 2024: Projected effects of climate change in precipitation and streamflows of the Upper Orinoco River Basin from global and regional climate models. *Journal of Water and Climate Change*, doi: 10.2166/wcc.2024.659

Hamed, K. H., & Rao, A. R., (1998): A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196. doi:10.1016/S0022-1694(97)00125-X



2

Inserción de la meteorología y la oceanografía en la sociedad

Energía eólica offshore: desafíos y oportunidades para la transición y diversificación energética en el sur global

Juan Pablo Guzmán-Escalante¹, Douglas Da Silva Lindemann¹, Alvaro Javier Avila-Díaz^{1,2}, Benjamín Quesada²

juan.escalante@correounivalle.edu.co . Autor correspondiente

¹ Grupo de Pesquisa em Interação Oceano-Atmosfera e Climatologia. Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Rio Grande Do Sul, Brasil

² Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia

Palabras clave: revisión sistemática de literatura, datos de reanálisis atmosférico

Resumen

La energía eólica offshore gana protagonismo como una vía estratégica hacia la transición energética, especialmente en regiones con alto potencial eólico y acceso limitado a tecnologías limpias. A través de una revisión sistemática de literatura, el estudio analiza las fuentes de datos y metodologías más utilizadas, resaltando vacíos de conocimiento y la distribución desigual de la producción científica en el Sur Global.

Abstract

Offshore wind energy is gaining prominence as a strategic path toward the energy transition, particularly in regions with high wind potential and limited access to clean technologies. Through a systematic literature review, the study analyzes the most commonly used data sources and methodologies, highlighting knowledge gaps and the unequal distribution of scientific production in the Global South.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el informe de seguimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 7, el panorama global respecto al acceso universal a la electricidad continúa siendo preocupante, especialmente para las poblaciones más vulnerables. Si bien en 2021 el 91% de la población mundial contaba con acceso a electricidad —un incremento de seis puntos porcentuales en comparación con 2010—, el ritmo de crecimiento entre 2019 y 2021 fue marcadamente bajo (IEA et al. 2022).

La distribución espacial de los principales indicadores analizados en aquel informe presenta una alta heterogeneidad, con patrones de concentración en países del Sur Global. Esto, debido a que las tasas más bajas de acceso a la electricidad, tanto en contextos urbanos como rurales, así como los mayores volúmenes de población sin acceso a electricidad, se localizan predominantemente en países del continente africano, así como en regiones de Sudamérica y del sur de Asia (IEA et al. 2022).

Además de los desafíos asociados al acceso universal a la electricidad, diversas presiones de carácter ambiental, político y económico han acentuado la urgencia de una transición energética sostenible. En este contexto, la energía eólica se perfila como una de las fuentes renovables con mayor potencial de crecimiento y consolidación dentro de las nuevas matrices energéticas (González, 2009; Manwell et al. 2010).

Para el año 2022, la capacidad instalada de energía eólica a nivel mundial alcanzó los 906 GW, de los cuales más del 80% corresponden a parques eólicos terrestres (*onshore*). Si bien estas infraestructuras presentan ventajas en términos de costos y facilidad de mantenimiento, su

rendimiento se ve condicionado por factores como el relieve natural y antrópico, que afectan la distribución espacial del viento —principal insumo para el funcionamiento de las turbinas—, así como por conflictos sociales y ambientales inherentes a su instalación (Gorayeb et al. 2022) generando importantes limitaciones en el aprovechamiento pleno de su potencial energético.

En este contexto, la energía eólica marina u *offshore* ha ganado protagonismo como alternativa estratégica, ya que diversos estudios han evidenciado densidades de potencial eólico (wpd) significativamente superiores en zonas marítimas en comparación con áreas continentales. Particularmente, se ha observado un aumento notable de estas densidades en el hemisferio sur a partir de los 40°S, lo que sugiere un alto potencial para las regiones costeras del Sur Global en América del Sur, Oceanía y África (Soares et al. 2020).

Sin embargo, el desarrollo de la industria eólica, así como de la producción científica asociada, se encuentra geográficamente concentrado en países del Norte Global, aquellos mismos que cuentan con excelentes tasas de acceso a electricidad en zonas urbanas y rurales. Esta concentración genera asimetrías en el acceso a información científica clave para la planificación y el desarrollo de proyectos eólicos, perpetuando desigualdades en el acceso a la energía y acentuando la vulnerabilidad de comunidades históricamente excluidas.

Ante este panorama, la presente investigación propone una revisión sistemática de literatura orientada a caracterizar el estado del arte de la energía eólica offshore, identificando las regiones más desarrolladas, los datos y métodos usualmente empleados, períodos temporales de evaluación y las diferentes formas de evaluación del potencial eólico marino. De esta manera, se expone que la falta de acceso a la información, y por tanto a las tecnologías asociadas, limita el aprovechamiento del potencial eólico por parte de países no hegemónicos. Desde una perspectiva meteorológica, este estudio permite identificar las prácticas y herramientas más comúnmente utilizadas para la modelación del viento en entornos oceánicos, lo que resulta clave para fortalecer el vínculo entre conocimiento meteorológico, planificación energética y justicia territorial.

METODOLOGÍA

Se construyó un marco teórico en torno a la energía eólica offshore a partir de una revisión sistemática de literatura, desarrollada en la base de datos Scopus (Elsevier). Para ello, se definieron criterios de inclusión y exclusión que permitieron delimitar los documentos seleccionados, ajustando los resultados a la temática central del estudio. La información extraída fue organizada en 41 categorías que permitieron caracterizar cada documento desde una perspectiva cuantitativa, metodológica y sobre resultados obtenidos. Se esquematizaron los documentos y se realizaron gráficas para analizar global, regional y localmente los patrones, vacíos y tendencias en la producción científica eólica offshore.

RESULTADOS

Fueron leídos, analizados y sistematizados 150 artículos publicados, lo que permitió construir un esquema global, regional y local sobre las características cuantitativas, metodológicas, y de principales hallazgos identificados, asociados a la investigación científica en energía eólica offshore. Esta revisión evidenció un crecimiento exponencial desde el 2013, de la producción científica asociada. Las mayores concentraciones de investigaciones existentes se dan en países del norte global, como Estados Unidos, China y países del norte de Europa. De manera paralela, el aporte científico de países del sur global es considerablemente limitado.

Los documentos analizados revelaron una fuerte dependencia de datos provenientes de reanálisis atmosféricos, y en menor medida, del uso de datos satelitales y observacionales. Predominaron las series temporales inferiores a los 10 años, y se evidenció un sincretismo en los métodos de validación aplicados a la información utilizada para la caracterización del viento, con procedimientos que tienden a repetirse entre estudios. Estas metodologías fueron, a su vez, coherentes con los enfoques empleados para la estimación de la velocidad del viento, insumo esencial en el cálculo de la WPD y del potencial eólico total.

CONCLUSIONES

Los métodos más comúnmente utilizados son accesibles y adecuados para contextos económicos restringidos. Por esto, el análisis e incorporación de estas metodologías constituye un insumo valioso y factible para el desarrollo de investigaciones en regiones con alto potencial eólico, pero que aún requieren estudios más detallados que refinan las estimaciones (generales) existentes, haciéndolas más precisas y confiables.

Por otro lado, se identificó una importante debilidad en la cobertura temporal de los estudios analizados, con escasa consideración de patrones climatológicos amplios del viento. Esta limitación implica vacíos significativos en la incorporación de dinámicas atmosféricas, lo cual restringe la robustez de las evaluaciones realizadas. En un contexto de cambio climático acelerado, donde las alteraciones en los patrones de viento pueden ser sensibles incluso en escalas locales, omitir estas variaciones podría derivar en estimaciones subvaloradas o sobrevaloradas del potencial eólico. Este aspecto puede resultar contraproducente para la planificación y consolidación de proyectos energéticos sostenibles, particularmente en regiones que más lo necesitan.

Esta revisión permitió evidenciar, desde una perspectiva holística, las profundas desigualdades en la producción de conocimiento científico, las cuales reflejan y refuerzan las asimetrías en el desarrollo de infraestructura energética a nivel global. Este panorama enciende una alerta frente a una fuente energética que aún se encuentra en proceso de consolidación. Ante ello, resulta fundamental que los países del sur global reconozcan y actúen sobre sus propias ventajas geográficas y atmosféricas, con el fin de avanzar hacia una transición energética justa, soberana y capaz de mejorar efectivamente la calidad de vida de sus poblaciones.

REFERENCIAS

González, J. 2009: Energías renovables. Barcelona: Editorial Reverte S.A,v.I, 1–656p.

Gorayeb, A.; Mesquita, R. D. P.; Silva, T. D. A.; Silva, R. B. Da; Silva, G. D. C. 2022: Análise multicritério de parques eólicos onshore e offshore no Ceará: em foco as comunidades tradicionais litorâneas. Revista Mutirão. Folhetim de Geografias Agrárias do Sul, [s. l.], v. 3, n. 2.

IEA; IRENA, UNSD, WORLD BANK W. Tracking SDG 7: The Energy Progress Report. World Bank, Washington DC. © World Bank. License: Creative Commons Attribution—NonCommercial 3.0 IGO (CC BY-NC3.0 IGO)

Manwell, J. F.; McGowan, J. G.; Rogers, A. L. 2010: Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. [s.l.]: [s.n.], DOI: 10.1002/9781119994367.

Soares, P. M. M.; Lima, D. C. A.; Nogueira, M. 2020: Global offshore wind energy resources using the new ERA-5 reanalysis. Environmental Research Letters, [s.l.], v. 15, no 10, ISSN: 17489326, DOI: 10.1088/1748-9326/abb10d.

ESTUDIO DE CASO DE ENCUENTRO CON GRANIZO DE UNA AERONAVE EN VUELO

Claudia Ribero¹, Roxana Vasques Ferro¹

cribero@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Transporte aéreo, fenómenos meteorológicos adversos, fases de vuelo.

1. INTRODUCCIÓN

La meteorología es una disciplina que cumple un rol fundamental en el sector de la aviación y prueba de ello son los distintos sucesos aéreos que se han desencadenado por exponer una aeronave a una condición atmosférica adversa.

El análisis de este caso busca identificar factores que afectan la seguridad de las operaciones aéreas relacionadas a los fenómenos meteorológicos, y a su vez proponer estrategias para la mitigación de sus riesgos, teniendo como marco de referencia la normativa de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Este trabajo además tiene como objetivo ofrecer recomendaciones y buenas prácticas orientadas a las partes interesadas en la aviación, derivadas del análisis de un caso de estudio de una situación meteorológica específica en apoyo a los Sistemas de Gestión de la Seguridad Operacional por sus siglas en inglés SMS (Safety Management System).

Para realizar este estudio se analizó la situación meteorológica previa, durante y posterior al evento sucedido el día 12 de noviembre del 2018 a las 23:10 UTC, cuando un avión Airbus A-320-214 encontrándose a 1.604 ft (FL160) tuvo que detener su ascenso inicial debido a un encuentro con granizo, por la cual tuvo que regresar al aeropuerto del que despegó. El suceso catalogado como “incidente” por la entonces Junta de Investigación de Accidentes de Argentina (JIAAC), ahora Junta de Seguridad del Transporte (JST), le provocó la rotura de su parabrisas (ver Figura 5). La aeronave se encontraba en la fase de ascenso inicial saliendo del aeropuerto Internacional de la ciudad de Córdoba “Ing. Taravella” (Argentina) con destino al Aeropuerto Internacional “Arturo Merino Benítez” de la Ciudad de Santiago de Chile (Chile).

2. FIGURAS

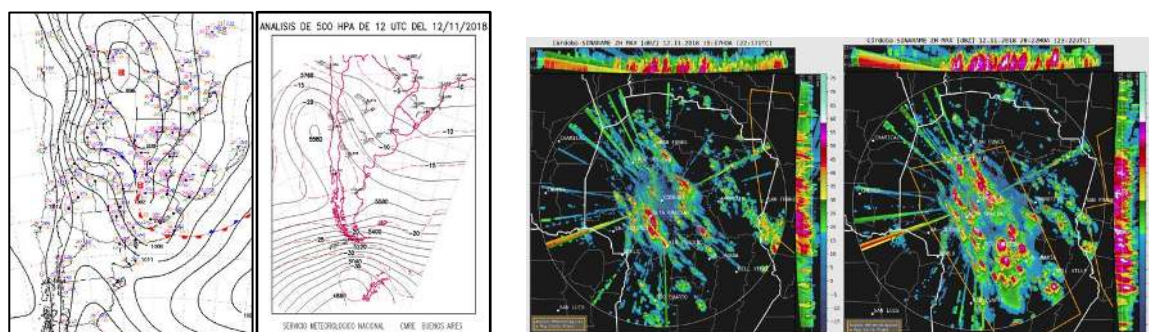


Figura 1. Carta de Superficie 21:00 UTC | 2. Carta de Altura 500 HPa | 3. Imagen Radar RAM1 - Córdoba 12/11/2018 22:17 UTC – SMN | Figura 4. Imagen Radar RAM1 - Córdoba 12/11/2018 23:22 UTC - SMN



Figura 5. Daños a la estructura de la aeronave. Diario “La Voz de Córdoba: https://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/un-avion-de-latam-queda-en-medio-de-una-tormenta-de-granizo-y-debio-aterrizar-en-cordoba?cx_level=mas_de

3. RESULTADOS

Los resultados fueron obtenidos a partir del análisis de los informes METAR/SPECI (Anexo 3, OACI) del aeropuerto de Córdoba (Sigla OACI: SACO), desde un par de horas antes del suceso, durante así como después del mismo. Asimismo, se tuvieron en cuenta los informes SIGMET (Anexo 3, OACI) del día del evento. Adicionalmente, se estudiaron los análisis de las cartas sinópticas de superficie (Figura 1), llegando a un diagnóstico de la situación cercano al momento del suceso, en la que se apreció un frente frío al noreste del Aeropuerto de la Ciudad de Córdoba de lento desplazamiento (Arhens, 2009), asociado a un sistema de baja presión de valor inferior a 1002 hPa ubicada en extremo sudeste de la Provincia de Córdoba/Sur de Provincia de Santa Fe. De acuerdo al análisis de la información de superficie, la masa de aire post-frontal pudo notarse aún muy húmeda y algunos datos mostraron valores saturados y otro cercanos a la saturación. Además, como resultado del análisis del sondeo de altura del día del suceso, se observó que la masa de aire estaba saturada hasta el nivel 375 ha (el nivel hasta donde llegó el sondeo ese día). Por otra parte, en las cartas de altura se distinguieron en todos los niveles una marcada delantera de vaguada, especialmente con núcleo cerrado en 500 hPa (Figura 2) en el Océano Pacífico. En este mismo nivel de altura se notó un marcado gradiente de temperatura entre los aeropuertos de Santiago de Chile y de Córdoba que llegaba casi a 20° C, con un núcleo frío al oeste de Santiago de Chile. Además, se pudo observar una corriente en chorro entre 250 a 200 hPa con su valor máximo de intensidad de 140Kt con dirección noroeste ubicado entre Santiago de Chile y Antofagasta. Finalmente, en relación con el modelo de pronóstico numérico WRF (Hobouchian y otros, 2018) disponibles previos al vuelo, se pudo notar que en los productos de reflectividad y precipitación pronosticados para las 23:00 UTC y 00:00 UTC, no se observaba la probabilidad de formación actividad convectiva y/o precipitaciones en la zona del suceso y alrededores. Vale aclarar que la información previa a efectos de la planificación de vuelos disponible 3 horas antes del despegue, no mostró presencia de formación de tormentas asociadas a nubosidad convectiva (CB), sea en el aeródromo como en la vecindad. Mientras que, en las imágenes de satélite y radar, se comenzó a apreciar convección con posibilidades de afectar las inmediaciones del Aeropuerto de Córdoba y zona de ascenso a partir de las 22:00 UTC (Ver figuras 3 y 4) del producto “reflectividad máxima” (COLMAX) (Rugna y Vidal, 2020) para el radar RAM1 (Córdoba) del SINaRaMe (Vidal, 2013), con sectores claramente identificados con granizo. Es importante resaltar, que tanto las imágenes de satélite como de radar se encuentran disponibles para su uso operativo (Rugna y otros, 2018) con cierta demora, debido al tiempo de procesamiento de estas (latencia). Respecto a la formación de nubosidad convectiva, que había sido pronosticada tanto en las cartas de tiempo significativo de baja altura (largo plazo) (Anexo 3, OACI) como en los informes SIGMET (corto plazo) (Anexo 3, OACI), se pudo verificar su existencia efectivamente con diferentes fuentes de datos observados convencionales y remotos.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis descripto en el anterior ítem se mostró evidente la situación de posible formación de actividad convectiva, ya que si bien el área del suceso se encontraba en una zona de aire post-frontal esta se presentaba todavía muy húmeda, los puntos de rocío seguían altos, en altura imperaba una situación que presentaba una delantera de vaguada (Arhens, 2009). En consecuencia, esta última favoreció la convergencia horizontal en capas bajas y los movimientos de ascenso del aire húmedo presente que produjeron la actividad convectiva aun estando en zona post-frontal.

Si bien, algunos productos del modelo WRF no preveían la formación de actividad convectiva, y, la situación que mostraban los datos previos (etapa de planificación de vuelo) no evidenciaban actividad cercana a la zona del aeropuerto, ni en las inmediaciones del evento, por otra parte, las cartas analizadas de superficie, cartas de altura y las cartas pronosticadas a baja altura sí mostraban que la zona se encontraba bajo amenaza de formación de actividad convectiva. Esto revela la importancia de la vigilancia por sensores remotos y el nowcasting (Arruti y otros, 2024) que desarrolla el pronosticador en este tipo de situación, ya que los sistemas convectivos representan un desafío a la hora de predecirlos y estudiarlos utilizando sólo modelos numéricos (Álvarez Imaz y otros, 2018). Además, este trabajo permite acercar al usuario un caso que pone de relevancia la importancia de mantener “la conciencia situacional de las condiciones atmosféricas durante todas las fases de vuelo”, y que se logra haciendo un uso adecuado de los productos y servicios (ej.: asesoramiento verbal, etc.) que brinda el Servicio Meteorológico en todo momento. De acuerdo a los resultados y conclusiones del trabajo surgen las antes mencionadas recomendaciones y buenas prácticas, tanto para los diferentes tipos de usuarios como para el personal meteorológico aeronáutico operativo.

REFERENCIAS

Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), 2024: Anexo 3 - Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional.

Vidal, L., 2013: Sistema Nacional de Radares (SINaRaMe)
<https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/254>

Hobouchian, M., Matsudo, C., García Skabar, Y. y Sacco, M., 2018: Validación operativa de la calidad del pronóstico del WRF-ARG
<https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/808>

Rugna M., Vidal L., 2022: Evaluación preliminar de algoritmos de detección de granizo con radar meteorológico en banda c
<https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/2439>

Rugna, M., Vidal, L., Zeitune, M. y Lohigorry, P., 2018: Nuevos productos de radar y satélite: desarrollo e implementación operativa en el Servicio Meteorológico Nacional
<https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/943>

Arruti, A., García Skabar, Y., Ruiz, J. y Vidal, L., 2024: Sobre las técnicas de nowcasting con sensores remotos
<https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/2755>

<https://jst.gob.ar/files/informes/AE/2018/111218-58459024/IB-58459024-18.pdf> Consultado 06052025

INTRODUCCIÓN DE MEJORAS EN EL SISTEMA DE AVIACIÓN CIVIL EJERCICIO DE SIMULACIÓN DE ERUPCIONES DE CENIZAS VOLCÁNICAS

Roxana Vasques Ferro¹, Claudia Ribero¹, Juan Augusto Díaz¹
rvasques@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Seguridad de las operaciones aéreas, fenómenos medioambientales, lecciones aprendidas.

1) INTRODUCCIÓN

En diciembre de 2024, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) participó del ejercicio de ceniza volcánica (Doc. 9766, OACI) organizado por la Oficina Regional Sudamericana (SAM) de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), denominado SAM VOLCEX 24/01. Participaron del mismo el Centro de Avisos de Ceniza Volcánica (VAAC) Buenos Aires, el VAAC Washington (Ver Figura 1), las oficinas de vigilancia meteorológica, los observatorios de los volcanes de los Estados y los proveedores de servicios de navegación aérea de la región SAM de la OACI. Asimismo, se invitó a participar a las compañías aéreas, a los explotadores de aeropuertos y organizaciones internacionales que operan en el área de responsabilidad de la región SAM de la OACI, y se contó con la colaboración de la Autoridad de Aviación Civil (AAC) de la Argentina (ANAC).

El ejercicio de erupción volcánica (VOLCEX) tuvo como objetivo principal medir la capacidad de respuesta del transporte aéreo y los Servicios de Navegación aérea, entre otros actores, ante una nube de ceniza volcánica provocada por la erupción de uno o más volcanes, en este caso “ficticia”.

El ejercicio sobre cenizas volcánicas SAM VOLCEX 24/01 organizado por la OACI para la región Sudamericana (SAM) como ejercicio de simulación, consistió en la erupción casi simultánea de tres volcanes ficticios los VOLCANO 01, 02 y 03 ubicados en los Estados de Chile, Perú y Colombia respectivamente (Ver Figura 2). Las erupciones de los VOLCANO 01 y 02 con ubicaciones ficticias dentro del área de responsabilidad del VAAC Buenos Aires, mientras que el VOLCANO 03 ubicado dentro del área de responsabilidad del VAAC Washington.

El ejercicio SAM VOLCEX 24/01 fue el primero realizado para la Región Sudamericana de la OACI, y, representa una mejora respecto a los ejercicios de ceniza volcánica realizados anteriormente por los servicio meteorológicos para la navegación aérea (MET), nos referimos a los Ejercicios FICTITUS. Ya que en este último caso de simulación se amplió el involucramiento a los servicios de tránsito aéreo, a los servicios de información aeronáutica, a los observatorios de los volcanes de los Estados, y a los operadores aéreos de la región.

En este trabajo se plantea la experiencia de las oficinas SMN que prestan servicios meteorológicos para la aviación, cómo las Oficinas de Vigilancia Meteorológica (OVM) y el VAAC Buenos Aires, compartiendo lecciones aprendidas. Asociados a las erupciones ficticias de los VOLCANO 01 y 02, cuyas ubicaciones y erupciones respondían al área de responsabilidad del VAAC Buenos Aires, que opera en el SMN.

En Argentina se coordinaron acciones de comunicación previamente a la ejecución del ejercicio, orientadas a los integrantes del sistema aeronáutico así como al público en general,

para advertir de las particularidades del ejercicio de simulación y evitar falsas alarmas. Estas comunicaciones involucraron la difusión de dos folletos informativos desarrollados por el SMN liderado por la Dirección de Meteorología Aeronáutica (DMA). Uno de los folletos dirigido al sector aeronáutico involucrado y otro dirigido a medios de comunicación en general. Por otra parte, desde la ANAC se dio a difusión a las partes interesadas de la aviación mediante la publicación de una circular de información aeronáutica.

El ejercicio siguió un protocolo definido y aprobado en las reuniones de preparación. El SAM VOLCEX 24/01 comenzó el día 03 de diciembre del 2024 a partir de la emisión de una notificación de los observatorios de los volcanes para la aviación (VONA) (Anexo 3 y Doc. 9766, OACI) por parte del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN) para el VOLCANO 01 vía email al VAAC Buenos Aires, este último realizó el correspondiente aviso de ceniza volcánica (VAA) (Anexo 3, OACI). A partir del mismo se elaboraron y emitieron desde las OVM del SMN los mensajes SIGMET de ceniza volcánica (Anexo 3, OACI). Asimismo, los demás Estados afectados por el ejercicio realizaron los informes MET correspondientes y los demás servicios de navegación aérea hicieron lo propio de acuerdo a sus funciones.

Durante el ejercicio previsto para una duración de 12 horas la DMA del SMN hizo un seguimiento de los informes MET difundidos (VAA y SIGMET), así como de los intercambios realizados en el chat virtual. El ejercicio se dio por finalizado vía email. Finalmente, en el chat virtual se anunció una reunión de intercambio de experiencias por parte de los partes involucradas en el ejercicio para mantener en los próximos días, la misma se concretó el 13 de diciembre del 2024.

2) FIGURAS

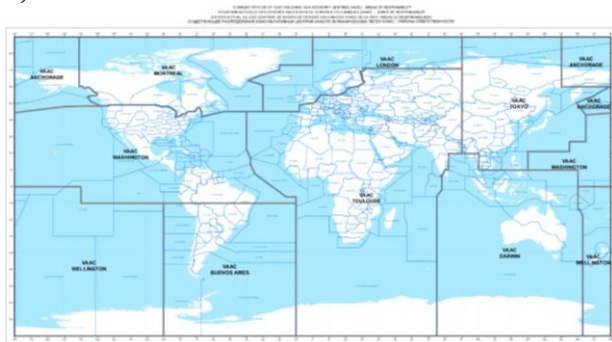


Figura 1: Mapa de los Centros de Avisos de Ceniza Volcánica (OACI).

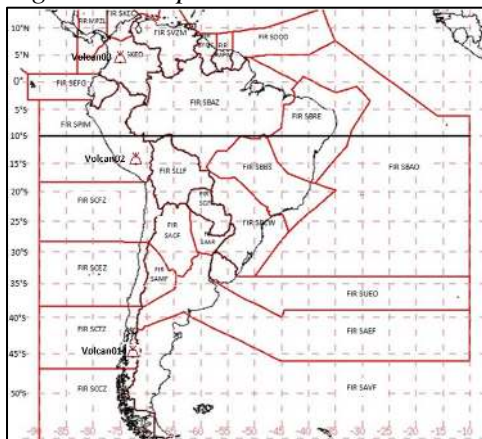


Figura 2: Mapa de la Región Sudamericana (OACI). Incluye divisiones de Regiones de Información de Vuelo y ubicación de volcanes.

3. RESULTADOS

Al efectuar el análisis posterior al ejercicio se identificaron varias oportunidades de mejoras respecto a las acciones y coordinaciones realizadas. Los Estados pueden beneficiarse de las lecciones extraídas de este análisis para mejorar sus respuestas ante futuras erupciones. Desde el punto de vista de la seguridad operacional, si bien las líneas aéreas fueron advertidas de la ejecución del ejercicio con suficiente antelación, no se recibió acuse de recibo de la información compartida, ni consultas. Con respecto al intercambio u obtención de información se notó la necesidad de una mayor interacción entre las partes del sistema. Observando los informes emitidos y las demoras en la emisión de los mismos, los ejercicios se muestran como un recurso valioso a la hora de brindarle oportunidad al personal operativo con menor experiencia en su puesto de trabajo, o que no haya tenido oportunidad de haber estado involucrado en una situación de erupción volcánica real. Pasar por el ejercicio les brinda una experiencia valiosa para aprovechar en futuros posibles casos reales. Como aspecto positivo, muy probablemente producto de la difusión por medio de redes sociales advirtiendo sobre el ejercicio, no se relevaron falsas alarmas por parte de la población en general, así como no hubo demoras en los vuelos, ni falsas alarmas en el sector de la aviación. Remarcando que colegas de otros Estados que han realizado acciones de difusión similares notaron el mismo beneficio.

4. CONCLUSIONES

El primer SAM VOLCEX demuestra que los ejercicios sobre cenizas volcánicas de todo el sistema son sumamente valiosos y contribuyen a que las partes interesadas del sector de la aviación de los Estados, puedan identificar oportunidades de mejoras, prepararse mejor para responder a futuras erupciones, y para recuperarse tras estos sucesos.

Otra conclusión a partir de la realización del diseño y ejecución del ejercicio es, considerar otros escenarios para ejercitar en los futuros SAM VOLCEX y asociarlos a los flujos de la información adecuados según el caso planteado, de acuerdo a lo indicado en los documentos normativos técnicos y de orientación a aplicar.

Los ejercicios de simulación de erupciones volcánicas permiten preparar al personal operativo tanto en general así como aquellos con menos experiencia en la actuación, eventos que por su naturaleza no son regulares, brindándoles una oportunidad de aprendizaje y preparación para mejorar tiempos de respuestas antes situaciones de actividad y erupción volcánica real.

El ejercicio puso de relevancia la importancia de la difusión y comunicación en redes sociales que evitan falsas alarmas y demoras en vuelos, sin embargo, se notó la necesidad de fortalecer los lazos de comunicación de estos ejercicios con las líneas aéreas y sus asociaciones para lograr su participación en los ejercicios.

REFERENCIAS

Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), 2024: Anexo 3 - Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional.

Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), 2024: Doc. 9766 – Handbook on International Airways Volcano Watch (IAVW), solo disponible en inglés.

PRODUCTOS OPERATIVOS EN METEOROLOGÍA MARINA DEL SERVICIO DE HIDROGRAFÍA NAVAL

Luciano Banegas¹, Alvaro S. Scardilli¹, Julieta Arce¹, Natalia Rodeiro¹

luciano.banegas@mindef.gov.ar

¹Departamento Meteorología, Servicio de Hidrografía Naval (SHN)

Palabras claves: olas, ondas de tormenta, Atlántico Sudoccidental

1) INTRODUCCIÓN

El modelo WaveWatch III Austral es una herramienta avanzada para la predicción y el análisis del oleaje en el Hemisferio Sur. Implementado por el Servicio de Hidrografía Naval, este modelo brinda información detallada sobre la altura significativa, el período y la dirección de las olas, variables fundamentales para la seguridad en la navegación, la gestión de actividades marítimas y la investigación oceanográfica.

WaveWatch III es un modelo espectral de oleaje, basado en la ecuación de transporte espectral, que describe la evolución temporal y espacial del campo de olas a partir de la distribución de energía en diferentes frecuencias y direcciones. La altura significativa de ola y otros parámetros se obtienen a partir de la integración del espectro de energía, no de la resolución hidrodinámica del nivel del mar.

La versión Austral de WW3 ha sido ajustada para reproducir con mayor precisión las condiciones particulares del Hemisferio Sur, con especial énfasis en la Plataforma Continental Argentina y sus alrededores. Utiliza como forzantes meteorológicos los campos globales provistos por el NCEP (National Centers for Environmental Prediction), lo que garantiza una adecuada representación del forzamiento atmosférico en sus pronósticos.

Un aspecto distintivo de la implementación regional es que el WW3 Austral incorpora de manera acoplada un módulo hidrodinámico para la resolución de ondas de tormenta (ODT). Esto permite simular, además del oleaje, las variaciones del nivel del mar debidas al forzamiento meteorológico, que luego se combinan con la marea astronómica. De esta forma, el sistema operativo del SHN integra en un mismo marco tanto la modelación espectral del oleaje como la hidrodinámica asociada a la elevación del nivel del mar.

En este trabajo se presentan los productos operativos del SHN relacionados con meteorología marina, en particular aquellos asociados al estado del mar, dada la relevancia que estas variables tienen para la seguridad náutica en el área de responsabilidad nacional.

2) RESULTADOS

Se muestran los productos derivados de la modelación espectral con WaveWatch III Austral y de la simulación hidrodinámica acoplada para el nivel del mar.

En la Figura 1 se presentan la altura significativa y el período de las olas (sea + swell), así como la altura significativa del swell en el Atlántico Sur. La altura significativa se obtiene al integrar la energía total del oleaje, y se interpreta operacionalmente como el promedio del tercio más alto de las olas. Estas variables permiten caracterizar la energía del mar y diferenciar el oleaje local del swell generado a gran distancia.

La Figura 2 muestra la altura significativa y el período del oleaje para todo el Hemisferio Sur. Los sistemas de baja presión, al generar fuertes vientos, producen regiones de oleaje más intenso que se propaga a gran escala como swell.

En la Figura 3 se presentan productos para el Río de la Plata: la variación meteorológica del nivel del mar (storm surge) y la altura total resultante de la combinación entre la marea astronómica y el forzamiento atmosférico. Estos resultados provienen del módulo hidrodinámico acoplado dentro del WW3 Austral, lo que permite evaluar el impacto combinado del oleaje, la marea y la meteorología en zonas costeras sensibles. Productos similares están disponibles para toda la Plataforma Continental Argentina, con actualización automática y acceso público en la sección de Modelos y Pronósticos del sitio web del Servicio de Hidrografía Naval (<https://www.hidro.gov.ar/ModelosPronosticos.asp>)

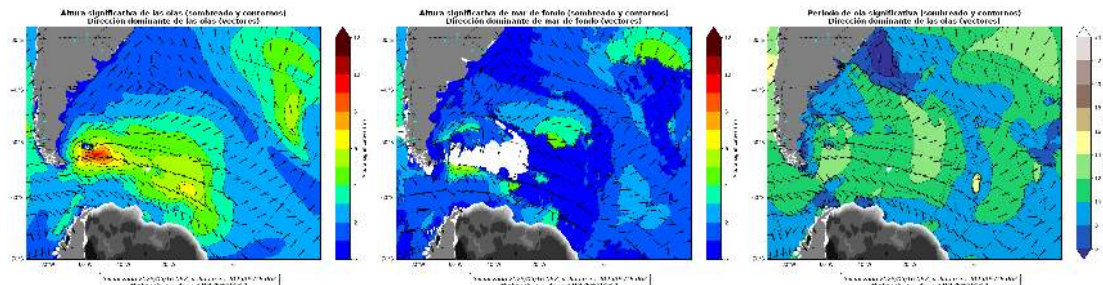


Figura 1: Altura significativa de olas, mar de fondo y período. Región Atlántico Sur

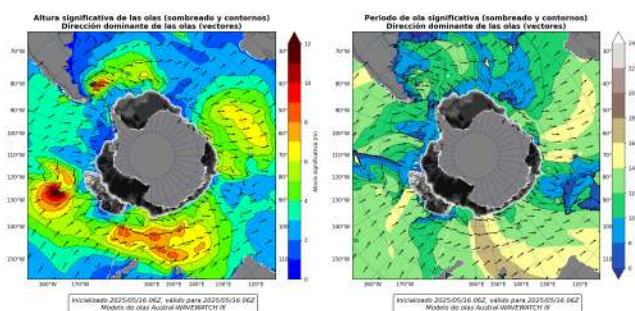


Figura 2: Altura significativa de olas y período. Región Hemisferio Sur

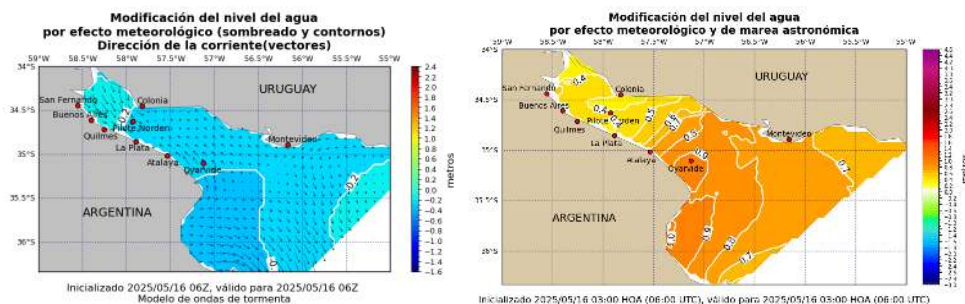


Figura 3: Modificación del nivel del agua por efecto meteorológico y por meteorológico y astronómico. Región Río de la Plata

3) CONCLUSIONES

El modelo espectral WaveWatch III – versión Austral, con su módulo hidrodinámico acoplado para la resolución de ondas de tormenta, conforma junto con la marea astronómica un sistema integral de pronóstico del estado del mar en el Atlántico Sur.

WW3 provee estimaciones confiables de la altura significativa, el período y la dirección del oleaje a partir de la integración del espectro de energía, mientras que el componente hidrodinámico integrado permite representar las variaciones del nivel del mar generadas por el forzamiento meteorológico y astronómico de mareas.

La integración de ambos enfoques ofrece una descripción completa del estado del mar, fortaleciendo la capacidad de anticipación frente a fenómenos oceanográficos de impacto. Los productos generados de manera operativa son de gran utilidad para la seguridad de la navegación, la gestión de emergencias y la planificación marítima en áreas costeras y de plataforma. Además, la disponibilidad pública de esta información en el sitio web del SHN garantiza el acceso en tiempo real por parte de navegantes, investigadores y autoridades competentes.

REFERENCIAS

- Cartwright, D. E., 1985:** Tidal prediction and modern time scales. *The International Hydrographic Review*, 62(1).
- Etala, P., Alonso, S. M., Souto, D., Romero, C., & Echevarría, P. 2014:** Progreso en el modelo de pronóstico de olas hasta un mosaico global multiescala. *Meteorologica*, 39(2), 37-48.
- Pugh, D. T. 1987:** Tides, Surges and Mean Sea-Level. John Wiley & Sons Ltd.
- Pugh, D.T, y Woodworth, P., 2014:** Sea-level science: Understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes. Cambridge University Press.
- Saha, S., Nadiga, S., Thiaw, C., Wang, J., Wang, W., Zhang, Q., ... & Xie, P. (2006):** The NCEP climate forecast system. *Journal of Climate*, 19(15), 3483-3517.
- Schureman, P., 1988:** Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides. U.S Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey. Special Publication No.98.
- Tolman, H. L., 2009:** User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14. *Technical note, MMAB contribution*, 276(220).

Evaluación de potenciales pronósticos de rendimiento de cultivos en la provincia de Buenos Aires basados en variabilidad climática

Maisonave Thomas^{1,*}; Hurtado Santiago I.^{2,3}; Aldeco Laura S.^{1,3}.

*Autor correspondiente: Thomasmaisonave@gmail.com

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Buenos Aires, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

³ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG-UNLP). La Plata, Argentina.

Palabras clave: Rendimiento de los cultivos, Predicción, Variabilidad climática, ENOS

1) Introducción

Las predicciones del rendimiento de los cultivos son cada vez más esenciales para la toma de decisiones de los sectores agrícolas públicos y privados, ya que permiten a los agricultores realizar ajustes oportunos destinados a mejorar los resultados, contribuyendo directamente a la maximización del rendimiento. Los pronósticos de rendimiento estacional varían en función de sus escalas temporales y espaciales (Basso y otros, 2013), influyendo a diferentes niveles. Existen distintos tipos de modelos de rendimiento de cultivos, como los empíricos, los probabilísticos y los de aprendizaje automático (ML). En la modelización de cultivos, se suelen utilizar principalmente datos satelitales y de teledetección debido a las limitaciones espacio-temporales que restringen la utilidad de datos observados de estación para aplicaciones en tiempo real. No obstante, cabe destacar el trabajo de Thomasz y otros (2023) quienes desarrollaron un modelo de predicción de rindes basado en datos observados en la región pampeana. Argentina es un actor destacado en los mercados agroalimentarios internacionales y los cultivos primarios -soja, trigo y maíz- comprenden el 78% de la superficie cultivada del país, región dentro de la cual se encuentra la provincia de Buenos Aires. Por lo expuesto, el objetivo principal de este trabajo es evaluar distintos modelos ML para la prospectiva del rendimiento de los cultivos en función de la variabilidad climática en la provincia de Buenos Aires. Para ello, se utilizaron datos de estaciones meteorológicas terrestres, índices de forzamiento climático y series medias de rendimiento de cultivos a nivel comarcal.

2) Datos y Metodología

Los datos de rendimiento de girasol, maíz y trigo de 1981 a 2021 se obtuvieron de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca para todos los departamentos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Por otro lado, se utilizaron datos de 18 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional en la región de estudio. Otra entrada para los modelos son algunos índices climáticos mensuales, que se calcularon utilizando los datos de TSM de ERSSTv5. Los índices calculados son: el Modo Anular Austral (SAM), índices de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), el Dipolo del Océano Índico (IOD), el Índice del Atlántico Sur Tropical (TSA) y el Dipolo Oceánico del Atlántico Sur (SAODI). Se realizó un agrupamiento de las series temporales de rendimiento utilizando el método de K-means. Se desarrollaron modelos de predicción del rendimiento (alto, normal o bajo) para cada cultivo y región

utilizando dos tipos de datos como predictores: registros de estaciones meteorológicas e índices climáticos. Los modelos utilizados fueron: regresión lineal múltiple (MLR), regresión multinomial (MLogR), árbol de decisión (Tree), y ensamble (Mean). Para evaluar los modelos de predicción se implementó una validación cruzada «leave one out».

3) Resultados y discusión

Las regiones definidas para el cultivo de girasol (Figura 1) presentan una distribución que se alinea con las etapas fenológicas definidas por la Oficina de Riesgo Agropecuario. En contraste, las regionalizaciones para trigo y maíz no se alinean con sus etapas fenológicas, probablemente debido a otros factores que influyen en la agrupación de estos cultivos. Al computar las métricas de evaluación para cada cultivo y región se obtuvieron resultados como los mostrados en la Figura 2 (ejemplo para el trigo). Los resultados indicaron que MLogR y MLR fueron los modelos más efectivos, sin una preferencia clara entre las variables meteorológicas e índices climáticos como predictores. El rendimiento del girasol se predijo mejor utilizando modelos basados en estaciones en las regiones central y sur, destacando la importancia de la evapotranspiración y la precipitación durante el invierno y la primavera. Por el contrario, la región norte de girasol depende de los índices climáticos IOD y ENSO, que influyen en los patrones de lluvia y temperatura de la región. El rendimiento del maíz se pronosticó de manera efectiva utilizando índices climáticos en la región sur y modelos basados en estaciones en las regiones este y oeste, evidenciando la importancia del papel de la humedad del suelo y la temperatura durante las fases críticas de crecimiento (como la floración), lo cual es consistente con lo encontrado por Wang y otros (2019). En general, se encontraron casos con mejores predicciones utilizando los predictores de invierno o primavera, sugiriendo la importancia de las condiciones del suelo no sólo en la etapa de floración, sino también en los meses previos a la siembra (Anderson y otros, 2017).

4) Conclusiones

Esta investigación contribuyó a avanzar en el conocimiento sobre la predictibilidad del rendimiento de tres cultivos utilizando técnicas de Machine Learning. Se identificaron varios modelos con potencial uso operativo, aunque se necesitan más estudios para mejorar la precisión de los modelos para ciertos cultivos y zonas. Nuestros resultados destacan el gran potencial de aprovechar el conocimiento de la variabilidad climática para desarrollar y mejorar las herramientas de predicción del rendimiento de los cultivos.

Referencias:

- Anderson, W., Seager, R., Baethgen, W., & Cane, M., 2017.** Life cycles of agriculturally relevant enso teleconnections in north and south america. *International Journal of Climatology*, 37(8), 3297–3318.
- Basso, B., Cammarano, D., Carfagna, E., 2013.** Review of Crop Yield Forecasting Methods and Early Warning Systems. *First Meet. Sci. Advis. Comm. Glob. Strateg. Improv. Agric. Rural Stat.* 1–56.
- Thomasz, E. O., Corfield, K., Vilker, A. S., & Osman, M., 2023.** Forecasting soybean production to enhance climate services for Agriculture in Argentina. *Climate Services*, 30, 100341.

Wang, Y., Tao, H., Tian, B., Sheng, D., Xu, C., Zhou, H., Huang, S. and Wang, P., 2019. Flowering dynamics, pollen, and pistil contribution to grain yield in response to high temperature during maize flowering. Environmental and Experimental Botany, 158, 80-88.

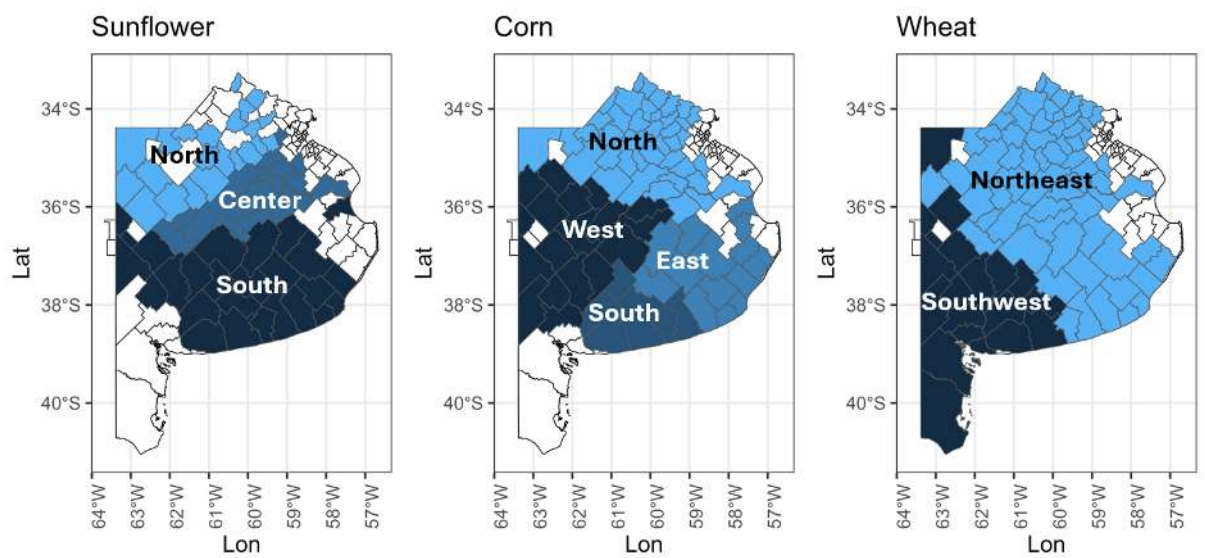


Figura 1. Regiones de rendimiento del girasol (panel izquierdo), maíz (panel central), y trigo (panel derecho). Obtenidos a partir de k-means sobre las series temporales de cada departamento.

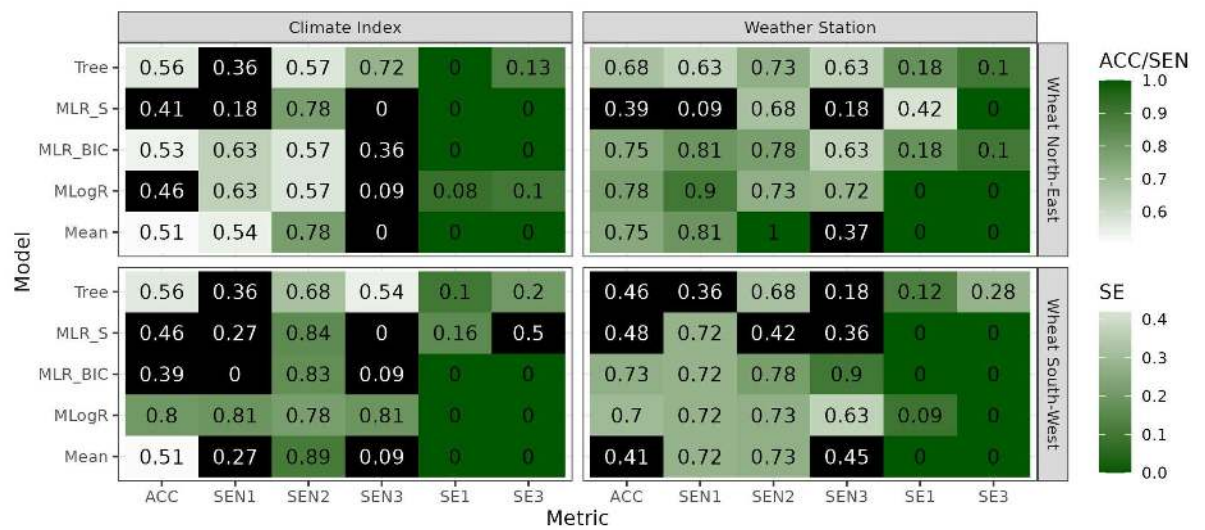


Figura 2. Métricas de evaluación (eje x) de cada modelo (eje y) para las distintas regiones del trigo.

INDICADOR COMBINADO DE SEQUÍAS AGRÍCOLAS DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN DE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA (CDI-SISSA)

Spennemann, Pablo^{1,2}, Peretti, Mercedes³, Vera Carolina^{4,5}, Gonzalez Marcela^{4,5}, Daniel Bonhaure⁶ y Maria de los Milagros Skansi⁷

pspennemann@smn.gob.ar. Autor correspondiente

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Dorrego 4019, CABA, Argentina.

²Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), Mosconi 2736, Sáenz Peña, Buenos Aires, Argentina.

³Facultad de Agronomía, Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453, C1417DSE Buenos Aires, Argentina.

⁴Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

⁵CONICET-Universidad de Buenos Aires, Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). CNRS-IRD-CONICET-UBA, Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL3351 IFAECI), Buenos Aires, Argentina.

⁶Centro Regional del Clima para el Sur de Sudamérica

⁷Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Dorrego 4019, CABA, Argentina.

Palabras clave: Sequías, Monitoreo, SISSA

1) INTRODUCCIÓN

Los indicadores combinados buscan representar las sequías en base a un conjunto de variables y/o índices en forma integral, lo cual permite capturar distintas características espacio-temporales de la evolución de las sequías (WMO y GWP, 2016). El Indicador Combinado de Sequía del Global Drought Observatory (CDI-GDO, Cammalleri y otros, 2021), utiliza 3 variables/índices para representar la propagación temporal de la sequía a través de la rama terrestre del ciclo hidrológico. Es decir, se enfoca en representar cómo la señal de la sequía se propaga desde un déficit de precipitación, a las anomalías de humedad del suelo (HS) y por último a un impacto por estrés hídrico en la vegetación. El CDI-GDO mostró una buena capacidad en representar la severidad, extensión espacial y evolución temporal sobre la región del sur de Sudamérica (CRC-SAS), pero ciertos eventos no mostraron la transición gradual esperada entre las categorías Atención, Advertencia y Alerta, apareciendo en algunas regiones directamente la categoría Advertencia o Alerta (Spennemann y otros, 2024). Esta dificultad para representar la evolución de la sequía, puede deberse a la naturaleza del fenómeno (e.j. Sequías de Rápido Desarrollo), o al uso de datos globales de precipitación con una baja frecuencia de actualización (mensual). Esta situación motivó la aplicación de ciertos ajustes al CDI-GDO en busca de mejoras para el monitoreo de las sequías agrícolas en la región. Estos aspectos impulsaron la implementación regional del CDI-SISSA.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El CDI-SISSA fue desarrollado y transferido al Centro Regional del Clima para el Sur de Sudamérica (CRC-SAS), en el cual funciona en forma operativa y está disponible para su uso a través del portal [SISSA](https://sisa.crc-sas.org). El indicador monitorea la evolución de las sequías, desde su inicio hasta su fin, mediante 6 categorías: la categoría “Atención” corresponde a un déficit de precipitación (Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, siglas en inglés), “Advertencia” a un déficit de precipitación y de HS (modelo hidrológico Lisflood-GDO), y “Alerta” a un déficit de precipitación sumado a un estrés en la vegetación (fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (fAPAR), MODIS/VIRS). Las categorías “Recuperación temporal por HS” y “Recuperación temporal por fAPAR” representan mejoras temporarias y por último la categoría “Recuperación total” corresponde a cuando la precipitación, la HS y las anomalías de fAPAR se normalizan. Las categorías Atención, Advertencia y Alerta denotan la severidad de la sequía. En la Figura 1 se muestra la evolución de un evento de sequía y los distintos umbrales, que activan las distintas categorías. El detalle de las condiciones necesarias para alcanzar cada una de las 6 categorías y el cálculo de las anomalías se pueden ver en Cammalleri y otros (2021). El CDI-SISSA posee principalmente dos diferencias respecto al CDI-GDO operativo a escala global: 1) se calcula en puntos de estación utilizando observaciones de precipitación en superficie integradas por el CRC-SAS, y 2) se calcula el índice SPI-1 y SPI-3 cada 10 días, teniendo así 3 actualizaciones al mes para una mayor frecuencia temporal del producto, diferenciándose del CDI-GDO, en el cual el SPI se actualiza de forma mensual.

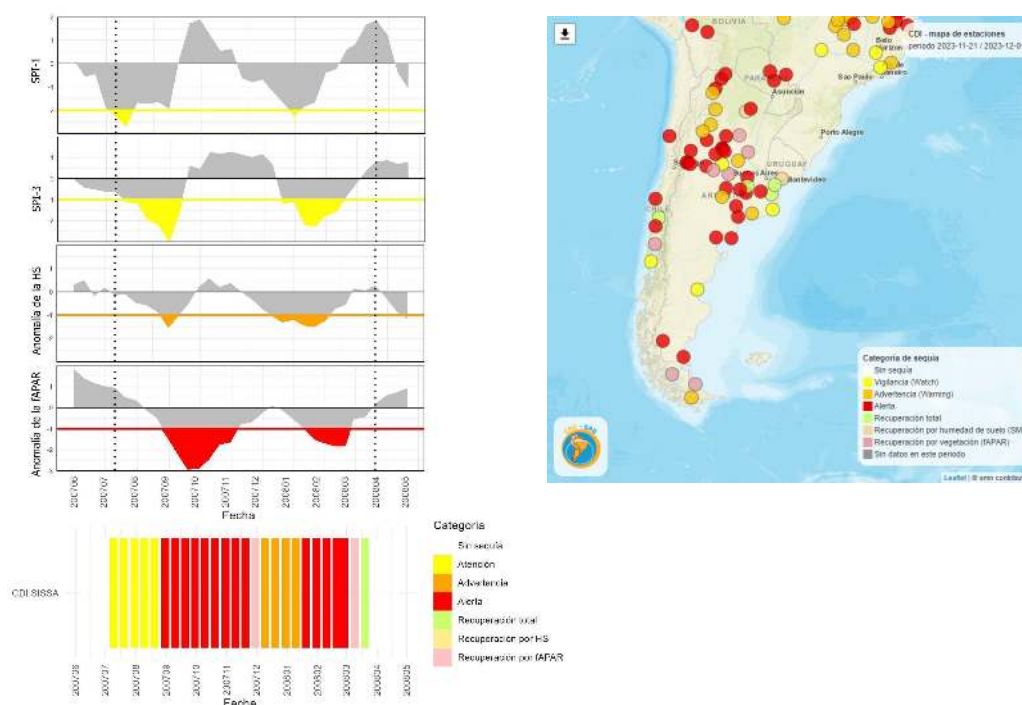


Figura 1. Izquierda (de arriba hacia abajo), evolución temporal de SPI-1, SPI-3, anomalías de HS y de fAPAR, sus umbrales y la correspondiente categoría del CDI-SISSA cada 10 días para la localidad de Tres Arroyos (60.3°W, 38.3°S) para el periodo junio 2007–mayo 2008. Derecha, mapa del CDI-SISSA por puntos de estación. Disponible en <https://sisa.crc-sas.org/indice-de-sequia-agricola/>

3) EVALUACIÓN Y VISUALIZACIÓN

El CDI-SISSA se evaluó en el período 2001-2020 mediante correlaciones ranqueadas (Tau Kendall) entre la frecuencia de categorías (Atención + Advertencia + Alerta) y anomalías de simulaciones de rindes de soja y maíz en las localidades de Gualeguaychú (-58.6°W,-33.0°S), Río Cuarto (-64.2°W,-33.1°S), 9 de Julio (-60.8°W,-35.4°S) y Tres Arroyos (-60.2°W,-38.3°S) de Argentina. Las simulaciones de rindes se basaron en el modelo DSSAT v4.5, consistiendo en un conjunto de entre 90 y 200 miembros para los rendimientos de maíz y soja, distintas condiciones iniciales de HS, distintas fechas de siembra y 3 suelos típicos según la ubicación. Se observó en general un buen grado de asociación negativo entre el CDI-SISSA y la mediana del ensamble de anomalías de rindes, indicando que un mayor número de décadas bajo categoría de sequía se corresponde con valores reducidos de rendimiento tanto para la soja como para el maíz (no se muestra), similar a lo documentado por Spennemann y otros (2024) sobre 14 localidades de la Pampa Húmeda. A su vez, logró representar adecuadamente la severidad de la sequía y un buen acuerdo con las declaraciones de emergencia agrícola de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, sobre las 4 localidades (no se muestra). Al analizar un evento en particular, la evolución temporal del CDI-GDO y del CDI-SISSA para la localidad de Tres Arroyos (junio 2007– mayo 2008), se pudo observar que con la incorporación de datos locales de SPI se anticipa dos décadas (20 días) la categoría de Atención (no se muestra).

Como se indicó previamente, el CDI-SISSA fue implementado como herramienta de monitoreo de sequías agrícolas en el sur de Sudamérica en la página web del SISSA en dos formatos distintos. Por un lado, se presenta CDI-SISSA en un mapa para cada punto de estación y para una década determinada (ver Figura 1, derecha). Por otra lado, al seleccionar una localidad se puede visualizar la evolución temporal del CDI-SISSA. Cada categoría del indicador se muestra con su color correspondiente y se puede visualizar el mapa del periodo más actual o consultar mapas de periodos anteriores. En todos los casos los gráficos pueden descargarse en diferentes formatos. El producto más actual que se puede visualizar y consultar en la página web tendrá un retraso de aproximadamente 3 o 4 semanas respecto a la fecha actual, dependiendo de la disponibilidad de los datos de HS y fAPAR.

REFERENCIAS

- Cammalleri C, Arias-Muñoz C, Barbosa P. y otros, 2021:** A revision of the Combined Drought Indicator (CDI) used in the European Drought Observatory (EDO). *Nat Hazards Earth Syst Sci* 21:481– 495. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-481-2021>
- Spennemann P.C., Naumann, G., Peretti, M. y otros, 2024:** Evaluation of a combined drought indicator against crop yield estimations and simulations over the Argentine Humid Pampas. *Theor Appl Climatol* 155, 7463–7478 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05073-8>
- World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016:** Handbook of Drought Indicators and Indices. and Guidelines, Series 2, Geneva, Switzerland, 45, <https://public.wmo.int/en/resources/library/standardized-precipitation-index-user-guide2016>

TEMPERATURA VS. UTCI COMO PREDICTORES DE LA MORTALIDAD POR CALOR EN ROSARIO: EVALUACIÓN DE MODELOS LINEALES Y NO LINEALES

Agustina Lopez Ramirez^{1,2}, Mariana Barrucand^{1,2}, Soledad Collazo^{1,3}
alopez@at.fcen.uba.ar

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, ARGENTINA

³Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, ESPAÑA

Palabras clave: Modelado estadístico, Salud, Extremos.

1) INTRODUCCIÓN

Las olas de calor y las altas temperaturas pueden tener efectos adversos en la salud humana, especialmente en entornos urbanos. El estrés térmico sobre las personas puede cuantificarse a través de índices de confort térmico, siendo el índice climático térmico universal (UTCI, por sus siglas en inglés) un indicador versátil para estudios epidemiológicos. En este trabajo se evalúan tres modelos que buscan predecir la mortalidad de la ciudad de Rosario, considerando como predictores variables meteorológicas y el índice UTCI. El objetivo es identificar el modelo estadístico y el predictor que ofrecen el mayor poder explicativo para caracterizar la relación entre las condiciones térmicas extremas y la mortalidad diaria en la ciudad.

2) DATOS Y MÉTODOS

Se utilizaron datos del índice UTCI máximo diario correspondientes a los meses de diciembre, enero y febrero, obtenidos de la base de datos ERA5-HEAT para el período 2005–2018. Además, se emplearon datos de temperatura máxima diaria (Tmax) y temperatura (T), temperatura media radiante (Tmrt), humedad relativa (HR) y velocidad del viento a 10 metros (W), extrapolada a partir de las componentes zonal (u) y meridional (v), a las 18hs UTC de ERA5 para el mismo periodo y meses del año. También se contó con una base de defunciones diarias para la ciudad de Rosario, provista por la Dirección de Estadísticas e Información en Salud del Ministerio de la Salud (DEIS), sometida a control de calidad con el fin de detectar posibles inconsistencias o errores.

Con el objetivo de evaluar la capacidad predictiva del UTCI y las variables meteorológicas sobre la mortalidad diaria, se aplicaron tres modelos estadísticos: Modelo Lineal Generalizado (GLM), Modelo Aditivo Generalizado (GAM) y Modelo No Lineal de Retardo Distribuido (DLNM). Cada modelo se aplicó por separado utilizando tres conjuntos de predictores: (1) el índice UTCI, (2) la temperatura máxima diaria (Tmax), y (3) las variables que componen el UTCI a las 18hs UTC (T, Tmrt, HR y W). En todos los casos se incluyeron desfases de hasta 7 días para capturar posibles efectos retardados, y se ajustaron términos para la estacionalidad, la variabilidad interanual y las tendencias de largo plazo.

Para validar los modelos, se dividió el periodo de estudio en dos: un subperíodo de entrenamiento (2005–2014), utilizado para ajustar los modelos, y un subperíodo de testeo (2015–2018), utilizado para evaluar su desempeño. Esta evaluación se realizó mediante distintas métricas: error cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE), coeficiente de determinación (R^2), y los criterios de información AIC (Akaike) y BIC (Bayesiano).

3) RESULTADOS

Los resultados muestran que el desempeño del modelado depende tanto de predictores utilizados, como de los tipos de modelos aplicados. Al evaluar el impacto de la inclusión de diferentes predictores en los modelos, se observa que los errores absolutos no presentan grandes cambios; no obstante, los modelos que incluyen solo el UTCI como predictor tiende a obtener mejores resultados. En todos los casos, el modelo GAM presentó los errores más bajos, mientras que el DLNM mostró los valores más altos, aunque las magnitudes fueron similares entre modelos: los RMSE oscilaron entre 6.5 y 8, y los MAE entre 5.5 y 6. En este sentido, la diferencia entre el mejor modelo (GAM con UTCI) y el de peor desempeño (DLNM con temperatura máxima) fue baja en términos absolutos.

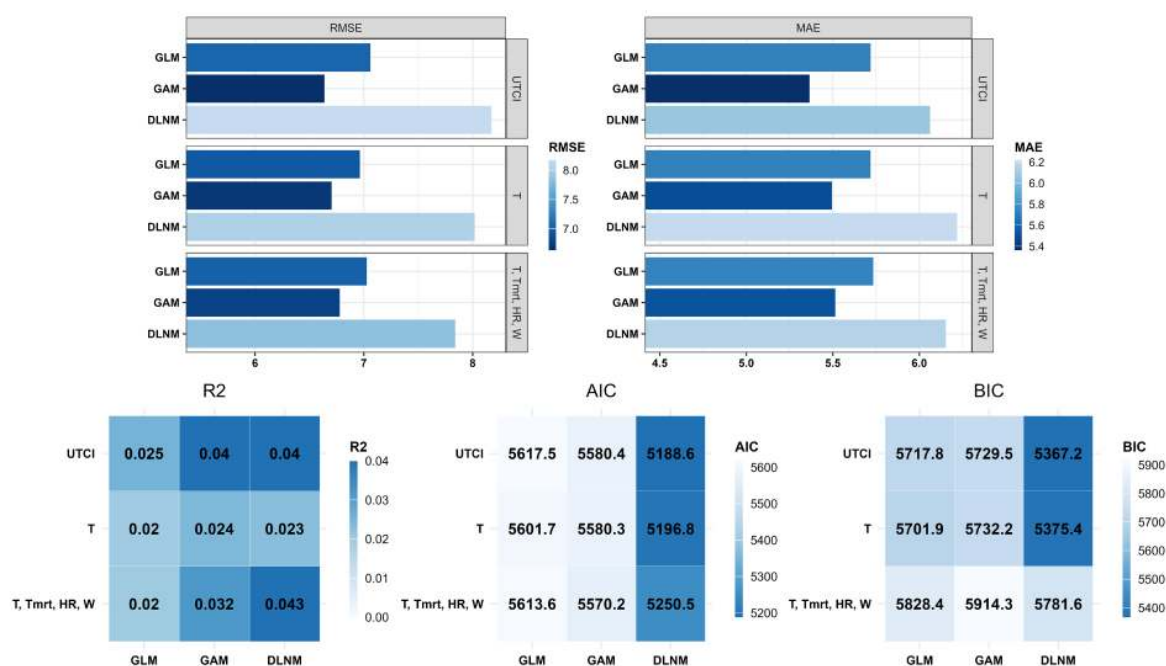


Figura 1. RMSE, MAE, R^2 , AIC y BIC de la mortalidad diaria estimada por los modelos GLM, GAM y DLNM con los predictores UTCI, temperatura máxima y las variables que componen el UTCI en el conjunto de validación (2015-2018). Tonos más oscuros indican un mejor desempeño del modelo.

En cambio, el coeficiente de determinación (R^2) permitió diferenciar mejor el poder explicativo de los modelos. Tanto el UTCI como las variables individuales que lo componen alcanzaron R^2 más altos en comparación con la temperatura máxima, especialmente en los modelos GAM y DLNM. Este resultado indica que los modelos que utilizan el UTCI capturan mejor la variabilidad de la mortalidad diaria, lo que resalta su valor como predictor frente al uso exclusivo de la temperatura.

Por último, las métricas AIC y BIC, que miden el ajuste penalizando la complejidad del modelo, mostraron diferencias más destacables entre los tipos de modelo. El DLNM se destacó por alcanzar los valores más bajos de AIC y BIC, lo que indica un mejor equilibrio entre ajuste y complejidad en comparación con los modelos GLM y GAM. Entre los predictores, el UTCI volvió a mostrar mejor desempeño, obteniendo los AIC y BIC más bajos. En contraste, los modelos que utilizaron separadamente las variables que componen el UTCI presentaron valores más altos de estas métricas, probablemente debido al aumento en la cantidad de predictores y, por ende, de la complejidad del modelo, que el BIC penaliza con mayor severidad.

Con el fin de evaluar el desempeño de los modelos en una situación de temperaturas extremas, con gran riesgo de mortalidad, se compararon las predicciones de mortalidad durante la ola de calor más extensa de Rosario, ocurrida en diciembre de 2013 (Figura 2). Los

resultados del estudio muestran que el modelo DLNM con el índice UTCI como predictor fue el único que logró estimar adecuadamente el aumento de mortalidad asociado a este evento extremo. En contraste, los modelos que utilizaron la temperatura máxima como predictor subestimaron considerablemente los valores observados, mostrando limitaciones para capturar el impacto real de las temperaturas extremas sobre la salud.

Por otro lado, si bien el modelo GAM con el índice UTCI logró aproximarse al valor de mortalidad observado durante el pico, su predicción no fue tan precisa como la del modelo DLNM. Sin embargo, ambos modelos superaron ampliamente al GLM, que no logró capturar adecuadamente el incremento abrupto en la mortalidad. Esta diferencia pone en evidencia la importancia de incorporar procesos no lineales en los modelos.

Asimismo, el desempeño del DLNM que utilizó como predictores las variables que componen el UTCI tampoco alcanzó el mismo nivel de precisión que el DLNM con el UTCI. Esto sugiere que el índice, al integrar múltiples variables meteorológicas en una sola, capta relaciones complejas entre las variables que son difíciles de representar cuando se modelan las variables por separado (T, Tmrt, HR y W), aunque se incluyan conjuntamente en el modelo. En este sentido, los resultados refuerzan el valor del UTCI como un predictor más adecuado para estudiar el impacto de las olas de calor en la mortalidad, frente al uso aislado de la temperatura.

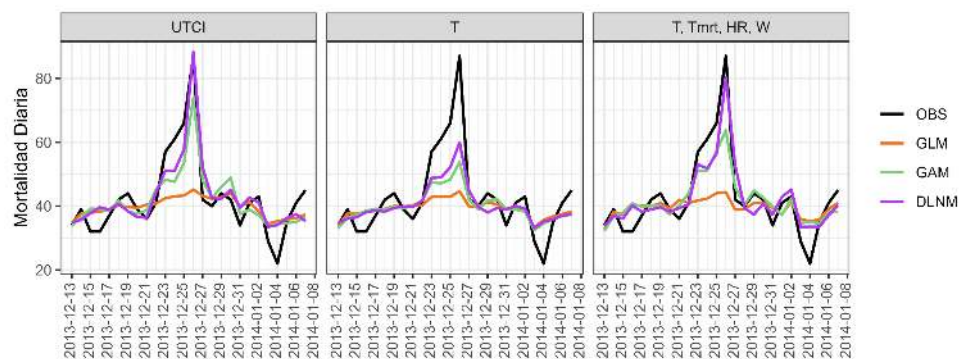


Figura 2. Mortalidad diaria observada (negro) y estimada por los modelos GLM (naranja), GAM (verde) y DLNM (violeta) con los predictores UTCI (izquierda), temperatura máxima (centro) y las variables que componen el UTCI (derecha) durante la ola de calor de diciembre del 2013 en Rosario.

4) CONCLUSIONES

Los resultados demuestran que el índice UTCI es un predictor más robusto que la temperatura máxima para estimar el impacto de las temperaturas extremas en la mortalidad diaria. Aunque las diferencias en los errores absolutos entre predictores fueron pequeñas, el UTCI demostró un mejor desempeño general, especialmente cuando fue incorporado en el modelo DLNM, logrando un buen balance entre la precisión y la complejidad. Estos hallazgos destacan la utilidad del UTCI y del DLNM como herramientas clave para estudios de salud y clima frente a eventos extremos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por los proyectos PICT2019-2019-02933, CONICET PIP 0333 (2021-2023), UBACyT 20020220200111BA, proyecto SAFETE, financiado por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, según el acuerdo de subvención Marie Skłodowska-Curie n° 847635 (UNA4CAREER)

IMPACTO DE LA OSCILACIÓN DE MADDEN-JULIAN EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DEL SUR DE SUDAMÉRICA

Emilio Bianchi^{1,2}, Tomás Guozden², Juan Rivera^{1,3}

ebianchi@unrn.edu.ar. Autor correspondiente.

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

²Universidad Nacional de Río Negro

³Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales

Palabras clave: Sistema eléctrico, MJO

1) INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existe una creciente sensibilidad de la demanda y la generación eléctrica a las variaciones climáticas (Hoste et al. 2009). La demanda eléctrica es principalmente afectada por la temperatura (Cassarino et al. 2018). La generación de electricidad de fuentes renovables depende de la velocidad del viento y radiación solar (De Felice et al. 2019).

La implementación de pronósticos de corto plazo es una práctica común en el sector eléctrico para actividades en escalas desde intra-diaria hasta semanales (Drew et al. 2017, De Felice et al. 2019). A pesar de que las variaciones climáticas afectan actividades de escalas más largas (Kirschen & Strbac 2018), la implementación de pronósticos sub-estacionales y estacionales en el sector eléctrico ha sido hasta ahora limitada (Bloomfield et al. 2021).

En la escala sub-estacional, uno de los principales forzantes de la variabilidad climática a nivel global es la Oscilación de Madden Julian (MJO en inglés)(Zhang 2005). Actualmente solo un estudio se ha referido a la MJO como un posible predictor de recursos energéticos renovables (Lledó & Doblas-Reyes 2020). Este estudio se propone explorar las relaciones estadísticas entre la MJO y la disponibilidad de recursos renovables (velocidad del viento y radiación solar) y demanda eléctrica (a través del impacto en la temperatura) de los países del sur de Sudamérica

2) DATOS

Se obtuvieron series de radiación solar y velocidad del viento a 50 metros de altura del reanálisis MERRA2 en las localizaciones de 25 parques solares y 28 parques eólicos en Argentina, Chile y Uruguay. Se utilizaron datos de demanda eléctrica diaria de Argentina, Chile y Uruguay en los períodos 2007-2022, 2014-2022 y 2011-2022 respectivamente. Se obtuvieron datos de temperatura promedio diaria y cobertura de nubes del reanálisis MERRA2 para las capitales (que es donde se concentra la mayor parte de la población y por ende, la demanda eléctrica). Además, se obtuvieron los campos diarios de cobertura de nubes, temperatura del aire a dos metros, presión atmosférica a nivel del mar y velocidad del viento a 50 metros de altura del reanálisis MERRA2. Se obtuvo el índice multivariado de Wheeler & Hendon (2004) para caracterizar las variaciones de la MJO.

2) METODOLOGÍA

En primer lugar se analizó la relación entre la temperatura y nubosidad con la demanda eléctrica a nivel diario y para cada estación. Para esto, se excluyeron del análisis los días feriados y de fines de semana (por presentar una demanda mayor). Luego, se analizó el impacto de la MJO en la demanda eléctrica, el recurso solar y el recurso eólico: Se calcularon las variaciones intraestacionales de la demanda eléctrica de acuerdo a la metodología de Cerne y Vera (2011) restando el promedio climatológico diario y el desvío estacional a cada valor diario. Luego, se calcularon los composites de anomalías de demanda eléctrica, radiación solar y velocidad del viento para cada una de las fases de la MJO en su modo activo. Este análisis se realizó para cada estación del año. Se analizaron además las relaciones entre la MJO y los campos de presión atmosférica, velocidad del viento, temperatura del aire y nubosidad. Para esto, se calcularon las variaciones intraestacionales de estos campos de la misma manera que para la demanda eléctrica.

3) RESULTADOS

Se encontraron relaciones lineales positivas entre la temperatura y la demanda diarias para el trimestre de verano; y negativas para el trimestre de invierno (no mostrado). En las estaciones de transición, en cambio, se observó un patrón no lineal en el cual la demanda aumenta por debajo y por encima de ciertos umbrales de temperatura. No se observaron relaciones claras entre la demanda eléctrica y la nubosidad (no mostrado). En cuanto a la relación entre la MJO y la demanda, durante el verano las fases 1 a 5 producen disminuciones en la demanda en Argentina y Uruguay de entre 1 y 2% (figura 1). Esto está asociado a la ocurrencia de menores temperaturas en la región (no mostrado). Para el otoño las fases 5 y 6 producen un aumento en la demanda en Argentina y Uruguay (debido a menores temperaturas), mientras que las fases 7 y 8 producen una disminución (asociado a aumentos de temperatura). Para el invierno se observa una marcada disminución de la demanda en la fase 6 (asociada a aumentos de temperatura), y un aumento en la fase 7 (asociada a una disminución de temperatura). Para la primavera se observa una marcada disminución de la demanda durante la fase 8 que coincide con aumentos de temperatura.

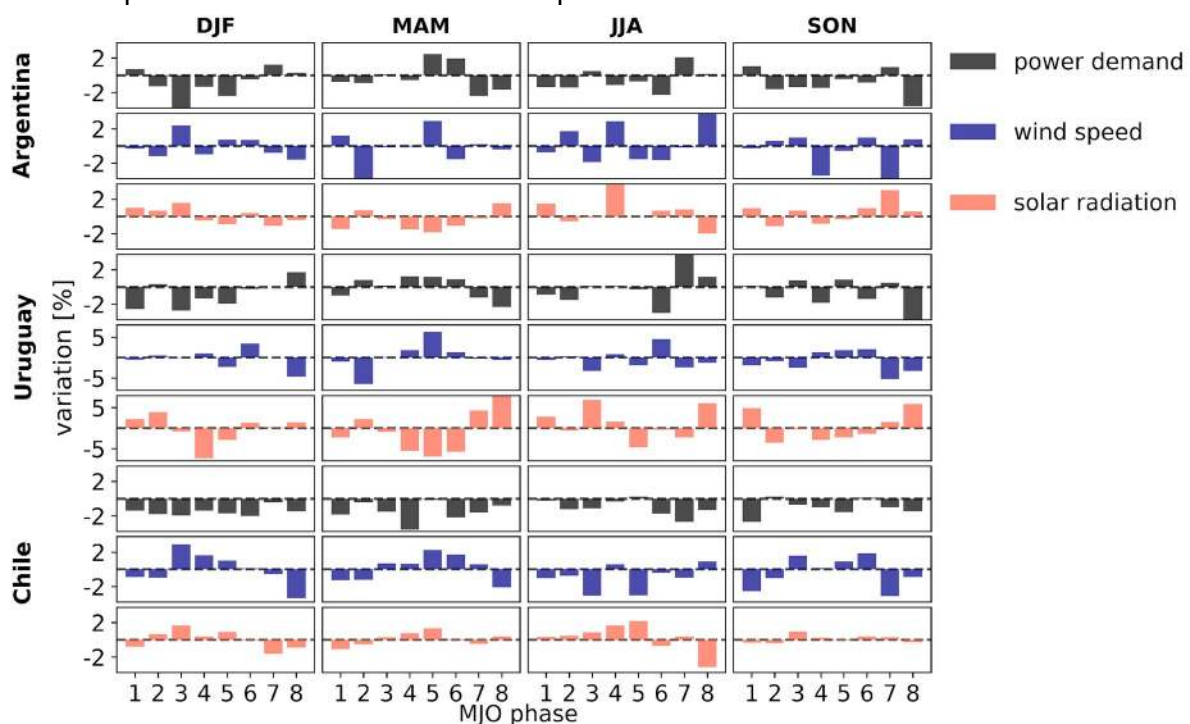


Figura 1: Composites de anomalías de demanda eléctrica, velocidad de viento a 50 mts. y radiación solar para las fases de la MJO en su modo activo.

En cuanto a la velocidad del viento, se observa un aumento durante la fase 3 en Argentina y Chile en el verano. Esto coincide con un patrón de mayores velocidades del viento en el norte de la Patagonia y centro de Chile (no mostrado). Se observa, además, una disminución en los tres países para la fase 8. Para el otoño, se observa una disminución durante la fase 2 (anomalías negativas de velocidad de viento sobre el este de Argentina, Uruguay y sobre Chile), y un aumento para la fase 5 (coincide con un patrón regional de aumento generalizado). Para el invierno, se observan comportamientos diferentes en los tres países. En Argentina se observa una alternancia: mayor velocidad del viento durante la fase 2, menor en la 3, mayor en la 4, menor en la 5 y en la 6. Esto está asociado a cambios en las anomalías en la velocidad del viento en la Patagonia. En Uruguay se observan anomalías negativas en la fase 3 y negativas en la fase 6. En Chile se destacan anomalías negativas durante las fases 3 y 5. Para la primavera también se observan patrones diferentes en los tres países. En Argentina se observan anomalías negativas para las fases 4 y 7, asociadas a disminuciones de la velocidad del viento en la Patagonia. En Uruguay, se observan disminuciones en las fases 7 y

8, mientras que en Chile se observan disminuciones en las fases 1 y 7 (asociadas a disminuciones de la velocidad del viento en el norte del país); y anomalías positivas en las fases 3 y 6 (asociadas a aumentos de la velocidad del viento en el norte del país).

En cuanto a la radiación solar, durante el verano, la fase 3 está asociada a un mayor recurso en Argentina y Chile. Esto se corresponde con una anomalía negativa de nubosidad sobre el noroeste de Argentina y norte de Chile (no mostrado). Se observa también una disminución durante la fase 7. En Uruguay se registra una merma de radiación durante la fase 4. Para el otoño, se registra una merma para las fases 4, 5 y 6, asociada a mayor nubosidad sobre el norte y noreste de Argentina y Uruguay. Estos países también registran un aumento en la radiación durante las fases 7 y 8. En el invierno se observa un aumento en la fase 4 para Argentina. Uruguay registra aumentos en las fases 1 y 8, y una merma en la fase 5. Estas variaciones responden a anomalías localizadas de nubosidad sobre Uruguay. En Chile se registra un aumento en la fase 5, y una merma en la fase 8. Por último, para la primavera se observa un aumento en la fase 7 en Argentina, aumentos en las fases 1 y 8 en Uruguay y en Chile en la fase 3.

4) CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se analizó el impacto de la oscilación de Madden-Julian en los recursos eólico y solar como en la demanda de energía eléctrica en Argentina, Chile y Uruguay. Dado el horizonte actual de predictibilidad de la MJO, estos resultados revisten de utilidad para el pronóstico y la planificación de mediano plazo del sector eléctrico.

REFERENCIAS

- Bloomfield, H. C., Brayshaw, D. J., Gonzalez, P. L., & Charlton-Perez, A. (2021).** Sub-seasonal forecasts of demand and wind power and solar power generation for 28 European countries. *Earth System Science Data*, 13(5), 2259-2274.
- Cassarino, T. G., Sharp, E., & Barrett, M. (2018).** The impact of social and weather drivers on the historical electricity demand in Europe. *Applied energy*, 229, 176-185.
- Cerne, S. B., & Vera, C. S. (2011).** Influence of the intraseasonal variability on heat waves in subtropical South America. *Climate Dynamics*, 36, 2265-2277.
- De Felice, M., Soares, M. B., Alessandri, A., & Troccoli, A. (2019).** Scoping the potential usefulness of seasonal climate forecasts for solar power management. *Renewable Energy*, 142, 215-223.
- Drew, D. R., Cannon, D. J., Barlow, J. F., Coker, P. J., & Frame, T. H. (2017).** The importance of forecasting regional wind power ramping: A case study for the UK. *Renewable energy*, 114, 1201-1208.
- Hoste, G., Dvorak, M., & Jacobson, M. Z. (2009).** Matching hourly and peak demand by combining different renewable energy sources. Sanford University, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Kirschen, D. S., & Strbac, G. (2018).** Fundamentals of power system economics. John Wiley & Sons.
- Lledó, L., & Doblas-Reyes, F. J. (2020).** Predicting daily mean wind speed in Europe weeks ahead from MJO status. *Monthly Weather Review*, 148(8), 3413-3426.
- Lu, D., Ding, R., & Li, J. (2020).** The predictability limit of the amplitude and phase of the Madden-Julian oscillation. *Atmospheric Science Letters*, 21(6), e968.
- Staffell, I., & Pfenninger, S. (2018).** The increasing impact of weather on electricity supply and demand. *Energy*, 145, 65-78.
- Zhang, C. (2005).** Madden-Julian oscillation. *Reviews of Geophysics*, 43(2).
- Wheeler, M. C., & Hendon, H. H. (2004).** An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly weather review*, 132(8), 1917-1932.

ARROZ EN CORRIENTES: INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA

Testani Nadia^{1,2}, Diaz Leandro^{1,2,3}, Herber Luciana⁴, Robledo Federico^{1,2,3}
nadia.testani@cima.fcen.uba.ar Autor correspondiente.

¹ Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO). Buenos Aires, Argentina.

² CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³ Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI) – IRL 3351 – CNRS-CONICET-IRD-UBA. Buenos Aires, Argentina.

⁴ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Grupo Cultivos Extensivos. EEA Corrientes. Argentina.

Palabras clave: Variabilidad climática, Noreste Argentino, Arroz

1) INTRODUCCIÓN

La producción de arroz en el noreste argentino representa una actividad clave por su relevancia económica y su integración en las dinámicas territoriales de la región. La provincia de Corrientes concentra aproximadamente el 50% de la producción nacional (BCSF, 2024), y se posiciona como un actor central en el sistema agroproductivo del litoral.

El rendimiento del cultivo de arroz está altamente condicionado por factores climáticos que actúan de manera diferenciada a lo largo de sus etapas fenológicas. A su vez, la variabilidad climática a diferentes escalas y los patrones de circulación atmosférica a escala planetaria y regional modulan la precipitación, la temperatura y la cobertura nubosa en el Noreste Argentino (NEA) (Barros y otros, 2002). Además, se ha mostrado que la Oscilación del Sur de El Niño (ENOS) modula la nubosidad en el NEA (Testani y otros, 2024 a) que influye en la radiación solar entrante y puede entonces influir en los rendimientos de arroz en Corrientes.

En este contexto, el presente trabajo analiza la influencia de la variabilidad climática y los patrones de circulación atmosférica sobre el rendimiento del cultivo de arroz en la provincia de Corrientes, Argentina. Para eso examina mes a mes (de septiembre a febrero) la influencia del clima con cada etapa del desarrollo del cultivo.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos provinciales de rendimiento de arroz en Corrientes (MAGyP, 2024), disponibles entre 1969 hasta la actualidad, que reflejan tanto la variabilidad climática como los efectos de mejoras tecnológicas a lo largo del tiempo (Lu y otros, 2017). Para aislar la señal interanual, fue aplicado un filtro LOWESS ($f=0.5$), con el cual se eliminó la tendencia de largo plazo. Los extremos de la serie resultante fueron identificados en informes técnicos regionales (e.g. BCSF, 2021; ACPA, 2010;), a fin de contextualizarlos así como de testear el método de filtrado de la tendencia.

Para analizar la influencia del clima sobre los rendimientos, se analizaron las series mensuales derivadas de datos diarios del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en Corrientes. Se calculó la media regional de cada variable sobre la provincia y se removió la tendencia de Theil-Sen. Las anomalías fueron estandarizadas con respecto al período base 1983–2016. Las variables consideradas incluyeron temperatura media, mínima y máxima, humedad relativa, precipitación, rango térmico medio mensual y un índice de nubosidad estimado a partir de registros diarios en octas (Testani y otros, 2024 b). El análisis se restringió al período común 1970–2016. Se realizaron composiciones mensuales para la

temporada de cultivo (septiembre a febrero), comparando campañas con rendimientos altos (mayores a +0.5 desvíos estándar) y bajos (menores a -0.5 desvíos estándar). La significancia estadística de las diferencias fue evaluada mediante pruebas de diferencia de medias con un nivel de confianza del 99 %.

Finalmente, con el objetivo de identificar los patrones de circulación atmosférica asociados a años de alto y bajo rendimiento, fueron analizadas variables climáticas regionales y de gran escala durante primavera (SON) y verano (DJF), en el período 1969–2021. Se consideraron campos de nubosidad, temperatura media, precipitación, flujos y convergencias de humedad, temperatura de la superficie del mar y flujo de actividad de onda en 250 hPa sobre el hemisferio sur. Para todas las variables, fue eliminada la tendencia de Theil-Sen en cada punto de retícula y se trabajó con anomalías estandarizadas previas a la construcción de las composiciones.

3) RESULTADOS

Valores extremos en la serie de rendimiento estandarizada (Figura 1) fueron identificados y contextualizados en relación a informes técnicos regionales. Por ejemplo, durante la campaña 2020/2021 se observó una anomalía positiva de rendimiento, consistente con lo reportado en el informe nacional de arroz BCSF (2021). En el mismo se indicó que, las temperaturas se mantuvieron dentro del rango óptimo y se registraron niveles adecuados de radiación solar durante el llenado de grano, lo que favoreció rendimientos elevados.

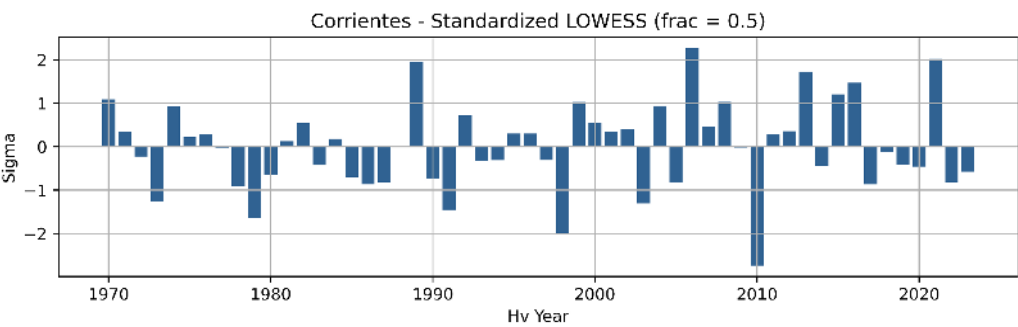


FIGURA 1. Serie de anomalías estandarizadas de rendimiento de arroz en Corrientes (1970–2023). Los valores corresponden a desviaciones respecto a la media local, suavizados mediante una regresión LOWESS (frac = 0.5).

La Figura 2 presenta los boxplots de las anomalías del índice de nubosidad en Corrientes, según años de rendimiento alto y bajo, para cada mes del período de cultivo. Se observa, que los rendimientos altos (bajos) en noviembre, etapa crítica del ciclo fenológico en la que tiene lugar la diferenciación del primordio floral e inicia el período de floración (en lotes sembrados temprano), se asociaron con anomalías negativas (positivas) de nubosidad dado el rol de la radiación solar en este periodo.

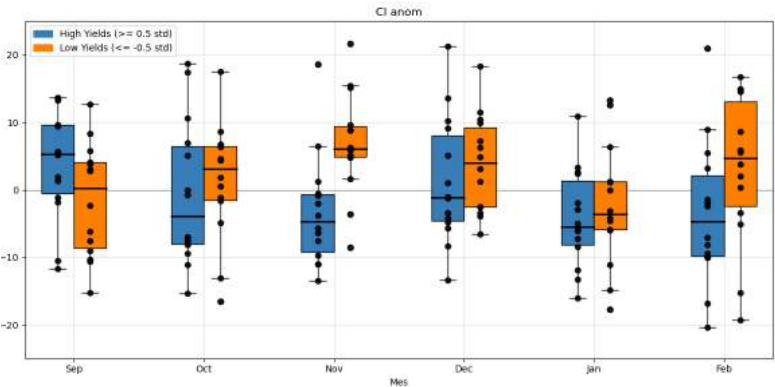


Figura 2. Boxplots de las anomalías del índice de nubosidad en Corrientes (%), diferenciadas según años de rendimiento alto (mayor a 0.5 desvíos estándar) y bajo (menor a -0.5 desvíos estándar), para cada mes del período de cultivo de arroz

Análisis análogos fueron realizados para otras variables climáticas y los resultados se resumen en la Tabla 1. Por ejemplo, se observa que valores bajos de temperatura mínima en noviembre y diciembre se relacionan con mayores rendimientos, ya que promueven una respiración moderada y eficiente de la planta (i.e. la energía producida por la fotosíntesis es superior a la energía consumida por la respiración,

resultando en una acumulación neta de biomasa). Por otro lado, temperaturas máximas elevadas en estos meses benefician la correcta formación y desarrollo de estructuras reproductivas, y el desarrollo óptimo de la floración y fertilización, lo que se traduce en un alto número de granos llenos por panoja, componente clave para alcanzar altos rendimientos. Esto explicaría la relación positiva que se observa con la temperatura máxima, aunque en este caso la diferencia de medias no resultó estadísticamente significativa. Finalmente, la relación positiva con el rango térmico diario se interpreta como resultado combinado de las relaciones previamente mencionadas con la temperatura mínima y máxima.

	T media	T mínima	T máxima	T rango	Nubosidad	Precipitación	HR
Sep	+	+	+	+	+	-	-
Oct	-	-	+	+	-	-	-
Nov	-	-	+	+	-	-	-
Dic	-	-	+	+	-	+	-
Ene	-	-	-	+	-	-	-
Feb	+	-	+	+	-	-	-

Tabla 1. Se indican los meses en los que la diferencia de medias de las anomalías compuestas entre años de rendimientos altos y bajos resultó estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 99 % (celdas coloreadas). Asimismo, se especifica si la relación fue positiva (+) o negativa (-), es decir, si los rendimientos altos estuvieron asociados a anomalías positivas o negativas, correspondientemente, de la variable analizada.

Por último, el análisis de los aspectos dinámicos que vinculan a los rendimientos de arroz en Corrientes con patrones de circulación regional y global muestra que los rendimientos mayores están asociados a patrones de circulación de La Niña, que favorece la divergencia de humedad, mayor radiación y alta amplitud térmica sobre la región, lo que favorece al desarrollo óptimo del cultivo.

Este trabajo destaca la importancia de contextualizar las anomalías de rendimiento del arroz mediante el uso de informes locales para validar el filtrado de tendencia y dar sentido a los datos. Se evidencia que la influencia climática varía según la fase fenológica del cultivo, siendo noviembre un mes determinante por su vínculo con la nubosidad y rango térmico. Por último, los mayores rendimientos se asocian a patrones de circulación de La Niña.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto PICT-2021-GRF-TI-00498, PIP 21-23 N°11220200102038 y al Servicio Meteorológico Nacional por los datos.

REFERENCIAS

Asociación Correntina de Plantadores de Arroz (ACPA) & Bolsa de Cereales de Entre Ríos. (2010). Cosecha nacional: Campaña 2009/2010. https://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/Informes_arroceros/D-COSECHA-NACIONAL-CAMPANA-2009-10.pdf

Barros, V. R., and G. E. Silvestri, 2002: The Relation between Sea Surface Temperature at the Subtropical South-Central Pacific and Precipitation in Southeastern South America. *J. Climate*, 15, 251–267, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0251:TRBSST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0251:TRBSST>2.0.CO;2).

Bolsa de Comercio de Santa Fe (BCSF), Asociación Correntina de Plantadores de Arroz (ACPA), Bolsa de Comercio del Chaco, & Bolsa de Cereales de Entre Ríos. (2021). *Informe nacional de arroz: Campaña 2020/2021*. https://www.bcsf.com.ar/doc_news/INFORMEARROZNACIONAL-Final.pdf

Bolsa de Comercio de Santa Fe (BCSF), Asociación Correntina de Plantadores de Arroz, Bolsa de Comercio del Chaco, EEA INTA Corrientes, AER INTA San Javier, AER INTA Las Palmas, & Bolsa de Cereales de Entre Ríos. (2025). *Informe superficie sembrada con arroz en Argentina – Campaña 2024/25*. https://bolsacer.org.ar/site/wp-content/themes/btdbolsacer/templates/pdfs/informe-semanal.php?page_id=9342

Lu, J., Carbone, G. J., & Gao, P. (2017). Detrending crop yield data for spatial visualization of drought impacts in the United States, 1895–2014. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238, 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.001>

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina, 2024. *Estimaciones agrícolas: Superficie sembrada, cosechada, producción y rendimiento por cultivo, campaña y provincia*. Dirección de Estimaciones Agrícolas. <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>

Testani, N., Robledo, F., & Díaz, L., 2024 (a). Cloudiness variability and long-term decrease over Northeastern Argentina: Insights from surface observations and satellite-derived data. *Presentado en JOVEN Andex 2024*.

Testani, N., Robledo, F. A., & Díaz, L. B., 2024 (b). Climatology and trends of cloudiness in a productive rice and vegetable region of South-Eastern South America. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.8385>

TURBULENCIA CONVECTIVA SOBRE LA REGIÓN DE CÓRDOBA: UN CASO DE ESTUDIO

Juan Ignacio Vera Amor^{1,2}, Paola Rodriguez Imazio^{2,3}
Luciano Vidal², Maria de los Milagros Alvarez Imaz², Andreas Dörnbrack⁴
nachoveraa00@gmail.com

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y de los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad de Buenos Aires

²Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁴Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Palabras claves: Turbulencia, Convección, SOUTHTRAC

1) INTRODUCCION

La turbulencia atmosférica está caracterizada por remolinos que generan rápidas variaciones en las componentes del viento, y pueden abarcar un gran espectro de escalas (desde varios metros hasta cientos de kilómetros). Cuando estos remolinos tienen una escala comparable con las dimensiones de un avión, pueden implicar fuertes impactos en la seguridad aeronáutica (Lane et al., 2003; Bedka et al., 2010). El encuentro con turbulencia puede generar daños materiales en las estructuras del avión, así como también poner en peligro la seguridad de pasajeros y tripulación a bordo (Lane et al., 2003). Por estos motivos, surge la necesidad de poder entender los diversos procesos físicos que generan turbulencia y aplicar esos conocimientos en la mejora de los pronósticos. En este sentido, la convección húmeda y su interacción con el entorno generan condiciones propicias para el desarrollo de turbulencia dentro y por encima de la nube. A este tipo de turbulencia se la define como turbulencia inducida por la convección, CIT (por su sigla en inglés, Convective Induced Turbulence). Este trabajo estudia un caso de turbulencia convectiva sobre la región de Córdoba el 6 de noviembre de 2019, ocurrido durante la campaña SOUTHTRAC (Rapp et al., 2021). Para ello se utilizan observaciones in situ a 1, 10 y 100 Hz obtenidos de un vuelo de investigación, sensores remotos para la detección y caracterización de la convección y se evalúa como el modelo de pronóstico europeo (IFS-ECMWF) resuelve la situación en el centro del país.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para este estudio se cuenta con datos in situ de las tres componentes de la velocidad del viento, obtenidas de instrumentos instalados a bordo del HALO (High Altitude and Long Range Aircraft) con una frecuencia de muestreo de 1, 10 y 100 Hz. Estos datos fueron utilizados para calcular la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación de energía (TKE y EDR, por sus siglas en inglés, respectivamente), que son parámetros utilizados normalmente para estimar la severidad de la turbulencia aeronáutica. Estas cantidades fueron calculadas de la misma forma que Imazio et al. (2022), ya que los datos se obtuvieron de los mismos sensores. En particular, el EDR es hoy el parámetro oficial utilizado por la ICAO (por sus siglas en inglés para Organización Internacional de Aviación Civil) para fijar umbrales de turbulencia. También se utilizan datos provenientes de sensores remotos para el seguimiento y caracterización de la

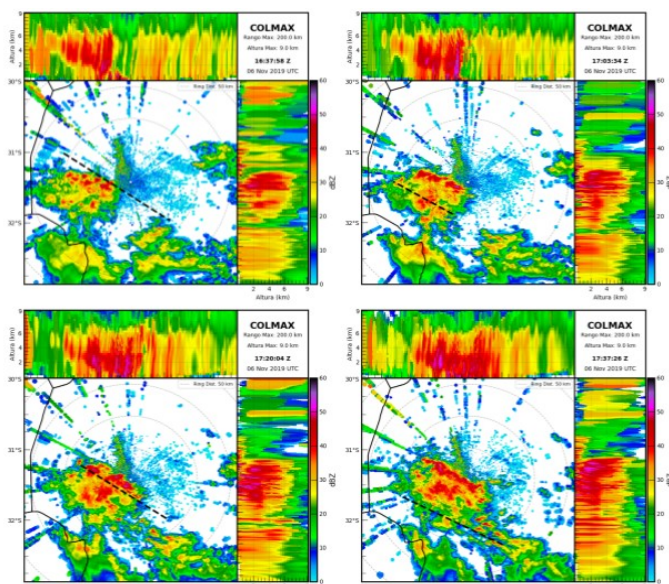


Figura 1: Producto COLMAX del RMA1 para el día 6 de noviembre de 2019 a las 16:37, 17:03, 17:20 y 17:37 UTC. En negro se grafican las sucesivas pasadas del HALO.

cada elevación del escaneo realizado por el RMA1. Las transectas en negro punteado representan las pasadas del HALO en cada momento, considerando que el avión se encuentra a una altitud de 12 km. La evolución temporal de las imágenes de radar permiten observar como la convección avanza hacia el ENE, donde el borde delantero de la misma presenta mayor intensidad tomando valores de reflectividad por encima de 50 dBZ. También se puede observar cómo si bien la convección es intensa, no es muy profunda y se puede determinar el tope de la nubosidad en un

convección. Se cuenta con información de distintos canales del sensor ABI montado en el satélite GOES-16 perteneciente a la NOAA, al igual que con datos del Radar Meteorológico Argentino 1, RMA1, ubicado en la ciudad de Córdoba. A estos datos, se le complementa información proveniente del sistema de pronóstico integrado del modelo global europeo IFS ECMWF.

3) RESULTADOS

En la Figura 1 se grafica la reflectividad máxima de la columna (COLMAX) para cada tiempo coincidente con las sucesivas pasadas del HALO. Además, los paneles laterales y superiores brindan información de la estructura vertical de la convección, obtenidos a partir de

nivel cercano a los 9 km, donde se registran valores de unos 10 dBZ.

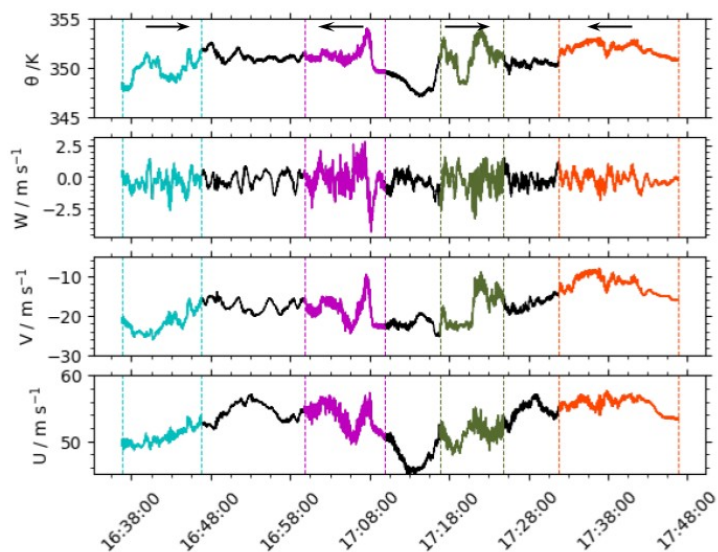


Figura 2: Serie temporal a 10 Hz de la temperatura potencial y las tres componentes de viento.

La íntima relación entre la convección y la turbulencia registrada por la aeronave queda plasmada en la Figura 2. Allí, se cuenta con la serie temporal de la temperatura potencial y de las 3 componentes del viento con las mediciones a 10 Hz. En colores se grafican los tiempos en los que se cuenta con observaciones a 100 Hz de modo que en celeste se tiene la primera pasada, en magenta la

segunda, en verde la tercera y la última en naranja. Se puede ver como las pasadas del medio (2 y 3, magenta y verde) cuentan con las mayores perturbaciones, íntimamente relacionadas con la intensidad de la convección. Para la hora de la última pasada (panel abajo a la derecha de la Figura 1) se observa como la convección sigue siendo intensa y abarca un área considerable, pero el sobrevuelo del HALO ocurre alejado de esta región.

4) CONCLUSIONES

El radar meteorológico es un gran aliado para detectar este tipo de eventos de convección profunda con tope cálido, capaz de generar turbulencia intensa a una distancia considerable de la región en donde se localiza, ya que el HALO vuela sobre la región a unos 3 km por encima del tope nuboso. Las sucesivas pasadas del avión sobre la convección permiten descartar cualquier otra fuente de turbulencia debido a que las mayores variaciones, principalmente en la velocidad vertical, ocurren en los tramos intermedios. Del mismo modo, para el tiempo de la última pasada se observa que la convección sigue siendo intensa (panel abajo a la derecha, Figura 1) pero el avión se encuentra alejado de esta zona. Este resultado sugiere entonces, que la inyección de energía en las escalas grandes es generada por la convección y este es el proceso que da lugar al evento turbulento registrado.

Se resalta la importancia de estudiar este tipo de eventos y no solo los que involucren convección húmeda profunda, al igual que promover estudios de turbulencia en la región para poder comparar con la bibliografía del hemisferio norte y de esta forma, calibrar los índices de turbulencia en la región utilizados con fines de pronóstico.

REFERENCIAS

- Bedka, K., J. Brunner, R. Dworak, W. Feltz, J. Otkin, y T. Greenwald, 2010:** Objective satellite-based detection of overshooting tops using infrared window channel brightness temperature gradients. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49 (2), 181 – 202, doi:10.1175/2009JAMC2286.1
- Fovell, R., D. Durran, and J. Holton, 1992:** Numerical simulations of convectively generated stratospheric gravity waves, *J. Atmos. Sci.*, 49(16), 1427–1442.
- Lane, T., R. Sharman, T. Clark, and H. Hsu, 2003:** An investigation of turbulence generation mechanisms above deep convection, *J. Atmos. Sci.*, 60(10), 1297–1321.
- Rapp, M., Kaifler, B., Dörnbrack, A., Gisinger, S., Mixa, T., Reichert, R., et al., 2021:** SOUTHTRAC-GW: An airborne field campaign to explore gravity wave dynamics at the World's strongest hotspot. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(4), E871–E893. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0034.1>
- Rodriguez Imazio, P., Dörnbrack, A., Urzua, R. D., Rivaben, N., & Godoy, A., 2022:** Clear air turbulence observed across a tropopause fold over the Drake passage—A case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035908. <https://doi.org/10.1029/2021JD035908>

DETECCIÓN DE HELADAS Y SU RELACIÓN CON EL RELIEVE EN UN VIÑEDO DE VALLE DE UCO, MENDOZA

Grethel García Bu Bucogen¹, Maximiliano Viale¹, Facundo Impagliazzo²

grgarcia@mendoza-conicet.gob.ar.

¹ Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA)

² Viticultor independiente (Proyecto RAQUIS)

Palabras clave: heladas, clima local, topografía.

1) INTRODUCCIÓN

Las heladas meteorológicas —definidas como aquellas en las que la temperatura (T) en el abrigo meteorológico desciende por debajo de 0°C — constituyen uno de los principales riesgos para la agricultura, especialmente en regiones subtropicales o con marcada influencia topográfica (Fernández Long et al., 2013). En zonas agrícolas específicas, como los viñedos de altura, la topografía configura el clima local y genera microclimas que afectan el crecimiento vegetal (Ferretti, 2020), por lo que para mitigar los efectos adversos de las heladas se requiere información meteorológica precisa que permita seleccionar las parcelas menos expuestas. En este marco, el proyecto Raquis cuenta con un viñedo de altura (finca Monasterio) situado en el piedemonte andino a ~ 1500 m. s. n. m, al pie de la cordillera de Los Andes, en Mendoza (Argentina). El agrónomo responsable de la finca ha identificado variaciones micro-climáticas entre parcelas, especialmente en relación con las heladas. El objetivo de este estudio es analizar la ocurrencia espacio - temporal de heladas en el terreno corrugado de la finca Monasterio de 30 ha, evaluando su relación con la topografía, con el fin de identificar zonas vulnerables y generar información climática de alta resolución para una gestión agronómica más eficiente.

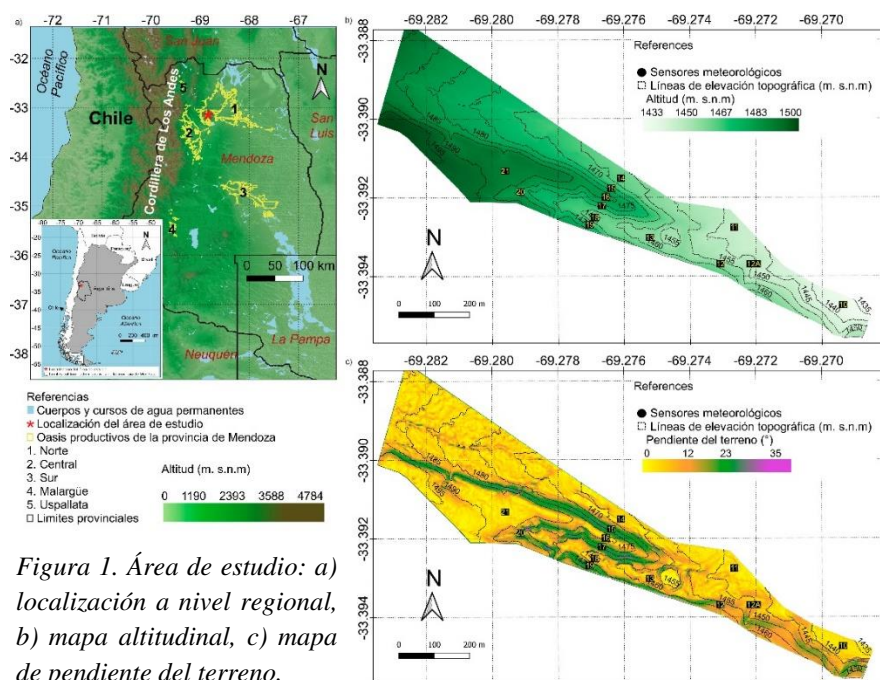


Figura 1. Área de estudio: a) localización a nivel regional, b) mapa altitudinal, c) mapa de pendiente del terreno.

2) ÁREA DE ESTUDIO

La finca Monasterio está ubicada en el oasis productivo central de la provincia de Mendoza, conocido como Valle de Uco (Fig. 1a). El área a cultivar de la finca se extiende pendiente abajo en el piedemonte al este de los Andes, desde los 1433 m hasta los 1499 m con un área de 30.4 ha (Figura 1b). El 99,8 % del área de estudio presenta pendientes inferiores a 35° (Figura

1c). En el noroeste de la finca Monasterio se localiza una loma, sobre cuya cresta se encuentra instalado el sensor 16 (Figuras 1b y 1c).

3) DATOS Y MÉTODOS

La finca Monasterio cuenta con una red de 13 sensores de temperatura distribuidas a lo largo de su superficie (Figura 1b y Tabla 1). Los sensores fueron instalados en abrigos meteorológicos a 1.5 m de altura, mientras 12A es μ METOS, el resto de sensores son marca HOBO modelo Pendant MX2201. Las mediciones son de alta resolución temporal (cada 5 minutos y 12A cada 15 minutos). Actualmente se cuenta con información de las temporadas de crecimiento 2022-2023 y 2023-2024. Se identificó la hora promedio de ocurrencia de las temperaturas mínimas absolutas ($T_{min_{abs}}$) durante los eventos de helada, y se estimaron las áreas más afectadas mediante la detección de cantidad de eventos y acumulación de minutos con $T < 0^{\circ}\text{C}$ por temporada de crecimiento. Para ilustrar el peor escenario registrado, se elaboró un Mapa de Cobertura de Helada Máxima (MCHM) correspondiente al evento del 31 de octubre de 2022. El mapa se generó mediante regresión múltiple en SAGA-QGIS, vinculando $T_{min_{abs}}$ con variables topográficas (altitud y pendiente). La interpolación resultante muestra las zonas más críticas, mientras que un mapa de calor permitió evaluar el efecto del drenaje de aire frío en el área.

Tabla 1. Características topográficas del emplazamiento de cada sensor de temperatura.

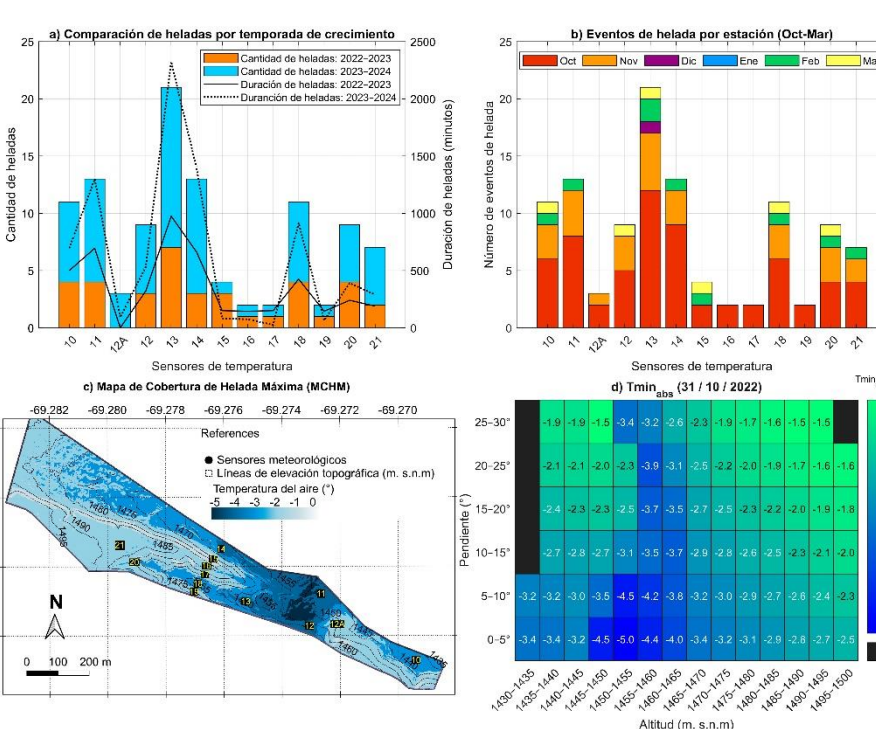


Figura 2. Caracterización espacio – temporal sobre la ocurrencia de heladas (2022-2024: a) cantidad y duración de heladas por temporada de crecimiento, b) recurrencia mensual, c) capa de extensión máxima de heladas, d) mapa de calor relacionándola ocurrencia de heladas con la topografía.

4) RESULTADOS

Excepto para los sensores 15, 16 y 17, la temporada 2023 - 2024 presentó una mayor cantidad de eventos de heladas que la 2022 - 2023 (Figura 1a). Los sensores 10, 11, 13, 14 y 18 se ubican en las zonas más afectadas por la ocurrencia de heladas (Figuras 2a y b). El sensor 13, el cual se ubica en una

depresión topográfica (1457 m) con una pendiente inferior a 3° (Tabla 1), registró la mayor cantidad (14 eventos) y duración de heladas (2325 minutos: 38 h 45 min). En todos los meses de la temporada de crecimiento (octubre – marzo) se reportaron la ocurrencia de heladas, siendo los meses con mayor frecuencia octubre y noviembre (Figura 2b). El enfriamiento más intenso ($T_{min_{abs}}$) durante la ocurrencia de heladas fue registrado antes del amanecer (7 horas). Las heladas más intensas ocurrieron el 31/10/2022, 01/11/2022, 18/02/2023, 07/10/2023 y 12/10/2023, alcanzando valores mínimos de -4.7°C en la zona del sensor 13 durante la helada del 31/10/2022.

El análisis del MCHM permitió identificar que las áreas ubicadas en sectores elevados o con pendientes > 20°, correspondientes a las zonas donde se encuentran los sensores 15, 16 y 17 (Figuras 1b y c), presentan menor susceptibilidad a la ocurrencia de heladas (Figura 2c). En contraste, la zona aledaña a los sensores 13, 14 y 18 mostró una alta susceptibilidad a estos eventos. La Figura 2d evidencia un gradiente térmico asociado a la topografía, donde la acumulación de aire frío se concentra en sectores con altitudes < 1465 m y pendientes < 10°, alcanzando temperaturas mínimas inferiores a -4 °C. Esta distribución espacial se explica por la dinámica del aire frío en terrenos complejos: al ser más denso, el aire frío fluye hacia las zonas más bajas y planas, donde se acumula durante la noche, especialmente en condiciones de estabilidad atmosférica. Este fenómeno, conocido como “*cold-air pools*” en inglés, favorece la formación de heladas más intensas y duraderas en estas áreas. Por el contrario, las zonas más elevadas y con mayor pendiente favorecen el drenaje del aire frío y dificultan su estancamiento, reduciendo así la duración e intensidad de las heladas. Este comportamiento evidencia el control topográfico sobre el microclima y su influencia directa en la distribución térmica y el riesgo de heladas a escala local.

5) CONCLUSIONES

La corrugación del terreno de un viñedo influye significativamente en el microclima del mismo, incluyendo la ocurrencia de heladas. En el Valle de Uco, los viñedos se ubican ladera abajo del piedemonte al pie de los Andes, y corrugaciones internas en el viñedo modulan el clima dentro del mismo. En el viñedo Monasterio estudiado aquí, hemos cuantificado dichas diferencias microclimáticas dentro del mismo, donde naturalmente las zonas ubicadas en depresiones relativas y pendientes <10°, son más propensas a registrar temperaturas bajo cero debido a la acumulación de aire frío drenando ladera debajo de Los Andes por el piedemonte. En contraste, las áreas elevadas o con pendientes > 20° presentan menor vulnerabilidad a este fenómeno. Se identificaron los meses de octubre y noviembre como en los que acontecieron mayor cantidad de heladas. La obtención de este tipo de resultados resalta la importancia de considerar la interacción entre relieve – temperatura en el diseño de estrategias de manejo y mitigación del riesgo por heladas.

6) REFERENCIAS

- Fernández-Long, M. E., Müller, G. V., Beltrán-Przekurat, A. y Scarpati, O. E., 2013:** Long-term and recent changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. *International Journal of Climatology*, 33 (7), 1673-1686. <https://doi.org/10.1002/joc.3541>
- Ferretti, C.G., 2020:** A new geographical classification of vineyards tested in the South Tyrol wine region, northern Italy, on Pinot Noir and Sauvignon Blanc wines. *Ecological Indicators*, 108, 105737. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105737>

ANDEX y AndAMOS: un caso de aplicación sobre eventos extremos en el norte tropical andino

Guido Juan Tiscornia^{1,2,3}, Lluís Fita Borrell^{1,2,3}, Andrea Fabiana Carril^{1,2,3} y equipo
AndAMOS
guido.tiscornia@cima.fcen.uba.ar.

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina

² Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET–UBA, Argentina

³ Instituto Franco-Argentino Para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI), CNRS–IRD–CONICET–UBA, Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: eventos extremos, toma de decisiones, norte tropical.

1) ANDEX: Una iniciativa regional con impacto global.

ANDEX es el Programa Hidroclimático Regional para los Andes (<https://www.andex-rhp.org/>), enmarcado dentro del Panel de Hidroclimatología (GHP) del Programa GEWEX del WCRP. Esta iniciativa fue creada en 2018 con el objetivo de mejorar la comprensión y la predicción del clima y la hidrología a lo largo de la cordillera de los Andes, a la par de promover la participación activa de actores de todos los países andinos.

El programa busca fomentar el desarrollo científico en América del Sur a través de diversas acciones clave. Primero, la promoción de la cooperación regional entre la comunidad científica y programas de investigación. Segundo, la formulación de una agenda científica centrada en problemáticas fundamentales para la región andina. Tercero, la creación de un marco científico que respalde la toma de decisiones orientadas al desarrollo sostenible de una región altamente vulnerable desde el punto de vista ambiental y biogeofísico. Cuarto, la articulación con iniciativas a nivel regional y global.

La misión de ANDEX es fortalecer la resiliencia de las sociedades andinas mediante la producción y difusión de conocimiento sobre el hidroclima regional, así como sobre los impactos de los cambios ambientales en las poblaciones y ecosistemas de la región. Tiene, además, la visión y el objetivo de consolidarse como un programa hidroclimático regional de referencia, conformado por una comunidad científica sólida, articulada y comprometida con las necesidades sociales.

Así, ANDEX cuenta con una red diversa de especialistas integrada por más de 200 personas dedicadas al estudio y la gestión del sistema andino. Esta comunidad científica se encuentra distribuida geográficamente en múltiples países, reflejando un enfoque regional e inclusivo, que trasciende nacionalidades, lugares de residencia o instituciones de afiliación.

2) AndAMOS: Acortar la brecha e invertir el orden entre la producción científica y los tomadores de decisiones

En la actualidad, los ámbitos del conocimiento climático, los estudios de impacto y la toma de decisiones suelen operar de manera desconectada. El conocimiento generado desde la ciencia del clima, basado en modelos globales y regionales, simulaciones numéricas y grandes volúmenes de datos procesados, no siempre logra integrarse de manera efectiva con las herramientas y necesidades del análisis de impactos o de la gestión. Esto impide que la información producida en el ámbito científico sea utilizada adecuadamente para la elaboración de políticas públicas, planes de acción o instrumentos de gestión territorial y adaptación al cambio climático.

Esta desconexión limita la utilidad del conocimiento disponible y genera un desequilibrio en la dirección del flujo de información. Según los enfoques más tradicionales, el conocimiento se genera desde la ciencia climática ‘*hacia abajo*’ sin una retroalimentación clara por parte de quienes enfrentan problemas concretos o toman decisiones. Existen nuevos marcos teóricos que describen el proceso de generar información como una coproducción entre los distintos actores participantes (Vera, 2024). Según estos, la información es coproducida a través de un diálogo entre los distintos actores, valorando los aportes que cada uno de ellos brinda.

El proyecto AndAMOS (“*Andes All MOdelling Strategies*”) comenzó en el 2024 como una iniciativa del programa GEWEX–ANDEX, para abordar esta problemática, promoviendo una transformación en la forma en que se produce el conocimiento climático y sus aplicaciones. AndAMOS propone comenzar desde las necesidades concretas de quienes trabajan en el análisis de impactos y desde quienes toman decisiones en los territorios andinos.

La estrategia de AndAMOS se basa en generar un diálogo con tomadores de decisiones, gestores del territorio, y especialistas en impactos para identificar de manera participativa cuáles son las preguntas clave y los vacíos de información (Figura 1). A partir de esta demanda, el proyecto orienta la producción científica hacia la generación de conocimiento

útil y contextualizado, fortaleciendo los vínculos entre ciencia, política y sociedad. Además, permite evaluar si las herramientas de modelado actuales son adecuadas para responder preguntas clave.

Así, se busca: (1) construir lazos entre el conocimiento climático y su aplicación concreta, (2) articular modelos, datos e información con herramientas de análisis, planificación y formulación de políticas, (3) fortalecer capacidades regionales y (4) generar una comunidad



científica más conectada con las necesidades reales de la región andina, que sea capaz de responder a los desafíos ambientales, sociales y climáticos con soluciones informadas y efectivas. Este diálogo se articula mediante ‘*experiencias*’ con las cuáles se ponen a prueba las herramientas numéricas existentes para responder a las demandas de los distintos actores consultados. Para ello se selecciona un caso de estudio representativo, sobre el cuál se realizan experimentos de simulado numérico y se reproducen todas las etapas necesarias para producir datos útiles y comprender mejor los procesos acontecidos durante el evento.

3) AndAMOS Tropical North: Una experiencia en el Norte Tropical Andino

La primera *experiencia* de AndAMOS se desarrolla en el norte tropical de los Andes, con foco en Ecuador y Colombia (Figura 2). Esta iniciativa busca abordar dos problemáticas críticas: (1) la crisis energética vivida en Ecuador en 2024 por escasez de agua que afectó la generación hidroeléctrica y (2), los deslizamientos de tierra en zonas montañosas de Colombia como el ocurrido en Anorí en julio de 2023. Entre sus objetivos están:

- Comprender los procesos atmosféricos relacionados con la falta de precipitación en el

norte de Sudamérica en 2024 y con la ocurrencia de deslizamientos de tierra en Colombia.

- Analizar la predictibilidad a medio plazo (< 6 meses) del evento y estudiar el valor agregado del simulado a alta resolución en comparación a los sistemas de predicción estacional por conjuntos globales (GSEPS, del inglés) disponibles en Copernicus.
- Proveer los datos meteorológicos necesarios para la gestión hídrica en centrales hidroeléctricas y para comprender la eventual ocurrencia de deslizamientos de tierra.
- Interactuar y coproducir en conjunto con la agencia encargada de la gestión hídrica de las centrales hidroeléctricas y con las autoridades locales de Colombia.
- Comprender cuáles son las limitaciones de los modelos para representar condiciones hidrometeorológicas sinópticas o locales que favorecen largos períodos de sequía, deslizamientos de tierra en valles estrechos y empinados.

El flujo de trabajo planteado consiste, en primer lugar, en identificar y contactar a las autoridades responsables de la gestión del agua y de las centrales hidroeléctricas así como a las autoridades locales y geológicas de Colombia, con el objetivo de construir un entorno de coproducción.

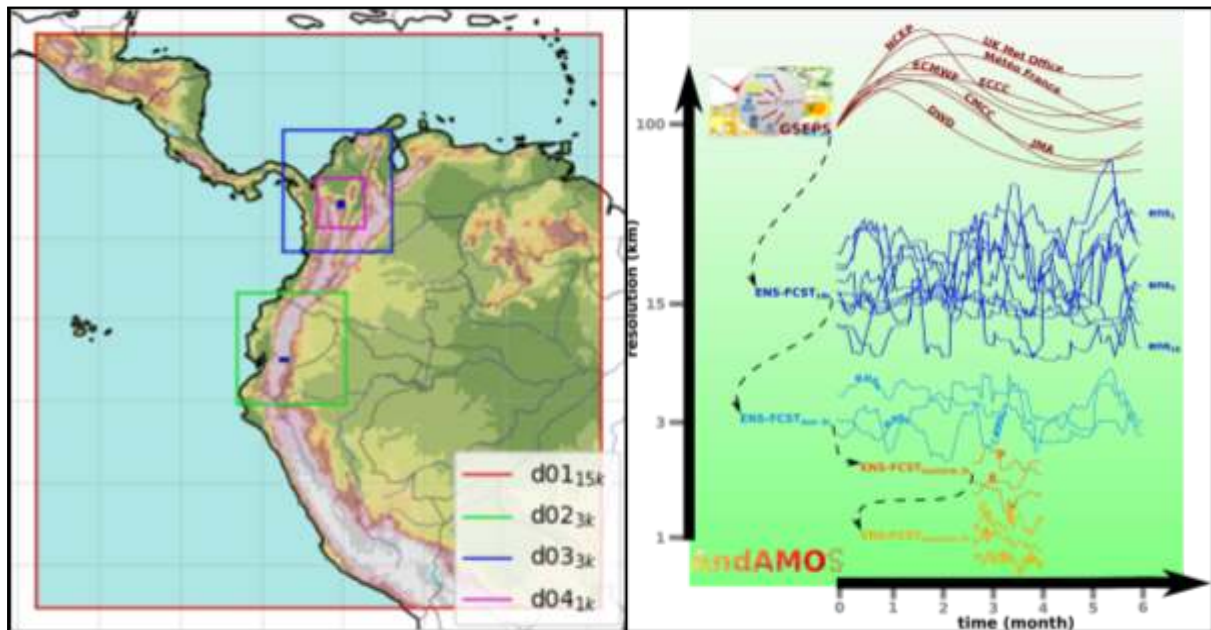


Figura 2. Propuesta de dominios de simulación (izquierda) y estrategia de simulado (derecha) a partir de datos del GSEP

Luego, analizar el desempeño del sistema GSEPS determinando cuando empezó a predecir la sequía: i.e., realizar un conjunto de simulaciones a resoluciones cada vez más altas con el modelo WRF (ver Figura 2), estudiar el valor agregado de la resolución a escala kilométrica para la predicción estacional y la provisión de datos útiles para la gestión de recursos hídricos y la ocurrencia de corrimientos de tierra. El período de simulación tendrá una duración de 14 meses para cubrir toda la temporada de lluvias de 2024: desde septiembre de 2023 hasta diciembre de 2024.

4) Referencias:

Vera, C., 2024. Climate Services in South America. In *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*.

CARACTERIZACIÓN DE PELIGROSIDADES CLIMÁTICAS Y VULNERABILIDAD SOCIAL EN MAR DEL PLATA ANTE TORMENTAS SEVERAS (2013–2024)

Martin P^{1,2}; Gentile, E¹; Vargas, E^{1,3}; Prario, B⁴
martinpaulabeatriz@gmail.com

¹ Universidad de Buenos Aires. Facultad de Filosofía y Letras. Instituto de Geografía “Romualdo Ardissonne”. Programa de Investigaciones en Recursos Naturales y Ambiente (PIRNA).

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

³ Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF).

⁴ Servicio de Hidrografía Naval. Ministerio de Defensa.

Palabras claves: Mar del Plata, Tormentas, Índice de Vulnerabilidad Social

1) INTRODUCCIÓN

Las tormentas severas son fenómenos meteorológicos de alto impacto, cuya frecuencia e intensidad han aumentado notablemente en las últimas décadas, en estrecha relación con el calentamiento global. Este proceso ha alterado los patrones climáticos, configurando nuevos escenarios de peligrosidad, especialmente en regiones costeras (García, 2011). Ciudades costeras como Mar del Plata presentan alta exposición a procesos de ciclogénesis que provocan eventos extremos de viento, oleaje y daños en infraestructura (Isla et al., 2022; Possia et al., 2003). A los impactos físicos se suman dimensiones sociales e institucionales que inciden en la capacidad de respuesta. La vulnerabilidad social condiciona los procesos de anticipación y recuperación, afectando con mayor severidad a los sectores más desfavorecidos. Este estudio busca caracterizar las peligrosidades climáticas y evaluar la vulnerabilidad social, problematizando los criterios de riesgo en contextos urbanos costeros.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para caracterizar la peligrosidad se utilizó por un lado la serie de datos discretos de altura (H), periodo (P) y dirección (D) de olas observadas en la "Estación de Observaciones Costeras" (EOC-MdP.) (-38° 00' 02"; -57° 32' 18") (Figura 1). Por otro lado, se trabajó con la velocidad del viento (U) y su dirección (W) obtenidas de la estación meteorológica Mar del Plata AERO (-37° 55' 48"; -57° 34' 48"). En ambos casos el periodo seleccionado fue 2013-2024. Para evaluar los distintos eventos hidrometeorológicos se utilizaron tres dimensiones: (I) información de periódicos nacionales y locales, medios sociales, programas de radio y televisión sobre los impactos, (II) tormentas severas que registraron olas superiores al Percentil 75 (P75), con un valor de H=1 m, (III) U superior a 14 km/h (valor medio). Se contabilizaron un total de 59 eventos durante el periodo de estudio. Las tormentas se clasificaron en 3 tipos según su génesis, basado en la metodología utilizada en Gatti et al. (2022). Para estudiar la vulnerabilidad social, se utilizó una metodología desarrollada por el Programa de Investigaciones en Recursos Naturales y Ambiente (PIRNA, UBA) Natenzon y Seattone Passe (2015). Se consideraron tres dimensiones: social, habitacional y económica que se dividieron en diez indicadores: analfabetismo, densidad de centros de salud, población 0-14 años, población mayor a 65 años, hacinamiento, falta de acceso al alcantarillado, falta de agua corriente, población de desempleados, hogar monoparental, y educación del cabeza de familia.



Figura 1. Ubicación relativa de Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires.

Los indicadores se obtuvieron del Censo Nacional 2022 del INDEC, trabajados a escala de radio censal. Un Índice de Vulnerabilidad Social frente a Desastres (IVSD) fue creado utilizando valores absolutos y relativos. El IVSD Síntesis se calculó a partir de los resultados obtenidos en los índices absolutos y relativos.

3) RESULTADOS

Los valores de altura de ola observados en la EOC presentan direcciones de olas correspondientes al cuarto cuadrante, siendo en su mayoría ESE y SE (38.6% y 36.9%, respectivamente). Del total de eventos analizados, el 49.2 % están asociados al percentil 95 (P95), definido por una H igual a 1,70 m (Figura 2 a). De la clasificación de las tormentas resulta que, un 15,3% están asociados a actividad frontal (Tipo1), un 22, % a centros de bajas presiones en superficie (Tipo 2) y un 62,7% al de actividad ciclónica (Tipo 3) (Figura 2b). Las tormentas Tipo 3 presentan las mayores frecuencias de ocurrencias en la época de transición e invernal.

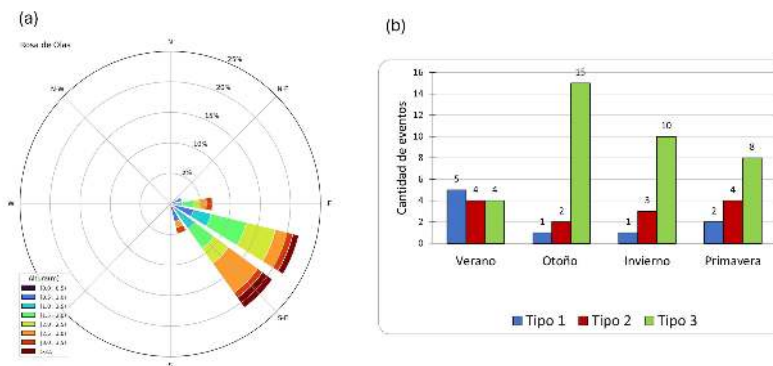


Figura 2. Rosa de olas para los 59 eventos seleccionados. Las direcciones indicadas son desde donde incide el frente de ola, los porcentajes representan el número de casos registrados para cada dirección y la escala de colores indica los rangos de valores de altura de ola en metros (a). Clasificación de tormentas según la estación del año (b).

La Figura 3a muestra la distribución del IVSD síntesis en los radios censales del Partido de General Pueyrredón, con valores más elevados en barrios del sur y sudoeste como por ejemplo: San Patricio, Playa Serrana y San Jacinto y del norte y noroeste como: Parque Independencia, Parque Hermoso y Camet. La Figura 3b muestra los impactos registrados por barrio observándose una distribución espacialmente heterogénea, con una mayor concentración de afectaciones en barrios ubicados a menos de 3 km de la costa. Sin embargo, también se reportaron impactos en zonas más alejadas, como Parque Hermoso (a 8 km del litoral), principalmente por inundaciones y cortes de energía eléctrica. Los eventos asociados al viento —como caída de árboles y voladuras de techos—

afectaron con mayor intensidad a Chapadmalal, Colinas de Peralta Ramos, Del Puerto y Punta Mogotes.

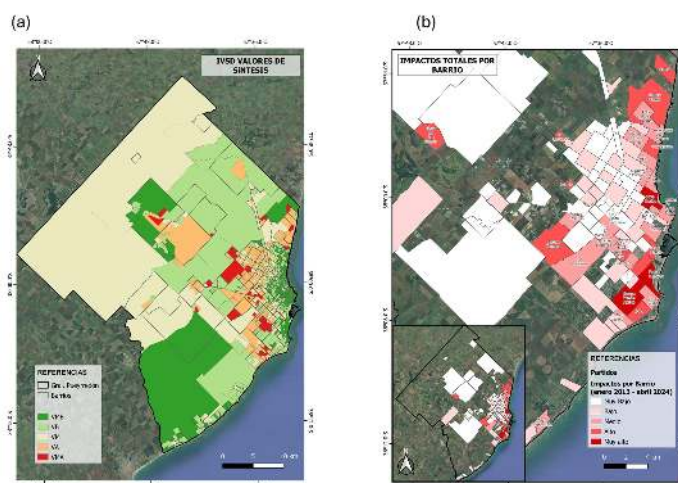


Figura 3. Radios censales con el IVSD Síntesis. VMB = Vulnerabilidad Muy Baja; VB = Vulnerabilidad Baja; VM = Vulnerabilidad media; VA = Vulnerabilidad Alta; VMA = Vulnerabilidad Muy Alta (a). Mapa del total de Impactos acontecidos en el periodo de estudio (b).

4) CONCLUSIONES

El estudio caracterizó la ocurrencia y magnitud de tormentas severas en Mar del Plata (2013–2024), identificando una mayoría de eventos de origen ciclónico (62,7%) con estacionalidad invernal y de transición. Cerca del 50% se asoció a alturas de ola superiores al percentil 95, evidenciando alta peligrosidad climática. El análisis de vulnerabilidad social reveló una marcada heterogeneidad territorial en el Partido de General Pueyrredón, con sectores de alta y muy alta vulnerabilidad coincidentes con zonas expuestas a tormentas. Estos hallazgos resaltan la necesidad de una planificación urbana que integre peligrosidad climática y vulnerabilidad social, así como el fortalecimiento de sistemas locales de alerta y respuesta para promover la capacidad de la sociedad de reponerse o adaptarse ante el cambio climático.

5) REFERENCIAS

- García, M., 2001:** Percepción de Vulnerabilidad Ambiental en Poblaciones Urbanas. Tesis Maestría en Gestión Ambiental del Desarrollo Urbano, Universidad Nacional de Mar del Plata. Mar del Plata.
- Gatti, I., Martin, P., Vargas, E., Gasparotto, M., Prario, B., Gentile, E., Patané, L., 2022** An assessment of severe storms, their impacts and social vulnerability in coastal areas. A study case of General Pueyrredón, Argentina, *Applied Geomorphology and Contemporary Issues*, Springer Nature. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-04532-5_29.
- Isla, F. Prario, B., Maenza, R., Bertola, G., Cortizo, L y Lamarchina, S., 2022:** Las sudestadas del Sudeste y del Sur en la Provincia de Buenos Aires, Argentina, y el aumento antropogénico previsto del nivel del mar. *Revista Universitaria de Geografía* / ISSN 0326-8373 / 2022, 31 (1) (enero-junio), 11-37.
- Natenzon, C. E., & Seattone Passe, J., 2015:** Vulnerabilidad social, amenaza y riesgo frente al cambio climático. Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- Possia, N., Cerne, S. and Campetella, C., 2003:** A diagnostic analysis of the Río de la Plata Superstorm, May 2000. *Meteorological Applied*. Vol 10: 1–13.

VALIDACION DE CURVAS IDF CONSTRUIDAS CON DATOS DIARIOS DE PRECIPITACION Y DATOS HORARIOS EN LA REGIÓN DEL SESA

Victoria Benítez¹, Sol Zoé Guerra², Milagros Cano², Karina Flores³, Leandro Sgroi¹, Moira Doyle^{2,4} y Gabriela Müller^{1,4}

victoria.schneider08@gmail.com. Autor correspondiente.

¹Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral (CEVARCAM-FICH-UNL), Santa Fe

²Universidad Nacional de Buenos Aires (UBA), Buenos Aires

³Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Buenos Aires

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires

Palabras clave: Curvas de diseño hidrológico, datos horarios, datos diarios, región del SESA.

1) INTRODUCCIÓN

La región del SESA está experimentando un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación, los cuales generan impactos significativos en áreas urbanas, infraestructura y caudales hídricos. Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) son herramientas fundamentales para el análisis, diseño y control hidrológico frente a estos eventos. Sin embargo, en la actualidad existe una marcada escasez de curvas IDF, principalmente debido a la disminución del número de estaciones con registros pluviográficos (Pritchard et al., 2023; Poschlod et. al., 2021). Si bien los datos diarios pueden ser utilizados para construir curvas IDF, requieren previamente una desagregación temporal basada en información subdiaria. Este proceso suele estar limitado por la falta de datos adecuados, pero los avances en productos de precipitación sintética permiten abordar esta limitación. En particular, el uso de coeficientes de desagregación temporal (Huff, 1990) calculados a partir de productos satelitales como IMERG Final Run (Huffman et al., 2019), que ofrecen alta resolución temporal y espacial (Li et al., 2015), permite generar curvas IDF a partir de datos diarios y para cada punto de grilla. No obstante, como paso preliminar, es fundamental validar estas curvas utilizando estaciones con registros de precipitación subdiaria disponibles en la región.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos de precipitación obtenidos a partir de la digitalización de fajas pluviográficas de las estaciones de Buenos Aires, Reconquista y El Trébol (Argentina), y Villarrica (Paraguay), mediante la metodología desarrollada por el SMN (Flores, 2025). Además, se incluyeron datos de la estación automática de Florianópolis (Brasil). El período analizado fue 2001–2020, con la excepción de Buenos Aires, cuyo registro abarca desde 2001 hasta 2018. Para la desagregación temporal, se emplearon datos satelitales de precipitación del producto IMERG Final Run versión 06 (Huffman et al., 2019), calibrado con observaciones en superficie. Este producto proporciona datos con una resolución temporal de 30 minutos y espacial de aproximadamente 10 km ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$).

A partir de ambas fuentes de datos, se calcularon las precipitaciones acumuladas para las distintas duraciones analizadas (60 a 1440 minutos). Luego, se determinaron los valores máximos anuales de precipitación para cada duración, totalizando 20 años de registro, con el objetivo de estimar la precipitación máxima probable asociada a diferentes periodos de retorno ($T = 2, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 300$ y 500 años), mediante la aplicación de la distribución de Gumbel (Koutsoyiannis et al., 1998). Finalmente, se estimaron las intensidades máximas probables para cada duración, y se validaron las curvas IDF comparando las derivadas de datos horarios y las obtenidas por desagregación, mediante el cálculo de métricas estadísticas como la correlación de Pearson (CC), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo relativo (BIAS%).

3) RESULTADOS

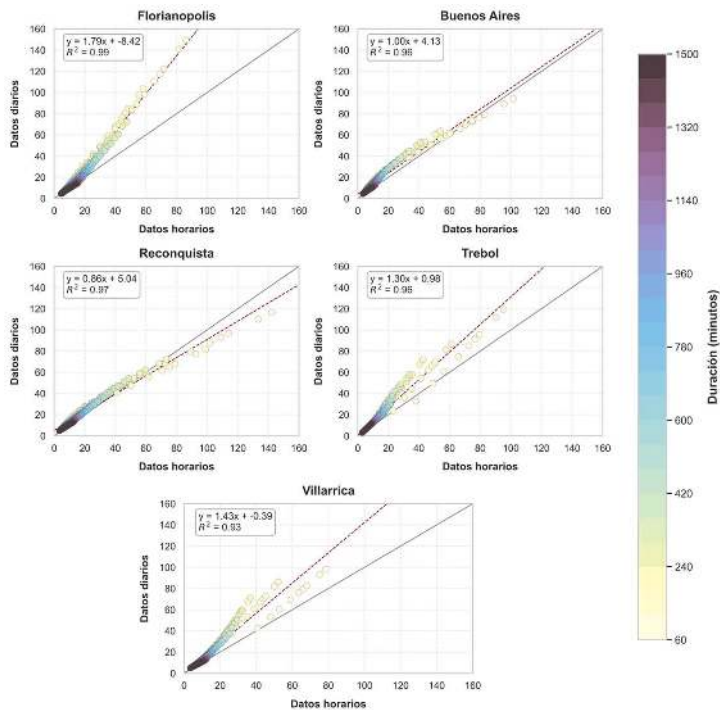
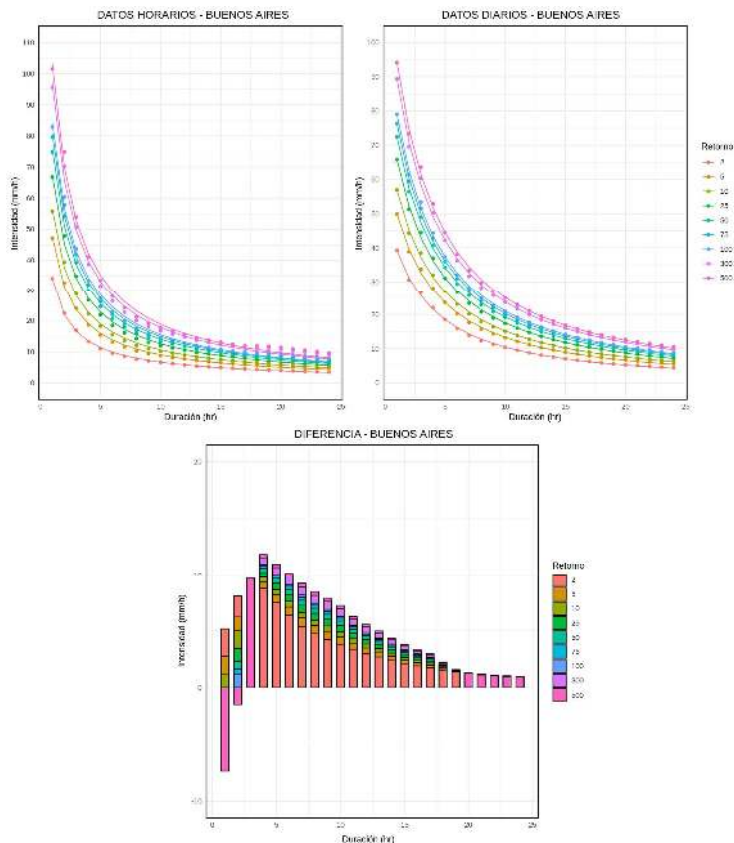


Figura 1: Diagrama de dispersión entre datos de intensidad de precipitación horarios y diarios para distintas duraciones para las 5 estaciones de la región del SESA seleccionadas.



Se emplearon diagramas de dispersión para comparar las intensidades correspondientes a todos los periodos de retorno entre datos horarios y diarios. En general, se observa que los datos diarios tienden a sobreestimar las intensidades, especialmente en las duraciones más cortas, donde también se registra una mayor dispersión. Esta dispersión disminuye a medida que aumenta la duración. Las estaciones de Buenos Aires y Reconquista presentan la mejor correlación entre ambos conjuntos de datos, mientras que Florianópolis, a pesar de mostrar la correlación más baja, alcanza el mayor coeficiente de determinación ($R^2 = 0.99$). En contraste, la estación de Villarrica presenta el R^2 más bajo, con un valor de 0.93.

Figura 2: Curvas IDF de las 5 estaciones con Recurrencia $T = 2, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 300$ y 500 años. Panel izquierdo datos pluviográficos, panel derecho datos de satélite. Tercer panel representa la diferencia entre las intensidades de cada duración.

La Figura 2 muestra las curvas IDF construidas a partir de datos horarios y diarios de la estación de Buenos Aires, así como las diferencias entre ambas curvas en función de la duración. Las curvas derivadas de datos diarios presentan una buena concordancia con las obtenidas a partir de datos horarios en las estaciones de Reconquista (no mostrada) y Buenos Aires, donde se registran las menores diferencias. En cambio, Florianópolis (no mostrada) muestra la mayor sobreestimación al utilizar datos diarios.

En general, las diferencias entre curvas son más pronunciadas en las duraciones más cortas y tienden a disminuir a medida que la duración aumenta. Estos resultados son especialmente relevantes para regiones donde no se dispone de registros pluviográficos horarios, ya que evidencian el potencial de utilizar datos diarios combinados con desagregación para la estimación de curvas IDF.

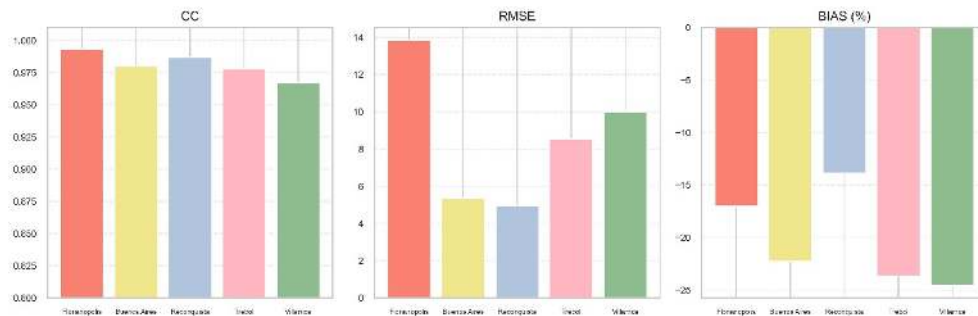


Figura 3: Métricas estadísticas (CC, RMSE y BIAS %) de las intensidades estimadas a partir de datos diarios en relación con los datos horarios, para los distintos periodos de retorno en todas las estaciones seleccionadas de la región del SESA.

El análisis de las métricas estadísticas revela una buena concordancia entre las intensidades estimadas a partir de datos horarios y diarios, destacándose la estación de Florianópolis con la mayor correlación. En términos generales, todas las estaciones presentan valores de RMSE inferiores a 10 mm/h, a excepción de Florianópolis, que alcanza el valor más alto con 14 mm/h. En cuanto al sesgo (BIAS), Villarrica muestra la mayor subestimación, seguida por la estación de El Trébol, mientras que Reconquista presenta el menor grado de subestimación entre todas las estaciones analizadas.

4) CONCLUSIONES

En este estudio se validaron las curvas de diseño IDF construidas a partir de datos diarios en comparación con aquellas derivadas de datos horarios. Las curvas basadas en datos diarios presentan una cobertura espacial más amplia, en contraste con los registros horarios observados. Esto permite desarrollar curvas de diseño en regiones donde no se dispone de información horaria. Los resultados obtenidos para todas las estaciones indican que los datos diarios tienden a sobreestimar las intensidades en comparación con los datos horarios, especialmente en las duraciones más cortas, mientras que dicha sobreestimación disminuye a medida que la duración aumenta. Estos hallazgos son alentadores para la generación de curvas IDF en áreas con escasa información pluviográfica, lo cual resulta fundamental para una adecuada planificación hidrológica.

AGRADECIMIENTOS Al SMN por las fajas pluviográficas. Este trabajo está enmarcado en los proyectos: PICT-2019-03982, PIP-CONICET 11220200102257CO y la Fundación Williams.

REFERENCIAS

- Flores, K., 2025.** Generación y Procesamiento de Datos Pluviográficos en el SMN: desarrollo de método de digitalización. Nota Técnica SMN 2025-19
- Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, Jackson Tan. 2019.** GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: 08/02/2022, 10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06.
- Koutsoyiannis, D.; Kozonis, D.; Manetas, A. 1998.** A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206(1-2), 118-135.
- Huff, F.A. (1990).** Time distributions of heavy rainstorms in Illinois. Illinois State Water Survey, Champaign, Circular 173.
- Li, Z., Yang D., Gao B., Jiao Y., Hong Y., and Xu T. 2015.** Multiscale hydrologic applications of the latest satellite precipitation products in the Yangtze River Basin using a distributed hydrologic model. *J. Hydrometeorol.*, 16(1), 407–426. doi:10.1175/jhm-d-14-0105.1.
- Poschlod, B., Ludwig, R. and Sillmann, J. 2021.** Ten-year return levels of sub-daily extreme precipitation over Europe. *Earth System Science Data*, vol. 13, 3. <https://doi.org/10.5194/essd-13-983-2021>
- Pritchard, D., Lewis, E., Blenkinsop, S., Patino, L., Whitford, A., and Fowler, HJ. 2023.** An Observation-Based Dataset of Global Sub-Daily Precipitation Indices (GSDR-I). *Sci Data*. 22;10(1):393. doi: 10.1038/s41597-023-02238-4.

CO-PRODUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA COMUNITARIO Y ANÁLISIS MULTIDIMENSIONAL DE LA INUNDACIÓN DE MAYO 2025 EN UN BARRIO DE CUENCA MATANZA

Camila Agustina Cibeira¹, Francisca Castillo¹, Caterina Fossier^{1,3}, Lautaro Montecino³, Santiago De Lojo^{1,3}, Diego Moreira^{1,2}, Lucia Curto^{1,4}, Federico Robledo^{1,2}
cibeiracamila@gmail.com, francastillo650@gmail.com

¹ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN), Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina

² Centro de Investigaciones del Mar y de la Atmósfera (CIMA, UBA-CONICET), Argentina

³ Dirección de Gestión Integral del Riesgo de Desastres, Subsecretaría de Cambio Climático, Municipio de Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina.

⁴ CONICET. Argentina

Palabras clave: ciencia ciudadana, práctica social, precipitación

1) INTRODUCCIÓN

La evidencia científica del calentamiento del sistema climático es inequívoca, y una de sus principales consecuencias es el aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos de precipitación, que al conjugarse con población expuesta y vulnerable a dicha amenaza incrementa la posibilidad de un impacto por inundaciones (IPCC 2022). En la Cuenca Matanza-Riachuelo, el agua escurre hacia diversos arroyos que confluyen en el Río Matanza-Riachuelo, el cual tiene una extensión de 64 km y desemboca en el Río de la Plata (ACUMAR, 2022). En esta cuenca habitan más de 4 millones de personas, muchas de las cuales residen en zonas inundables, alrededor de los arroyos, y son especialmente vulnerables a eventos de inundación, debido a la falta de infraestructura adecuada para afrontar sus impactos. Este trabajo se centró en el barrio El Corchito que se encuentra a orillas del Arroyo del Rey en su desembocadura del río Matanza. En esta zona, las inundaciones se producen tanto por precipitaciones como por el desborde de cauces fluviales y sudestadas. Para atenuar el impacto de las inundaciones en el año 2015 se realizó una obra estructural sobre el arroyo el Rey que consistió en la canalización del 90% de la traza del arroyo dentro del partido y la instalación de una estación de bombeo en la desembocadura. Dicha estación funciona mediante compuertas que separan al arroyo del río Matanza, y cuatro bombas que transportan agua del arroyo hacia el río (Figura 1). Cuando sube el nivel del arroyo, se activan las bombas para aumentar el flujo hacia el río. En cambio, cuando se eleva el nivel del río, se cierran las compuertas para evitar el ingreso de agua desde el río al arroyo, lo cual incrementa el riesgo de inundación.

Por otro lado, las medidas no estructurales son aquellas acciones que no incluyen la construcción de infraestructura, y que se realizan para mitigar los impactos. Dentro de estas medidas se pueden incluir campañas de concientización, los sistemas de alerta temprana, políticas públicas sobre gestión ambiental, etc. Este trabajo muestra los resultados de: 1) el inicio de un proceso de co-producción de un sistema de alerta temprana comunitario con diferentes actores territoriales del barrio el Corchito: gobierno local, organizaciones de la sociedad civil y vecinos del barrio, en el marco de una práctica social educativa vinculada al proyecto Anticipando la Crecida del DCAO y CIMA; y 2) el análisis multidimensional de la inundación que sufrió el barrio el Corchito durante las intensas lluvias entre el 16 y 18 de mayo de 2025.

2) METODOLOGÍA

Se aplicó una metodología de coproducción de conocimiento para iniciar el proceso de implementación de un sistema de alerta temprana comunitario. Para esto se diseñó un encuentro que propuso pensar de manera colectiva las inundaciones en el barrio El Corchito. El encuentro realizado el 9 de mayo del 2025 se dividió en dos partes. La primera parte consistió en un mapeo comunitario de inundaciones, identificando viviendas y espacios públicos afectados, así como también como es el ingreso y escurrimiento del agua durante los eventos de precipitación. En la segunda parte se trabajó sobre el monitoreo y el pronóstico del tiempo, en el que se planteó la instalación de dos pluviómetros operados por los vecinos. La ejecución de la actividad se realizó conjuntamente con la Dirección de Gestión Integral del Riesgo de Desastres (DGIRD) de la Subsecretaría de Cambio Climático de Lomas de Zamora.

El análisis multidimensional de la inundación en el barrio El Corchito durante las intensas tormentas entre el 16 y 18 de mayo de 2025 se realizó analizando información hidrometeorológica de diferentes fuentes oficiales y no oficiales en conjunto con el personal de DGIRD.

3) RESULTADOS

El mapa comunitario de inundaciones realizado conjuntamente con los vecinos del barrio se presenta en la Figura 2. Se observa que todas las casas a orillas de ambos lados del arroyo se ven afectadas (barrio “El Corchito” lado oeste y “El Bajo” lado este). La calle Bruno Tavano fue identificada como límite verde (sin inundaciones) dentro del barrio. Dentro de la localidad Lamadrid, diez cuadras desde Camino de la Ribera Sur de la calle Isaac Newton fueron marcadas como zona inundable.

Se pudo generar un espacio de encuentro y reflexión entre los vecinos y el personal de la DGIRD, en el cual los vecinos compartieron cómo viven las inundaciones, cuáles creen que son las razones por las que esto sucede, recalcando que la basura es una gran problemática que se suma a las precipitaciones y sudestada, y cuáles son los efectos que tienen las inundaciones en su vida.

Los pluviómetros comunitarios de Barrio el Corchito midieron en promedio, un acumulado de 144 mm de lluvia entre el 16, 17 y 18 de mayo de 2025. Esto provocó que el Arroyo del Rey alcanzara un máximo de 2,66 metros generando inundaciones en calles y viviendas aledañas en la zona. Además el Río Matanza superó los 3,00 metros entre las 6 de la mañana del 16/5 y el 17/5 a las 18hs (Figura 3) por lo que se requirió el cierre de compuertas. La DGIRD retransmitió las alertas meteorológicas del SMN antes y durante el evento y montó un esquema de guardias y recorridas por zonas afectadas de diferentes localidades del Partido de Lomas de Zamora.



Figura 1: Imagen panorámica Estación de Bombeo Arroyo del Rey. 1) Compuertas. 2) Bombas. 3) Mangas que retienen basura

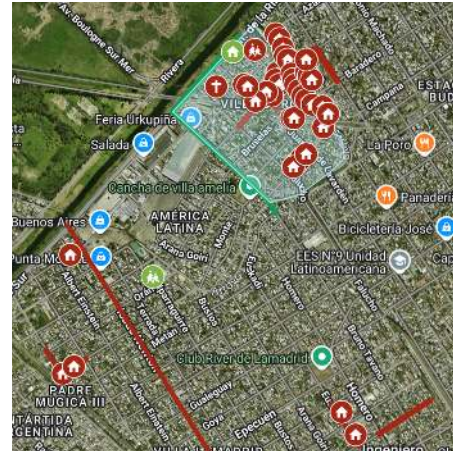


Figura 2: Mapa del barrio "El Corchito". Rojo: viviendas y calles inundables. Verde: viviendas y calles no afectadas.



Figura 3: Altura del río Matanza (datos de la estación de Bombeo del arroyo del Rey).

4) CONCLUSIONES

La coproducción de conocimiento entre los vecinos del barrio, la comunidad universitaria y la DGIRD, a través del mapeo colectivo y la instalación de pluviómetros comunitarios, permitió subir el nivel de conciencia sobre la necesidad de monitorear lluvia localmente y estar atentos a información oficial sobre alertas y pronósticos. La activa participación de las personas que asistieron al taller, permitió generar un espacio de diálogo continuo entre los vecinos y el municipio, en el que se compartieron las consecuencias de los eventos de inundaciones y se visibilizaron problemáticas existentes, como la acumulación de residuos. Las personas que operan los pluviómetros fueron incorporadas a un grupo de whatsapp de la DGIRD donde se reportan lluvias diarias y se comunican alertas oficiales. Los vecinos comprendieron su importancia para establecer umbrales de precipitación que permitan anticipar situaciones de riesgo. Este encuentro demostró la importancia de combinar conocimiento científico y comunitario para construir un sistema de alerta temprana comunitario.

5) REFERENCIAS

ACUMAR. 2022. [Características de la Cuenca Matanza Riachuelo](#).

IPCC. 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

UNA REFLEXIÓN SOBRE LA EXPERIENCIA DE YESS EN EL FORTALECIMIENTO DE CAPACIDADES

Valentina Rabanal¹, Rodrigo Rudge Ramos Ribeiro², Luis Eduardo Muñoz³
valenrabanal@gmail.com. Autor correspondiente.

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Buenos Aires, Argentina

² Fundação Getulio Vargas (FGV), São Paulo, Brasil

³ Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), CONICET-UBA, Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: Capacity Building, Early Career Researchers, colaboración internacional

1) INTRODUCCIÓN

El fortalecimiento de capacidades (*capacity building*, en inglés) es una estrategia clave para una ciencia más equitativa, especialmente en un contexto global y entre investigadores en etapa temprana de su carrera científica. Este concepto va más allá de la adquisición de conocimientos técnico-científicos; implica el desarrollo de habilidades organizativas, comunicativas, estratégicas y colaborativas que permitan a los individuos y comunidades científicas participar activamente en la generación, aplicación y gobernanza del conocimiento. En este contexto, invertir en capacidades humanas y organizativas permite mejorar la calidad de la investigación y fomentar una ciencia más inclusiva, interdisciplinaria y conectada con las necesidades sociales (Pearson & Pelling, 2015; UNESCO, 2015).

La formación de investigadores capaces de colaborar en redes internacionales, interpretar fenómenos interdisciplinarios y cocrear soluciones junto a distintos actores sociales es fundamental para enfrentar problemáticas como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad o la gestión del riesgo de desastres (WCRP JSC, 2019). En este contexto, la comunidad *Young Earth System Scientists* (YESS) es un ejemplo de una red global que conecta e impulsa la integración y desarrollo profesional de jóvenes investigadores de las ciencias del sistema terrestre. Con más de 2500 miembros en más de 120 países, YESS promueve el trabajo colaborativo, el liderazgo participativo y la formación continua. La red, enfocada en jóvenes investigadores y profesionales (en inglés, *Early Career Researchers*), opera en forma virtual, lo que permite la participación activa de personas de todo el mundo, superando barreras geográficas y logísticas.

Este trabajo tiene como objetivo presentar una reflexión sobre las principales actividades de *capacity building* impulsadas por YESS entre 2020 y 2024, identificando limitaciones y oportunidades, con el fin de aportar a la discusión sobre el rol de las redes científicas juveniles en la transformación del sistema científico global. Es un ejemplo colaborativo de los tres autores, miembros activos de YESS, donde las reflexiones del tema no necesariamente representan la opinión de la totalidad de los integrantes de la comunidad.

2) CONTRIBUCIÓN AL FORTALECIMIENTO DE CAPACIDADES

A partir de un análisis cualitativo de las acciones desarrolladas por YESS desde 2020, se identificaron tres ejes centrales de contribución al fortalecimiento de capacidades en la comunidad científica joven: liderazgo colaborativo, comunicación científica y libre acceso al conocimiento, e integración en redes internacionales.

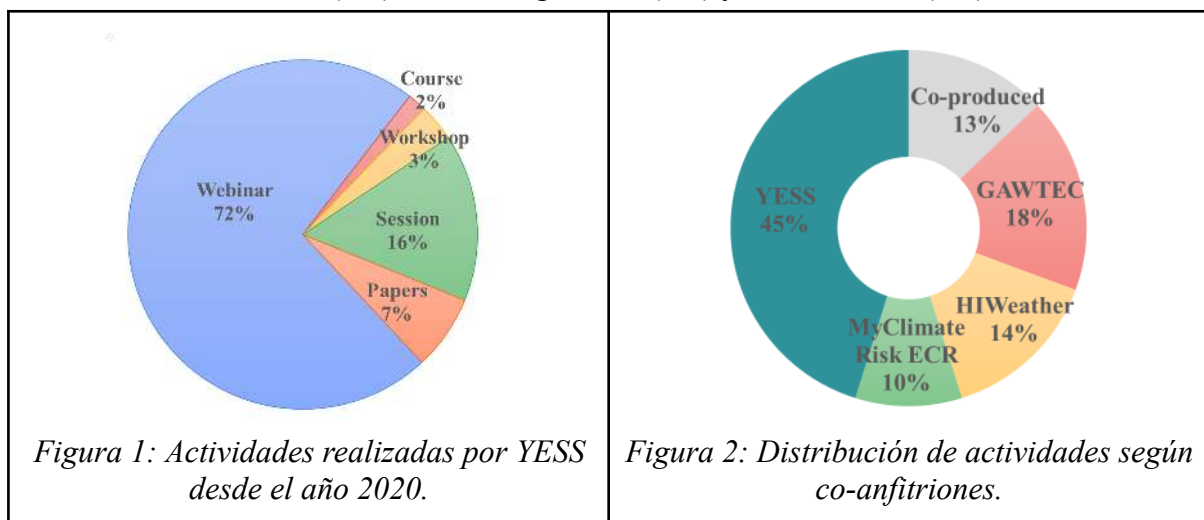
2.1. Liderazgo colaborativo

Todos los meses YESS organiza encuentros virtuales de planificación y estrategia que representan un espacio clave para el desarrollo de habilidades de gestión, toma de decisiones

y trabajo en equipo. En estas reuniones, donde hay papeles rotativos de liderazgo, se comparten informes de grupos de trabajo, se discuten iniciativas futuras y se abordan aspectos estratégicos internos, lo que permite a los miembros adquirir experiencia en gobernanza y gestión científica de manera horizontal. También facilita la puesta en común de las acciones que se desarrollan de forma regional, una separación que facilita la logística y el desarrollo de eventos que consideren las necesidades propias de cada región. La participación activa en estos espacios prepara a los jóvenes investigadores para asumir roles de liderazgo en escenarios internacionales multiculturales.

2.2. Comunicación científica y acceso al conocimiento

Desde 2020, la comunidad YESS ha desarrollado al menos 60 actividades orientadas a fortalecer las capacidades de jóvenes investigadores. Las Figuras 1 y 2 presentan estas actividades y su distribución según el tipo de colaboración institucional. Se observa que el 72% de las actividades realizadas por YESS en los últimos años corresponden a seminarios virtuales (webinars) que buscan promover la divulgación de información científica en desarrollo, compartir herramientas metodológicas, fomentar la discusión interdisciplinaria y como adquirir habilidades de oratoria. Estas actividades permiten superar barreras de acceso al conocimiento, especialmente para regiones con menor infraestructura científica, y fortalecen la capacidad de los jóvenes investigadores para comunicar sus hallazgos a públicos diversos. Se observa en la Figura 1 que existen también otras actividades en menor porcentaje como el desarrollo de sesiones científicas en congresos internacionales (16%), elaboración colaborativa de artículos (7%), talleres regionales (3%) y cursos online (2%).



Cabe mencionar que, aunque los artículos científicos representan un porcentaje bajo, su relevancia no debe subestimarse. La creación de publicaciones académicas colaborativas entre miembros de YESS y otras redes de jóvenes es un proceso complejo que requiere coordinación, revisión continua y mucho tiempo desde la idea inicial hasta la publicación. En este sentido, la publicación de cuatro artículos científicos constituye un logro significativo (Díaz et al., 2025; Testani et al., 2025; Moreno-Ibáñez et al., 2024; Jain et al., 2022).

2.3. Integración en redes internacionales

Como se puede observar en la Figura 2, el 55% de las actividades de YESS fueron desarrolladas en colaboración con organizaciones y programas científicos internacionales como High Impact Weather (HIWeather), Global Atmosphere Watch Training & Education Centre (GAWTEC) y My Climate Risk, entre otros. Estas alianzas permiten a los jóvenes investigadores participar en redes de alto impacto, acceder a formación especializada y desarrollar competencias en contextos interdisciplinarios y multiculturales. También se

destaca aquí la creación de un grupo de revisión de informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), promoviendo la participación en documentos clave para la toma de decisiones climáticas.

Esta diversidad de actividades refleja el enfoque amplio e inclusivo de YESS y sus colaboraciones con grupos de alta relevancia internacional que promueven la formación e integración de investigadores en actividades de impacto. Además, estas interacciones impulsan el intercambio de conocimientos y la discusión de temas relacionados al sistema terrestre frente a los desafíos actuales. La virtualidad para YESS ha sido aprovechada como herramienta para ampliar la participación y reducir las desigualdades geográficas en el acceso a oportunidades científicas. La diversidad de actividades reflejan el enfoque amplio de YESS.

3) CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El caso de YESS permite visibilizar el potencial de las redes científicas juveniles como agentes de cambio dentro del sistema científico global. A través de iniciativas de bajo costo y alto impacto, redes como YESS pueden fomentar el desarrollo de capacidades clave para una nueva generación de científicos más comprometida con los desafíos sociales y ambientales del siglo. Para potenciar este rol, se destacan dos aspectos fundamentales:

- a) Consolidar mecanismos de financiamiento que aseguren tanto la sostenibilidad de actividades virtuales, como el desarrollo de eventos presenciales, cruciales para fortalecer vínculos profesionales y construir comunidades científicas que motiven a mantenerse en la comunidad científica para el desarrollo de más y mejores investigaciones.
- b) Impulsar procesos de mentoría intergeneracional y co-producción de conocimiento, integrando jóvenes investigadores con científicos consolidados y actores sociales para abordar desafíos complejos de forma más efectiva.

En definitiva, el *capacity building* debe entenderse como un proceso dinámico, colectivo y contextualizado. Redes como YESS contribuyen a democratizar la ciencia, no solo ampliando el acceso al conocimiento, sino también generando nuevas formas de producirlo y gobernarlo desde una perspectiva inclusiva, colaborativa y transformadora.

REFERENCIAS

- Díaz, L. B., Gulizia, C., Jain, S., Langendijk, G. S., Palanisamy, H., Rabanal, V., ... Siame, G. (2025). Connecting climate science and society: Reflections from early and mid-career researchers at the World Climate Research Programme Open Science Conference 2023. *Frontiers in Climate*, 6, 1501216. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1501216>
- Jain, S., Mindlin, J., Koren, G., Gulizia, C., Steadman, C., Langendijk, G. S., Osman, M., Abid, M. A., Rao, Y., & Rabanal, V. (2022). Are We at Risk of Losing the Current Generation of Climate Researchers to Data Science? *AGU Advances*, 3(4), e2022AV000676. <https://doi.org/10.1029/2022AV000676>
- Moreno-Ibáñez, M., Casado, M., Gremion, G., Rabanal, V., ... Vural, D. (2024). Engagement of early career researchers in collaborative assessments of IPCC reports: Achievements and insights. *Frontiers in Climate*, 6, 1395040. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1395040>
- Pearson, L., & Pelling, M. (2015). The UN Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030: Negotiation Process and Prospects for Science and Practice. *Journal of Extreme Events*, 02(01), 1571001. <https://doi.org/10.1142/S2345737615710013>
- Testani, N., Cappelletti, L. M., Díaz, L. B., Prudente, C., Rabanal, ... Tangarife-Escobar, A. (2025). Balancing Earth science careers in an unequal world. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 22. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01964-w>
- UNESCO. (2015). *UNESCO science report: Towards 2030* (F. Schlegel, Ed.). UNESCO Publ.
- WCRP Joint Scientific Committee (JSC). (2019). *World Climate Research Programme Strategic Plan 2019–2028* [WCRP Publication]

SOBRE EL USO DE LOS SENSORES REMOTOS PARA EL MONITOREO Y NOWCASTING DE LA PRECIPITACIÓN EN EL MARCO DEL PROYECTO PREVENIR

Luciano Vidal¹, Maite Cancelada^{1,2}, Daichi Kitahara³, Martin Rugna¹, Paul Fernández Chomik⁴, Maria Paula Hobouchian¹, Gonzalo Diaz¹, Sergio González^{1,2}, Ezequiel Geslin², Aldana Arruti¹, Leandro Axel Aguirre⁴, Juan Ruiz², Pablo Negri⁴, Manuel Pulido⁵, Paola Salio², Tomoo Ushio³
lvidal@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Argentina

²Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA-CONICET), Argentina

³Osaka University/Keio University, Japón

⁴Instituto de Investigación en Ciencias de la Computación (ICC-CONICET), Argentina

⁵Universidad Nacional del Nordeste (UNNE-CONICET), Argentina

Palabras clave: precipitación, sensores remotos, PREVENIR.

1) INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la precipitación en tiempo real y la predicción a corto plazo con la mayor frecuencia temporal y resolución espacial posibles son esenciales para anticiparse a las inundaciones asociadas a episodios de precipitaciones intensas. Luego, el Proyecto PREVENIR, una iniciativa de colaboración científico-técnica entre Argentina y Japón, aborda el reto de la alerta temprana de inundaciones urbanas repentinas desde varias perspectivas complementarias. Una de ellas es mejorar las estimaciones cuantitativas de la precipitación (QPE, por sus siglas en inglés) multisensor utilizando métodos tradicionales y la potencia del aprendizaje automático, así como su pronóstico a muy corto plazo (nowcasting). A continuación, estos productos se usarán para el monitoreo y como entrada de modelos hidrológicos. El objetivo del presente trabajo es mostrar el estado actual de estos desarrollos.

2) OBSERVACIONES PLUVIOMÉTRICAS

Las mediciones *in situ* de la precipitación son necesarias para los procesos de calibración y validación de las estimaciones de precipitación mediante sensores remotos. Contar con redes densas y de calidad es clave. Para ello, el SMN lleva adelante un proyecto de integración de redes de terceros con el objetivo de ampliar su red de observación de superficie (Díaz y otros, 2021). En el marco de PREVENIR se están integrando nuevas redes pluviométricas como el INA (Córdoba y Buenos Aires) o APRHi (Córdoba).

3) RADARES METEOROLÓGICOS

3.1 CONTROL DE CALIDAD DE DATOS DE RADAR

Para poder utilizar los datos de radares meteorológicos en aplicaciones cuantitativas como la QPE, es necesario someter a los mismos a un riguroso control de calidad. Luego, se desarrolló un sistema que permite eliminar o minimizar un gran número de fuentes de error en los datos como ecos no meteorológicos (interferencias, terreno, insectos, etc) o correcciones de atenuación de las variables de interés. En la figura 1 se muestran algunos de los productos que conforman este sistema.

3.2 PRODUCTO RQPE

El producto utiliza la fase diferencial específica (KDP), robusta frente a errores de calibración, bloqueo del haz y atenuación en lluvias intensas (Kitahara et al., 2023; Cancelada et al., 2024), un problema común en radares de banda C. El KDP se estimó ajustando la fase

de propagación diferencial con una función spline monotónicamente creciente (Kitahara et al., 2023), y su relación con la tasa de precipitación se calibró usando datos de disdrómetros del experimento RELAMPAGO/CACTI (Nesbitt et al., 2021). Estas estimaciones se acumulan en ventanas temporales según necesidades (ej. modelos hidrológicos). Adicionalmente se está desarrollando un modelo basado en aprendizaje automático para la estimación de precipitación, el cual pueda ser entrenado con observaciones pluviométricas.

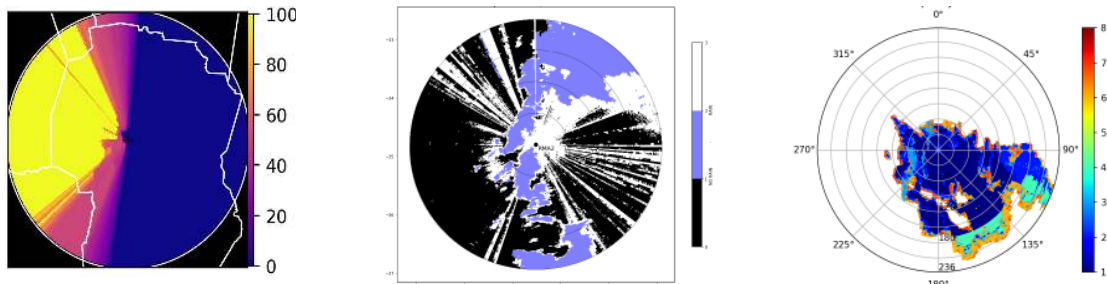


Figura 1: Izq: Mapa de bloqueo por topografía para el radar RMA1-Córdoba. Cen: Máscara de lluvia/no lluvia para el radar RMA2-Ezeiza. Der: Índice de calidad de datos.

4) SATÉLITES METEOROLÓGICOS

4.1 PRODUCTO SQPE-OBS-1h

El producto desarrollado toma de base la estimación IMERG (Huffman et al., 2020) y le aplica una corrección histórica a partir de la técnica conocida como PDF-matching que utiliza las estaciones meteorológicas de mejor calidad de la red del SMN y de países limítrofes, seguida de una corrección diaria a partir de la interpolación del Bias local que suma el valor agregado de todas las estaciones meteorológicas disponibles en escala diaria (Hobouchian y otros, 2021).

4.2 PRODUCTO GSMaP-GAUGE-AR

Con el objetivo de contar con un producto horario satelital, se tomó como estimación base el producto GSMaP-Now (Kubota et al., 2007) que se ajusta con las EMAs disponibles con un PDF-matching de los últimos 15 o 30 días. Luego se aplica una interpolación del bias con una técnica modificada de IDW que usa el sistema MRMS de la NOAA.

4.3 PRODUCTO G16-RRQPE-ML

Se desarrolló un nuevo producto que propone utilizar un modelo de redes neuronales convolucionales con una arquitectura de tipo U-Net, a partir de datos multisensor provistos por el satélite GOES-16. En particular, se combina la temperatura de brillo IR ($10.3\mu\text{m}$) del sensor ABI y la actividad eléctrica del sensor GLM. El entrenamiento del modelo se realiza utilizando datos de precipitación estimada por el radar meteorológico a bordo del satélite GPM.

5) NOWCASTING DE LA PRECIPITACIÓN

Un sistema de pronóstico a muy corto plazo (*nowcasting*) basado en la extrapolación de datos QPE resulta fundamental para estimar la evolución del campo de precipitación en las próximas dos horas. En el marco del proyecto se desarrollaron e implementaron dos sistemas modernos: uno determinístico y otro probabilístico que incluye la asimilación de los vectores de movimiento. En paralelo, se han evaluado diferentes modelos de aprendizaje automático/machine learning basados en arquitecturas LSTM, U-Net y Gru con el mismo propósito utilizando lluvia simulada numéricamente.

6) CONCLUSIONES

La diferentes herramientas para mejorar las estimaciones de precipitación en base a sensores

remotos y su pronóstico a muy corto plazo desarrolladas en el marco del Proyecto PREVENIR representan un avance sustantivo para la región y en particular para mejorar los sistemas de alerta temprana de eventos meteorológicos de alto impacto como las precipitaciones intensas en cortos periodos de tiempo.

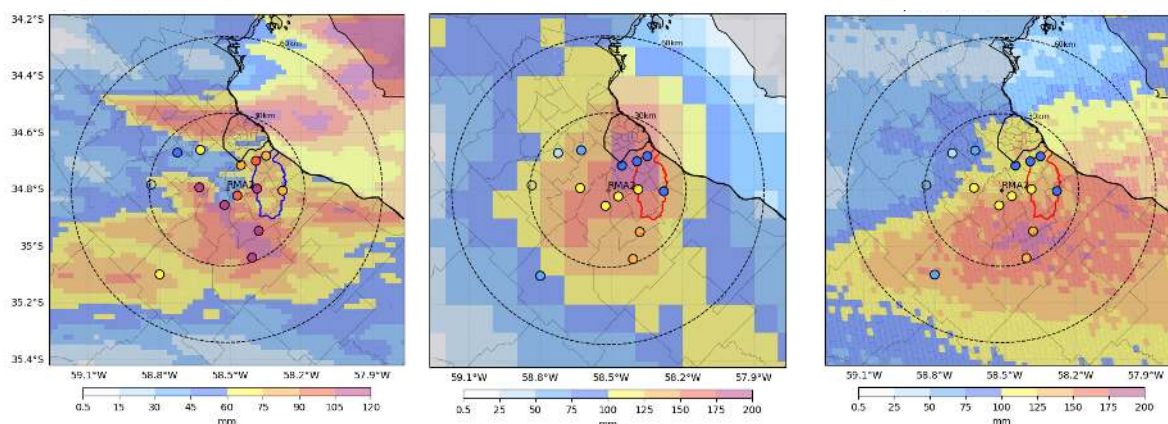


Figura 2: Izq: Precipitación acumulada mediante el radar RMA2-Ezeiza (sombreado) para el evento del 19 y 20 de marzo de 2024. Los puntos con color corresponden a pluviómetros. Cen: Idem izq. pero con la estimación satellite SQPE-OBS-1h. Der: Idem izq. pero con la estimación GOES-16 RRQPE. En contorno azul se delimita la Cuenca Sarandí - Santo Domingo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha realizado en el marco del Proyecto PREVENIR (prevenir.smn.gob.ar).

REFERENCIAS

- Cancelada, M. and Coauthors, 2024:** Development of an operational system for quantitative precipitation estimation from c-band polarimetric radars in the framework of the PREVENIR project in Argentina. 12th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2024), 9-13 september, Roma, Italy.
- Díaz, G., and Coauthors, 2021:** Expansión de la red de referencia empleando los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas automáticas de terceros. Nota Técnica SMN 2021-90. <https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/1694>
- Hobouchian, M. P., and Coauthors, 2021:** Ajuste de la estimación de precipitación satelital IMERG con observaciones pluviométricas en Argentina. Nota Técnica SMN 2021-105.
- Huffman, G.J., and Coauthors, 2020:** Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG). Satellite Precipitation Measurement. Advances in Global Change Research, vol. 67, Springer.
- Kitahara, D., and Coauthors, 2023:** KDP Estimation Based on Spline Smoothing with the Self-Consistency Principle. 40th Conference on Radar Meteorology, 28 August–01 September, Minneapolis, USA.
- Kubota, T., and Coauthors, 2007:** Global precipitation map using satellite-borne microwave radiometers by the GSMaP project: Production and validation. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 45, 2259–2275. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.895337>
- Nesbitt, S. W., and Coauthors, 2021:** A Storm Safari in Subtropical South America: Proyecto RELAMPAGO. Bull. Amer. Meteor. Soc., 102, E1621–E1644, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0029.1>.

INFERENCIA DE LOS CAMBIOS DE MASA DE LOS GLACIARES DESCUBIERTOS A TRAVÉS DE LA RECONSTRUCCIÓN SATELITAL DE SUS TEMPERATURAS: APORTES PARA EL BALANCE HÍDRICO REGIONAL DE MENDOZA

Tomás Barrientos^{1,2}, Andrés Lo Vecchio^{1,2}, Juan A. Rivera¹, Claudia Albiol², Ricardo Villalba¹, Verónica Blazek²

tbarrientos@mendoza-conicet.gob.ar

¹ Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA, CCT Mendoza / CONICET)

² Laboratorio de Geografía Física y Geotecnologías (FFyL-UNCUYO)

Palabras clave: Temperatura de Superficie del Hielo, Andes Centrales, Balance de Masa Glaciar

1) INTRODUCCIÓN

En la provincia de Mendoza la nieve y los glaciares son componentes cruciales del régimen hidrológico de los ríos andinos. Aportan la totalidad del agua dulce para el sostén de los ecosistemas y las actividades socioeconómicas. Desde el año 2010 se observa una marcada y persistente disminución en la acumulación de nieve en los Andes de Mendoza, lo cual resulta en una reducción de los caudales de los ríos andinos y una pérdida de masa glaciar. Los glaciares cumplen un rol relevante durante años secos, dado que aportan un porcentaje significativo de caudal al río Mendoza (Toum et al., 2025). No obstante, a pesar de su relevancia, solo 2 glaciares descubiertos poseen mediciones *in situ* de balance de masa. Frente a esta limitación, este estudio propone una aproximación simplificada y de bajo costo a la estimación del Balance de Masa Glaciar (BMG).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

En este trabajo se explora la relación empírica entre el BMG de glaciares descubiertos mendocinos (reportado en estudios previos), y la tendencia mensual/trimestral/anual de la temperatura superficial de esos glaciares, calculada en este trabajo. Los registros de BMG, en unidades de metros de agua equivalente (*mwe*, por sus siglas en inglés) por año, usados para la calibración del modelo corresponden a los publicados por Ferri et al. (2020) para el período 2001-2017. Por su parte, las tendencias de Temperatura de Superficie del Hielo (TSH) para el mismo período se estimaron mediante el uso combinado de los productos térmicos de MODIS (MOD21A2 y MYD21A2), diurno y nocturno, con resolución semanal.

Previo a la calibración del modelo, se seleccionaron glaciares descubiertos representativos en función de tres criterios simultáneos: 1) área glaciar, 2) elevación mínima y 3) ratio de señal/ruido (SNR) de los registros de BMG. Respecto del área glaciar, se consideraron todos aquellos Glaciares Descubiertos (GD) con una superficie mayor a 1 km² al momento del mapeo (2009). Este umbral fue seleccionado a partir de la resolución espacial (1 km²) de los productos térmicos usados. Es decir, como mínimo la temperatura superficial del glaciar debe estar estimada por un píxel o más. De un total de 531 GD candidatos del Inventario Nacional de Glaciares (Zalazar et al., 2018) cumplen el filtro 120 cuerpos de hielo descubiertos. Complementariamente, y con relación al filtro de elevación mínima, solo se consideraron aquellos GD con una elevación mínima superior a 4500 m al momento del mapeo (2009). Este umbral se eligió considerando que el área ocupada por glaciares descubiertos por encima de los 4500 m se ha reducido menos del 10% durante el periodo de calibración. Dicho criterio

asegura que la posición de los frentes de los glaciares considerados haya sido estable entre el tiempo inicial (2001) y el tiempo final (2017) de este estudio. Este aspecto es crucial ya que, si consideramos glaciares que han cambiado drásticamente su posición, el píxel que en el tiempo inicial habría mostrado hielo, en el tiempo final podría estar representando depósitos glaciares, afloramientos rocosos u otra cubierta que no es hielo. En efecto, la estimación de la temperatura y las tendencias sería espuria. Posterior a ese filtro simultáneo quedaron 16 glaciares. Por último, se estableció el tercer criterio (SNR) con un umbral > 1 , es decir, solo se usaron aquellos glaciares donde el error de estimación de BMG fue menor a la magnitud reportada. El filtrado arrojó un total de 7 glaciares que cumplieron con los tres criterios de forma simultánea, distribuidos entre la cuenca del río Mendoza y Tunuyán. A continuación, se exploraron diferentes ajustes del modelo mediante regresión lineal por mínimos cuadrados ($p\text{-value} < 0.05$).

3) RESULTADOS

Se obtuvo una relación inversa entre el BMG y la tendencia de TSH de verano ($R^2 = 0,8362$), la cual es estadísticamente significativa ($p\text{-value} = 0.0039$), con un error cuadrático medio (RMSE) de 0.0349 mwe/año.

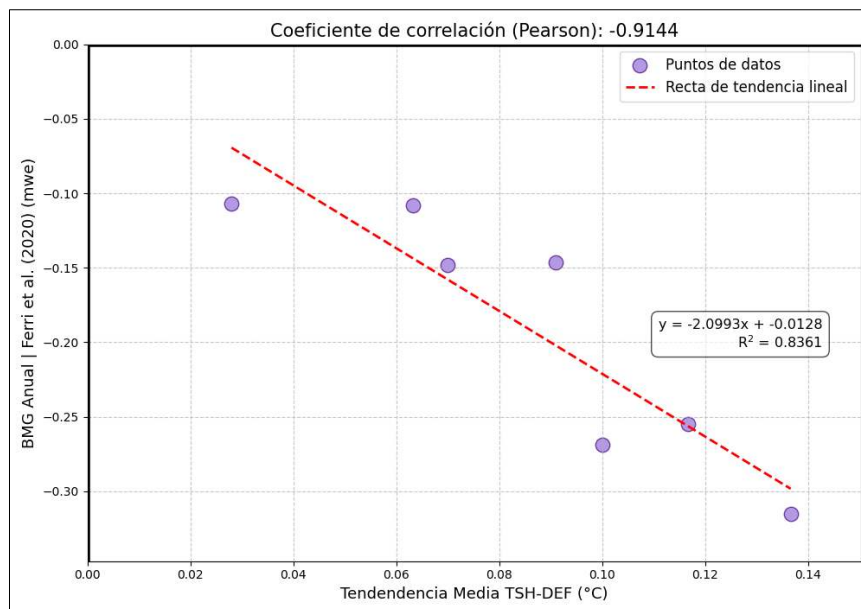


Figura 1: Correlación entre BMG Anual (estimado por Ferri et al., 2020) y la tendencia de la TSH de verano.

Por ende, a partir de la figura 1, el modelo de Balance de Masa Glaciar (BMG) resultante está dado por Ecuación 1:

$$BMG = (-2.0993) * Tend Media TSH-DEF + (-0.0128) \quad (1)$$

- Donde *BMG* es Balance de Masa Glaciar anual; y *Tend Media TSH-DEF* es la tendencia promedio de la TSH del trimestre cálido Diciembre-Enero-Febrero.

Por último, la figura 2 compara los valores de BMG de los GD estimados por este estudio a escala de subcuenca del río Tupungato, en el período 2001-2017 en relación con los estudios de referencia (Ferri et al., 2020; Toum et al., 2025).

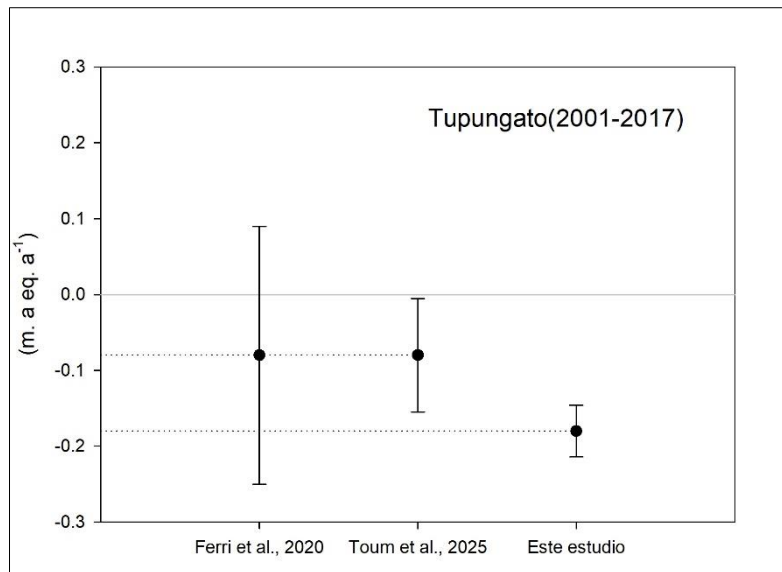


Figura 2: Comparación del valor de BMG estimado por este estudio a partir de los estudios de referencia (Ferri et al., 2020; Tourn et al., 2025), para la subcuenca del río Tupungato.

4) CONCLUSIONES

Los resultados evidencian la factibilidad de construir modelos de balance de masa glaciar a partir del análisis de datos satelitales de temperaturas superficiales como una alternativa de bajo costo frente a las complejas mediciones *in situ*. Además, el significativo ajuste del modelo ($R^2=0.84$) con las tendencias térmicas del trimestre estival (DEF) otorga robustez conceptual considerando que corresponde al periodo de mayor ablación dentro del ciclo anual, es decir, estación de mayor calentamiento y, por ende, deshielo glaciar/nival. Finalmente, la validación preliminar señala que se coincide en valores negativos de BMG de los trabajos de referencia. Asimismo, se encuentran dentro de los rangos de error difiriendo ~ 0.1 m. a eq. a⁻¹ (metros de agua equivalente por año).

5) AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue desarrollada y financiada en el contexto de los Proyectos Institucionales Orientados 2023 (PIO) de la Secretaría de Investigación, Internacionales y Posgrado (SIIP) de la Universidad Nacional de Cuyo (UNCUYO), mediante Resolución N° 552/2024.

6) REFERENCIAS

Ferri, L., Dussaillant, I., Zalazar, L., Masiokas, M. H., Ruiz, L., Pitte, P., Gargantini, H., Castro, M., Berthier, E. y Villalba, R., 2020: Ice Mass Loss in the Central Andes of Argentina Between 2000 and 2018 Derived From a New Glacier Inventory and Satellite Stereo-Imagery, *Frontiers in Earth Science*, 8.

Hulley, G.; Freepartner, R.; Malakar, N. y Sarkar, S., 2016: Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) land surface temperature and emissivity product (MxD21) user guide, NASA, 26.

Tourn, E.; Villalba, R. y Masiokas, M., 2025: Snow and Glacier Contributions to the Mendoza River in the Semiarid Central Andes of Argentina, *Hydrological Processes*, 39, 4.

Zalazar, L.; Ferri, L.; Castro, M.; Gargantini, H.; Giménez, M.; Pitte, P.; Ruiz, L.; Masiokas, M. y Villalba, R., 2018: Glaciares de Argentina: Resultados preliminares del Inventario Nacional de Glaciares, *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 2, 8, 13-22.

REVISIÓN DE UMBRALES PARA LA MEJORA DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

Carolina Cerrudo¹, Marcos Saucedo¹, Milagros Alvarez Imaz¹, Daniela D'Amen¹,
Sebastián Pérez¹, Julián Goñi¹, María Steven¹, Nahuel Spinoso², Daniel Anaya²
ccerrudo@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

² Dirección Provincial de Riesgos y Emergencias de la Provincia de Buenos Aires (DPRyE)

Palabras clave: alertas, umbrales meteorológicos, impactos.

1) INTRODUCCIÓN

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) emite alertas gráficas y en código de colores para los fenómenos meteorológicos que tienen mayor impacto en el país en el marco del Sistema de Alerta Temprana (SAT), desde noviembre del 2020. Uno de los criterios utilizados para la toma de decisión del nivel de alerta son los umbrales meteorológicos, los cuales fueron definidos principalmente en base a la climatología. Sin embargo, en numerosas ocasiones se observa que la intensidad del fenómeno en sí no es suficientemente representativa de los impactos que puede producir en terreno. Por este motivo, es necesario evaluar de forma conjunta los eventos meteorológicos y sus impactos socioambientales asociados. En este sentido, tanto la incorporación de información del impacto de los fenómenos meteorológicos (D'Amen y otros, 2022) como la definición de umbrales de emisión de alerta más adecuados para diferentes regiones del país (Saucedo y otros, 2021), son elementos esenciales para la mejora del SAT. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es desarrollar una propuesta metodológica para el análisis de umbrales meteorológicos en relación con los impactos observados en eventos pasados, a los fines de poder efectuar una revisión y mejora de los umbrales actualmente utilizados en el SAT.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para realizar la revisión de umbrales se seleccionaron tres regiones del país con diferentes características geográficas y demográficas: 1) las cuencas de los arroyos Sarandí y Santo Domingo, ubicadas al sur del conurbano bonaerense; 2) la cuenca del río Suquía, ubicada en la provincia de Córdoba; y 3) las ciudades y alrededores de Neuquén, Comodoro Rivadavia, El Bolsón y Viedma, en Patagonia. El período de análisis abarcó desde diciembre del 2020 hasta agosto 2023, y se consideraron los eventos asociados a precipitación, viento y tormentas, donde estos últimos se desglosaron en sus componentes de precipitación o viento, según los impactos registrados en cada caso.

Se realizó una exhaustiva recopilación de información proveniente de distintas fuentes (**Figura 1**), teniendo como referencia y principal fuente a la “Base de datos de eventos meteorológicos e impactos socio ambientales asociados” (SAMHI por sus siglas en inglés), coproducida entre el CIMA y el SMN (Salio y otros, 2024). Entre las fuentes utilizadas se encuentran los medios de comunicación, redes sociales y la Dirección Provincial de Riesgos y Emergencias de la Provincia de Buenos Aires. Este proceso requirió de la búsqueda de información para completar los datos faltantes, de manera que cada evento tuviera asociado al menos un dato de impacto y uno meteorológico. Los registros de impacto se obtuvieron principalmente de noticias y redes sociales, mientras que para los datos meteorológicos se utilizaron estaciones oficiales del SMN y estaciones automáticas de algunas redes de terceros.



Figura 1: Metodología utilizada para el análisis de umbrales e impactos asociados.

Para la clasificación de los impactos se utilizó la categorización desarrollada para la base SAMHI, así como también se utilizó su estructura para la unificación y estandarización del formato de la información adicional integrada, es decir, que todos los eventos recopilados adicionales fueron integrados a la base SAMHI. Los impactos se clasifican en las siguientes familias, donde cada familia a su vez tiene su propio desglose y codificación: daño a infraestructura de transporte, daño en viviendas (casas y/o edificios con fines habitacionales), impacto a la población y daño a los medios de vida, daño a vehículos, daño a árboles, daño a infraestructura urbana y afectación de servicios esenciales, daño a la actividad agrícola y/o ganadera. Finalmente, para efectuar los primeros análisis en base a la información disponible se realizaron gráficos para relacionar los impactos registrados con diferentes valores de las variables meteorológicas, para cada fenómeno, región de estudio y familia de impacto.

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre los tipos de gráficos realizados para analizar la información se encuentran: 1) Histogramas de frecuencia de reportes de impacto por cada familia, para cada variable y región de estudio, por mes; 2) Frecuencia de valores registrados de la variable por cada familia de impacto, para cada región de estudio (histograma y geolocalización en mapa).

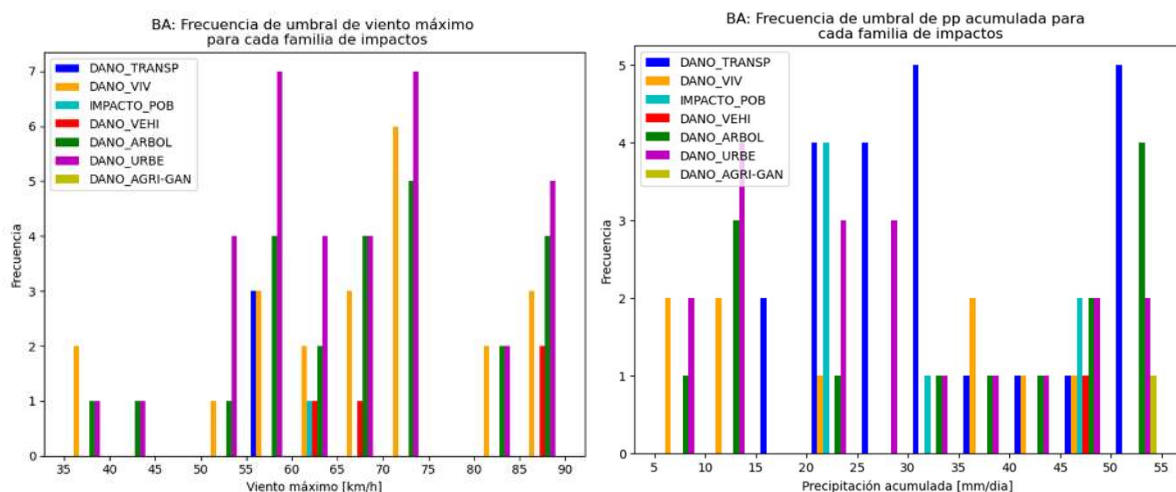
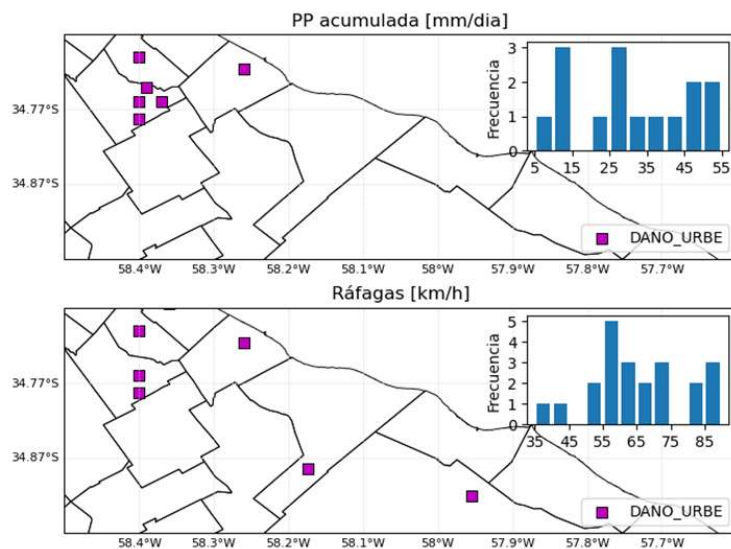


Figura 2: frecuencia de valores de viento máximo para cada familia de impactos (izq), frecuencia de valores de precipitación para cada familia de impactos (der), para SSD.

A modo de ejemplo se muestran algunos resultados preliminares obtenidos para la cuenca de

Sarandí y Santo Domingo (SSD), provincia de Buenos Aires. La **Figura 2** muestra histogramas de frecuencia de valores de viento y precipitación para cada familia de impactos. Para la lluvia, se destacan dos rangos de valores que generan impactos mayormente en el área de transporte: entre 20 y 30 mm/día y a partir de los 50 mm/día. También se observa un máximo relativo de impactos en infraestructura urbana y arbolado con valores entre 10-15 mm/día. Cabe mencionar que se realizó un análisis con los valores de precipitación registrados en una hora disponibles, y para la categoría de daños en la infraestructura urbana se observa una mayor frecuencia de eventos entre 10 y 15 milímetros, aunque lamentablemente se dispone de pocos eventos. De cualquier manera, es importante resaltar que en algunos casos los impactos podrían deberse a lluvias acumuladas en períodos de tiempo más cortos, o bien estar condicionados por la ocurrencia de eventos previos.



La **Figura 3** muestra la ubicación de los eventos que registraron daño en la categoría infraestructura urbana y los histogramas de lluvia y ráfagas de viento para la cuenca Sarandí - Santo Domingo. Se observa un máximo de cantidad de registros de lluvia entre 10 y 15 mm/día y otro entre 25 y 30 mm/día, seguidos de eventos entre 45 y 55 mm/día. En cuanto a los registros de ráfagas, el máximo de ocurrencia se encuentra entre 55 y 60 km/h, seguido de valores que rondan los 65, 75 y 90 km/h.

Figura 3: ubicación geográfica de eventos que registraron daño en infraestructura urbana e histograma de frecuencia de valores asociados a precipitación diaria (mm/día, arriba) y ráfagas de viento (km/h, abajo), para la región de la cuenca SSD.

Cabe destacar que, aunque en la mayoría de los casos la cantidad de registros es reducida, estos resultados preliminares muestran la relevancia de este tipo de estudio para la futura generación de pronósticos basados en impactos y la mejora de los umbrales del SAT. Ampliar la disponibilidad de este tipo de información es uno de los grandes desafíos para poder obtener a futuro resultados más robustos. Se destaca la importancia de tener acceso a la información de impacto asociada a los eventos y su relación con la intensidad de los fenómenos, no sólo para la mejora de los sistemas de alerta temprana y comunicación del riesgo, sino también para la evaluación post evento y verificación de las alertas.

REFERENCIAS

- Daniela D'Amen, D., Cerrudo, C., Sosa, P., 2022:** Planificación y desarrollo de la iniciativa de alertas y avisos basados en impacto en el Servicio Meteorológico Nacional. Congreso Argentino de Meteorología, CONGREGMET XIV, <http://hdl.handle.net/20.500.12160/2448>
- Salio, P., y coautores, 2024:** Towards a South American Severe Weather Reports Database. Bull. Amer. Meteor. Soc., 105, E1204-E1217, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0063.1>
- Saucedo, M., Campetella C., Cejas A., Cerrudo C., Amorin I., Stella J.L., 2021:** Definición de umbrales meteorológicos para el nuevo sistema de alertas del SMN. Nota Técnica SMN 2021-109, <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1723>

EVALUACIÓN DE UNA PERSPECTIVA SEMANAL DESTINADA A LOS SECTORES DE EMERGENCIAS Y ENERGIA

Alejandro Godoy^{1,2}, Carolina Cerrudo¹, Esteban Zuccaro¹, Cam Córdoba¹, Carina Bolzi¹, Paula Romero¹, Florencia Luraschi¹, Florencia Ghatti Paciaroni¹, Laura Chavez¹, Nicolás Mundel¹, Julián Goni¹, Lorena Ferreira¹, Daniela D'Amen¹

agodoy@smn.gob.ar. Autor/a correspondiente.

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP)

Palabras clave: Verificación, Codiseño, Sectores.

1) INTRODUCCIÓN

Las predicciones climáticas subestacionales, en particular los pronósticos en periodos de semanas son relevantes para la toma de decisiones en diferentes sectores y es una herramienta que ayuda a la gestión y planificación de acciones anticipatorias. Un ejemplo es el sector de gestión del riesgo de desastres, que tienen la responsabilidad de monitorear y responder ante las diversas amenazas de origen natural que implican riesgos para la población, los bienes y el ambiente. En el sector energético es fundamental tener información de posibles eventos de altas temperaturas que pudieran afectar a la demanda eléctrica. Por este motivo la información oficial generada por organismos científico-técnicos resulta un elemento central para la toma de decisiones y la planificación de acciones en distintos plazos de anticipación por parte de las instituciones estatales que trabajan en los distintos niveles jurisdiccionales. En particular, resulta útil la provisión de información en todos los plazos de pronósticos que resultan efectivos para la toma de decisiones anticipadas por parte de sus usuarios, tal es el caso de esta perspectiva en la segunda semana de pronóstico.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la herramienta de perspectiva semanal desarrollada por los pronosticadores del SMN y los resultados de la evaluación e identificación de oportunidades de mejora realizadas junto a técnicos que integran el Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil (SINAGIR).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El pronóstico de perspectiva a 2 semanas se realiza una vez por semana y se basa en los pronósticos por ensamble de diferentes centros mundiales y productos propios del SMN. Para definir las áreas con anomalías significativas, se establece un criterio subjetivo para determinar zonas con anomalías cálidas y frías, en todo el Territorio Nacional. Asimismo, para marcar las áreas de anomalía de precipitación acumulada con déficit o superávit. Durante el proceso de desarrollo de la perspectiva, se realizan reuniones con especialistas del SMN para discutir/analizar los resultados de todas las herramientas. El producto final es un consolidado del análisis y se genera en formato georeferenciado con QGIS, disponible para ser consumidos por los usuarios. A futuro, este producto podría ser ingestado en una IDE.

La verificación de la perspectiva a dos semanas se realiza analizando, en las áreas pronosticadas, los datos de las observaciones de todas las estaciones del SMN. La base de datos observada se confeccionó con la información diaria de 110 estaciones (periodo 1981-2010) para realizar promedios semanales de temperatura media y precipitación y obtener la climatología semanal de ambas variables. Si las anomalías cumplen los umbrales establecidos anteriormente se consideran aciertos, falsas alarmas si no cumplen y sorpresas si se dan anomalías de signo contrario al pronosticado. Luego, a través de tablas de contingencia, se

calculan los siguientes índices: BIAS en frecuencia, FAR (False Alarm Rate), POD (Probability of Detection) y TS (Threat Score).

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Verificación del pronóstico de perspectiva

La verificación de la perspectiva se realiza en base a 108 pronósticos confeccionados por los pronosticadores en el periodo enero 2023 hasta mayo 2025. En la Fig. 1 se muestra un ejemplo de un pronóstico de perspectiva a dos semanas en conjunto con las observaciones, donde se pronosticó muy bien el área de un evento de anomalías cálidas y un evento de superávit y déficit de precipitación en la región del Litoral. Sin embargo, subestimó la extensión del evento en el centro del país y los excesos de lluvias en el norte de Buenos Aires, mostrando las limitaciones del producto en un pronóstico a mayor plazo.

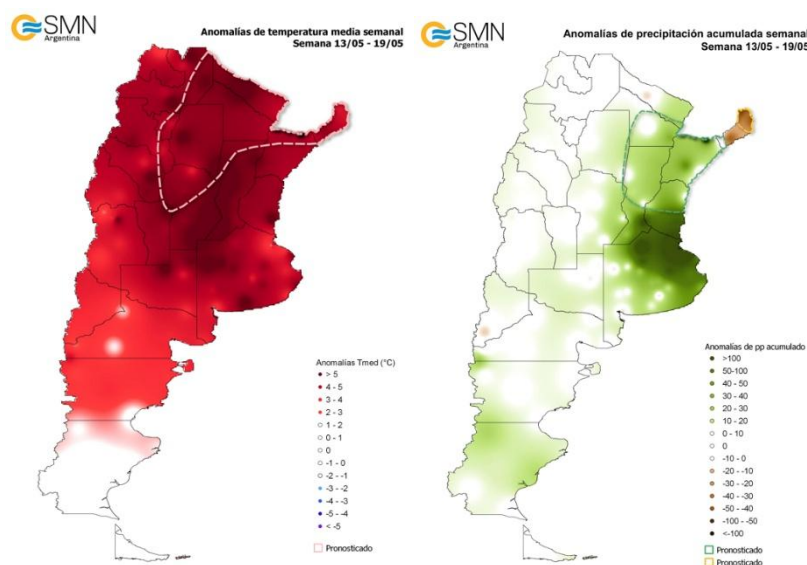


Fig. 1. Gráfico de pronóstico (contorno línea punteada) vs observado (sombreado) para la anomalía de temperatura media y precipitación acumulada semanal del periodo 13/05 al 19/05/2025

En la tabla 1 se muestran los resultados de los índices de verificación de los pronósticos de anomalía de temperatura media y precipitación acumulada semanal. Los resultados muestran que el POD es cercano a 1 para el pronóstico de temperatura media semanal, mientras que para la precipitación acumulada es levemente menor, aunque este último posee un menor FAR que para el pronóstico de temperatura. El TS indica la presencia de falsas alarmas y sorpresas que reducen la habilidad del pronóstico en estas escalas. El desafío es reducir las falsas alarmas y las sorpresas para obtener un producto de mejor calidad.

Tabla 1. Métricas de verificación de pronósticos de perspectiva semanal para la temperatura media y precipitación acumulada semanal.

Métricas	Temperatura media	Precipitación media
BIAS	1.67	1.09
POD	0.94	0.71
FAR	0.43	0.35
TS	0.55	0.51

Evaluación del producto con el usuario y oportunidades de mejora

Con el propósito de relevar información para la mejora del producto, se inició un proceso de prueba junto a usuarios de distintos organismos tales como: personal técnico de la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres de la Secretaría de Protección Civil del Ministerio de Seguridad y Justicia de la provincia de Río Negro, Dirección de Análisis de Riesgo de la Subsecretaría de Gestión del Riesgo y Protección Civil del Ministerio de Seguridad de la Nación, Cruz Roja Argentina, y tomadores de decisión de la Secretaría de Energía y Ministerio de Defensa. En primer lugar, se realizó una reunión de presentación de las características del producto con cada usuario, y luego se procedió a enviar el producto todas las semanas por correo electrónico a los responsables designados por el lapso de tres meses. Durante este período se realizaron distintas encuestas para evaluar la experiencia del usuario con relación al nivel de satisfacción en la visualización y comprensión del producto, el canal de recepción del producto, formato, usos de la información, la pertinencia de los umbrales de anomalías empleados, y la necesidad de información ampliatoria que podrían requerir los usuarios. A través de estas instancias se relevó la información que se muestra en la tabla 2:

Tabla 2. Relevamiento de la información a usuarios

Valoración general del producto	• Positiva. Se destaca lo sintético de la información y su utilidad para la planificación de acciones y la toma de decisiones. • El producto fue incorporado al análisis del riesgo en forma complementaria a los pronósticos de menor escala ya provistos en forma operativa por el SMN.
Comprensión del contenido y escala espacial	• La noción de anomalías no presentó dificultades. • La escala espacial del producto resultó de gran interés para aquellos usuarios que realizan tareas de análisis del riesgo a escala nacional. • Dependiendo del área de incumbencia del usuario podría ser de interés una visualización del producto a menor escala, como la provincial.
Oportunidades de mejora	• Evaluar la posibilidad de incorporar avisos especiales en caso de preverse la probabilidad de eventos extremos. Dar rango de valores. • Interés en otros fenómenos como vientos y nevadas. • Mejorar la visualización en formato vertical para una mejor lectura en teléfonos móviles. • Incorporación de formato shapefile en el envío. Revisión de formato, colores, redacción. Unificar criterios en las distintas emisiones.

Como resultado de la devolución de los usuarios se destaca la oportunidad de mejorar la interpretación del producto, lo que conlleva a una toma de decisión mejor informada. En este sentido, se planea a futuro el desarrollo de un manual de usuario, así como también la realización de talleres para relevar otras necesidades con relación al servicio brindado.

AGRADECIMIENTOS: Se agradece la participación de las distintas áreas del SMN en las distintas etapas de desarrollo del producto.

PROCESO DE COPRODUCCIÓN PARA EL DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DE DATOS EN EL NEXO CLIMA, AMBIENTE Y SALUD

Cerrudo Carolina¹, Herrera Natalia¹, Marincovich Giselle¹, Domínguez Diana¹,
Ferreira Lorena¹, Muñoz Sonia²
ccerrudo@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

² Universidad Nacional de Córdoba

Palabras clave: base de datos, clima, salud.

1) INTRODUCCIÓN

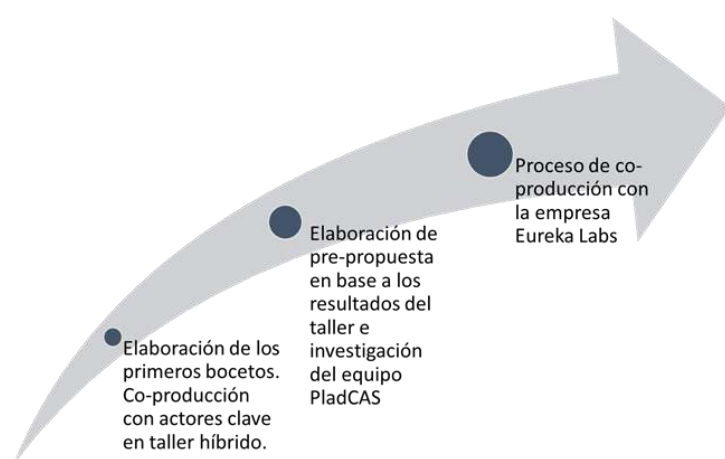
La disponibilidad de bases de datos y sistemas de información que permitan vincular los datos climáticos y ambientales con impactos en la salud de la población es esencial para la comprensión de los efectos del clima en la salud. Frecuentemente la información sobre clima, ambiente y salud se presenta de manera fragmentada, en diferentes escalas temporales y espaciales, lo que dificulta su acceso y utilización. Para acortar esa brecha, este trabajo presenta el proceso de diseño de una plataforma digital que contenga datos de clima, ambiente y salud (CAS), con el objetivo de brindar una herramienta que facilite la gestión de riesgos y planificación sanitaria.

Dicho proceso se enmarca en el proyecto PladCAS (Plataforma de Datos en el nexo Clima, Ambiente y Salud) iniciado en 2022, gracias al apoyo del Consorcio Global de Educación en Clima y Salud (GCCHE, por sus siglas en inglés), el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS). El proyecto tiene como objetivo integrar los datos sobre el clima, el ambiente y la salud mediante un enfoque FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable, por sus siglas en inglés, Heacock y otros 2022). Es decir, que los datos sean localizables, accesibles, interoperables y reutilizables. Las áreas clave priorizadas en esta primera etapa son: salud gestacional, enfermedades crónicas, salud ocupacional, seguridad hídrica y sistemas alimentarios.

El equipo de PladCAS está conformado por profesionales de diversas disciplinas, pertenecientes a instituciones nacionales e internacionales. Cabe destacar el enfoque de producción conjunta interinstitucional, transdisciplinaria, y de participación de actores clave en su ejecución desde el inicio del proyecto, tal como recomienda la Organización Meteorológica Mundial para la mejora en la provisión de servicios climáticos (OMM N° 1129). Entre las actividades llevadas a cabo en el marco del proyecto se encuentran desde el mapeo de actores, relevamientos de datos, fuentes de información, desarrollo de indicadores, hasta el diseño de la plataforma. En particular, este trabajo presenta el proceso llevado a cabo para el diseño de las secciones y estructura preliminar de la plataforma.

2) METODOLOGÍA Y RESULTADOS

El proceso de diseño de la plataforma contempló distintas instancias de trabajo colaborativo y de coproducción tanto del equipo PladCAS de forma interna, como así también a partir de la interacción con actores claves y consultoría externa. La **Figura 1** resume dicho proceso en tres etapas de trabajo, que contemplan desde el intercambio obtenido con actores clave en un taller híbrido, hasta la coproducción con la empresa Eureka Labs a lo largo de sucesivas reuniones virtuales.



En primer lugar, el equipo PladCAS elaboró una propuesta de posible estructura y secciones de la plataforma para ser evaluada en el taller híbrido realizado con actores clave. A partir de los resultados obtenidos en el taller se elaboró una segunda propuesta que fue trabajada internamente por el equipo PladCAS para obtener un primer diseño consensuado, que sería el insumo inicial para la siguiente etapa de consultoría y coproducción con la empresa Eureka Labs.

Figura 1: Etapas de trabajo para el diseño de la plataforma.

Para la elaboración de ese primer diseño también se tuvo en cuenta un relevamiento de distintas plataformas actualmente disponibles como referencia, como por ejemplo las de FIOCRUZ y CLÍMAX. La estructura general propuesta en principio se basó en tres componentes: tablero de indicadores, recursos y un espacio de comunicación. El tablero de indicadores es el que contiene la información en los ejes de clima, ambiente y salud, y una serie de filtros relacionados a características sociales, culturales y demográficas. Cada eje de información se presenta con su correspondiente desglose y se pueden filtrar según nivel de agregación, escala temporal y características poblacionales. La información referente a tutoriales, links de interés, glosario, repositorio de trabajos y fuentes de información estaría en la sección de recursos, mientras que el espacio de comunicación es el que hace referencia a los medios de contacto y publicación de boletines y novedades. También se propone una sección para acceder a otro tipo de información más específica, a partir de la asignación de un usuario y contraseña. Esta propuesta de estructura y contenidos fue acompañada de una propuesta de visualización, que incluye gráficos, tablas, mapas georreferenciados, informes, descarga de los datos y fichas técnicas para cada indicador. De esta manera se constituyó el insumo inicial a partir del cual se comenzó a trabajar en conjunto con la empresa Eureka Labs en el diseño de un Mínimo Producto Viable (MVP por sus siglas en inglés).

La **Figura 2** presenta las distintas etapas de este proceso de trabajo, comenzando por algunas reuniones en donde se acordaron y unificaron criterios, para luego definir una serie de características y funciones claves de la plataforma, así como también las distintas categorías de usuarios. Fue necesario definir los módulos prioritarios para el diseño del MVP, quedando seleccionados los de comunicación y tablero de indicadores.



Figura 2: Etapas del proceso de trabajo con Eureka Labs.

Gran parte del proceso estuvo destinado a la definición del contenido y opciones de visualización del tablero de indicadores, para lo cual fue necesario proveer a la empresa ejemplos de indicadores, su construcción, y bases de datos con distintos formatos. Luego de varios intercambios, e incluyendo la experiencia adquirida de otras plataformas, se definió la estructura tecnológica necesaria para alojar la plataforma, teniendo en cuenta que los datos deben cumplir con los criterios FAIR. Durante la última etapa del proceso se definieron las características y funcionalidades de los entornos de pre-producción y producción, los cuales permiten la carga e importación de bases de datos, metadatos, creación de datos FAIR, procesamientos de la información, cálculo de indicadores y su visualización, etc.



Como resultado del proceso descripto anteriormente, la **Figura 3** muestra un esquema que resume las secciones y funcionalidades que serían diseñados para el MVP en una primera versión de la plataforma. El Panel de indicadores constituye el módulo central de la plataforma. Permite combinar las variables de clima, ambiente, salud y características poblacionales, y representar visualmente los resultados utilizando distintos tipos de visualización y formatos. El módulo de comunicación permite acceder al material y contenido a través de palabras clave, así como también a las fichas de los indicadores, y envío de actualizaciones a través de una suscripción.

Figura 3: Secciones y funcionalidades del MVP.

3) CONCLUSIONES

Este trabajo sienta las bases para el desarrollo de una plataforma de datos en clima, ambiente y salud (CAS), con el objetivo de fortalecer la vinculación entre la información disponible en el nexo CAS y la toma de decisiones en políticas públicas. El proceso de diseño de la plataforma PladCAS demuestra la importancia de la coproducción interinstitucional y transdisciplinaria para el desarrollo de herramientas útiles en la gestión de riesgos climáticos y sanitarios.

REFERENCIAS

Heacock, M. L., Lopez, A. R., Amolegbe, S. M., Carlin, D. J., Henry, H. F., Trottier, B. A., Velasco, M. L., & Suk, W. A., 2022: Enhancing data integration, interoperability, and reuse to address complex and emerging environmental health problems. *Environmental Science & Technology*, 56(12), 7544–7552. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08383>

Organización Meteorológica Mundial N° 1129, 2014: La estrategia de prestación de servicios de la OMM y su plan de aplicación. Ginebra, Suiza.

ESTIMACIÓN DE CAUDAL EN SALTO GRANDE A PARTIR DE SALIDAS CORREGIDAS DE REGCM Y REDES NEURONALES PROFUNDAS

Matilde Ungerovich

mungerovich@adme.com.uy

¹Administración del Mercado Eléctrico (ADME)

Palabras clave: RegCM, Salto Grande, caudal

1) INTRODUCCIÓN

Uruguay ha sido reconocido a nivel internacional por su exitosa transición energética, alcanzando una matriz eléctrica compuesta en

precipitación promedio, 10 días más de lluvia por año, y excesos de hasta 20 mm/día en el percentil 99.

Para abordar estos sesgos se aplicó una corrección estadística basada en cuantiles (*Quantile Mapping*), dividiendo el dominio en cuadrantes de $2^{\circ} \times 2^{\circ}$, como se muestra en la figura 1. En cada subregión se construyó una función empírica de corrección con datos diarios históricos, aplicada luego a cada variable del modelo. Como ejemplo, la figura 2 muestra las curvas de permanencia del modelo y del reanálisis utilizadas para las correcciones de temperatura máxima en las regiones 7-12 de la figura 1. Se observa que en el noreste de la región (zonas 8, 9 y 12) el modelo sobreestima las temperaturas máximas, mientras que en las zonas 7 y 11 el error depende del valor de la temperatura y en el sureste (zona 10) se subestima la temperatura máxima.

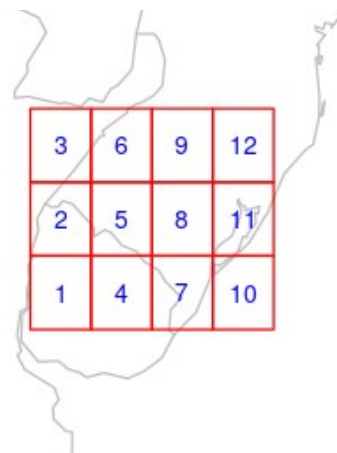


Figura 1- Regiones utilizadas para correcciones de predicciones de RegCM

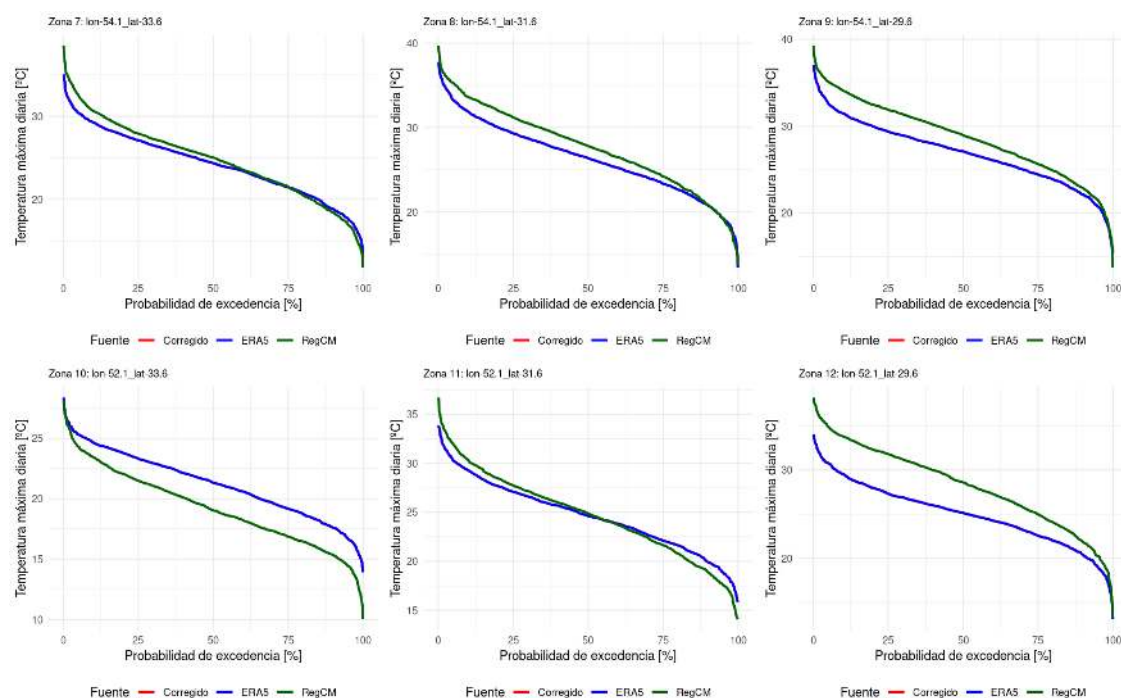


Figura 2- Curvas de permanencia de ERA5 y de RegCM5 para temperatura máxima

2.3 Estimación de caudal con redes neuronales

Para calibrar el modelo de caudal en la represa de Salto Grande se utilizan datos de reanálisis de temperatura máxima y mínima diaria y acumulados de precipitación en las ventanas 0 a 3, 3 a 7, 7 a 13, 13 a 20 y 20 a 30 días en la región del recuadro rojo de la figura 1. Con el fin de reducir el tiempo de cálculo se utilizan promedios espaciales en regiones de 5° x 5°. Se entrena el modelo con datos diarios durante el período 1974-2023.

De esta manera se entrena una red neuronal que combina capas convolucionales temporales, LSTM bidireccional, mecanismos de atención multicausal (MultiHeadAttention), integración de estadísticas globales y el día del año. Se probaron cinco configuraciones distintas, variando la arquitectura y parámetros como *dropout* y número de cabezas de atención.

3. RESULTADOS

Al utilizar datos de ERA5, el modelo alcanza un coeficiente R^2 de 0.75 en la etapa de validación. Actualmente se están generando las predicciones con las salidas corregidas de RegCM5. Aunque aún no se dispone de esos resultados, se espera una disminución en el desempeño. Sin embargo, la estructura general del caudal estacional debería mantenerse razonablemente representada.

4. CONCLUSIONES

La combinación de modelos climáticos regionales, correcciones estadísticas por cuantiles y redes neuronales profundas permite estimar caudales con un alto grado de precisión cuando se utilizan datos confiables como ERA5. Aunque el uso de modelos como RegCM5 implica mayores incertidumbres, esta metodología permite convertir información climática simulada en un producto útil para la planificación energética.

En el contexto de una matriz energética cada vez más basada en renovables, herramientas como esta pueden aportar valor para la operación y gestión eficiente del sistema eléctrico.

REFERENCIAS

Coppola, E., Giorgi, F., Giuliani, G., Pichelli, E., Ciarlo, J. M., Raffaele, F., ... & de Leeuw, J. (2024). The Fifth Generation Regional Climate Modeling System, RegCM5: the first CP European wide simulation and validation over the CORDEX-CORE domains. *Authorea Preprints*.

Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM). (2025). *Uruguay vuelve a registrar niveles récord de fuentes renovables en la matriz de generación eléctrica*. Dirección Nacional de Energía. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/uruguay-vuelve-registrar-niveles-record-fuentes-renovables-matriz-generacion>

REN21. (2024). *Sistemas e Infraestructuras de Energía Renovable – Informe Global de Estado de Sistemas 2024*. Red de Políticas de Energía Renovable para el Siglo XXI. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr2024_SYSTEMS_module.pdf

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

El contenido de este artículo es responsabilidad exclusiva de sus autores y no refleja necesariamente la posición de las instituciones a las que pertenecen.

COMUNICACIÓN E INTERACCIÓN EN REDES SOCIALES: ESTRATEGIAS DEL PROYECTO “PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN CONTRA RAYOS”

M. D. Barranquero^{1,*}, F. I. Solari^{1,2}, S. S. Kseminski^{1,3},
S. I. Sánchez^{1,2}, A. Cesanelli¹, M. F. Barle^{2,4}
^{*}prevencionrayos@fcaglp.unlp.edu.ar

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG), UNLP

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Servicio Meteorológico Nacional (SMN Argentina)

⁴Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF)

Palabras clave: divulgación científica, tormentas, vulnerabilidad.

1) INTRODUCCIÓN

Prevención y Protección contra Rayos es un proyecto de extensión de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) integrado por estudiantes y docentes de esta unidad académica. Nuestro objetivo principal es realizar actividades de difusión y concientización que promuevan la toma de decisiones para la reducción del riesgo antes, durante y después de una tormenta. El interés en abordar esta línea de trabajo surge no solo por ser un área de vacancia respecto de la difusión de estos peligros, sino por el enorme desconocimiento que existe en relación a la temática. Los esfuerzos de prevención ante tormentas realizados por distintos organismos a nivel nacional y local suelen orientarse, casi con exclusividad, a otro tipo de fenómenos, como vientos intensos y precipitaciones abundantes, ignorando no solo la peligrosidad de las descargas eléctricas sino también su ocurrencia durante tormentas que no presentan otros fenómenos severos. Sumado a las numerosas creencias -muchas veces, erróneas- de gran parte de la población sobre lo que constituye una acción segura, la falta de información certera y sencilla de comprender termina resultando muy peligrosa en estas situaciones. Es importante destacar que los rayos son una de las principales causas de muerte por fenómenos naturales en Argentina (Nicora, 2014).

A lo largo de los 10 años que llevamos desarrollando este proyecto hemos implementado distintas estrategias para concretar nuestro objetivo, tales como charlas en diferentes tipos de instituciones públicas y privadas, cursos y capacitaciones, y diversas actividades en redes sociales. Esto último representó un cambio de paradigma respecto del alcance del proyecto y del tipo de público destinatario de nuestra propuesta, llevándonos constantemente a replantear las estrategias de trabajo. En este trabajo presentamos nuestras experiencias y reflexiones sobre el trabajo de los últimos 5 años en este medio de comunicación.

2) BREVE RESEÑA DEL PROYECTO

El proyecto cobró forma hacia finales de 2014 como respuesta a la enorme sensibilización que provocan las amenazas meteorológicas en La Plata desde la inundación en el año 2013. Durante el primer año de trabajo, en el cual se abordó a las tormentas como un fenómeno meteorológico que tiene eventos severos asociados, quedó en evidencia el nivel de desinformación sobre la temática en general, y sobre las descargas eléctricas en particular. Esto nos condujo a poner más el foco sobre las medidas de seguridad frente a la actividad eléctrica y, consecuentemente, desarrollamos actividades orientadas a la prevención.

Nuestras acciones se realizaban principalmente en instituciones educativas, brindando charlas y talleres adaptados específicamente a las características de cada grupo destinatario. Con el tiempo se fueron diversificando los espacios de interacción, y realizamos cursos y

capacitaciones dentro del ámbito universitario y el sector privado, tanto a nivel local como a nivel provincial. Solo por brindar algunos ejemplos, participamos en la actualización del protocolo de “bandera de rayos” para la Costa Atlántica bonaerense junto con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Dirección Provincial de Riesgos y Emergencias de la Provincia de Buenos Aires, y realizamos capacitaciones a guardaparques del Ministerio de Ambiente de la Provincia de Buenos Aires y a personal del Club Estudiantes de La Plata.

A raíz de las restricciones impuestas por el aislamiento social, producto de la pandemia de COVID-19, en 2020 y 2021 se reorganizó el proyecto, orientándose más hacia el uso de redes sociales (@PrevencionRayos) como herramienta de difusión y concientización. Actualmente, seguimos trabajando y apostando mayoritariamente por esta modalidad, aunque sin abandonar otras formas de contacto.

3) DESARROLLO DE ACTIVIDADES EN REDES SOCIALES

Nuestra red principal de trabajo es Instagram, ya que es donde hemos conseguido un público “fiel” e interacciones que nos permiten mejorar nuestro alcance. Nuestro público se compone en más de un 80% por residentes en Argentina, en particular, de localidades del AMBA, destacando la fuerte componente local del proyecto y nuestra área de impacto.

Aunque actualmente es una red mayormente en desuso, sobre todo para el público menor a 40 años, también trabajamos con Facebook. Además, contamos con una cuenta en X (ex Twitter), la cual usamos esporádicamente, ya que aún no hemos conseguido adaptar nuestro contenido a la modalidad y dinámica de interacción propia de esa red. Durante el transcurso de este año, estamos explorando en el uso de la red social TikTok, adaptando los contenidos para lograr un mayor alcance, especialmente en el público más joven (principales usuarios de esta red), ya que actualmente el 60% de nuestros seguidores tienen entre 25 y 44 años.

En estas plataformas publicamos, en diversos formatos, contenido original que aborda, de manera sencilla, conceptos relacionados con las tormentas y la actividad eléctrica. También realizamos encuestas y actividades interactivas que, por un lado, nos permiten reforzar nuestro vínculo con la comunidad y, por el otro, nos permiten compartir información certera, a la vez que exploramos el nivel de conocimiento en la temática por parte del público destinatario. Por otro lado, contribuimos en la difusión de pronósticos, alertas y avisos a muy corto plazo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, Argentina) y pronósticos para La Plata elaborados por el Grupo de Pronóstico de la FCAG, remarcando la importancia de consultar fuentes oficiales. También mantenemos siempre disponible la información sobre acciones seguras a tomar antes (prevención) y durante (protección) una tormenta.

La Figura 1 muestra la evolución en la cantidad de seguidores y cuentas alcanzadas en Instagram a lo largo de los años. A fines de 2020, luego de haber publicado por primera vez con regularidad durante todo el año, conseguimos duplicar la cantidad de seguidores. Esto se debe, en primer lugar, a que al ser una cuenta activa, el proyecto pudo darse a conocer de manera más orgánica dentro de la propia red (antes se dependía casi con exclusividad de que aparecieran nuevos seguidores luego de una charla). Pero también sucedió un hecho significativo que motivó tal crecimiento en el número de seguidores. José Bianco (meteorólogo y divulgador con un gran número de seguidores) publicó un video real de situación en extremo insegura que resultó fatal, y nuestros propios seguidores nos recomendaron como fuente de información confiable en los comentarios del vídeo, luego de lo cual se sumaron unos 500 nuevos seguidores en el transcurso de un solo día. Destacamos también que, si bien el disparador de este aumento fue la gran visibilidad de nuestra cuenta por estar mencionada en otra de mayor alcance, conseguimos mantener los nuevos seguidores, logrando que interactúen con nuestro contenido, lo cual significa que el contenido generado resulta atractivo para el público pero requerimos de mayor exposición para poder captar nuevos seguidores. Para fines de 2021 conseguimos un aumento neto de 200 seguidores.

Teniendo en cuenta que solo trabajamos en la segunda mitad del año (por cuestiones propias de reorganización administrativa a la salida de la pandemia), y que esta inactividad provocó la

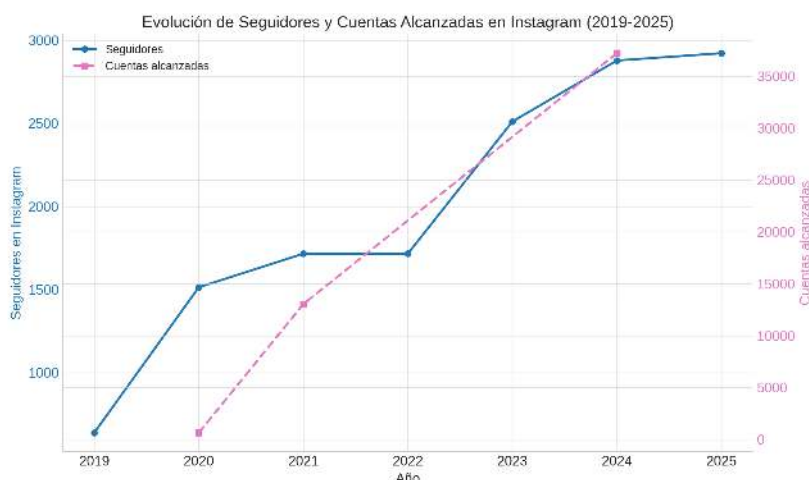


Figura 1: Evolución en la cantidad de seguidores (azul) y cuentas alcanzadas (rosa) en Instagram en el periodo 2019-2025. Se consideran las mediciones al final de cada año.

pérdida de algunos seguidores, el resultado final no es malo. En 2022, por motivos similares, tampoco se realizaron actividades del proyecto, con lo cual el número de seguidores se mantuvo estancado. Por último, al retomar las actividades en 2023, observamos desde ese momento a la fecha un aumento constante -aunque moderado- en el número de seguidores, destacando nuevamente nuestra capacidad de retención del público.

Utilizando estadísticas proporcionadas por

Instagram, analizamos también el alcance (en cantidad de cuentas) en los últimos tres meses de trabajo para cada año del proyecto (Figura 1). En 2020 logramos un alcance de 649 usuarios, mientras que para 2021 se alcanzaron 13.042 cuentas, de las cuales 9,2% corresponden a seguidores y 90,5% a cuentas que no nos siguen. En 2024 se alcanzaron más de 90.000 cuentas, correspondiendo 69% a usuarios que no nos siguen y 31% a seguidores. Este salto abrupto en el alcance se dio gracias a que Matías Cepeda (@elnegrodelclima), un *influencer* en meteorología con más de 88.000 mil seguidores al momento, compartió dos publicaciones nuestras con sus seguidores. Esto se tradujo en que ambas publicaciones tuvieran un alcance de más de 20.000 cuentas cada una (10 veces lo normal en nuestras publicaciones), registrándose también la máxima cantidad de “me gusta” en una publicación del proyecto hasta el momento. De esta interacción destacamos cómo la intervención de una cuenta popular logra que nuestras publicaciones consigan un alcance e interacción mucho mayor que el que habitualmente conseguimos con el mismo tipo de contenido.

4) CONCLUSIONES

La experiencia acumulada en estos años de trabajo en redes sociales nos permitió aprender de qué formas el contenido que producimos llega a mayor cantidad de personas, aumentando asimismo el nivel de interacción, y mejorando en definitiva nuestra práctica extensionista. De cara al futuro, identificamos una oportunidad clave: ampliar el alcance del proyecto mediante la colaboración con personas que tengan mayor llegada al público, como referentes comunitarios o usuarios con gran cantidad de seguidores. Fortalecer estas alianzas puede favorecer la difusión de prácticas seguras y potenciar el impacto preventivo del proyecto, manteniendo siempre el espíritu de intercambio y construcción colectiva que caracteriza a la extensión universitaria.

REFERENCIAS

Nicora, M. G., 2014: Actividad eléctrica atmosférica en Sudamérica. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata. Tesis Doctoral.

CONSTRUCCIÓN SOCIAL DE ALERTAS TEMPRANAS: ACCESIBILIDAD, SABERES LOCALES Y ARTICULACIÓN INTERSECTORIAL FRENTE AL RIESGO DE INUNDACIONES

**Maria Duggan¹, Natalia B. Rodeiro¹, Julieta Nasi², Lucia Curto^{1,3}, Diego Moreira^{1,3,4},
María Laura Contin⁵, Paula Micou⁵, Federico A. Robledo^{1,3,4}**
mariaduggan7@gmail.com

¹Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN)

²Facultad de Filosofía y Letras (FFyL)

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁴Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IRL 3351
IFAECI/CNRS-CONICET-IRD-UBA)

⁵Instituto Geográfico Nacional (IGN)

Palabras clave: Inundaciones urbanas. Sistema de alerta temprana. Mapeo participativo.

1) INTRODUCCIÓN

Las Prácticas Sociales Educativas (PSE) son una propuesta académica de la Universidad de Buenos Aires (UBA) para brindar herramientas a las personas que se forman en la Universidad Pública, con el fin de garantizar una formación de grado con solidez técnica, pensamiento crítico y compromiso con el desarrollo político, social, económico y cultural nacional. En este marco, en el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN) se preparó desde el proyecto Anticipando la Crecida la asignatura “Construcción comunitaria de mapas de inundaciones urbanas” (Barboza y otros, 2022). La misma responde al objetivo de conocer y concientizar sobre las inundaciones urbanas centralizadas en la Cuenca Matanza-Riachuelo (Cano y otros, 2023; Curto y otros, 2023). De esta manera, se busca contribuir a la gestión de alertas tempranas de inundaciones urbanas por lluvias, desborde de ríos y arroyos y/o sudestadas con un abordaje comunitario, interdisciplinario e intersectorial. En este trabajo presentamos la experiencia realizada en el marco de la PSE desarrollada durante marzo, abril y mayo 2024 en una escuela secundaria pública ubicada en la cuenca Matanza.

2) METODOLOGÍA

Aplicamos una metodología de [Cartografía Participativa](#), considerando que el mapeo es un proceso de construcción colectiva que permite crear, a través de la representación, mayor entendimiento de las relaciones entre una comunidad y su territorio. Permite así dimensionar problemáticas en él a partir de la combinación del conocimiento local con información y tecnología geográfica. Esta metodología brinda prácticas de acción y reflexión sobre los usos que los actores sociales hacen del espacio, viéndose materializados los problemas y las experiencias de quienes habitan el lugar. Para conocer e identificar los riesgos, el mapa permite ubicar lugares vulnerables a estos peligros (viviendas, escuelas, etc). Esta herramienta permite que la comunidad y las autoridades puedan tomar decisiones a través de potenciar las medidas de prevención. La mejor fuente de información para el trazado del mapa de riesgo de una localidad son las personas (actores) que viven en esa área (Sendai, 2015), que conocen y habitan su entorno. Además, ellas representan el núcleo del proceso, participando activamente según su interés, disponibilidad, actitudes, capacidades y formación en las diferentes etapas del proceso.

En el marco de la PSE, en mayo de 2024, se realizó un encuentro de trabajo junto a una comunidad educativa en una zona expuesta a inundaciones frecuentes, localizada en el barrio Puente Ezcurra de la localidad de Virrey del Pino en el partido de La Matanza, provincia de Buenos Aires. El mismo consistió en el desarrollo de un encuentro de trabajo en la escuela secundaria N°54 Ernesto “Che” Guevara. La actividad se basó en introducir componentes de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) y reflexionar sobre el componente de monitoreo y conocimiento del riesgo. El taller presencial tuvo tres instancias. Primero se dialogó sobre los conocimientos de la cuenca y su funcionamiento, y los componentes de un SAT. Luego se realizó un mapeo de inundaciones junto a la comunidad educativa en dos grupos de trabajo simultáneo con el mapa de la zona, realizados por el Instituto Geográfico Nacional. La pregunta: “¿Cómo se mueve el agua en el territorio?” fue el disparador para identificar las zonas afectadas por las crecidas y desborde de ríos locales. Se utilizaron post-its de colores rojo, amarillo o verde, según cuánto afectó la inundación y la altura promedio que alcanzó el agua durante cada evento, como se indica en la Figura 1. Por último se instruyó a la comunidad en el monitoreo de lluvia.

3) RESULTADOS

En la conversación sobre el movimiento del agua en la zona los estudiantes evidenciaron un conocimiento claro sobre los arroyos locales que afectaban el barrio. Sin embargo, el concepto cuenca y desde donde venía el agua que afectaba el territorio no era del todo claro para el grupo. Los resultados de mapeo comunitario se digitalizaron (Figura 1) para analizar el impacto local de inundaciones a través del indicador de viviendas y calles afectadas por el agua. Aproximadamente el 48% de los casos registrados corresponden a viviendas que no se vieron afectadas por las inundaciones con agua en su interior, sino que solo se vió anegada la calle (puntos amarillos en Figura 1). Luego, el 37% corresponde a vecinos a los cuales les ingresó el agua dentro de su casa (puntos rojos en Figura 1). Y por último, tan solo el 15% de los casos remiten a aquellos que no presenciaron agua ni fuera ni dentro de su hogar (puntos verdes en Figura 1). Se

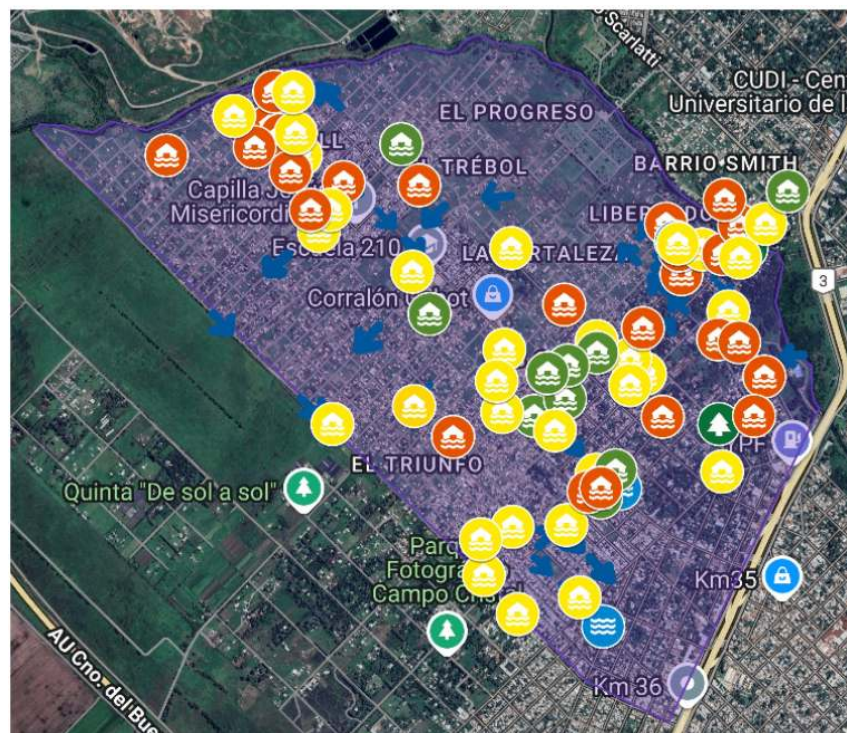


Figura 1. Mapa de riesgo digitalizado posterior al taller. Se indica movimiento del agua en el barrio (flechas azules), viviendas que sufrieron la entrada de agua (círculos rojos), viviendas donde el agua sólo llegó a la calle (círculos amarillos), viviendas que no presentaron ningún inconveniente (círculos verdes), alcantarillas (círculos azules) y los límites geográficos del barrio (sombreado violeta).

Extraída de Rodeiro y otros (2024).

observa una distribución espacial heterogénea del impacto de las inundaciones. Se llevó adelante la capacitación para utilizar un pluviómetro y la instalación en la escuela, además se diseñó un esquema posible de registro y reporte de lluvia junto a docentes y directivos.

4) CONCLUSIONES

El desarrollo de la PSE permitió a estudiantes de grado de la Lic. en Ciencias de la Atmósfera y la Lic. en Ciencias Antropológicas de la UBA realizar una experiencia concreta de trabajo intersectorial, junto a una comunidad educativa de zona inundable. Se trabajaron los conocimientos de los riesgos que implica una inundación en diálogo directo con habitantes afectados por amenazas meteorológicas. La construcción de un mapa de forma comunitaria habilitó el diálogo del saber local con el saber técnico para ampliar sentidos de la gestión del riesgo de inundaciones. En el marco de la PSE se demostró que dicho diálogo intersectorial en un territorio amplió la capacidad de análisis del impacto de una inundación de los actores científico técnicos (estudiantes de grado, investigadores y docentes universitarios) involucrados en esta experiencia directa. A su vez, la comunidad afectada, tomadores de decisión locales y provinciales entraron en diálogo con las capacidades científico técnicas en relación a un SAT, favoreciendo la apropiación de productos concretos como el sistema de alerta del Servicio Meteorológico Nacional o el geoportal del Instituto Geográfico Nacional. De esta manera, se logró fortalecer a escala local estrategias integrales de gestión del agua y planificación urbana que reduzcan la vulnerabilidad ante las inundaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio es financiado por el Programa ImpaCT.AR; el Programa Interdisciplinario de la UBA, PIUBACC 2023; UBANEX 2023 y el Programa de Fortalecimiento y Promoción de Proyectos de Ciencia Ciudadana - Convocatoria 2022.

REFERENCIAS

Barboza, M., Curto, L., Moreira, D., Robledo, F.A. 2022: Análisis de eventos de inundaciones en Quilmes con una perspectiva social. XIV Congreso Argentino de Meteorología (CONGREGMET XIV). Buenos Aires, Argentina.

Cano, R., Juárez, R., Benítez Zotelo, M.A., Pereyra, A., Barboza, M., Moreira, D., Robledo, F., Curto, L. 2023: Las Prácticas Socioeducativas como metodología de enseñanza y producción de servicios en torno a eventos hidrometeorológicos. Jornadas Socioambientales 2023. FCEN-UBA. Buenos Aires, Argentina.

Curto, L., Moreira, D., Prudente, C., Testani, N., Robledo, F., Rossetto, L., Barboza, M. 2023: Future challenges & opportunities/Social educational practices as a methodology for teaching and service production around hydrometeorological events. CALMet XV Conference 2023.

Robledo F. A., Prudente C., Testani N., Moreira D., Curto L., Basilico M., Belizán E., Berra A., Montecinos L., Calloca N., Contin M.L., Kazimierski L., Micou P., Re M., Sosa S., Juarez R., Cano R., Benitez A., Pereira A., Rodeiro N., Duggan M., Nassi J. 2024: “Abordaje de impacto de inundaciones junto con las comunidades: Experiencia de Coproducción de conocimiento local en Argentina”. Conferencia Meteorología Panamericana. San Pablo, Brasil.

Rodeiro N. B., Duggan M., Nasi J., Curto L., Moreira D., Robledo, F. A. 2024: Análisis de inundaciones en el Área Metropolitana de Buenos Aires a través del diálogo en comunidades educativas. Workshop PREVENIR. Buenos Aires, Argentina.

Visualización experimental y numérica de ondas de Kelvin como herramienta de divulgación y enseñanza en oceanografía

Eliana Burgart¹, Solana M. Gomes¹, Federico N. Lillo¹, Candela López Fidel¹, Rocío C. Marquez¹, Nina Reches¹, Marcos Remotti¹, Valentina Toscano Zárate¹, Victoria Varni¹,
Diego Moreira^{1,2}

eli.burgart2@gmail.com

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, DCAO-FCEN-UBA.

²Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CIMA/CONICET-UBA. Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: mareas, experimentación, simulaciones numéricas.

1) INTRODUCCIÓN

Las ondas de Kelvin son un tipo de ondas de gravedad que se desarrollan en presencia de rotación y una frontera lateral. Partiendo de las ecuaciones de Navier-Stokes, y considerando un océano incompresible, de densidad ρ y profundidad H constantes, no viscoso, hidrostático y homogéneo, bajo la aproximación del plano-f y de aguas someras (escala horizontal mucho mayor que su profundidad), se pueden obtener las ecuaciones linealizadas de movimiento para describir este fenómeno:

$$\frac{\partial u'}{\partial t} - f_0 v' = -g \frac{\partial \eta'}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t} - f_0 u' = -g \frac{\partial \eta'}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta'}{\partial t} + H \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

Donde las variables primadas refieren a una perturbación del estado de reposo; u y v son las componentes zonal y meridional de la velocidad respectivamente; f_0 es el parámetro de Coriolis para un plano tangente de referencia; y η es la superficie libre del mar. Suponiendo una frontera sólida en $y = 0$, de modo que allí la velocidad meridional $v' = 0$, una solución posible del sistema es una solución oscilatoria. Descartando la solución que crece exponencialmente al alejarse de la frontera, se obtiene:

$$u' = e^{-y/R} G(x - ct) \quad (4)$$

$$\eta' = \sqrt{H/g} e^{-y/R} G(x - ct) \quad (5)$$

$$v' = 0 \quad (6)$$

Estas expresiones corresponden a las ondas de Kelvin, donde $R = \sqrt{gH}/f_0$ es el radio de deformación de Rossby barotrópico, que define la escala espacial de decaimiento de la onda hacia el interior, y $c = \sqrt{gH}$ es la velocidad de fase. Si $f_0 > 0$, la onda se propaga dejando la frontera a su derecha, por lo que en una cuenca cerrada sigue una trayectoria ciclónica en ambos hemisferios (Vallis, 2006). Este tipo de ondas tiene una gran importancia dado que son el mecanismo dominante de propagación de la marea a lo largo de las costas. En Argentina, la marea se propaga de sur a norte con un decaimiento hacia el este (Simionato et al., 2004), lo que es consistente con una onda de Kelvin que avanza dejando la costa a su izquierda en el Hemisferio Sur.

Es por este motivo que se propone el diseño de un experimento físico de bajo costo que permita visualizar el comportamiento de estas ondas en un entorno controlado. Esta iniciativa no sólo se enmarca en actividades de docencia, sino que también puede ser utilizada para divulgación científica y extensión universitaria, con el objetivo de acercar conceptos oceanográficos complejos a estudiantes de nivel medio y superior, así como al público general.

2) METODOLOGÍA

Para recrear la propagación de ondas de Kelvin se diseñó un experimento físico utilizando una mesa rotante de 12 V de potencia, sobre la cual se montó una pecera de acrílico cuadrada de $45 \times 45 \times 25$ cm. La pecera se llenó con agua de red hasta aproximadamente 20 cm. Para generar ondas en la superficie del agua, se colocó un motor de 60 rpm solidario a la estructura, el cual excitó de forma constante una de las esquinas del recipiente (*Figura 1*). Se utilizó colorante como trazador para facilitar la visualización del movimiento del fluido.



Figura 1: Esquema del experimento.

Además de la experiencia física, se desarrolló una simulación numérica con el objetivo de comparar los resultados observados. Para ello, se utilizó el modelo hidrodinámico “Coastal and Regional Ocean Community model” ([CROCO](#)), una herramienta de libre acceso ampliamente utilizada en estudios regionales, que permite incorporar diversos componentes físicos, atmosféricos y biogeoquímicos.

La simulación consistió en dos etapas: primero se reprodujeron condiciones similares a las del experimento físico, y luego se escaló el modelo a una cuenca representativa de la Plataforma Continental Argentina. Se configuraron los archivos de parametrización con las coordenadas geográficas correspondientes, activando los componentes de marea y fricción. Los contornos fueron definidos como cerrados, a excepción del contorno este, donde se aplicó el forzante ondulatorio, emulando así la entrada de una onda de Kelvin.

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

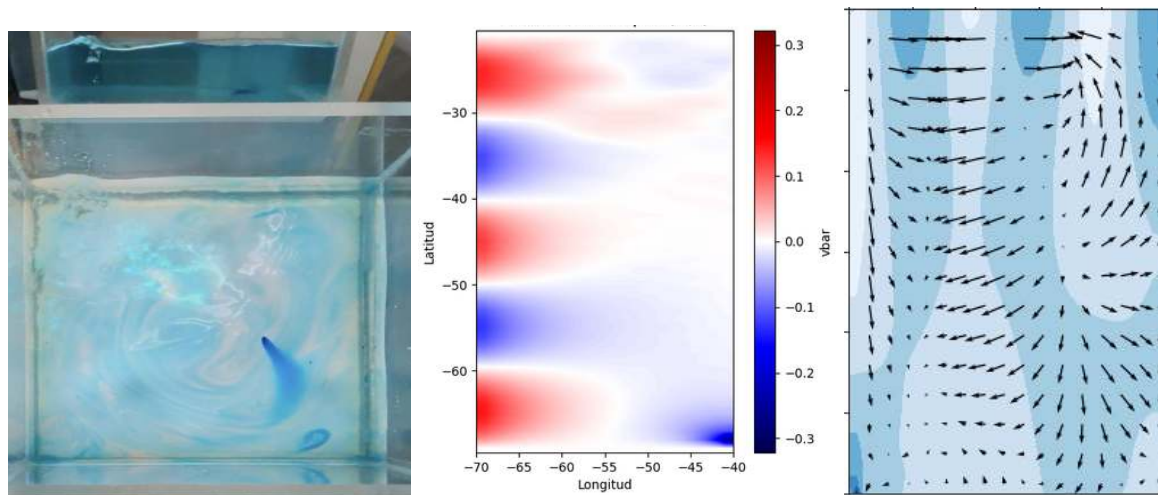


Figura 2. Izquierda: fotografía del experimento en funcionamiento. Centro: Resultado de la modelación de una onda de Kelvin en CROCO. Derecha: esquema teórico de las ondas de Kelvin (las flechas indican la intensidad y dirección del movimiento).

Como primer paso, se observó que al perturbar la superficie del agua con la mesa estática (sin rotación), la onda generada presentaba un frente circular simétrico que se propagaba uniformemente en todas las direcciones dentro de la pecera, como era esperable en ausencia del efecto de Coriolis. Sin embargo, al activar la rotación de la mesa (en sentido antihorario), se evidenciaron diferencias significativas en el comportamiento del fluido. El trazador permitió visualizar cómo parte de la energía del frente circular se concentraba cerca de las paredes, y en particular en las esquinas de la pecera. Allí se generaban patrones de propagación que guardan similitud con las ondas de Kelvin, es decir, movimientos que se adherían a la frontera y mostraban una atenuación hacia el interior del recipiente, con un frente que avanzaba dejando la “costa” a su izquierda en este caso, consistente con el comportamiento esperado para el Hemisferio Sur.

Este experimento de bajo costo y fácil implementación permitió reforzar la comprensión de un fenómeno teórico complejo a través de una visualización concreta. Resultó especialmente útil para estudiantes en formación, ya que permitió vincular el desarrollo matemático de las ecuaciones con una experiencia tangible. En este sentido, se destaca el valor pedagógico de los experimentos físicos para complementar el aprendizaje teórico en oceanografía y meteorología, y su potencial para ser utilizados en espacios de divulgación y extensión universitaria.

4) REFERENCIAS

Vallis, G. K, 2006: Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation, Princeton University, New Jersey, Cambridge University Press.

Simionato, C. G., Dragani, W., Nuñez, M., y Engel, M, 2004: A set of 3-D nested models for tidal propagation from the argentinean continental shelf to the Río de la Plata estuary—part I. M2. Journal of Coastal Research, 20(3), 893-912.

ESTACIONALIDAD DE LA DESNUTRICIÓN INFANTIL EN ARGENTINA

Martín Echeverría¹, Mariana Barrucand^{2,4}, Silvia Fontan³, Agustina López Ramírez^{2,4}, Pablo Nuñez^{1,4}, Adriana Pérez¹, Valentín Rozenblit^{1,4}, Matilde Rusticucci^{2,4}, Gerardo Cueto^{1,4}

mecheverria1099@gmail.com. Autor/a correspondiente.

¹Grupo de Bioestadística Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

³Departamento de Ciencias de la Salud, Universidad Nacional de La Matanza

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Palabras clave: salud, retraso de crecimiento, estacionalidad

1) INTRODUCCIÓN

La desnutrición infantil continúa siendo un problema de salud pública en Argentina, especialmente en menores de cinco años. A pesar de avances recientes en la región, persisten brechas estructurales que condicionan el crecimiento saludable (Nuñez et al., 2020). La estacionalidad climática —entendida como la variación cíclica anual de condiciones climáticas— puede influir en factores clave de la nutrición infantil, como la disponibilidad de alimentos, la carga de infecciones y el acceso a agua segura (Baye et al., 2020). Mientras que en regiones de África o el sur asiático se ha documentado la variación estacional de la desnutrición, en América Latina este fenómeno ha sido escasamente estudiado (Marshak et al., 2021), limitando la posibilidad de diseñar intervenciones sensibles al tiempo, que respondan a los momentos de mayor vulnerabilidad nutricional. En Argentina, la diversidad ambiental se organiza en 18 ecorregiones y 6 subecorregiones, definidas por la recurrencia de condiciones ecológicas relativamente homogéneas (Brown y Pacheco, 2006), lo que representa un marco relevante para examinar variaciones geográficas en la estacionalidad de la desnutrición. Este trabajo se propone aportar evidencia empírica sobre la variación intraanual del retraso de crecimiento en Argentina y su asociación con condiciones bioclimáticas.

2) METODOLOGÍA

Datos nutricionales: Se analizaron datos antropométricos de niños y niñas menores de cinco años obtenidos entre 2009 y 2019 en controles de salud del Programa Sumar, orientado a la población con cobertura exclusiva del subsistema público, es decir sin obra social ni prepaga. Este grupo representa aproximadamente el 51% de los menores de cinco años en Argentina. Se registró la talla y se calcularon los puntajes Z de talla para la edad (HAZ) según estándares de la OMS (2006). La baja talla para la edad, un indicador de retraso de crecimiento, se definió como $HAZ < -2$. Para cada centro de salud se calculó la proporción de niños menores de cinco años con retraso de crecimiento por mes. Los centros de salud fueron georreferenciados y asignados a una de las 24 ecorregiones del país.

Datos climáticos: Las estadísticas climatológicas (1991-2020) de 117 estaciones meteorológicas del país se obtuvieron del [Servicio Meteorológico Nacional](#). Las variables bioclimáticas correspondientes a cada ecorregión se obtuvieron de la base [WorldClim.org](#) y

representan promedios de 1970 a 2000. Se analizaron tendencias anuales (e.g., temperatura y precipitación media anual) y estacionalidad (e.g., coeficiente de variación porcentual en la temperatura y en las precipitaciones).

Análisis estadístico: Para evaluar las fluctuaciones mensuales en la prevalencia de retraso de crecimiento se ajustaron modelos de regresión armónica con función de enlace logit, que permiten capturar patrones anuales de estacionalidad nutricional mediante funciones trigonométricas. Se consideró un modelo con un único pico estacional por año, incorporando términos seno y coseno de primer orden. Para contemplar posibles variaciones interanuales, se incluyó un término suavizado (spline) para el año del muestreo. Además, se incorporaron variables demográficas, como edad promedio y proporciones de masculinos, para permitir comparaciones entre poblaciones. La ecorregión fue incorporada como un factor fijo, interactuando con los términos armónicos, con el fin de estimar curvas mensuales diferenciadas para cada ecorregión. El centro de salud se incluyó como variable explicativa de efectos aleatorios para controlar la falta de independencia entre las observaciones temporales. A partir de las estimaciones de los coeficientes armónicos en cada ecorregión se calculó el momento del pico estacional, definido como el mes del año en que se alcanzó la máxima prevalencia estimada. Se realizaron modelos aditivos generalizados (GAM) para analizar las relaciones entre las variables bioclimáticas y el momento del pico estacional.

3) RESULTADOS

A partir del análisis de 16.7 millones de registros antropométricos obtenidos a partir de 6 millones de menores de 5 años atendidos en 6711 centros de salud públicos de todo el país se obtuvo una prevalencia de retraso del crecimiento del 11.3%. Se observó un único ciclo estacional a lo largo del período, con variaciones interanuales, registrándose la mayor prevalencia (14%) durante 2009 (Figura 1).

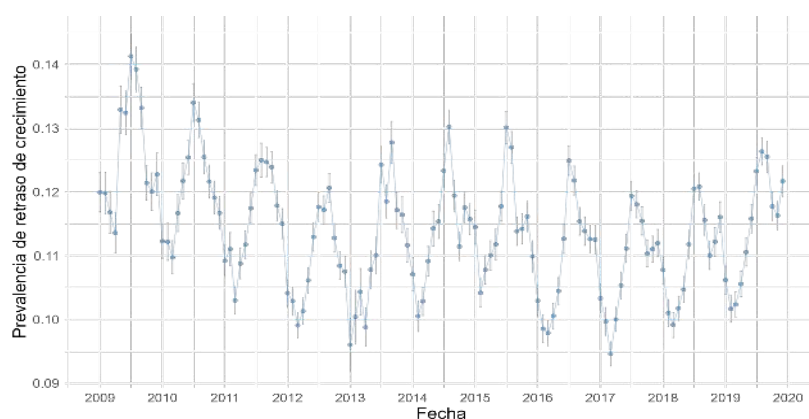


Figura 1. Variación mensual en la prevalencia de retraso de crecimiento (media $\pm$ error estándar) en niños y niñas menores de 5 años de Argentina, período 2009-2019.

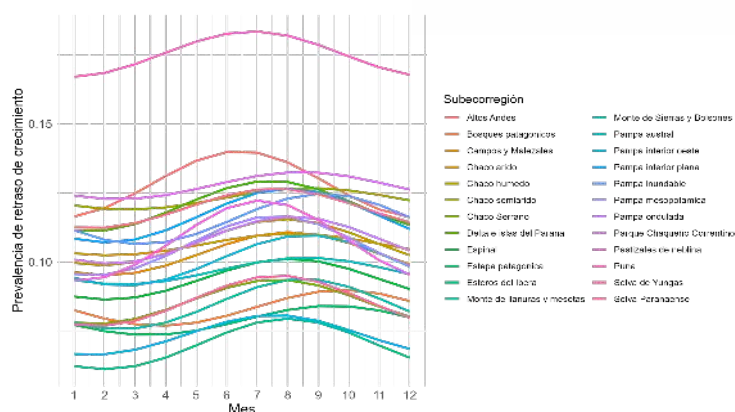


Figura 2. Variaciones intraanuales en la prevalencia ajustada de retraso de crecimiento en niños y niñas menores de 5 años de Argentina según ecorregión, período 2009-2019. Las estimaciones fueron ajustadas por variables demográficas y destendenciadas.

Al aplicar regresión armónica para modelar intraanualmente la prevalencia de retraso en el crecimiento incluyendo un único pico anual se encontraron diferencias entre las ecorregiones, tanto en la prevalencia media como en el mes en el que se produce el pico y en la amplitud del mismo (Fig. 2).

Se observó que el momento del año en que ocurre el pico de prevalencia de retraso de crecimiento se asocia de forma no lineal tanto con la temperatura media anual como con la estacionalidad de las precipitaciones (Fig. 3). En las ecorregiones cálidas (temperatura media anual $> 15^{\circ}\text{C}$), el pico se concentra en torno a agosto, independientemente del grado de estacionalidad en las precipitaciones. En cambio, en las ecorregiones más frías, el patrón varía según la estacionalidad: en regiones con baja estacionalidad de precipitaciones, el pico se produce más tardíamente, mientras que se adelanta en aquellas con alta estacionalidad.

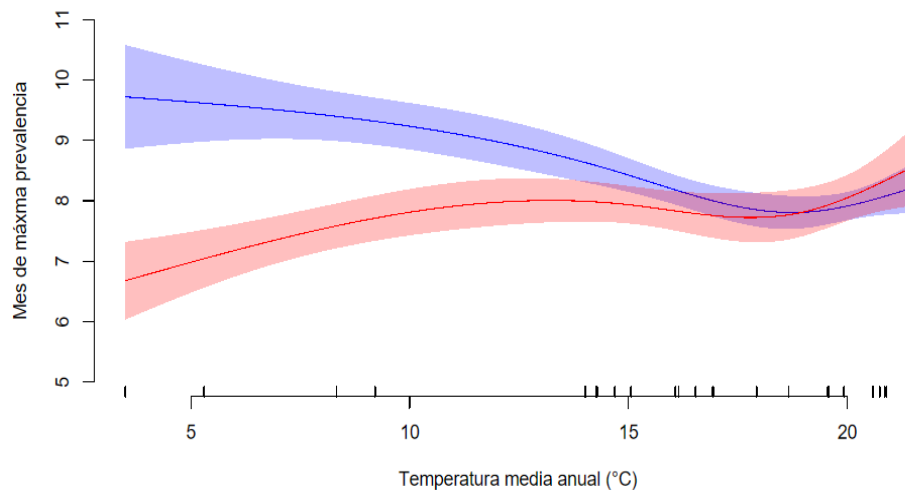


Figura 3. Variación en el mes estimado de máxima prevalencia (1, enero; 12, diciembre) en función de la temperatura media mensual y la estacionalidad en las precipitaciones. Rojo= alta estacionalidad (cv=80%); azul= baja estacionalidad (cv=40%).

4) CONCLUSIONES

El análisis reveló que las variaciones intraanuales en la prevalencia de retraso en el crecimiento en menores de 5 años difieren según la ecorregión; variando el mes estimado de máxima prevalencia según la temperatura y la estacionalidad. Estudios previos fueron realizados en su mayoría en regiones cálidas y semiáridas con alta estacionalidad, donde se encontró una asociación entre el incremento en las precipitaciones y una mayor prevalencia de desnutrición. En este estudio se evidenció que la prevalencia no solo varía con la estacionalidad de las precipitaciones, sino que a su vez la temperatura modifica el patrón de variación, particularmente en ecorregiones frías. Comprender la dinámica estacional de la desnutrición, en particular en contextos con realidades socioambientales y climáticas diferenciadas, resulta esencial para avanzar hacia sistemas de vigilancia más robustos y políticas más eficaces.

REFERENCIAS

- Baye, K. y Hirvonen, K., 2020:** Seasonality: a missing link in preventing undernutrition. *The Lancet Child & Adolescent Health*, 4(1), e3.
- Brown, A. D. y Pacheco, S., 2006:** Propuesta de actualización del mapa ecorregional de la Argentina. *La situación ambiental argentina 2005*, 28-31.
- Marshak, A., Venkat, A., Young, H. y Naumova, E. N., 2021:** How seasonality of malnutrition is measured and analyzed. *International journal of environmental research and public health*, 18(4), 1828.
- Núñez, P. A., Fernández, M. S., Turjanski, P., Pérez, A., Rivero, M. R., De Angelo, C., et al., 2020:** Substantial reduction in child stunting is differentially associated to geographical and socioeconomic disparities in Misiones Province, Argentina. *Tropical Medicine & International Health*, 25(7), 874–885.
- WHO Multicentre growth reference study group, De Onis M., 2006:** WHO Child Growth Standards based on length/height, weight and age. *Acta Paediatr Suppl.* (S450), 76–85.

FORTALECIMIENTO DE LAS CAPACIDADES EN SERVICIOS DE ALERTA TEMPRANA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PRONÓSTICOS BASADOS EN IMPACTO

Daniela D'Amen¹, Carolina Cerrudo¹, Julián Goñi¹ y Juan Bazo²

ddamen@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

² Centro del Clima de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja

Palabras claves: Alerta Temprana, Pronósticos basados en impacto, Desarrollo de capacidades

1) INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) representan una de las herramientas fundamentales para la gestión del riesgo de desastres (GRD). El objetivo de la iniciativa “Alerta Temprana para todas las personas” (EW4All, por sus siglas en inglés) es garantizar que, para 2027, todas las personas del planeta estén protegidas por un sistema de alerta temprana, que contribuya a la protección de la vida, la propiedad, el ambiente y la reducción de pérdidas económicas. Esta iniciativa establece cuatro pilares, o elementos centrales, que componen la cadena de alerta temprana, que se encuentran liderados por las respectivas organizaciones:

- Pilar 1: Comprensión del riesgo de desastres (Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres - UNDRR).
- Pilar 2: Detección, observación, monitoreo, análisis y pronóstico de las amenazas (Organización Meteorológica Mundial - OMM).
- Pilar 3: Difusión y comunicación de alertas (Unión Internacional de Telecomunicaciones - UIT).
- Pilar 4: Capacidades de preparación y respuesta (Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja - FICR).

En el marco de esta iniciativa, se están implementando diferentes acciones a nivel regional. Treinta países han sido designados para su aplicación prioritaria y seis de ellos se encuentran en las Américas y el Caribe: Antigua y Barbuda, Barbados, Ecuador, Guatemala, Guyana y Haití.

El Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, los Centros Regionales de Formación de la OMM en Argentina y Perú y el Centro del Clima de la Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (IFRC), en coordinación con los principales organismos de ejecución de la iniciativa, llevaron adelante en mayo de 2024 el primer webinar para sensibilizar sobre la necesidad de aunar esfuerzos y así alcanzar el objetivo de la iniciativa EW4All. Este encuentro reunió a 400 participantes de toda América con el objetivo de reforzar colaboraciones entre las distintas agencias, compartir experiencias de trabajo, mejorar la comunicación de alertas y avisos, promover la implementación de pronósticos basados en impacto y la catalogación de eventos severos (OMM, 2024).

2) DESARROLLO DE CAPACIDADES

Con el objetivo de dar continuidad a este proceso de interacción continua, el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina y el Centro del Clima de la Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja, junto con la colaboración de los Centros Regionales de Formación de Argentina y Perú, desarrolló del 12 al 30 de mayo de 2025 el curso *“Fortaleciendo colaboraciones estratégicas para la implementación de pronósticos basados en impacto”* con el objetivo de reconocer la importancia de los pronósticos basados en impacto para la comunicación del riesgo, adquirir herramientas y buenas prácticas para la implementación de estos pronósticos e identificar posibilidades de asociación e instancias de colaboración entre organismos. La Figura 1 muestra un resumen de los contenidos abordados durante el curso, concentrándose principalmente en los fundamentos y conceptos básicos para la implementación de pronósticos basados en impacto, la coproducción con usuarios y asociaciones, y ejemplos de fuentes de información. En el desarrollo de los contenidos se destaca un enfoque transversal desde los distintos pilares de la iniciativa EW4All, y está orientado a personal de organismos Científico-Técnicos vinculados a la emisión de alertas tempranas, Oficinas Nacionales de Gestión del Riesgo de Desastres y Emergencias, Personal del Sector Humanitario y ONGs.



Contenidos del curso:

Semanas	Temas
Semana 1	Fundamentos para la implementación de Pronósticos basados en impactos: • Conceptos básicos de comunicación y componentes del riesgo • Principios clave de un enfoque de Pronóstico Basado en el Impacto (PBI) para la acción temprana anticipatoria • Directrices de las organizaciones líderes de EW4ALL
Semana 2	Abordaje de usuarios y asociaciones (Codiseño y Coproducción) • Comprendiendo a los usuarios y sus necesidades (Codiseño) • Creación de Alianzas y Colaboraciones (Coproducción) • Entendiendo el Riesgo y el impacto.
Semana 3	Fuentes de información • Información necesaria para la construcción de pronósticos basados en impacto • Integración de datos oficiales y no oficiales • Experiencias exitosas de bases de datos con información de impacto y asociaciones

Figura 1: Contenidos del curso

El curso contó con 468 participantes de 22 países distintos (Ver Figura 2). Luego de finalizado el curso, posteriores análisis considerarán aspectos tales como organismos participantes, inscriptos según los pilares establecidos en el marco de la iniciativa y motivaciones identificadas para la inscripción.

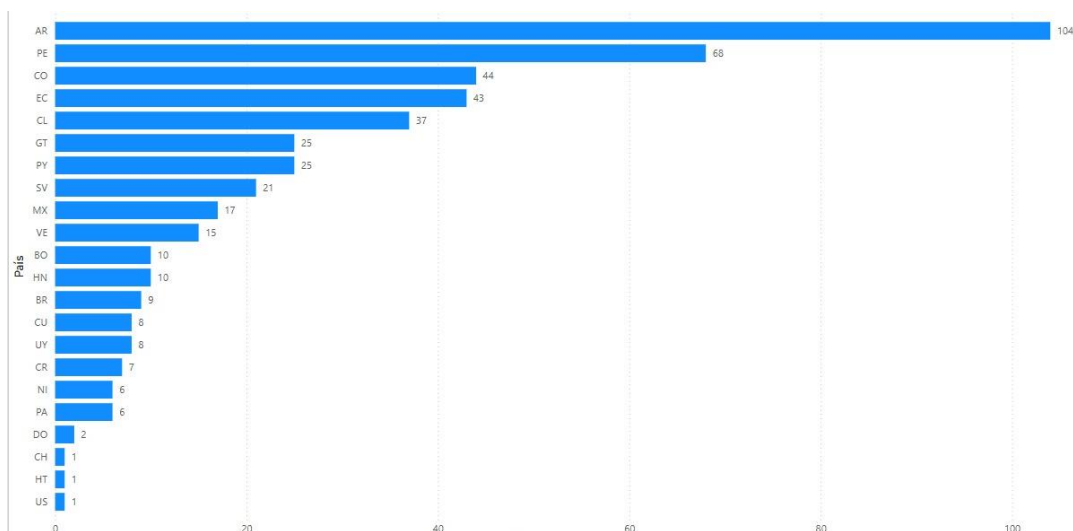


Figura 2:

Cantidad de participantes por país.

3) CONCLUSIONES

La introducción de información de impactos asociados a los avisos de fenómenos hidrometeorológicos extremos es un reto para los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales, ya que se deben dejar atrás las tradicionales formas de comunicar los pronósticos, teniendo en cuenta la introducción de información no meteorológica (OMM 2015; 2021). Por este motivo, es necesario abordar el desafío de forma conjunta, interdisciplinaria e interinstitucional, siendo condición necesaria la estrecha colaboración entre diversos actores como organismos del Estado -nacionales, provinciales y locales-, la comunidad científica y el sector humanitario, entre otros. En este contexto, el desarrollo de capacidades y el fortalecimiento de las asociaciones para poder implementar Pronósticos Basados en Impacto (PBI) resultan fundamentales. Cabe destacar el desarrollo de este curso como una valiosa herramienta a nivel regional, que, si bien en su primera edición se elaboró en idioma español, tiene la potencialidad de ser traducido en otros idiomas y quedar disponible para su realización en línea de forma asincrónica.

REFERENCIAS

Organización Meteorológica Mundial. 2024: Meteoworld (June) Discovering the Early Warnings for all Initiative in the Americas. Disponible en: <https://wmo.int/media/magazine-article/discovering-early-warnings-all-initiative-americas>

Organización Meteorológica Mundial. 2021: Documento 1150 Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre los servicios de predicción y aviso de peligros múltiples que tienen en cuenta los impactos. Parte II: Aplicación práctica de los servicios de predicción y aviso de peligros múltiples que tienen en cuenta los impactos.

Organización Meteorológica Mundial. 2015: Documento 1150 Directrices de la OMM sobre servicios de predicción y aviso multirriesgos que tienen en cuenta los impactos

CLIMATOLOGÍA SINÓPTICA DE VIENTO CRUZADO EN EL AEROPARQUE JORGE NEWBERY DE LA CIUDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES

Anabel Marques da Silva^{1,2}, Luciano Vidal¹, Roxana Vasques Ferro¹
amarques@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

² Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEN-UBA)

Palabras clave: Viento cruzado, METAR, seguridad operacional.

1) INTRODUCCIÓN

La presencia de condiciones de viento adversas, como viento cruzado, en un aeródromo dificulta las operaciones aeronáuticas, ya que pueden dar como resultado cambios en la actitud de la aeronave, y ocasionalmente consecuencias como aterrizajes forzosos, golpes en la aeronave o inducir a realizar maniobras de aproximación frustrada (Krüs, 2016). El viento cruzado o crosswind es el flujo de viento moviéndose de manera perpendicular a la trayectoria de una aeronave y resulta en una dificultad para mantener el control direccional de la misma. Cada tipo de aeronave tiene su máximo umbral demostrado de viento cruzado para despegue y aterrizaje según el estado de la pista, y según las características de la aeronave (Krüs, 2016). Sin embargo, cada aerolínea puede determinar un criterio de umbrales menores para sus operaciones. Según un análisis de la Fundación de Seguridad de Vuelo (Flight Safety Foundation; Khatwa y Helmreich, 1999) de los accidentes en aterrizaje y despegue entre 1980 y 1996 se determinó que las condiciones adversas del viento, tales como fuertes vientos cruzados, viento de cola y cortante del viento, están involucradas en un tercio de los accidentes de aproximación y aterrizaje. A su vez, se observó que el 85% de los incidentes y accidentes por viento cruzado ocurren durante el aterrizaje.

El Aeroparque Jorge Newbery (Sigla OACI: SABE) es uno de los aeropuertos más importantes de Argentina debido a su cercanía con el centro de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, y por la cantidad de movimientos diarios que realiza, tanto de vuelos de cabotaje como internacionales. Es por esto que resulta de suma relevancia el análisis de los fenómenos meteorológicos que puedan afectar la seguridad y eficiencia operacional en el mencionado aeropuerto, y, en particular, ahondar en el estudio del viento cruzado ya que SABE posee una única pista orientada Sureste-Noroeste, identificada como 13-31, para llevar a cabo sus operaciones aéreas.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

A fin de estudiar la climatología de viento cruzado en SABE se utilizaron los datos minutales de dirección e intensidad de viento del Sistema Automático de Observación Meteorológica (AWOS, por sus siglas en inglés), y los reportes meteorológicos aeronáuticos horarios METAR. El AWOS es un sistema de recolección de datos meteorológicos de superficie compuesto por una estación automática especializada en meteorología aeronáutica, con instrumental meteorológico instalado en diferentes posiciones de la pista. En particular, para la medición del viento se utilizan sensores de viento ultrasónicos emplazados en torres en el umbral de toque de cada cabecera (13 y 31) y en el punto medio de la pista. Por su parte, los mensajes METAR son informes meteorológicos ordinarios emitidos por la estación meteorológica aeronáutica correspondiente al aeródromo, en este caso del aeropuerto internacional SABE. Estos incluyen la información meteorológica de variables como dirección e intensidad de viento, visibilidad, cobertura nubosa, temperatura, presión, entre otros, obtenida en la estación convencional o proveniente del AWOS, en caso de que esté emplazado en el aeródromo. Dichos mensajes se envían de manera horaria a los bancos de

datos mundiales a través del sistema AMHS/CADAS, y se codifican en lenguaje aeronáutico según el Manual de claves OMM N°782. En este trabajo se analiza el grupo de viento en superficie, el cual se compone por la dirección e intensidad de viento promediado en los últimos 10 minutos, y por la ráfaga máxima, en caso de que exceda la velocidad media del viento en 10 kt (nudos) o más (RAAC 203, ANAC, 2022); para el período de 2016-2024 de datos METAR, y 2021-2024 de datos AWOS.

3) RESULTADOS

Utilizando los datos de viento en superficie y ráfagas de los mensajes METAR, se representan en la Figura 1 dos rosas de los vientos que muestran la frecuencia porcentual de dirección e intensidad del viento para distintos umbrales en SABE. A su vez, con una barra gris se superpone en el gráfico una representación de la pista del aeropuerto, con sus respectivos números de cabeceras. Se incluye la frecuencia porcentual de las calmas de viento en superficie, que se definen como viento con intensidad menor que 2 kt. Se observa frecuencia predominante de viento en superficie del sector E y ESE, con intensidad mayoritariamente entre 10 y 15 kt. Además, es en estas direcciones donde se registraron los vientos más intensos, alcanzando velocidades de hasta 32 kt. Las componentes cruzadas a la pista, correspondientes a los sectores NE y SE, tienen una menor frecuencia en comparación con la dirección paralela, siendo el viento del noreste el más frecuente.

Las ráfagas de viento se registraron con mayor frecuencia del sector S y SO, es decir con dirección cruzada a la pista y proveniente de la ciudad, con velocidades entre 15 y 25 kt. Sin embargo, las ráfagas más intensas que se observaron en este período se dieron con velocidades mayores a 30 kt, principalmente en la dirección SE y ESE, paralelo a la pista de aterrizaje.

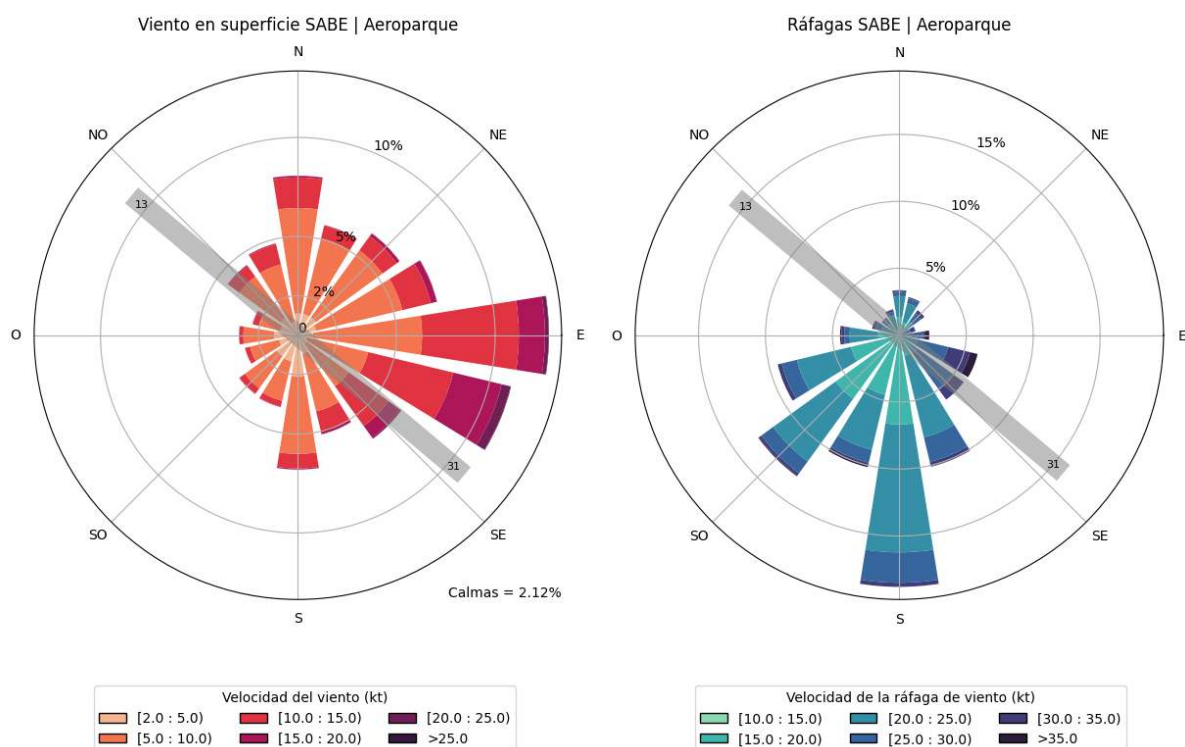


Figura 1: Rosa de los vientos de viento en superficie (izq.) y ráfagas (der.) para SABE en el período 2016-2024.

A partir de los datos de viento registrados por el instrumental AWOS de SABE, la Figura 2

representa la componente de viento cruzado en cada uno de los puntos de medición de la pista 13-31, correspondiente a un evento de aproximaciones frustradas ocurrido el 30/4/2023. Aproximadamente a las 18:30 UTC, un frente frío avanzó sobre el aeropuerto, modificando las condiciones meteorológicas prevalecientes en el mismo. En pocos minutos se detectó un aumento pronunciado de la intensidad del viento cruzado en los 3 sectores de la pista simultáneamente, sin embargo se puede observar la variabilidad que hay entre ellos una vez que ingresó la nueva masa de aire. En este período de tiempo se observaron velocidades de viento cruzado de hasta 34 kt, capaz de desestabilizar una aeronave en fase de aproximación final a la pista.

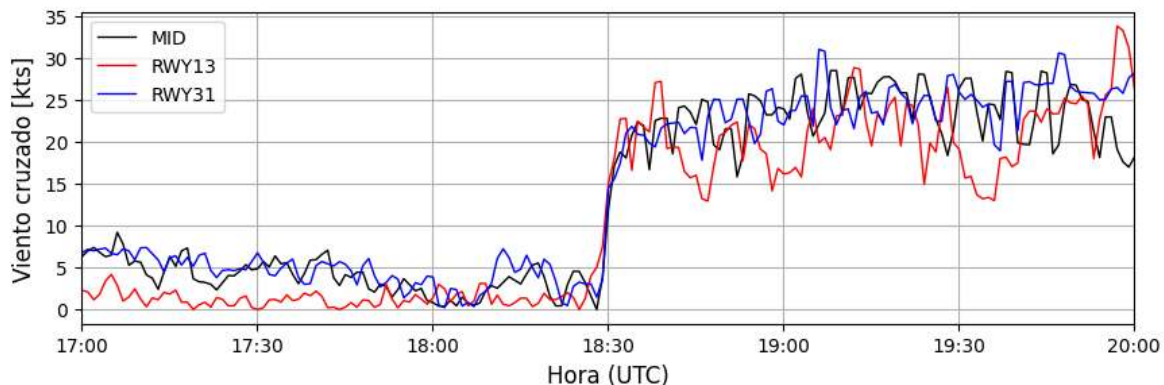


Figura 2: Viento cruzado medido con el instrumental AWOS de SABE en las cabeceras 13 (azul), 31 (rojo) y a la mitad de la pista (negro) entre las 17:00 y 20:00 UTC del 30/4/2023.

4) CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza la variable de viento en el aeródromo SABE, tomando los datos de los informes horarios METAR y los datos minutales provenientes del sistema AWOS, para el período de 2016-2024 y 2021-2024, respectivamente. A partir del análisis de estos datos se obtuvo la frecuencia de ocurrencia de eventos de viento cruzado en el aeropuerto, donde se observa una preponderancia de ráfagas con componente cruzada del suroeste por sobre otras direcciones. Adicionalmente, los datos minutales AWOS aumentan significativamente la cantidad de información disponible en distintos sectores de la pista, permitiendo una rápida detección de eventos significativos y locales, como lo es el viento cruzado y las ráfagas de viento. Este análisis resalta la importancia del estudio de las variables meteorológicas para evaluar su impacto en la aviación, tanto como apoyo a la seguridad operacional, en la planificación y diseño de aeródromos, como en la toma de decisiones durante las operaciones aéreas.

REFERENCIAS

- Khatwa, R., y R. L. Helmreich, 1999:** Flight Safety Foundation Approach-and-landing Accident Reduction Task Force: Analysis of Critical Factors During Approach and Landing in Accidents and Normal Flight: Data Acquisition and Analysis Working Group Final Report. SAE Transactions, 108.
- Krüs, H. W., 2016:** Criteria for crosswind variations during approach and touchdown at airports. Radespiel, R., Niehuis, R., Kroll, N., Behrends, K. (eds) Advances in Simulation of Wing and Nacelle Stall. FOR 1066 2014. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 131, 167–187.
- RAAC 203, ANAC, 2022:** Regulaciones Argentinas de Aviación Civil, Parte 203: Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea, Primera Edición.

HACIA EL DESARROLLO COLABORATIVO DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE INUNDACIONES REPENTINAS: APORTES PARA LA DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN Y EL TRABAJO CON COMUNIDADES VULNERABLES EN LAS CUENCAS SUQUÍA Y SARANDÍ -SANTO DOMINGO.

Julián Goñi¹, Daniela D'Amen¹, Milagros Alvarez Imaz¹, Mariano Re², Federico Robledo^{3,4,5}, Marcelo García^{6,7}, Yanina García Skabar¹, Juan Ruíz^{3,4,5}, Martín Vilariño¹, Carlos Catalini², Sebastián López^{6,7}, José Manuel Diaz Lozada^{2,6}, Andrés Portigliatti⁷, Matias Menalled¹, Leandro Kazimierski², Carolina Cerrudo¹, Marina Lagos², Nadia Testani^{3,5}, Camila Prudente^{3,5}, Diego Moreira^{3,4,5}, Malena Lozada^{3,5}

jgoni@smn.gob.ar. Julián Goñi

¹ Servicio Meteorológico Nacional, Argentina (SMN)

² Instituto Nacional del Agua, Argentina (INA)

³ Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, Argentina (CIMA/CONICET-UBA)

⁴ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO/FCEN-UBA)

⁵ Instituto Franco-Argentino para el estudio del clima y sus impactos (UMI-IFAEI/CNRS-CONICET-UBA)

⁶ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (FCEyN/UNC)

⁷ Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, Argentina (IDIT/CONICET-UNC)

Palabras clave: Reducción del riesgo de desastres, Acción anticipatoria, Inundación.

1) INTRODUCCIÓN

Las inundaciones urbanas repentinas son uno de los principales peligros asociados a las precipitaciones intensas en todo el mundo debido al crecimiento de las zonas urbanas. En Argentina, las inundaciones en ciudades densamente pobladas son un evento frecuente y cada año la comunidad se ve directamente afectada, en particular los habitantes de los barrios más vulnerables. Una de las herramientas más importantes para mitigar el impacto de las inundaciones urbanas repentinas son los sistemas de alerta temprana. Trabajar para que cada vez este sistema sea más preciso y que su difusión sea eficaz, es fundamental para que los responsables de la toma de decisiones y la comunidad puedan ser conscientes del riesgo y tomar medidas anticipatorias para protegerse a sí mismos y a sus bienes.

El proyecto PREVENIR, un proyecto de cooperación de cinco años entre instituciones científicas argentinas y japonesas, pretende desarrollar un sistema de alerta temprana de inundaciones repentinas en dos zonas densamente pobladas: la cuenca del río Suquía en Córdoba y la cuenca Sarandí Santo-Domingo en Buenos Aires. La propuesta representa un desafío científico-tecnológico a nivel internacional, así como un desafío interinstitucional al trabajar colaborativamente con los gobiernos locales de dos provincias diferentes. Ambas cuencas incluyen dos de las ciudades más pobladas del país y fueron seleccionadas por sus características demográficas, geográficas e hidrometeorológicas. Este sistema proporcionará herramientas y recomendaciones útiles para la implementación de sistemas similares en otras regiones. Al considerar

tanto los aspectos ambientales como sociales de la problemática, el proyecto es también un desafío interdisciplinario que busca combinar desarrollos científicos y tecnológicos de diferentes disciplinas con el conocimiento local para reducir el riesgo. Este trabajo implica necesariamente la articulación entre distintos actores clave, como las instituciones científicas y técnicas nacionales, las agencias de gestión de riesgos provinciales y locales, los responsables de la toma de decisiones y las instituciones educativas y/o comunitarias.

Un aspecto importante de este proyecto consiste en mejorar el sistema de comunicación de la información hidrológica y meteorológica incluyendo la difusión de pronósticos y alertas a través de una plataforma digital con datos hidrometeorológicos útiles para la comunidad local y los tomadores de decisión en materia de gestión del riesgo de desastres. Además, se están llevando a cabo actividades de sensibilización en colaboración con diversos actores comunitarios, incluidas escuelas y organizaciones vecinales para identificar los riesgos y construir comunidades mejor preparadas para las inundaciones repentinas. A continuación, se describen las acciones desarrolladas en el marco de ambos paquetes de trabajo en las cuencas Suquía y Sarandí-Santo Domingo desde el año 2022 a la actualidad.

2) SISTEMA DE DIFUSIÓN DE DATOS Y AVISOS

El grupo de trabajo que se enfoca en la difusión de la información tiene como objetivo final el desarrollo de un portal Web, que pueda también adaptarse en un teléfono celular, para comunicar de manera eficiente pronósticos y avisos a los organismos de gestión del riesgo, los tomadores de decisión y el público en general. Para alcanzar dicho objetivo, es importante conocer a las partes interesadas que intervienen en la gestión del riesgo de todos los municipios de cada cuenca. Por este motivo, como primera actividad de este grupo de trabajo se realizaron talleres preliminares en donde se presentaron las características del proyecto y se relevó información sobre sus capacidades técnico-operativas y sus intereses para articular las acciones futuras de PREVENIR. En segundo lugar, se realizaron en cada cuenca talleres de simulación de escenarios de riesgo de inundaciones para analizar el nivel de conocimiento de la información hidrometeorológica disponible, reconocer el proceso de toma de decisiones de los equipos a cargo de la gestión del riesgo de cada municipio y mejorar la comprensión de las amenazas y sus impactos. Estos talleres permitieron conocer y definir quién es el “usuario persona” que va a utilizar la página web. Los talleres siguientes se enfocaron en conocer cómo es la experiencia de dicho usuario en las aplicaciones y herramientas ya existentes de difusión de información hidrometeorológica. Estos talleres de testeo de herramientas hidrometeorológicas se realizaron con los organismos provinciales y locales de gestión de riesgos de desastres, para conocer cómo se están utilizando y qué ventajas e inconvenientes encuentran los usuarios en cada una de las fuentes de información que utilizan para tomar decisiones. La información relevada en cada una de estas instancias permite caracterizar los

requerimientos de los usuarios en vistas a los desarrollos que se producirán en el marco del proyecto.

Por otro lado, este grupo es el encargado de coordinar con el resto de los grupos de trabajo de este proyecto en donde se realizan los avances y mejoras en los pronósticos hidrometeorológicos y en redes de observación. El desafío al respecto es la de integrar toda la información producida por los otros grupos de trabajo, en una visualización que sea fácil de entender para los usuarios y fácil de navegar en los teléfonos móviles, incluso en zonas donde la conectividad a Internet puede ser limitada.

3) TRABAJO CON LA COMUNIDAD

El grupo de trabajo seis se focaliza en la realización de actividades con diferentes actores e instituciones comunitarias para aumentar la conciencia de la población sobre las inundaciones repentinas, con especial énfasis en la participación de las personas más expuestas y vulnerables. En tal sentido desde 2022 se llevan a cabo en forma acciones para aumentar la capacidad de prevención, preparación y respuesta de las comunidades involucrando a las docentes y estudiantes de escuelas de ambas cuencas, asociaciones vecinales, integrantes de comités operativos de emergencias, entre otros.

En relación al trabajo con comunidades educativas de ambas cuencas, se han llevado a cabo reuniones de presentación del proyecto ante docentes e inspectores escolares y se han desarrollado talleres en escuelas rurales y urbanas de nivel primario y secundario. Estas jornadas contaron con la participación de docentes, personal del establecimiento y/o familiares de alumnos, y mediante actividades didácticas que abordaron la problemática de las inundaciones permitieron recordar eventos previos de inundaciones en su localidad, identificar los impactos asociados y las prácticas para el cuidado de la población recomendadas ante estas situaciones.

Asimismo, en una articulación interinstitucional con el Ministerio de Ambiente de la Provincia de Buenos Aires, se ha trabajado en la generación de contenidos didácticos para el abordaje de la problemática en el aula y se logró publicar el material de orientación para docentes “Gestión del riesgo ante inundaciones”. En línea con estas acciones, se entregaron pluviómetros y estaciones meteorológicas automáticas de bajo costo en escuelas de zonas inundables de ambas cuencas que serán utilizadas para el desarrollo de acciones de ciencia ciudadana.

En cuanto al trabajo con las comunidades, se han realizado talleres participativos en barrios vulnerables con el objetivo de incrementar el acceso del público general a la información hidrometeorológica disponible e identificar las zonas de mayor vulnerabilidad y exposición en cada barrio. En estos talleres se mostraron los canales de acceso a la información oficial y se realizaron mapeos colaborativos del riesgo ante inundaciones con la participación de vecinos y vecinas de barrios que sufren frecuentemente las inundaciones en ambas cuencas. Esta información luego fue digitalizada para la generación de mapas de riesgo en los diferentes barrios.

CAMBIO CLIMÁTICO: UN ABORDAJE SENCILLO DESDE UNA PERSPECTIVA COMPLEJA

**Agustina Carranza¹, Rocío Cano¹, Analía Pereyra¹, Gimena E. Alegría Fernández¹,
Marianela Groppa¹, Daiana M. Martínez^{1,2,3}, Belén Martorelli^{1,4}, Leandro B. Díaz^{1,2,3},
Malena S. Lozada Montanari^{1,2,3}, Nadia Testani^{1,2,3}**
agustina.cza@gmail.com. Autora correspondiente

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

² CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³ CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina

⁴ INTA- Instituto de Tecnología Agropecuaria

Palabras clave: popularización de la ciencia, educación ambiental, formación docente, taller planeta al horno

1) INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha dejado de ser un tema exclusivo de círculos científicos para convertirse en un problema de relevancia social, abarcando aspectos políticos, económicos y éticos, entre otros, y un tema central en la agenda de políticas públicas (ej. Nieto Galán, 2011). Por tanto, la comunidad científica como un eslabón más en la sociedad, tiene el desafío de comunicar conceptos científicos y técnicos en torno al cambio climático a una sociedad no especializada, sin perder rigor y sin desestimar la naturaleza sistémica del problema.

Con esta motivación se lleva a cabo el taller ¿Por qué el Planeta está al Horno?, propuesto como un espacio de aprendizaje y reflexión. Este taller es llevado adelante por estudiantes, docentes e investigadores del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (FCEN-UBA). En este trabajo se presentan los resultados de la experiencia que actualmente cuenta con dos versiones, por un lado un taller para estudiantes de escuelas secundarias y también adaptado a docentes formados y en formación de nivel medio y superior, y por otro lado, un stand interactivo destinado al público en general.

2) TALLER ¿POR QUÉ EL PLANETA ESTÁ AL HORNO?

En junio de 2021, en el marco de la actividad “Semana de las Ciencias de la Tierra 2021” de FCEN-UBA, destinada principalmente a estudiantes y docentes de escuelas secundarias, se realizó por primera vez el Taller ¿Por qué el Planeta está al Horno? en modalidad virtual debido a las restricciones sanitarias vigentes en ese momento en el marco de la COVID-19 (Figura 1, izq.). Este taller se propuso como un espacio de aprendizaje y reflexión sobre el cambio climático, y contó con la participación de alrededor de 300 personas.

El taller incluyó en primer lugar la presentación de algunos de los principales conocimientos científicos sobre el tema, como los conceptos físicos de equilibrio radiativo y efecto invernadero, que permiten comprender por qué en las últimas décadas, debido al accionar humano, la temperatura media global ha estado aumentando. En segundo lugar, se trabajó sobre posibles escenarios futuros de cambio climático mediante un modelo climático

simplificado web (<https://c-roads.climateinteractive.org/scenario.html>) que permite “proyectar” cómo evolucionaría la temperatura media planetaria y algunos de los impactos asociados a ese aumento, en función de acciones de mitigación (reducción de emisiones de gases de efecto invernadero) globales. Por último, se trabajó con un mapa interactivo del sitio web Carbon Map (<https://www.carbonmap.org/>) que permite ver las desigualdades asociadas al cambio climático y, en particular, a los impactos estudiados con el modelo simplificado.

Desde el año 2022 a la actualidad la actividad fue repetida de manera presencial en el marco de la “Semana de las Ciencias de la Tierra” (FCEN-UBA) donde participaron estudiantes de escuelas secundarias (Figura 1, der.). Además fue adaptada para dictarse en la “Semana de la Enseñanza de las Ciencias” (FCEN-UBA) donde participaron docentes de escuelas de CABA y Buenos Aires y estudiantes de profesorados, a quienes se les compartió el taller para que lo puedan reproducir en sus aulas.

El taller fue compartido también en visitas a escuelas de CABA y Buenos Aires, de manera particular y en el marco de “Exactas Itinerante” (FCEN-UBA), y en la 47a y 48a “Feria Internacional del Libro de Buenos Aires”.

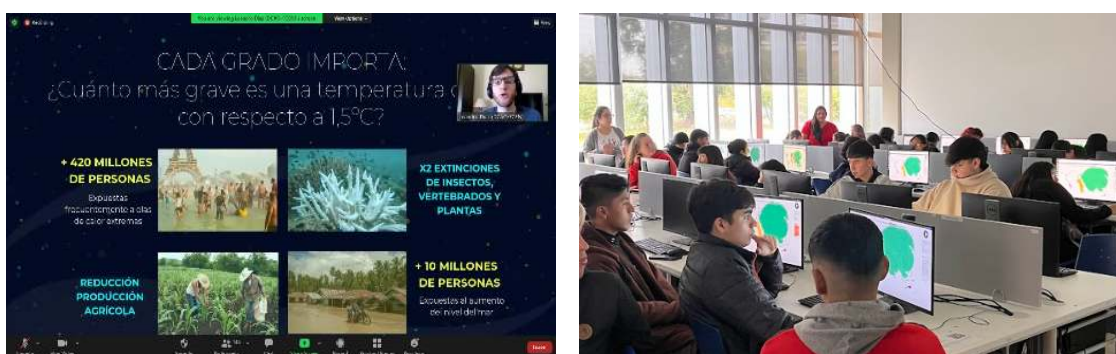


Figura 1. Taller *¿Por qué el Planeta está al Horno?*. **Izq:**Taller virtual, Junio 2021. **Der:**Taller presencial FCEN-UBA, Junio 2024.

3) STAND INTERACTIVO

Frente a la oportunidad de participar en “La Noche de los Museos” en 2023 (FCEN-UBA), el taller fue adaptado a su versión stand interactivo (Figura 2, izq.). El stand se organizó en tres postas, bajo preguntas que van guiando el recorrido. La primera posta, bajo la pregunta “¿Qué está pasando?”, presentó algunos de los cambios observados debido al cambio climático. Utilizando un mapa de Argentina e imágenes ilustrativas (sequías, ola de calor, retroceso de glaciares, precipitaciones extremas y aumento del nivel del mar) se invitó a los participantes a pensar en que partes del país ocurrían principalmente estos cambios. También se diseñó un juego de dados para mostrar el aumento en la frecuencia de fenómenos extremos. Por último, a partir de un experimento con hielos se explicó el aumento en el nivel del mar y sus impactos. En la segunda posta, “¿Por qué está pasando?”, con el objetivo de explicar las causas físicas del cambio climático se expuso una maqueta para explicar el efecto invernadero y los cambios en el balance radiativo del planeta. Además, se mostraron imágenes extraídas del sitio web Carbon Map para abordar las desigualdades e impactos asociados al cambio climático, al igual que en el taller. Finalmente, la tercera posta “¿Qué podemos hacer?”, se enfocó en las propuestas de mitigación y adaptación al cambio climático en distintas escalas, desde lo individual a lo más colectivo. Se utilizó un mural colaborativo de la organización ambiental *¿Ahora qué?* (<https://ahora-que.com/>) que fue completado con distintas propuestas de las personas que se acercaron al stand.



Figura 2. Stand interactivo ¿Por qué el Planeta está al Horno?. **Izg.:** "La Noche de los Museos" FCEN-UBA, Noviembre 2023. **Der.:** "La Noche de los Museos" FCEN-UBA, Diciembre 2024.

El stand también fue compartido en "La Noche de las Ciencias" (FCEN-UBA) en 2024 para el público visitante (Figura 2, der.). Por otro lado, el material generado para el stand fue reutilizado en visitas a escuelas y permitió modificar el taller al incluir parte de estas nuevas actividades, de modo que el taller sea más interactivo.

4) PÁGINA WEB

A partir de la experiencia de los talleres, se proporcionó una base para el desarrollo de una página web llamada "¿Por qué el Planeta está al Horno?" (<https://porqueelplanetaestaalhorno.weebly.com/>), que apunta al público juvenil (edad de escolarización secundaria) y para docentes de escuelas secundarias. En la misma, se proporciona una experiencia de taller-web que sea replicable en el aula por parte del público objetivo y de fácil acceso desde un celular, tablet y/o laptop, con guías disponibles para que la experiencia se nutra desde una visión científico-técnica. En la web se propone trabajar con la herramienta C-ROADS, que permite visualizar los impactos a largo plazo según las estrategias climáticas llevadas a cabo en distintos grupos regionales y así comprender el impacto de los compromisos de reducción de emisiones que los países han propuesto en Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Asimismo, se aportan herramientas para el entendimiento de las bases físicas del cambio climático, las políticas de mitigación, las desigualdades asociadas y las acciones individuales y colectivas que se podrían tomar en pos de la adaptación y mitigación al cambio climático.

5) REFLEXIONES

La implementación de herramientas de popularización tienen como objetivo principal colaborar en una construcción de puentes de conocimiento y/o saberes en los cuales los usuarios, la sociedad, el público puedan participar de manera activa y que sea de fácil acceso. El desarrollo de herramientas de popularización de la ciencia es fundamental en el marco de la problemática socio-ambiental que atraviesa la sociedad global con respecto al cambio climático. Asimismo, es un aporte en el marco de la recientemente aprobada Ley 27621: Ley para la Implementación de la Educación Ambiental Integral en la República Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el proyecto CONICET-PIBAA 28720210100758CO.

REFERENCIAS

Nieto Galán, Agustí. 2011: Los públicos de la ciencia. Expertos y profanos a través de la historia. Madrid: Fundación Jorge Juan-Marcial Pons Historia, 2011.». *Dynamis: Acta Hispanica ad Medicinæ Scientiarumque Historiam Illustrandam*, [en línea], 2012, Vol. 32, Núm. 2, p. 501-5

CARACTERIZACIÓN DE EXTREMOS COMPUESTOS DE VIENTO Y PRECIPITACIÓN EN EL SUDESTE DE SUDAMÉRICA

Carla Viazzo¹, María Laura Bettolli^{1,2}
cviazzo@at.fcen.uba.ar. Autora correspondiente.

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO)

²Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IFAECI)

Palabras clave: concurrencia de extremos, regresión logística, bases reticuladas, estacionalidad

1) INTRODUCCIÓN

Los eventos extremos climáticos representan grandes amenazas para diversos sectores socioeconómicos. En ocasiones, los eventos extremos individuales pueden interactuar y ocurrir asociados a un mismo sistema meteorológico; a tales eventos se los denomina extremos compuestos y sus impactos asociados pueden aumentar considerablemente respecto a los extremos individuales.

Dentro de los eventos compuestos, la ocurrencia conjunta de extremos de viento y precipitación cerca de superficie es de especial interés debido a sus potenciales impactos, tales como crecidas repentinas y mayores daños estructurales, entre otros. Este tipo de eventos ha sido estudiado, principalmente en el hemisferio norte (e.g., Martius et al., 2016; Chen et al., 2025; Zscheischler et al., 2021). En Argentina, y en particular en el Sudeste de Sudamérica (SESA), estos extremos compuestos no han sido explorados en la literatura. Más aún, no tenemos conocimiento de estudios de extremos individuales de viento en la región.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es caracterizar los eventos extremos compuestos de viento y precipitación en SESA, utilizando distintas bases de datos. Dado el vacío de información sobre extremos de viento, se incluye, además, una caracterización de los extremos individuales, como paso necesario para entender su contribución a los extremos compuestos y también aportar a su entendimiento.

2) DATOS

Se usaron las variables precipitación acumulada diaria (PP) y velocidad del viento máxima diaria a 10 m (WS10_MAX) provenientes de cuatro bases de datos: ERA5, MSWX, WFDE5 y NASA Power. En ERA5, MSWX y WFDE5, ambas variables fueron calculadas a partir de datos subdiarios, mientras que en NASA Power se descargaron directamente PP y WS10M_MAX, dado que los datos horarios sólo están disponibles a partir del año 2000. En la Tabla I se resumen las principales características de las fuentes de datos utilizadas.

Fuente de datos	Resolución temporal	Resolución horizontal	Periodo temporal	Referencia
ERA5	Horaria	0.25°x0.25°	1979-2024	https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview
WFDE5	Horaria	0.5°x0.5°	1979-2019	https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/derived-near-surface-meteorological-variables?tab=overview
NASA Power	Diaria	0.5°x0.625°	1981-2024	power.larc.nasa.gov/
MSWX	3-horaria	0.1°x0.1°	1979-2024	gloh2o.org/mswx/

Tabla I: Principales características de las fuentes de datos empleadas en el presente trabajo. Para más información consultar los links de referencia.

En particular, WFDE5 aplica una corrección de bias a los datos horarios de ERA5. De forma similar, MSWX incluye a ERA5 entre sus fuentes de datos. NASA Power, por el contrario, está basada en MERRA2 y resulta independiente de las otras fuentes utilizadas en el presente trabajo.

Todas las bases fueron interpoladas, mediante interpolación bilineal, a la resolución más fina, correspondiente a MSWX. Dada la naturaleza poco frecuente de los eventos extremos, y más aún de extremos compuestos, se usó la mayor cantidad de datos disponibles hasta 2024 en cada fuente de información, sin limitar el análisis a un período coincidente entre todas.

La región de estudio es SESA (20°S-40°S y 65°O-45°O).

3) METODOLOGÍA

Los extremos de viento y precipitación se definieron como los días en que se superó el percentil 95, calculado sobre todo el período disponible para cada base de datos de manera individual. Luego se realizó un estudio de la estacionalidad de los mismos, calculando la frecuencia relativa de ocurrencia en cada estación del año.

La ocurrencia de eventos compuestos se identificó como los casos en que, habiéndose registrado un evento extremo de precipitación, también se observó un evento extremo de viento el mismo día, el día anterior o el día posterior, ya sea en el mismo punto de retícula o a una distancia máxima de 0.1° en latitud o longitud. Esta flexibilización espacio-temporal permite capturar eventos en los que ambos extremos están asociados a un mismo sistema meteorológico aunque no se produzcan exactamente al mismo tiempo o en el mismo lugar. Enfoques similares fueron adoptados en otros estudios de eventos compuestos (e.g., Martius et al., 2016; Zscheischler et al., 2021).

Para cuantificar la ocurrencia de extremos se usaron dos enfoques. El primero consiste en contar el número de eventos compuestos y calcular su frecuencia relativa respecto a los extremos individuales de precipitación. En este caso se estudió, al igual que con los extremos individuales, su estacionalidad.

En el segundo enfoque utilizó una regresión logística para cuantificar la razón de momios (OR, por sus siglas en inglés) de que ocurra un evento extremo de precipitación dado que ocurrió un extremo de viento:

$$\text{Logit}(p(t)) = \beta_0 + \beta_1 \text{WS10M_EXT}(t) \quad (1)$$

donde $\text{WS10M_EXT}(t)$ es la serie temporal binaria que indica la ocurrencia (1) o no ocurrencia (0) de eventos extremos de viento el día anterior o el día posterior, ya sea en el mismo punto de retícula o a una distancia máxima de 0.1° en latitud o longitud. $\text{Logit}(p(t))$ equivale a:

$$\text{Logit}(p(t)) = \log(p(t) / (1 - p(t))) \quad (2)$$

donde $p(t) = P(\text{PP_EXT}(t) = 1 \mid \text{WS10M_EXT}(t))$ representa la probabilidad condicional de observar un evento extremo de precipitación dado un valor $\text{WS10M_EXT}(t)$. $\text{PP_EXT}(t)$ es la serie temporal análoga a $\text{WS10M_EXT}(t)$, pero para los extremos de precipitación.

De esta forma, de las ecuaciones 1 y 2, se desprende que OR, dada por $\exp(\beta_1)$, cuantifica la relación entre ocurrencia de extremos de viento y la probabilidad de observar un extremo de precipitación. En particular, valores de $\text{OR} > 1$ indican que la ocurrencia de un extremo de viento aumenta la probabilidad de ocurrencia de extremos de precipitación, mientras que valores de $\text{OR} < 1$ señalan lo contrario.

4) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1a,f,k,p presenta la frecuencia relativa de ocurrencia extremos compuestos en relación con la ocurrencia de extremos individuales de precipitación, para las bases de datos ERA5, MSWX, WFDE5 y NASA Power, respectivamente. En general, los extremos compuestos son más frecuentes sobre el océano y en las zonas costeras, con valores que superan el 30%. En Uruguay, Paraguay, el centro de Argentina y el sur de Brasil, la frecuencia de ocurrencia de compuestos oscila entre 20% y 40% según la base de datos analizada. Por otro lado, en el norte de SESA y el noroeste argentino (NOA), la frecuencia de compuestos resulta relativamente baja (inferior al 12%). Esta menor frecuencia podría deberse a la fuerte estacionalidad, desfasada, de los extremos individuales en la región: los eventos de precipitación son más frecuentes en verano (DEF), mientras que los de viento predominan en primavera (SON) (no mostrado).

En la mayor parte de la región continental, la ocurrencia de compuestos es mayor el SON (Figura 1e,j,o,t), abarcando alrededor del 40% del total de extremos compuestos identificados. En el sur de Brasil y en la zona precordillerana, principalmente al norte de 30°S , sin embargo, más del 50% de los extremos compuestos ocurren en DEF (Figura 1b,g,l,q). En general, sobre el océano y en las zonas costeras se observa que la ocurrencia de compuestos es mínima en DEF y máxima en JJA (Figura 1d,i,n,s). Sobre el océano, no obstante, las frecuencias presentan valores similares en MAM, JJA y SON, de entre 25% y 30%.

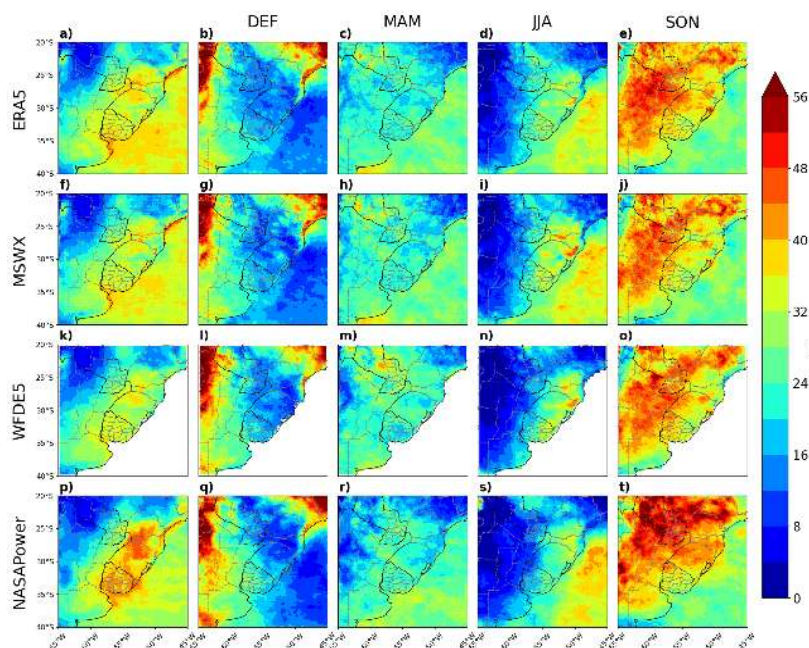


Figura 1: Primera columna (a,f,k,p): frecuencia relativa (%) de ocurrencia de eventos extremos compuestos de viento y precipitación, en relación con la ocurrencia de eventos extremos individuales de precipitación. Columnas siguientes: distribución estacional (%) de los eventos compuestos respecto del total de eventos compuestos identificados, para DEF (segunda columna; b,g,l,q), MAM (tercera columna; c,h,m,r), JJA (cuarta columna; d,i, n,s) y SON (quinta columna; e,j,o,t). Cada fila corresponde a una base de datos distinta: ERA5 (primera fila; a-d), MSWX (segunda fila; f-j), WFDE5 (tercera fila; k-o) y NASA Power (cuarta fila; p-t).

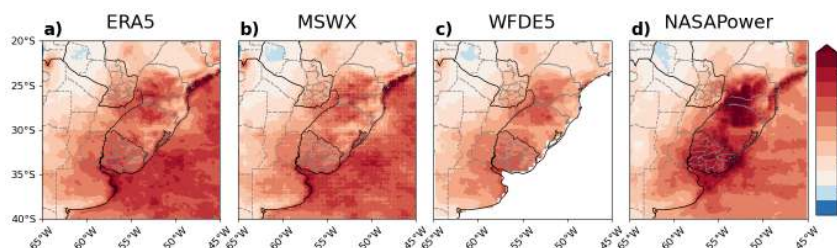


Figura 2: OR para ERA5 (a), MSWX (b), WFDE5 (c) y NASA Power (d).

Las distribuciones espaciales de frecuencia de extremos compuestos, y su distribución estacional, resultan, en general, consistentes entre las distintas bases de datos, aunque se observan diferencias en la intensidad de los valores. En particular, las mayores diferencias se observan para NASA Power, que presenta frecuencia de ocurrencia de compuestos sistemáticamente más altas en Uruguay, Paraguay, el centro de Argentina y el sur de Brasil (Figura 1p). Además, el porcentaje de compuestos que ocurren en SON (Figura 1t) en gran parte de la región continental es más intenso para esta base de datos. Estas diferencias pueden atribuirse a que NASA Power es la única fuente de datos estudiada que es independiente de ERA5.

Los resultados de la regresión logística (Figura 2) son consistentes con los observados en los campos de frecuencia relativa de ocurrencia de compuestos (Figura 1a,f,k,p). Al igual que en el análisis de frecuencias, NASA Power presenta diferencias respecto a las demás bases de datos, con valores de OR más altos en Uruguay, Paraguay, el centro de Argentina y el sur de Brasil (Figura 2d). En general, los OR son mayores a 1, lo que indica que en SESA la ocurrencia de un extremo de viento aumenta la probabilidad de que ocurra un extremo de precipitación.

REFERENCIAS

- Chen, T.-C. y Di Luca, A., 2025:** Characteristics of precipitation and wind extremes induced by extratropical cyclones in Northeastern North America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130, 6, e2024JD042079. doi: <https://doi.org/10.1029/2024JD042079>.
- Martius, O., Pfahl, S. y Chevalier C., 2016:** A global quantification of compound precipitation and wind extremes. *Geophysical Research Letters*, 43, 14, 7709–7717. doi: <https://doi.org/10.1002/2016GL070017>.
- Zscheischler, J., Naveau, P., Martius, O., Engelke, S. y Raible, C.C., 2021:** Evaluating the dependence structure of compound precipitation and wind speed extremes. *Earth System Dynamics*, 12, 1, 1–16. doi: <https://doi.org/10.5194/esd-12-1-2021>.

RECURSOS DE FORMACIÓN PARA LA VIGILANCIA DE RIESGOS MEDIANTE INFORMACIÓN POR SATÉLITE: CONTRIBUCIÓN DEL CENTRO DE EXCELENCIA SMN A LA INICIATIVA ALERTA TEMPRANA PARA TODOS

Luciano Vidal¹, Romina Mezher¹, Juan Ignacio Vera Amor¹
lvidal@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: VLab, EW4ALL, modelos conceptuales.

1) INTRODUCCIÓN

Dentro del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina, funciona desde 2009 un Centro Regional de Excelencia en Capacitación en Meteorología Satelital (CoE), en el marco de la iniciativa Laboratorio Virtual para la Educación y Capacitación en Meteorología Satelital (VLab) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Dentro del CoE se han puesto en marcha diversas iniciativas para la región, como el diseño de modelos conceptuales (Campos, 2020), especialmente para los países de habla hispana. La formación en temas relacionados con los satélites es un reto constante debido a las nuevas tecnologías e innovaciones del sector, que requieren una actualización continua de los servicios meteorológicos. En 2023, la OMM aprobó su plan estratégico 2024-2027, en el que destaca la iniciativa «Alerta temprana para todos». Uno de sus principales objetivos es el monitoreo de amenazas y sus impactos para la mejora de las alertas hacia la población. Durante 2024, el SMN CoE Argentina fue invitado por VLab a desarrollar materiales de capacitación para Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) en idioma español como parte de esta iniciativa en las Asociaciones Regionales III y IV. El objetivo de este proyecto es promover el uso de herramientas satelitales para el monitoreo de las principales amenazas de la región, de manera que puedan ser utilizadas para mejorar los sistemas de alerta temprana en los SMHN. Por su impacto en la aviación y sectores afines, el CoE SMN Argentina seleccionó dos amenazas para el desarrollo de material didáctico: la niebla y las cenizas volcánicas.

2) PROPUESTA PEDAGÓGICA

El material didáctico se organiza acorde a la hoja de ruta presentada en la Figura 1. Allí, se realiza una introducción a la amenaza y a la importancia de generar herramientas para la detección de la misma. Se presentará material de lectura sobre el Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) ya que ambas amenazas son muy bien monitoreadas por dicho satélite. El módulo continua con el análisis de uno o varios casos reales utilizando las herramientas previamente presentadas, descargando datos de satélite y generando imágenes por medio de notebooks de lenguaje Python. Por último, se realiza una actividad final de evaluación para cerrar el módulo.

3) NIEBLA

La niebla tiene un impacto significativo en el desarrollo normal de las actividades socioeconómicas, ya que afecta directamente la seguridad operacional de la actividad aerocomercial. Por ello, una vigilancia y previsión adecuadas para mejorar los sistemas de alerta temprana es una prioridad para los SMHN. La información proporcionada por los satélites meteorológicos es fundamental para el diagnóstico y seguimiento de las zonas afectadas por niebla y estratos bajos con alta resolución temporal y espacial, como las capacidades que ofrece el actual satélite GOES-19 (antes GOES-16). El objetivo de este recurso es proporcionar a los estudiantes herramientas satelitales para identificar y monitorear la niebla utilizando varios productos, como las BTDS o compuestos RGBs. Para ello, se

dispondrá material práctico para el análisis de tres situaciones diferentes de niebla registradas en Argentina que afectaron a varios aeropuertos de la región.

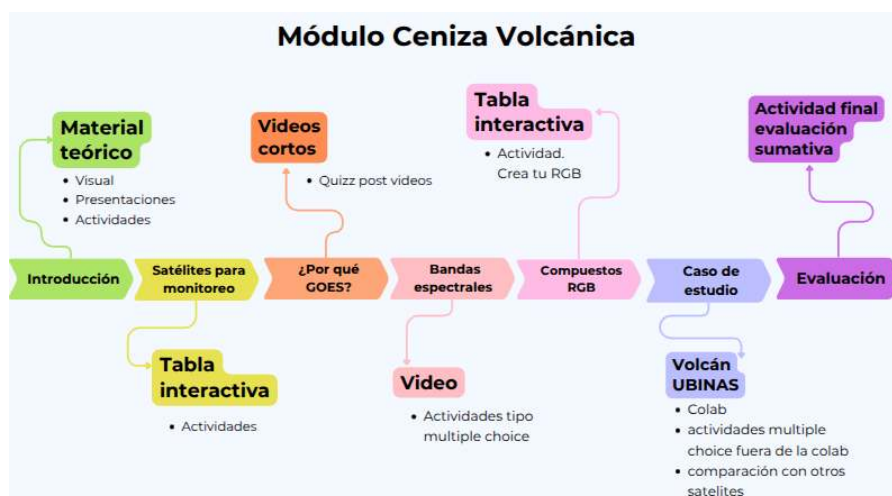


Figura 1: Estructura propuesta para el desarrollo de cada módulo de entrenamiento.

4) EMISIONES VOLCÁNICAS

La dispersión de cenizas volcánicas en la atmósfera, originada por las erupciones volcánicas y la erosión eólica de los depósitos de cenizas volcánicas (denominada resuspensión), provoca impactos ambientales y afecta a las actividades humanas a diferentes escalas, por lo que su detección es de suma importancia. El Centro de Aviso de Cenizas Volcánicas (VAAC) Buenos Aires del SMN vigila la presencia de cenizas volcánicas para contribuir a la seguridad aérea. Es posible vigilar y seguir las nubes de ceniza volcánica mediante sensores remotos montados a bordo de satélites. El recurso formativo explorará múltiples herramientas para monitorizar las diferentes etapas de la pluma de ceniza del volcán Ubinas utilizando productos de los satélites BTM, Ash/SO₂ RGB y ABI-L2-VAAF. Los estudiantes analizarán los datos de la erupción del 19 de julio de 2019 durante la cual una gran explosión expulsó cenizas y gases a más de seis kilómetros sobre el cráter del volcán. Mediante el uso de este recurso, los estudiantes obtendrán conocimientos sobre los sistemas de alerta temprana para los peligros relacionados con las cenizas volcánicas, mejorando sus capacidades para apoyar la seguridad de la aviación y los esfuerzos de respuesta ante desastres.

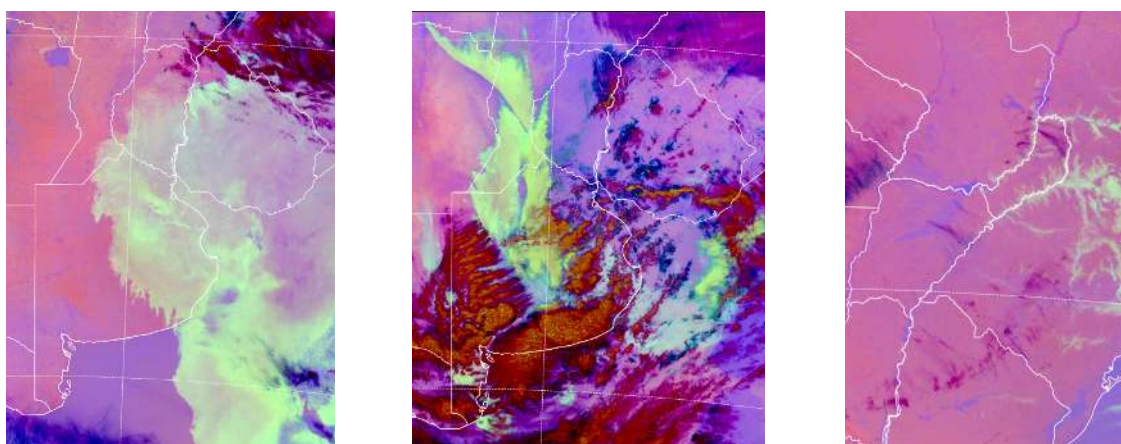


Figura 2: (Izq.) Banco de niebla aislado sin nubes encima. (Cen.) Banco de niebla aislado con nubes encima. (Der.) Bancos de niebla en valles fluviales. El producto que se muestra es el compuesto RGB microfísica nocturna.

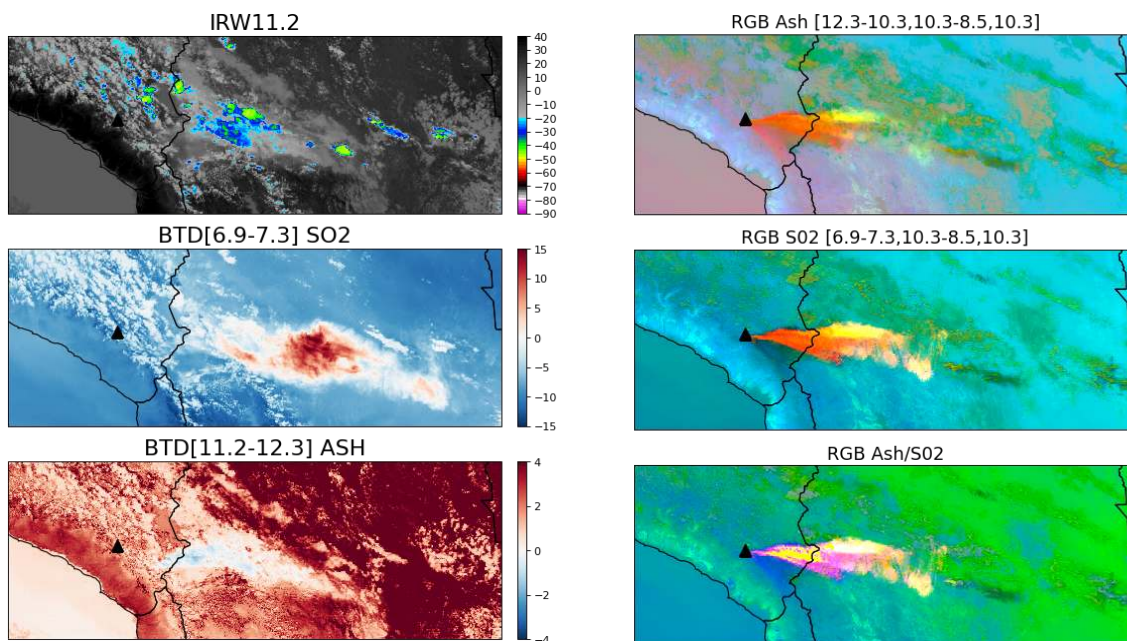


Figura 3: Ejemplo de diferentes productos del satélite GOES-16 para el análisis de las emisiones asociadas a la erupción del Volcán Ubinas (Perú) del día 19 y 20 de julio de 2019.

5) CONCLUSIONES

Mediante el desarrollo de estos recursos de formación, el CoE SMN de Argentina pretende reforzar las capacidades de los SMHN de la región, mejorando su capacidad de vigilancia y respuesta a los peligros atmosféricos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Organización Meteorológica Mundial y al Grupo de Coordinación para los Satélites Meteorológicos por su continuo apoyo a los miembros del Laboratorio Virtual para la Educación y Capacitación en Meteorología Satelital (VLab).

REFERENCIAS

- Campos, M. y L. Veeck., 2020.** From research to operational training: Conceptual models empower young professionals. ETR-27 - Volume I – New Pedagogical Approaches. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10403
- Jahani, B., Karalus, S., Fuchs, J., Zech, T., Zara, M., and Cermak, J., 2025:** Algorithm for continual monitoring of fog based on geostationary satellite imagery, Atmos. Meas. Tech., 18, 1927–1941, <https://doi.org/10.5194/amt-18-1927-2025>
- Rodriguez, D. M. y L. Vidal, 2020:** Monitoreo de ceniza volcánica con la nueva generación de satélites polares. Nota Técnica SMN 2020-72. <https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/1374>
- Rodriguez, D., L. Vidal y S. Osore, 2021:** Algoritmo de identificación de nubes de ceniza volcánica en imágenes satelitales - Parte 1: sensor VIIRS. Nota Técnica SMN 2021-116. <https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/1758>
- Rodríguez, D., J. A. Díaz, M. Maurizi, L. Vidal y S. Osore, 2023:** Algoritmo de identificación de nubes de ceniza volcánica en imágenes satelitales - Parte 2: sensor ABI. Nota Técnica SMN 2023-155. <https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/2651>
- Yabra, M.S., de Elía, R., Vidal, L. and Nicolini, M., 2025:** Observational Characterisation of Fog Events Over the Main Argentine Airports. Int J Climatol e8858. <https://doi.org/10.1002/joc.8858>

INTENSIDAD DE OLAS DE CALOR : APLICANDO EL EXCESS HEAT FACTOR EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES

Carrozza Micaela^{1,2}, Cano Hidalgo Milagros Liana^{1,2},
Guerra Sol Zoé^{1,2}, Irurzun Adrián¹
micaelacarrozza@gmail.com. Autor/a correspondiente.

¹ Jardín Botánico Carlos Thays (JBCT)

² Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)

Palabras clave: Olas de Calor, Excess Heat Factor, Intensidad.

1) INTRODUCCIÓN

Una Ola de Calor se define como un período de tiempo que presenta temperaturas anómalamente cálidas e impactantes durante la temporada cálida de la región de estudio (WMO, 2023). Varios trabajos han abordado la frecuencia y duración de las Olas de Calor siguiendo distintos índices, como también se ha analizado el impacto de estos fenómenos en la salud humana, la agricultura y ganadería, entre otros aspectos.

De igual forma, nunca se ha compuesto un parámetro de intensidad para un día perteneciente a una Ola de Calor. Una categorización de este estilo facilitaría el entendimiento de la evolución de las Olas de Calor, como también ayudaría a poder realizar un análisis más profundo sobre el desarrollo de las mismas.

El Excess Heat Factor (EHF) (Nairn, 2014) es un índice utilizado para cuantificar la severidad térmica del fenómeno a trabajar, y combina información sobre temperaturas recientes, y temperaturas bajo condiciones climáticas previas. Es utilizado internacionalmente para la evaluación de impactos térmicos en el humano teniendo en cuenta la aclimatación del mismo a las altas temperaturas (Oliveira, 2022).

Este trabajo entonces, se centrará en definir una categorización de intensidades de un día de Ola de Calor, en base al EHF. Este índice se aplicó a datos de la estación Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA), para luego hacer un análisis de los resultados obtenidos.

2) METODOLOGÍA

Se utilizaron datos horarios de temperatura del aire desde el año 1981 hasta 2025 de la estación OCBA, otorgados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) correspondientes a los meses del período cálido (noviembre a marzo), y sobre estos se aplicó la metodología para calcular el EHF que se describe a continuación.

El índice EHF se construye con dos componentes principales: el índice de significancia (EHI_{sig}) y el índice de aclimatación (EHI_{accl}). El primero compara la temperatura media de tres días consecutivos promediados, con el percentil 95 de temperatura media climatológica (Ecuación 1). El segundo, compara este promedio de temperaturas medias de tres días consecutivos con un promedio de las temperaturas medias de los 30 días anteriores (Ecuación 2).

$$EHI_{sig} = (T_i + T_{i+1} + T_{i+2})/3 - T_{95} \quad (1)$$

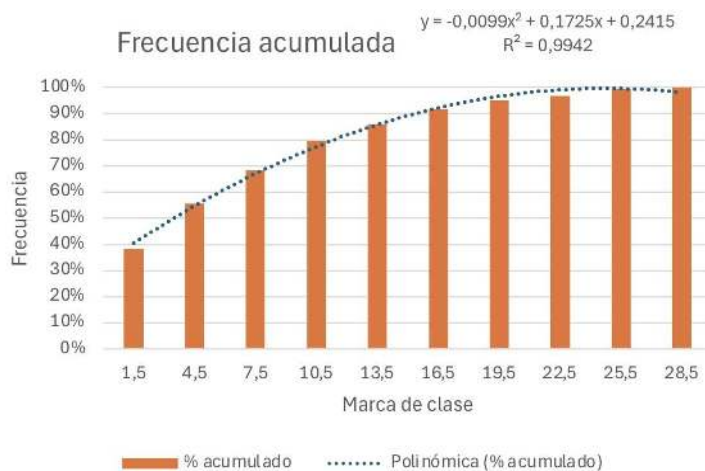
$$EHI_{accl} = (T_i + T_{i+1} + T_{i+2})/3 - (T_{i-1} + \dots + T_{i-30})/30 \quad (2)$$

Entonces, por un lado, si el EHI_{sig} es positivo, los tres días consecutivos son considerados

anormalmente cálidos; y por otro lado, si el EHI_{accl} es positivo, estos tres días consecutivos son además anormalmente más cálidos que el pasado inmediato (30 días anteriores).

Finalmente, el EHF es el producto entre el EHI_{sig} y el máximo entre 1 y el EHI_{accl} . Si EHI_{sig} es positivo, entonces estamos en presencia de un día que puede pertenecer a una Ola de Calor. Además, si el EHI_{accl} es positivo, este amplifica el valor de EHF, “intensificándolo”, ya que no se logró una aclimatación hacia los días consecutivos cálidos que se utilizaron para la medición.

Luego, a partir de los datos de temperatura del aire provistos por el SMN, se identificaron todos los días individuales que cumplían con ese criterio de EHF, y se definió como Ola de Calor cada conjunto de tres o más días consecutivos que cumplan con dicho criterio. Posteriormente, se extrajo el valor del EHF correspondiente a cada día de cada evento de Ola de Calor, con el fin de cuantificar su intensidad.



Con esta información se analizó el comportamiento de la distribución acumulada de valores de EHF, observando que los datos podrían ajustarse adecuadamente mediante una función polinómica (Figura 1). Este ajuste permitió estimar con mayor precisión los cuartiles de la distribución, a partir de los cuales se establecieron categorías de intensidad para cada día de las Olas de Calor (normal, moderada, intensa y extrema), en función del rango de EHF correspondiente a cada cuartil.

Figura 1. En naranja, frecuencia acumulada. En línea punteada, línea de tendencia polinómica representando el ajuste de la frecuencia de valores de EHF.

3) RESULTADOS

A partir de los cuartiles se obtuvieron los siguientes intervalos para categorizar la intensidad de cada día correspondiente a las Olas de Calor:

0 - 13,5	Normal
13,6 - 15,5	Moderado
15,6 - 17,5	Intenso
17,6 - INF	Extremo

Tabla I. Intervalos para cada categoría de intensidad de días de Olas de Calor.

Se indicó a qué categoría pertenece cada día de Olas de Calor desde el año 1981 hasta 2025 de la estación OCBA. Los resultados son presentados en la Figura 2, y muestran que el grupo correspondiente a intensidad normal presenta el mayor número de ocurrencias con un 82,7% del total, seguido por el grupo denominado extremo, que representan un 8,6%. También se puede observar que la mayoría de las Olas de Calor que alcanzaron intensidades extremas, lo hicieron en los primeros días, con mayor recurrencia en el día 2 de la Ola de Calor.

Distribución de intensidades en días de olas de calor (1981-2025)

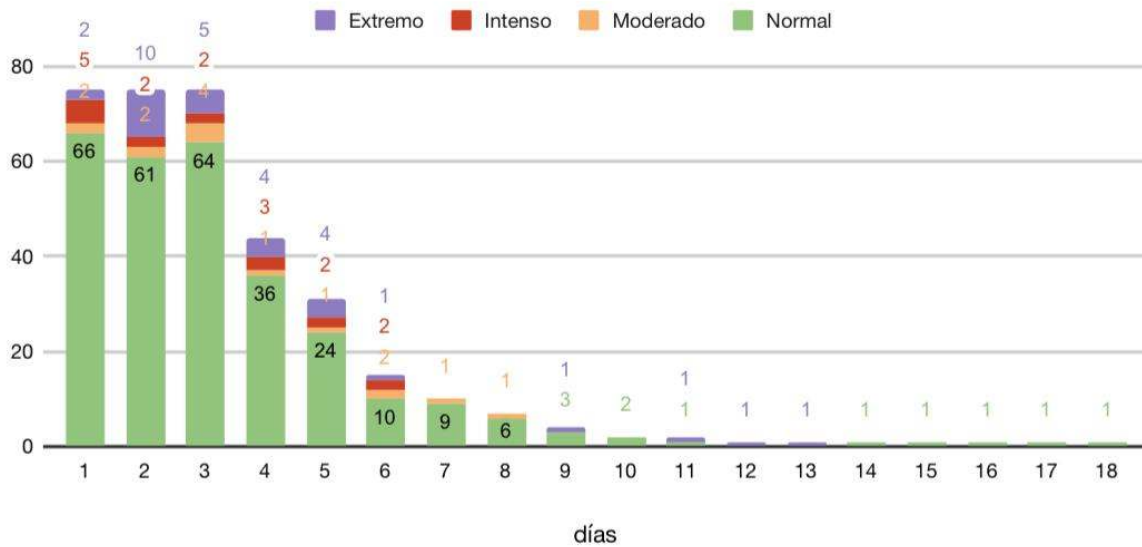


Figura 2. Distribución de las intensidades en días de Olas de Calor para los años 1981-2025.

CONCLUSIONES PRELIMINARES

A partir de este primer análisis, se observa un predominio de días con intensidad normal. No obstante, la proporción de eventos extremos, que alcanza el 8,6% del total constituyendo la segunda categoría con mayor números de casos, resulta un hallazgo relevante con implicancias significativas para investigaciones posteriores siendo el estudio de dichos eventos fundamental para el diseño de estrategias preventivas ante Olas de Calor.

Comprender cómo varía la intensidad durante una Ola de Calor es crucial para anticipar momentos de mayor riesgo de salud y optimizar las medidas de respuesta ante estos fenómenos extremos.

REFERENCIAS

Nairn, J. R., Fawcett, R. J., 2014: The Excess Heat Factor: A Metric for Heatwave Intensity and Its Use in Classifying Heatwave Severity. *International journal of environmental research and public health* vol. 12,1 227-53.

Oliveira, A, Lopes, A., Soares, A., 2022: Excess Heat Factor climatology, trends, and exposure across European Functional Urban Areas. *Weather and Climate Extremes*, Volume 36, 100455

World Meteorological Organization, 2023: Guidelines on the Definition and Characterization of Extreme Weather and Climate Events. WMO-No. 1310.

FORTALECIMIENTO DE CAPACIDADES EN LOS SERVICIOS METEOROLÓGICOS EN EL MARCO DEL PROYECTO ENANDES+

Romina Mezher¹, Lorena Ferreira¹, María de los Milagros Skansi¹, Paula Romero¹,
Moira Doyle², Marcela Perez³, Elian Wolfram¹
rmezher@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Dep. de Cs. de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN-UBA)

³Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH-UNL)

Palabras clave: Educación, Desarrollo de capacidades, Proyecto regional.

1) INTRODUCCIÓN

El proyecto ENANDES+ (Fortalecimiento de las capacidades de adaptación al clima mediante la implementación de servicios climáticos) (WMO, 2023) busca mejorar y fortalecer la capacidad de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) en seis países andinos (Colombia, Perú, Chile, Ecuador, Bolivia y Argentina) para producir información sobre el tiempo, el clima y el agua (TAC) con la contribución de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). Además de reforzar las capacidades técnicas, ENANDES+ tiene como objetivo mejorar la coordinación institucional con la incorporación de nuevas herramientas y procesos, involucrar a los actores sociales en el codiseño de servicios TAC y optimizar la coordinación y planificación regional generando sinergias positivas y fortaleciendo las capacidades humanas en la región. En este sentido, el proyecto ENANDES+ establece un ejemplo de buenas prácticas en lo que se conoce como Cooperación Sur-Sur (CSS) o “*twinning*” (Gubler y otros, 2020) que se basa en superar los desafíos del desarrollo mediante esfuerzos conjuntos y abordar problemas comunes. Un mecanismo clave de la CSS es fomentar en la mayor medida posible el intercambio colectivo de conocimientos y experiencias, y facilitar e intensificar la cooperación regional. Para que la coordinación técnica del proyecto se realice de forma efectiva se creó en el marco del mismo un grupo regional de expertos conocido como NUREX: Núcleo Regional de Experticia cuyos socios son los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos de Argentina, Perú, Colombia, Ecuador y Chile, el Centro Regional del Clima para el Sur de Sudamérica (CRC-SAS) y el Centro Regional del Clima para el Sudoeste de Sudamérica (CRC-OSA), el Centro Regional de Formación de Argentina (CRF-ARG) y el Centro Regional de Formación de Perú (CRF-PE), MeteoSwiss y la Universidad para las Ciencias Aplicadas de Berna.

Este trabajo estará enfocado en las contribuciones realizadas por el CRF-ARG, el CRC-SAS y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina para el desarrollo de capacidades en cada uno de los *twinning* creados para el proyecto y cómo esta colaboración inter-institucional y entre países aporta para alcanzar un objetivo común en la región Andina.

2) PLANIFICACIÓN Y ACTIVIDADES REALIZADAS

En el marco del proyecto se crearon 29 *twinning* distribuidos en 9 áreas temáticas bajo la coordinación de 5 líderes temáticos. El SMN lidera el *twinning* “Heladas” y el *twinning* “WIGOS” y el CRC-SAS lidera el *twinning* “Clima” y el de “Datos”. Por su parte, el CRF-ARG participa activamente en cada uno de esos *twinning*, relevando las necesidades de capacitación y organizando un plan de trabajo e implementación conjunta con cada socio del proyecto. Las capacitaciones también se coordinan con el CRF-Perú con el objetivo de evitar duplicidades y además compartir tutores y optimizar el material de enseñanza. Durante el año 2024 y 2025 se realizaron ocho cursos con su modo de impartición y cantidad de participantes que se detallan en la Tabla 1

En el *twinning* de “WIGOS” se llevó a cabo un curso virtual entre septiembre y octubre de 2024 destinado a las regiones III y IV de OMM, con participación de países de habla hispana

de Sudamérica y Centroamérica. La capacitación incluyó encuentros sincrónicos y actividades en plataforma Moodle del CRF-ARG (Figura 1). Posteriormente, en mayo de 2025, se dictó una capacitación presencial en el SMN de cuatro días sobre este mismo tema con profesionales del SMN, MeteoSwiss y el Centro Regional WIGOS de Argentina. Asistieron técnicos de Perú, Colombia, Ecuador, Chile y Brasil y se hizo énfasis en la elaboración de planes de implementación WIGOS y el manejo de datos de terceros.

Otro ejemplo de buenas prácticas dentro de un *twinning* es el de “Heladas”, que lidera SMN y coopera junto con MeteoSwiss y cuyo objetivo es fortalecer capacidades del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de Ecuador. En este contexto, se desarrollaron capacitaciones virtuales (Figura 1, derecha) sobre calibración de modelos para la implementación de pronósticos de heladas en diferentes tipos de terreno, a través de la plataforma Moodle del CRF-ARG y encuentros sincrónicos durante los meses de septiembre y noviembre de 2024 con participación de todos los países integrantes de ENANDES+.

Además, el proyecto contempla misiones técnicas de profesionales de MeteoSwiss a los países andinos. En Argentina, el SMN recibió la visita de dos especialistas involucrados en actividades relacionadas con gestión de datos, estaciones meteorológicas, certificaciones y WIGOS, entre otras actividades. Durante sus visitas se realizaron talleres híbridos en mayo y noviembre de 2024 con participación presencial y virtual de todos los países del proyecto y países integrantes del CRC-SAS y CRC-OSA (Figura 1, izquierda). Algunos de los temas dictados fueron: Gestión de Datos, Metas de la Homogeneización, Medición de Nieve en Suiza, entre otros. A todo el material se puede acceder sin matricularse en la plataforma Moodle: <https://crf.smn.gob.ar/course/view.php?id=254>.

3) PROXIMOS PASOS

El proyecto ENANDES+ concluirá en 2026, y uno de sus principales objetivos será convertirse en un ejemplo de buenas prácticas en materia de cooperación entre países y centros regionales. Para cumplir con este propósito, el Centro Regional de Formación de Argentina tiene previsto desarrollar nuevas capacitaciones y talleres, en coordinación con los socios del proyecto en cada uno de los *twinning*, con el fin de fortalecer capacidades y mejorar los productos y servicios que cada institución ofrece a la sociedad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se financió gracias al proyecto ENANDES+ y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) con el apoyo de todos los socios del proyecto y la Organización Meteorológica Mundial.

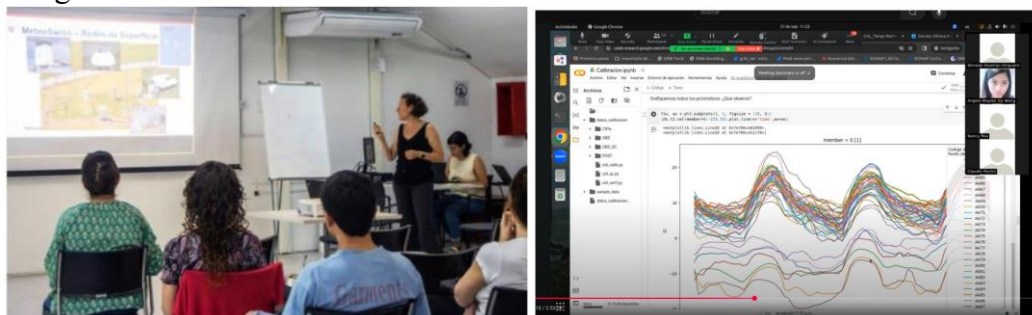


Figura 1. Taller de análisis de datos realizado en el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina con participación presencial y virtual (izquierda). Encuentro sincrónico en curso virtual sobre calibración de pronósticos de temperaturas (derecha).

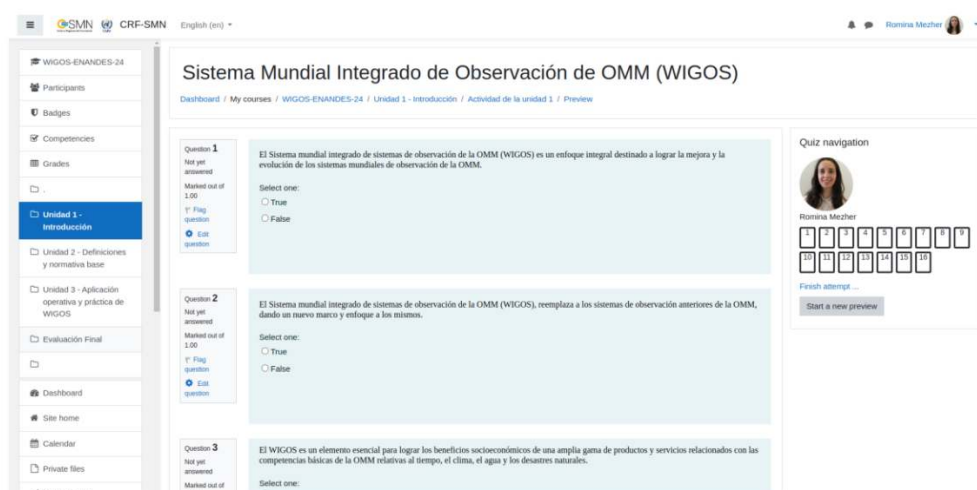


Figura 2. Actividades en plataforma Moodle del CRF-ARG durante el curso virtual WIGOS.

Twining	Nombre del curso	Duración	Modo de impartición	Participantes
WIGOS	Sistema Mundial Integrado de Observación de OMM (WIGOS)	6 semanas	Virtual	121
WIGOS	WIGOS: Buenas prácticas y cadena de valor en sistema de observación meteorológica	4 días	Presencial	19
HELADAS	Calibración de Pronósticos de Temperatura	3 semanas	Virtual	12
HELADAS	Capacitación de postprocesamiento de MeteoSwiss	3 días	Virtual	12
SEB	Generación de capacidades para la interacción con usuarios de servicios meteorológicos, climáticos y ambientales	4 semanas	Virtual	53
DATOS	Obtención de datos a partir de fajas pluviográficas	3 días	Virtual	20
DATOS	Talleres de datos	5 días	Híbrido	50
CLIMA	Uso del paquete R ClimIndVis para el cálculo de índices climáticos	5 días	Virtual	29

Tabla 1. Cursos organizados por el proyecto entre 2024 y 2025.

REFERENCIAS

Gubler, S., Rossa, A., Avalos, G., Brönnimann, S., Cristobal, K., Croci-Maspoli, M., Dapozzo, M., Van der Elst, A., Escajadillo, Y., Flubacher, M., Garcia, T., Imfeld, N., Konzelmann, T., Lechthaler, F., Liniger, M., Quevedo, K., Ramos, H., Rohrer, M., Schwierz, C., . . . Wüthrich, B., 2020. Twinning SENAMHI and MeteoSwiss to co-develop climate services for the agricultural sector in Peru. *Climate Services*, 20, 100195. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2020.100195>

WMO, 2023. <https://wmo.int/files/enandes-fact-sheet>

PRESENTACIÓN DE LA TECNICATURA SUPERIOR EN METEOROLOGÍA, INSTITUTO MISIONERO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

Leonardo Rivero¹, Mariano Pianovi¹
leorivero1229@gmail.com. Leonardo Rivero

¹Instituto Misionero de Educación Superior (IMES)

Palabras clave: FORMACIÓN Terciaria, Meteorología, Vacancia

1) INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La gestión del gobierno de la provincia de Misiones, en lo referente al cuidado del territorio y del ambiente tiene una mirada afín a la ciencia y, específicamente, a los cambios que se producen en el clima, dado que los mismos impactan directamente en tres ejes fundamentales del desarrollo provincial: industrial-agropecuaria, conservación de la biodiversidad y turismo. El Grupo de Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en el Resumen para responsables de políticas (2021) informa los cambios observados y los escenarios futuros para cada región de nuestro planeta. De dicho informe, los tomadores de decisión jurisdiccionales observaron que los cambios en factores climáticos ya registrados en la región de Misiones han sido: un aumento en fenómenos de calor extremo y un aumento en fenómenos de precipitaciones intensas; mientras que, los pronósticos de escenarios futuros proyectan para esta región de Argentina, un aumento en las medias regionales de temperatura, precipitaciones y humedad del suelo.

Frente a estos desafíos climáticos surgió una mesa intergubernamental donde la preocupación fundamental se focalizó en la vacancia de profesionales expertos en el área del clima y de la meteorología que posee la provincia y la necesidad de cubrirlos en un plazo no muy extenso, se precisan profesionales idóneos que permitan interpretar científicamente y técnicamente los fenómenos climáticos extremos y que puedan dar aportes para las acciones de mitigación que se deban llevar a cabo. De allí, surgió primeramente la posibilidad de una formación de grado, trámite que demoraría muchos años para su establecimiento, por tal motivo, en una mesa integrada por distintos actores afectados por la problemática y realizándose consultas diferentes organismos específicos formadores y expertos en meteorología, tales como el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los océanos (DCAO) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se propuso lanzar una formación profesional de observadores meteorológicos (2023) y una Tecnicatura Superior en Meteorología como una cohorte de tres años (2025).

Desde el año 2021 el Instituto Misionero de Educación Superior (IMES) asume este desafío propuesto por el gobierno provincial realizando consultas bibliográficas pertinentes y a expertos educativos especializados en la elaboración y propuesta de planes de estudios para carreras de nivel terciario. Se consultaron y evaluaron los planes de estudios de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) y de la Universidad Nacional de los Comechingones (UNCCH), ambas, altas casas de estudios que tienen en su oferta educativa Tecnicaturas Universitarias en Meteorología. Al mismo tiempo se consulta la Guía para la aplicación de normas de enseñanza y formación profesional en meteorología e hidrología de la Organización Meteorológica Mundial (OMM- N° 1083),

Como resultado de este trabajo surge la Resolución 318/23 del Servicio Provincial de la Educación Privada de Misiones (SPEPM), la cual crea la Tecnicatura Superior en Meteorología que se pudo instrumentar con el presupuesto provincial del año 2025 y se ha lanzado como única cohorte por el término de tres años. Dicho plan toma como modelo estructurante la Tecnicatura en Meteorología de la UNLP.

2) OBJETIVOS GENERALES DE LA CARRERA

La Tecnicatura Superior en Meteorología formará profesionales con conocimientos generales de la meteorología y la que les permita a los egresados:

- Manejar e interpretar la información meteorológica de diferentes fuentes para la elaboración de informes técnicos acordes a su formación.
- Elaborar pronósticos meteorológicos utilizando las técnicas y tecnología afín.
- Integrar desde el perfil técnico grupos de trabajo interdisciplinarios aportando los conocimientos técnico-científicos de su formación.

3) ESTRUCTURA DE LA CARRERA

La carrera se estructura de acuerdo con el modelo de carreras terciarias dispuestas por las normativas nacionales y provinciales, sobre dicha estructura se ensambla el diseño de la Tecnicatura en Meteorología de la UNLP y se incorporan asignaturas que hacen a la pertenencia regional, tales como agrometeorología, introducción a la hidrometeorología y sistemas de alerta de eventos extremos

La estructura curricular se divide en cuatro tipos de formaciones: Formación General (FG), Formación de Fundamento (FF), Formación Específica (FE) y Formación de Prácticas Profesionalizantes (FPP).

Algunas asignaturas de la carrera son; ofimática, producción oral escrita, espacios de definición institucional, física 1 y 2, química, inglés, álgebra, análisis matemático, termodinámica, dinámica de la atmósfera, climatología, instrumentos de observación, meteorología dinámica, meteorología sinóptica, laboratorio de previsión del tiempo, micrometeorología, etc.

La carrera posee un total de 2128 horas cátedras anuales, desarrolladas durante tres ciclos lectivos. En la figura 1 se describen el resumen de las cargas horarias totales por tipo de formación.

Campos de	Horas Cátedra Semanales	Horas Cátedra Anuales	Porcentaje
Formación General (FG)	12	192	9,02%
Formación de Fundamento (FF)	21	464	21,80%
Formación Específica (FE)	52	1024	48,12%
Formación Prácticas Profesionalizantes (FPP)	14	448	21,05%
Total, Horas Cátedras	99	2128	100%

Figura 1: Tabla de cargas horarias totales de la carrera

4) MODALIDAD DE CURSADA

La carrera se desarrollará mediante una modalidad combinada que integra clases presenciales, híbridas y virtuales (sincrónicas y asincrónicas):

- Clases presenciales e híbridas: los estudiantes que residan a menos de 80 km de la ciudad de Posadas, sede donde se dictará la carrera, deberán asistir de forma presencial a las instalaciones del IMES. Aquellos que residan a mayor distancia podrán cursar de

manera híbrida.

- La metodología de enseñanza híbrida se caracteriza por la combinación de actividades presenciales y en línea, permitiendo a los estudiantes acceder a recursos digitales mientras participan en clases tradicionales.
- La metodología de enseñanza virtual se centra en el uso exclusivo de plataformas digitales para impartir educación, lo que se realiza a través del Campus Virtual con el que cuenta el IMES como herramienta didáctico-pedagógica, donde se aloja el material bibliográfico de lectura, videos, clases grabadas, foros de participación y actividades de evaluación en línea (cuestionarios, trabajos prácticos, etc.).

REFERENCIAS

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Impreso en octubre de 2021 por el IPCC, Suiza.

OMM-N° 1083. 2023. Guía para la aplicación de normas de enseñanza y formación profesional en meteorología e hidrología Volumen I — Meteorología.

RESOLUCION 318/23. SPEPM. Posadas 2023. Creación de la Tecnicatura Superior en Meteorología.

CARTOGRAFÍA SOCIAL PARTICIPATIVA COMO UNA ESTRATEGIA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO

**Rocío Juárez^{1*}, Andrea Benitez¹, Rocío Cano¹, Analía Pereyra¹, Yanina Azas^{2,3},
Lucía Curto^{1,4}, Diego Moreira^{1,4,5}, Federico A. Robledo^{1,4,5}**
rofjuarez@gmail.com

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

²Universidad de Buenos Aires, Facultad de Medicina. Buenos Aires, Argentina.

³Ministerio de Salud de la Provincia de Buenos Aires. Argentina

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Buenos Aires, Argentina.

⁵CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: inundaciones urbanas, sistema de alerta temprana, creación comunitaria de mapas.

1) INTRODUCCIÓN

Las Prácticas Sociales Educativas (PSE) son una propuesta académica de la Universidad de Buenos Aires (UBA) orientada a la articulación de conocimientos técnicos y científicos durante la formación curricular con las necesidades y demandas de la sociedad. Estas prácticas ponen en valor el aprendizaje y su adquisición en la trayectoria académica de cada estudiante, así como una mejora en un territorio concreto en un contexto de vulnerabilidad social, atendiendo sus necesidades. En este marco, el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN) implementó la PSE “Construcción Comunitaria de mapas de inundaciones urbanas” (Barboza y otros, 2022) en el ámbito del proyecto “Anticipando la Crecida”. El objetivo principal de la misma es la construcción comunitaria de mapas de inundaciones urbanas con comunidades locales de la Cuenca Matanza-Riachuelo, promoviendo así el acceso a información territorial clave para la gestión del riesgo (Cano y otros, 2023; Robledo y otros, 2024). En este trabajo se relata la experiencia del taller participativo llevado a cabo en mayo de 2023, en el contexto de la PSE, con estudiantes de una escuela del Barrio Esperanza en Virrey del Pino, La Matanza, Buenos Aires.

2) METODOLOGÍA

En este trabajo se generaron mapas comunitarios, resultados de talleres participativos con miembros de la comunidad. El mapa permite identificar y georreferenciar lugares vulnerables frente a eventos de inundación tales como viviendas, escuelas y otras infraestructuras del territorio. Los talleres se enfocan en sectores urbanos y sectores rurales, fundamentalmente en espacios educativos, centros barriales, e instancias de gobierno municipal como por ejemplo defensas civiles, entre otros.

En el marco de la PSE, durante Mayo del 2023, se realizó un encuentro participativo en la Escuela Primaria N°179. Dicha escuela se encuentra en el Barrio Esperanza a 600 m del río Matanza en Virrey del Pino. En el barrio Esperanza se registraron varias inundaciones, siendo la última inundación severa registrada en octubre de 2019, y la última inundación registrada en 2020 (hasta la fecha de realización del taller). Esto implica una situación de riesgo constante para las personas vulnerables que viven en el barrio, aún más para las que se encuentran cercanas al río dada la baja pendiente que tiene allí y la infraestructura de las calles y casas.

Se llevaron al taller dos mapas del barrio y uno de la cuenca, ambos realizados por el Instituto de Geografía Nacional (IGN). Se le pidió a cada alumno/a de la escuela que identifique su vivienda en el mapa. Se determinó un sistema de colores para indicar las inundaciones: verde si nunca se inundó su vivienda, amarillo si el agua alcanzó la calle pero no ingresó al hogar, y rojo si el agua alguna vez ingresó a la vivienda. Se indicaron en el mapa con strass autoadhesivo del color correspondiente. Además se preguntó a los/as estudiantes la altura que alcanzó el agua en caso en que su vivienda se hubiera inundado alguna vez. También se llevaron a cabo encuestas para los/as alumnos/as para evaluar el acceso que tienen a la información meteorológica.

3) RESULTADOS

La información recopilada durante el taller, a partir del aporte de los/as estudiantes, permitió la elaboración de un mapa con indicadores espaciales de afectación por inundaciones, como se observa en la Figura 1. Más del 50% de los estudiantes indicó haber experimentado situaciones de inundación en sus viviendas y aproximadamente el 34% indicó que el agua únicamente alcanzó la calle. Esto sugiere que la comunidad del barrio tiene una alta exposición a las inundaciones, especialmente en eventos de mayor severidad, ante los cuales varios/as estudiantes indicaron haber tenido que evacuar sus viviendas.

Respecto a la altura alcanzada por el agua en el interior de las viviendas durante las inundaciones, los estudiantes reportaron valores que oscilaron entre un mínimo de 10 cm y

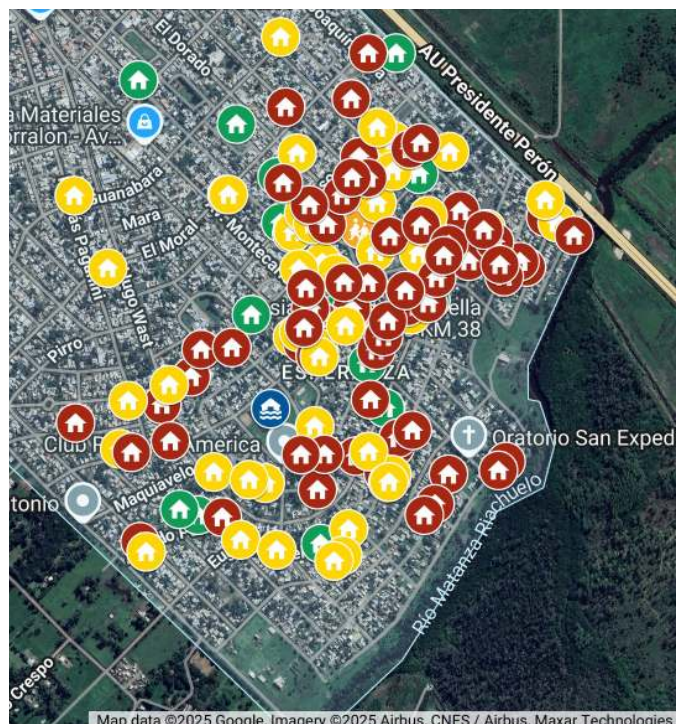


Figura 1: Mapa del barrio Esperanza con las viviendas georeferenciadas indicadas por los estudiantes durante el taller. Se presentan con círculos rojos las viviendas donde se registró ingreso de agua durante inundaciones, en amarillo las zonas donde el agua alcanzó solo la calle y en verde las zonas que no presentaron afectación.

un máximo de 1,50 m. Cabe recalcar que estas alturas son estimativas ya que se basan en el recuerdo de cada estudiante.

4) CONCLUSIONES

Se evidencia que los estudiantes de la escuela N° 179 se encuentran expuestos al riesgo, su situación es crítica y vulnerable frente a las lluvias. La mayoría de los/as alumnos/as sufrieron inundaciones al menos una vez. Particularmente, hicieron referencia a la tormenta del año 2019, durante la cual el nivel del agua en algunos casos alcanzó 1,5 m de altura. Ante esta situación, comentaron que sus familias debieron evacuarse y desplazarse a viviendas de otros familiares frente al riesgo que conlleva quedarse en una vivienda anegada.

El contexto territorial del barrio evidencia una alta vulnerabilidad a las inundaciones, por lo cual la implementación de un Sistema de Alerta Temprana podría contribuir a la reducción de los daños ocasionados por las lluvias. Cabe destacar que el riesgo no es tan solo por el desborde del Río Matanza-Riachuelo, sino también por el desborde de un humedal, al cual denominaron la "Laguna". Esta zona, por sus características, presenta una escasa capacidad de infiltración, lo cual favorece la acumulación superficial del agua y genera anegamientos que pueden llegar a alcanzar alturas de hasta un metro.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio es financiado por el Programa ImpaCT.AR; el Programa Interdisciplinario de la UBA, PIUBACC 2023; UBANEX 2023 y el Programa de Fortalecimiento y Promoción de Proyectos de Ciencia Ciudadana - Convocatoria 2022.

REFERENCIAS

Barboza, M., Curto, L., Moreira, D., Robledo, F.A., 2022: Análisis de eventos de inundaciones en Quilmes con una perspectiva social. XIV Congreso Argentino de Meteorología (CONGREGMET XIV). Buenos Aires, Argentina.

Cano, R., Juárez, R., Benítez Zotelo, M.A., Pereyra, A., Barboza, M., Moreira, D., Robledo, F., Curto, L., 2023: Las Prácticas Socioeducativas como metodología de enseñanza y producción de servicios en torno a eventos hidrometeorológicos. Jornadas Socioambientales 2023. FCEN-UBA. Buenos Aires, Argentina.

Robledo F. A., Prudente C., Testani N., Moreira D., Curto L., Basilico M., Belizán E., Berra A., Montecinos L., Calloca N., Contin M.L., Kazimierski L., Micou P., Re M., Sosa S., Juarez R., Cano R., Benitez A., Pereyra A., Rodeiro N., Duggan M., Nassi J., 2024: “Abordaje de impacto de inundaciones junto con las comunidades: Experiencia de Coproducción de conocimiento local en Argentina”. Conferencia Meteorología Panamericana. San Pablo, Brasil.

RED DE MONITOREO HIDROLÓGICO COMUNITARIO A TRAVÉS DE LA COPRODUCCIÓN DE CONOCIMIENTO

Camila Prudente^{1,2,3}, Federico Robledo^{2,3,4}, Valeria A. Hernández^{5,6}

camila.prudente@cima.fcen.uba.ar. Autor/a correspondiente.

¹Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN),
Buenos Aires, Argentina

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la
Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IFAECI) - IRL 3351-
CNRS-CONICET-IRD-UBA. Buenos Aires, Argentina

⁴Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de
Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

⁵Programa de Estudios Rurales y Globalización (PERyG), Escuela Interdisciplinaria de Altos
Estudios Sociales (EIDAES), Universidad Nacional de San Martín (UNSAM),

⁶UMR CESSMA, Institut de Recherche pour le Développement, France

Palabras clave: Adaptación - Diálogo - Territorio

1) Introducción y marco teórico

Este trabajo presenta la experiencia de diseño y desarrollo de una Red Comunitaria de Monitoreo Hidrológico (RCBH) en el Departamento Bermejo, provincia del Chaco, Argentina, como parte del proyecto [*CLIMAX – Climate Services Through Knowledge Coproduction*](#), una iniciativa sudamericana-europea. El proyecto surge como respuesta a múltiples desafíos persistentes en América del Sur para la provisión de servicios climáticos regionales y locales, tales como la escasa comprensión de los procesos climáticos, la falta de observaciones en territorio, las dificultades para la apropiación social del conocimiento científico y la ausencia de canales eficaces de diálogo entre saberes académicos y locales para la toma de decisiones.

Este proceso se enmarca en el enfoque de “ciencia implicada” (Hernández et al 2022), que propone un diálogo no instrumental entre actores sociales, una valoración simétrica de los distintos sistemas de conocimiento y el reconocimiento de las asimetrías de poder que atraviesan las relaciones entre saberes y entre actores. A partir de este marco se diseñó una metodología de coproducción de servicios climáticos estructurada en ciclos, que favorece el diálogo disciplinar entre ciencias climáticas y antropológicas, el intercambio interdisciplinario entre ambas, y la articulación intersectorial con actores académicos y no académicos interesados en lograr soluciones a un problema co-definido.

2) Proceso de construcción de la RCBH

El trabajo se desarrolló en el Departamento Bermejo, una región de humedales del noreste argentino, bordeada por los ríos Paraguay y Paraná, y cuyos ríos locales desembocan en el

Paraguay (Fig. 1). El proceso comenzó en 2016 a partir del trabajo de campo etnográfico realizado por investigadores en ciencias antropológicas, lo que permitió comprender las dinámicas socioterritoriales y sus principales problemáticas ligadas al vínculo entre la producción agroalimentaria y la información climática, así como identificar actores locales interesados en la coproducción de servicios climáticos. A partir de 2017, con la participación de investigadores de ciencias del clima en talleres intersectoriales realizados en Bermejo, el espacio de trabajo “Diálogo Bermejo” coprodujo diversas herramientas de pronóstico local al servicio de la producción agroalimentaria de la región: una red comunitaria de monitoreo de precipitaciones, una aplicación para difusión de la información climática, boletines radiales, entre otras (Hernández et al 2022). En el marco del diálogo abierto, en 2018 surgió el interés por monitorear los ríos locales, cuyo desarrollo continúa hasta la actualidad: actualmente, la red de monitoreo hidrológico cuenta con once escalas hidrométricas instaladas en lugares estratégicos definidos por la comunidad, de fácil acceso para su visualización y registro, así como una fototeca y una base de datos con las alturas registradas desde 2018.

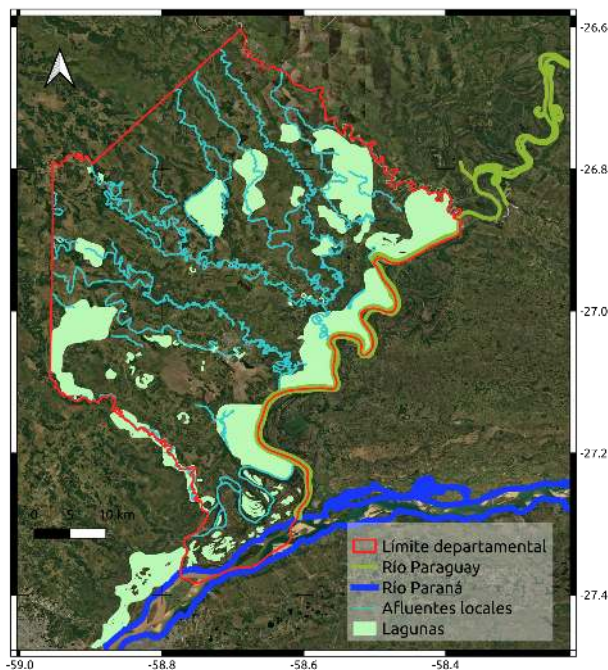


Figura 1. Departamento de Bermejo, Provincia de Chaco y los cuerpos de agua de la región.

El proceso de desarrollo de la RCBH comienza con la instalación conjunta de nuevas escalas en sitios elegidos por quienes habitan y conocen el territorio. A continuación, se capacita a las personas encargadas del monitoreo en la medición y registro de datos. Luego, la información es sistematizada y difundida a la población a través de diferentes canales como redes sociales, una radio local y un boletín mensual. A partir del diálogo entre saberes locales y científicos, se construye un nuevo conocimiento sobre el comportamiento de los ríos, que en

algunos casos ha permitido anticipar y explicar fenómenos complejos, como el efecto de remanso hidrodinámico provocado por crecidas del Paraná que afecta río arriba al río Paraguay y sus afluentes locales de Bermejo.

Uno de los principales aportes de esta experiencia es la transformación del conocimiento cualitativo, basado en la memoria y observación local, en información cuantificable que permite evaluar impactos con mayor precisión. La comunidad desarrolla, además, mayor autonomía para producir y compartir conocimiento sobre los niveles de los ríos, fortaleciendo su capacidad de adaptación frente a eventos extremos. La RCBH constituye una herramienta para mejorar la adaptación frente al cambio climático y fenómenos extremos, no sólo por la

información que genera, sino también por la forma en que dicha información se produce. Al integrar conocimientos científicos y locales en un proceso sostenido y participativo, esta experiencia muestra el valor de los procesos de coproducción de conocimiento y la co-construcción de servicios climáticos socialmente relevantes y apropiables en el marco de equipos interdisciplinarios en diálogo con actores no académicos.

REFERENCIAS

Hernández, V., Riglos, M. F. F., & Vera, C., 2022. Addressing climate services in SouthAmerican Chaco region through a knowledge coproduction process. *Global Environmental Change*, 72, 102443.

COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE DURANTE OLAS DE CALOR EN AMBIENTES CON INSOLACIÓN SOLAR Y BAJO SOMBRA. IMPACTO DEL RIEGO EN LA TEMPERATURA.

Franco L. Visconti C.^{1,2}, M. Milagro Balladares^{1,2}, Federico Florio^{1,2}, Adrián Irurzun¹
franco.visconti02@gmail.com. Autor/a correspondiente.

¹Jardín Botánico Carlos Thays (JBCT)

²Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)

Palabras clave: Olas de Calor, temperaturas del aire, humedad relativa, mitigación, riego.

1) INTRODUCCIÓN

El aumento en la frecuencia y duración de las Olas de Calor representa un desafío creciente para la gestión urbana y la salud pública. Es por eso que resulta fundamental comprender cómo distintos ambientes urbanos responden térmicamente a condiciones extremas, y cómo prácticas simples, como el riego controlado, influyen en la temperatura del aire y de su entorno.

Este trabajo compara datos de temperatura del aire de dos estaciones meteorológicas automáticas ubicadas en el Jardín Botánico Carlos Thays (JBCT), en un entorno urbano en el barrio de Palermo, Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), Argentina. Al ser el JBCT el 1° sitio de referencia de la Red de Refugios Climáticos ante Olas de Calor de CABA (Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires (GCBA), febrero 2025) en su entorno, y especialmente durante Olas de Calor, se perciben marcadas diferencias térmicas entre ambientes soleados y sombreados del mismo. Motivado por lo anterior, se implementó un monitoreo sistemático y continuo de la temperatura del aire y humedad relativa (T&HR), con el fin de analizar el comportamiento térmico de dos entornos con distinta exposición solar -soleado y sombreado- bajo condiciones de riego por aspersión y en su ausencia, evaluando su potencial como estrategia de mitigación frente a temperaturas extremas y Olas de Calor.

Para ello el JBCT cuenta con una estación meteorológica automática en funcionamiento desde fines del año 2022, la que denominaremos “Estación Sol” (Figura 1) que, además de registrar datos de T&HR, también lo hace del resto de las variables meteorológicas cada 10 minutos. Encontrándose en un ambiente bajo insolación diurna según las normas de instalación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2020). Adicionalmente, se instaló en la temporada estival 2023-2024 un sensor integrado de T&HR teniendo su abrigo meteorológico a 1,5 mts. de altura del suelo, que denominamos “Estación Sombra” (Figura 2) por estar bajo frondosas copas de árboles dentro del JBCT; distando ambas estaciones unos 110 mts. lineales (Figura 3).



Figura 1: Estación Sol



Figura 2: Estación Sombra



Figura 3: Jardín Botánico Carlos Thays con las ubicaciones de las estaciones Sol y Sombra

2) METODOLOGÍA

Se estudiaron 5 eventos de Olas de Calor para los veranos 2023-2024 y 2024-2025; de acuerdo con la definición proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, s.f): Una Ola de Calor es un evento en el cual las temperaturas máximas y mínimas superan o igualan, por lo menos durante 3 días consecutivos y en forma simultánea, a ciertos valores umbrales que dependen de cada localidad (percentil 90 del semestre cálido octubre-marzo). Para la estación Observatorio Central Buenos Aires (OCBA) los valores umbrales son (calculados a partir del período 1961-2010):

Temperatura máxima = 32.3 °C | Temperatura mínima = 22 °C

A partir de los eventos de Olas de Calor se analizaron un total de 1504 datos de temperatura del aire registrados cada 10 minutos, de los cuales 670 corresponden a la temporada estival 2023-2024 y 834 a la de 2024-2025. Dentro de este conjunto, se seleccionaron los períodos con mayor diferencia térmica entre condiciones de sol y sombra, con el objetivo de evaluar el impacto del riego en la temperatura del aire bajo esas distintas condiciones de exposición. El análisis se estructuró en torno a tres situaciones: sin aplicación de riego en ninguna estación, con riego controlado en la “Estación Sol”, y con riego controlado en la “Estación Sombra”.

3) RESULTADOS

En condiciones normales, es decir, sin la aplicación de riego, se utilizaron datos del 06/02/24, correspondientes a una Ola de Calor del verano 2023-2024. Al graficar la T&HR en ambas estaciones (Figura 5), se observa que entre las 11:00 y 16:30 la diferencia térmica varía entre 2°C y 3°C, con un descenso de temperatura del aire y aumento en la humedad relativa en ambas estaciones a partir de las 16:30, asociado a la ocurrencia de cielo cubierto y precipitación leve durante dicho día.

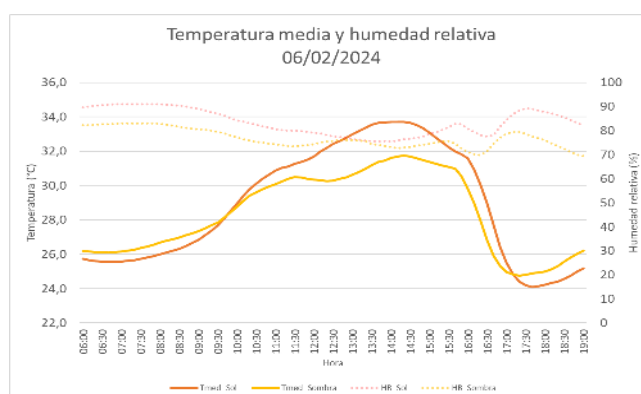


Figura 5: Temperatura media y humedad relativa para “Estación Sol” en naranja y “Estación Sombra” en amarillo para el 06/02/2024.

A partir de lo hallado, se propuso continuar estudiando las diferencias entre la temperatura del aire en dichos ambientes aplicando riego controlado entre las 14:30 a 16:00 horas, siempre durante días de Ola de Calor.

Como resultado se obtuvo que para la “Estación Sol” en el día 15/01/2025 la temperatura del aire desciende aproximadamente 3°C debido al riego aplicado entre las 14:00-15:12 horas. Generando que, entre las 15:00-16:24 hs. la temperatura del aire de la “Estación Sol” se encuentre por debajo de la de la “Estación Sombra”, e invirtiendo su diferencia, la cual llegó a

-1,4 °C, y teniendo a su vez en ese periodo un leve aumento en su humedad relativa bajo una intensidad de radiación de 824 W/m². (Figura 6).

Por otro lado, el 16/01/2025 se replicó la misma configuración experimental, pero esta vez regando el suelo donde se ubica la “Estación Sombra”. En consecuencia, además de tener un aumento en la humedad relativa, la temperatura del aire en dicha estación presentó un descenso de 5 °C, generando una diferencia térmica de 6,7°C respecto a la “Estación Sol” en los horarios de riego propuestos (Figura 7).

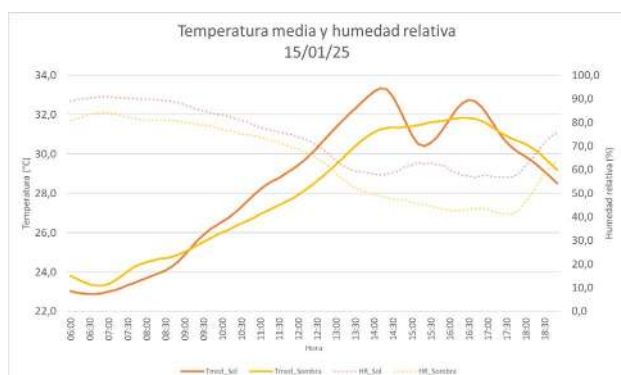


Figura 6: Temperatura media y humedad relativa para “Estación Sol” en naranja y “Estación Sombra” en amarillo para el 15/01/2025.

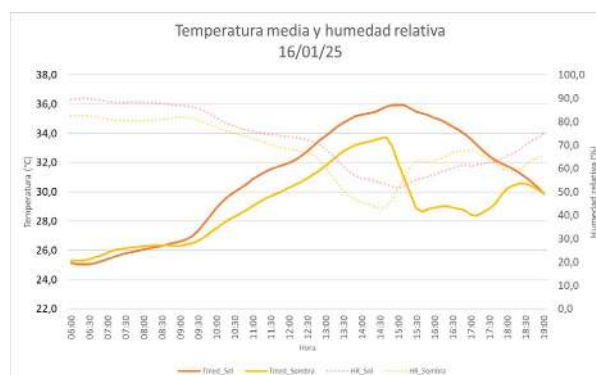


Figura 7: Temperatura media y humedad relativa para “Estación Sol” en naranja y “Estación Sombra” en amarillo para el 16/01/2025.

4) CONCLUSIONES PRELIMINARES

Los resultados obtenidos permitieron verificar que, durante ocurrencias de Olas de Calor en la Ciudad de Buenos Aires, las diferencias térmicas entre ambientes soleados vs. sombreados con frondosa vegetación arbórea son significativas, llegando hasta unos 7°C menos en ambientes sombreados bajo condiciones de riego por aspersión. Esta práctica, de simple implementación y accesible, especialmente en espacios verdes urbanos que ya posean riego por aspersión, representa una herramienta muy útil y de gran escalabilidad para mejorar el confort térmico urbano y contribuir al bienestar de la población ante ocurrencia de Olas de Calor.

5) REFERENCIAS

Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires (febrero 2025). *Red de Refugios Climáticos ante Olas de Calor de la Ciudad*. Subsecretaría de Ambiente. <https://buenosaires.gob.ar/adaptacion/red-de-refugios-climaticos-de-la-ciudad-de-buenos-aires>

Organización Meteorológica Mundial. (OMM,2020). Guía de instrumentos y métodos de observación Volumen I – Medición de variables meteorológicas (WMO-No. 8), edición 2021/2018. https://community.wmo.int/en/activity-areas/imop/wmo-no_8

Servicio Meteorológico Nacional (SMN,s.f). <https://www.smn.gob.ar/estadisticas>

METEOROLOGÍA-AGRONOMÍA EL ACOPLE PERFECTO PARA ENTENDER Y ANTICIPARNOS A LA CAMPAÑA ACTUAL

Natalia Gattinoni¹, María José Dickie^{2,3}, Pablo Mercuri¹
gattinoni.natalia@inta.gob.ar

¹ Instituto de Clima y Agua - CIRN - INTA Castelar

² Agencia de Extensión Rural - INTA Cañada de Gómez

³ Facultad de Ciencias Agrarias - UNR

Palabras clave: comunicación, pronósticos, decisiones

1) INTRODUCCIÓN

Durante toda la historia, la variabilidad climática ha condicionado las producciones agropecuarias y principalmente las producciones en secano. Sin embargo, en la actualidad hemos evidenciado distintos eventos extremos que afectaron a los principales cultivos del país y por lo tanto afectaron el PBI nacional. Por ejemplo, en el año 2022 se caracterizó por ser un año climáticamente adverso en cuanto a registros pluviométricos, provocando una disminución en el área sembrada nacional; solo se implantó el 10% de superficie de maíz temprano en la zona núcleo de producción, representando la menor siembra de maíz temprano de los últimos 10 años.

La suma de la sequía con la ola de calor ocurrida en el mes de marzo 2023 provocó un escenario que impactó fuertemente en la merma de las estimaciones de los rendimientos, en un 40% menos de lo esperado a principios de la campaña (BCR, 2023). Las condiciones climáticas volvieron a ser el centro de atención, junto al manejo agronómico, con la expansión hacia el sur del área maicera del complejo dalbulus maidis-chicharrita, cuya aparición mantuvo niveles extraordinarios en el 2023 (Mahuad y otros, 2024).

Producir información climática para mejorar los procesos de toma de decisiones es un desafío que las instituciones académicas y operativas enfrentan cotidianamente (Hidalgo y otros, 2018). La generación de espacios de interacción con usuarios ha permitido a las instituciones explicitar objetivos que trascienden la provisión de información y que apuntan a visibilizar el valor y la calidad del servicio que brindan (Carabajal, 2018).

El INTA ha sido desde siempre, un medio de transferencia de la información climática hacia el productor debido a su presencia territorial, su vínculo directo con el sector agropecuario, y su capacidad para traducir el conocimiento técnico-científico en herramientas prácticas para la toma de decisiones en el campo.

Este trabajo tiene como objetivo compartir la experiencia de difundir información climática en jornadas agrícolas-ganaderas y medios de comunicación por tres profesionales de la institución.

2) RESULTADOS

Desde nuestro lugar en INTA y Facultad venimos trabajando en la generación de información climática para mejorar los procesos de toma de decisiones; donde analizar primeramente la interacción actual entre los factores climáticos y la producción agropecuaria para luego comunicarlo a los distintos actores del territorio ha sido parte del proceso de extensión que realizamos cotidianamente. Sin embargo, en los últimos años, la parte de transferencia dentro de este proceso se incrementó sustancialmente, y eso se puede cuantificar en el número de jornadas de capacitación realizada en los últimos cinco años, y en el número de asistentes que

les motiva participar de esta temática. Los momentos de mayor demanda de este tipo de jornadas son previo a la siembra de los cultivos invernales y estivales, luego en los momentos críticos del crecimiento y desarrollo de los mismos. En particular, esta demanda se acentuó a partir del 2020, donde las condiciones deficitarias de lluvias, que se mantuvieron durante tres campañas agrícolas, impactaron en una amplia región productiva. Y esto despertó el interés en informarse sobre cómo continuar tomando decisiones en un contexto climático complejo. Así mismo, es importante destacar que el aislamiento que transitamos durante el año 2020 debido a la pandemia COVID-19 nos propuso repensar las actividades de capacitación y difusión, siendo la virtualidad la opción que nos permitió continuar con las jornadas técnicas utilizando la plataforma ZOOM y MEET y a su vez, nos dio acceso a llegar a localidades o regiones más allá de nuestra área de trabajo. Como así también la incorporación del WHATSAPP para la comunicación diaria o semanal.

Probablemente la demanda de capacitación y actualización de información climática va de la mano de los avances científicos en los pronósticos del EL Niño- Oscilación del Sur (ENSO) y los pronósticos climáticos estacionales como herramientas para la toma de decisiones en los sistemas productivos. En estas jornadas, ya sea presenciales o virtuales, se generó un espacio de intercambio de conocimientos y demandas entre los participantes y los disertantes donde las consultas más comunes se centraron en conocer: ¿si será Niña o Niño?; ¿Cuál será la probabilidad de precipitaciones en los próximos días?; ¿Cuáles son los pronósticos de heladas tardías?; ¿estamos en un ciclo seco?, etc.

No solo se incrementó la demanda de jornadas técnicas, sino también nuestra participación en distintos medios de comunicación como por ejemplo radiales, TV y diarios digitales, en lo que no solo se analizó la campaña sino situaciones puntuales como por ejemplo las últimas lluvias ocurridas en Buenos Aires y su impacto en la producción, el análisis del déficit de precipitaciones en el sur de Santa Fe durante el mes de enero de 2025, por citar algunos ejemplos.

En virtud a la demanda de información que surgía de este tipo de encuentros, se realizaron entre 2020-2022 grupos focales con productores en distintas zonas productivas de Argentina con el objetivo de explorar el uso de la información climática desde el sector (Cristeche y otros 2024; Gattinoni y otros, 2022). En particular, el grupo realizado en Cañada de Gómez y coordinado por la Ing. Dickie, se explayó en remarcar que lo primero en consultar es el pronóstico del ENSO y que ante un planeamiento de sistema productivo esta información junto a la económica (costos-insumos) eran primordiales.

La tecnología de hoy permite tener al alcance información climática desde distintas fuentes, nacionales e internacionales y en distintas escalas temporales. En el caso de pronósticos a corto plazo, al intercambiar con los usuarios surgió que apps como Boosteagro y pronósticos como el elaborado desde el Instituto Meteorológico de Noruega eran los más consultados. Indicando que todos los días miran los pronósticos y citan “...cada uno tiene el pronóstico al que le confían...”. Mientras que otro de los participantes mencionaba: “...Y en un pronóstico puntual, no. ..., es como un mix que uno va consultando distintas fuentes y con eso te haces una idea o panorama...”.

En cuanto, a la consulta de información a largo plazo o trimestral el grupo mencionó como fuente de información al Servicio Meteorológico y al INTA. Acotando la siguiente percepción desde uno de los participantes: “...también lo que pasa es que son muy variables

las lluvias, a lo mejor vos decís si es seco y justo en tu zona, hubo una lluvia de 60mm y te cambió la historia...”, siendo afirmada por el resto de los integrantes del grupo. Sin embargo, se notó que la información climática estaba más orientada a la evolución del fenómeno ENSO que a los pronósticos estacionales.

3) COMENTARIOS FINALES

La experiencia adquirida en los últimos años en la difusión de información climática en jornadas agrícolas-ganaderas, medios de comunicación y, de la interacción con los participantes nos resultó sumamente satisfactoria. Nos permitió traer al diálogo conceptos básicos de climatología, de incertidumbre y de riesgo. Intercambiar con la audiencia sobre los beneficios efectivos y potenciales del uso de la información climática para la toma de decisión en el sector agropecuario y poder analizar entre todas situaciones particulares como por ejemplo sobre cómo el comportamiento anómalo de precipitaciones o temperatura afectan a los cultivos o a la dinámica poblacional de insectos.

Es fundamental destacar que si bien la información en su mayoría es de acceso libre y disponible en internet, la participación y la consulta en persona con profesionales de las instituciones sigue siendo altamente valorada. Consideramos que estos encuentros fortalecen la sinergia entre meteorología y agronomía, hoy esencial para integrar el conocimiento en la predicción climática con la toma de decisiones en la producción agropecuaria.

REFERENCIAS

Bolsa de Comercio Rosario, 2023. Siguen los recortes para la cosecha Argentina: la soja pierde 4 Mt y el maíz 3 Mt. <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/gea/estimaciones-nacionales-de-produccion/estimaciones/siguen-los-recortes-para-la-cosecha>

Carabajal, M. 2018. Vientos de cambio: repensando la comunicación de la información climática”, XIII Congreso Argentino de Meteorología, 6 al 19 de octubre de 2018, Rosario-Santa Fe. Actas del Congremet XIII.

Cristeche, E., Gattinoni, N., Cabrini, S., Pellerano, L., García, M.L. y Mercuri, P., 2024. Formas de acceso y uso de la información climática en el sector agropecuario: un análisis cualitativo, 54 Reunión Anual de la Asociación Argentina de Economía Agraria, 23 al 25 de octubre de 2024, Rosario, modalidad presencial.

Gattinoni, N., Cristeche, E., Cabrini, S., García, M.L. y Mercuri, P., 2022. Resultados preliminares del relevamiento del uso de información climática para la toma de decisiones en el sector agropecuario, III Seminario de Riesgo Agropecuario, 29 y 30 de Septiembre de 2022, modalidad presencial.

Hidalgo, C. y Carabajal, M., 2018. Coproducción de conocimiento: más de una década de tendencia climática trimestral. XIII Congreso Argentino de Meteorología, 6 al 19 de octubre de 2018, Rosario-Santa Fe. Actas del Congremet XIII.

Mahuad, A., Bertolotti, Guerra, Carabaca y Bindi, 2024. Spiroplasma: liberemos nuestro talento colectivo. CONGRESO MAIZAR 2024. 30/05/24 <https://www.maizar.org.ar/vertex.php?id=866>

DESAFÍOS COMUNICACIONALES EN LA DIFUSIÓN DE LOS ALERTAS DEL SAT-SMN EN EL MUNICIPIO DE LOMAS DE ZAMORA

Caterina Fossier^{1,2}, Analía Pereyra^{1,2}, Lautaro Montecino², Santiago De Lojo^{1,2}, Federico Robledo^{1,3}

catefossier@gmail.com, anapereyra.met@gmail.com

¹ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN), Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina.

² Dirección de Gestión Integral del Riesgo de Desastres, Subsecretaría de Cambio Climático, Municipio de Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina.

³ Centro de Investigaciones del Mar y de la Atmósfera (CIMA, UBA-CONICET), Argentina.

Palabras clave: sistemas de alerta temprana, SAT, comunicación

1) INTRODUCCIÓN

Los sistemas de alerta temprana (SAT) son sistemas integrales diseñados para brindar advertencias oportunas que permiten a las personas tomar medidas preventivas ante los peligros inminentes de los fenómenos climáticos (OMM, 2010). El SAT del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) emite alertas de niveles amarillo, naranja y rojo para diferentes fenómenos (lluvia, tormenta, viento, viento zonda, nevada y temperaturas extremas) (SMN, 2020). Estos son comunicados al público en general a través de su página web y su aplicación móvil, ambos con la posibilidad de actualización de la información en tiempo real. Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) el 95% de la población mundial tiene acceso a telefonía móvil (ITU, 2024), sin embargo esto no garantiza acceso a gran cantidad de información meteorológica.

El Municipio de Lomas de Zamora, en particular, es afectado por los eventos de lluvia, tormenta y viento. Siendo un territorio con otras complejidad como la presencia de arroyos que atraviesan la ciudad y la cercanía con el Río Matanza-Riachuelo, se tomó especial atención a la decisión de comunicar estos alertas de manera oficial y a escala local a través de las redes sociales del Municipio, o con la utilización de grupos de WhatsApp de vecinxs, referentes barriales, funcionarios municipales con acción territorial, entre otros.

La pieza comunicacional escogida para esto fue el formato de flyer, con diseños específicos para cada tipo y nivel de alerta. Por su carácter estático, que se contrapone a la inmediatez con la que se puede actualizar el SAT del SMN, fue necesario ajustar la estrategia y tomar decisiones operativas, a través de las cuales se buscó un balance entre la información oficial y la optimización de la comunicación hacia los vecinos y vecinas.

A través de este trabajo se busca analizar las estrategias utilizadas y proponer un camino hacia otros municipios para su implementación, que permita situar la información del SAT a nivel barrial.

2) METODOLOGÍA

Se analizaron los casos de los alertas emitidos por el SAT del SMN por Tormenta y Viento (los casos de alertas por lluvias suelen ser excepcionales), entre febrero y mayo de 2025. Se tuvieron en cuenta sus tipos y vigencias, así como las modificaciones que se dieron en el momento del evento, las piezas comunicacionales emitidas y sus cambios, si los hubiese, testeando las siguientes estrategias como árbol u hoja de ruta para la toma de decisiones para comunicar de manera situada en Lomas de Zamora:

- Debido a que el alerta puede salir hasta 72 hs antes de su vigencia, en ocasiones hubo cambios entre la primera emisión por parte del SMN y el momento del evento. Previendo esto, en estos casos se optó por esperar hasta 24 hs antes del evento para emitir con mayor seguridad el flyer correspondiente.
 - Con el objetivo de minimizar confusiones, prever modificaciones y a la vez adaptándose a la información emitida por el equipo de la dirección Emergencias de la Provincia de Buenos Aires, los flyers de alertas incluyeron en su vigencia únicamente el día y no el horario.
 - Si el alerta era válido para la madrugada y/o la mañana únicamente, se sugirió que, finalizado el evento, se elimine el flyer de redes para no generar desorientación en la comunidad.
 - En aquellos casos en los que hubo -para un mismo día o para dos días consecutivos- alerta de un nivel dado para un período de tiempo y de un nivel superior para otro, se decidió emitir la pieza comunicacional correspondiente al nivel máximo entre ambos.
 - A su vez, para las situaciones en las que estaban vigentes dos tipos de alerta diferentes, se optó por emitir únicamente el de nivel mayor. Por ejemplo, en un caso de alerta amarillo por viento y naranja por tormenta, se compartió el de tormenta. Se propuso, igualmente, emitir también el faltante, dado que se trataba de eventos con impactos diferentes.
 - Si el alerta era válido para dos días consecutivos, por ejemplo, un día a la noche y la madrugada siguiente, se decidió incluir ambos días en la vigencia, entendiendo que se trataba del mismo evento.
 - Se presentaron casos en los que, durante el evento, se actualizó el nivel de alerta del período siguiente de tiempo. Se observó, por ejemplo, que bajo la vigencia de un alerta amarillo por tormenta pronto a finalizar y teniendo luego otro período bajo alerta amarillo, este segundo se actualizó a naranja. Estos casos implicaron un obstáculo comunicacional en el que se evaluaron distintos factores, tales como el horario, disponibilidad del equipo de diseño y la difusión del flyer previo, para decidir (o no) emitir un flyer correspondiente al alerta actualizado.
- De manera similar, en ocasiones el alerta se extendió durante el mismo día, con lo cual el flyer ya emitido seguía teniendo validez.

3) RESULTADOS

En total, entre febrero y mayo 2025 se observaron 6 días con alertas naranja por tormentas, 17 días con alerta amarillo por tormentas y 2 días con alerta amarillo por vientos.

Las piezas comunicacionales diseñadas fueron publicadas en las redes sociales oficiales del municipio, y a su vez enviadas por Whatsapp para su difusión a funcionarios municipales con vinculación territorial directa y a referentes de instituciones de la sociedad civil. También se articuló con los referentes de la red de monitoreo comunitario de lluvias que posee el municipio. Esta placa circuló por grupos de whatsapp y estados de vecinos, alcanzando a la mayor parte del territorio, con especial aprovechamiento de los vecinos y vecinas de los 20 barrios ubicados en zonas inundables.

Al ser de fácil acceso y de rápido entendimiento, los vecinos referentes replican casi instantáneamente la información en sus redes personales, garantizando así su difusión plena. Asimismo, esta relación favorece el diálogo con los vecinos y vecinas que ante condiciones meteorológicas que parecen desfavorables, solicitan información para compartir con sus propias comunidades.

A continuación, se observan algunas piezas comunicacionales (Fig 1) a modo de ejemplo de

los flyers enviados, donde se puede observar que incluyen la fecha, el tipo de evento, el color relacionado con el nivel del alerta y algunas recomendaciones:



Figura 1: Imágenes ejemplo del diseño empleado para la comunicación del SAT en Lomas de Zamora.

4) CONCLUSIONES

Con el objeto de situar la comunicación del SAT a nivel municipal, para su difusión y efectividad se reflexionó sobre las limitaciones que posee un municipio para la previsibilidad y las modificaciones en tiempo real. Una vez definido el criterio, se vio que en la mayoría de los casos, cuando hubo modificaciones previas al evento, fue acertado aguardar para emitir la pieza comunicacional correspondiente, bajo el esquema discutido previamente.

Este procedimiento continúa en construcción para las variantes de eventos que puedan surgir, sin embargo resulta un paso positivo en la dirección de la comunicación de las alertas de un SAT, ya que rompe con la pasividad de la publicación en sitios web, o dependientes de una aplicación en especial, para llevar la información activamente a los territorios en un esquema de igual uso de tecnologías pero con mayor efectividad.

Cabe destacar el rol del personal técnico del municipio en el diseño e implementación de la estrategia dual (personas y tecnologías de la información) para situar el alerta del SMN a escala barrial y de manzanas a través de referentes locales, garantizando que la información meteorológica impacte por los mecanismos de comunicación cotidianos que utiliza la población. La articulación de capacidades científico-tecnológicas con la capacidad de comunicación y diálogo territorial de un gobierno local centrado en la comunidad permitió ampliar el alcance de la información meteorológica para avanzar en un sistema de alertas tempranas para todos y todas.

REFERENCIAS

ITU, 2024. Measuring digital development: Facts and Figures 2024

OMM, 2010. Directrices sobre sistemas de alerta temprana y aplicación de predicción inmediata y operaciones de aviso. OMM N°1159.

SMN, 2020. Preguntas frecuentes y definiciones del Sistema de Alertas Tempranas.

RIESGO DE MORTALIDAD POR OLAS DE CALOR EN CIUDADES DE ARGENTINA (2005-2019)

Francisco Chesini^{1,2}, Matilde Rusticucci^{1,3}

fran.chesini@gmail.com

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

²Grupo de Estudios en Salud Ambiental y Laboral, Departamento de Ambiente y Turismo (UNDAV)

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, (UBA)

Palabras clave: Olas de calor, mortalidad, ciudades.

1) INTRODUCCIÓN

Las olas de calor (OC) son una amenaza natural para la salud que se han vuelto más frecuentes e intensas a escala global debido al calentamiento del sistema climático (IPCC, 2021). Aunque no existe una definición universal para las OC, hay consenso en que éstas refieren a un período de al menos dos o tres días inusualmente cálido (McGregor et al, 2015). En Argentina el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2025) las define como un período de al menos 3 días consecutivos en los que las temperaturas máxima y mínima diarias son iguales o superiores al percentil 90 calculado a partir de los datos diarios durante los meses de octubre a marzo del período 1961-2010. A escala nacional se ha observado que las OC han aumentado su frecuencia entre 1960 y 2010 (Herrera, 2024; Rusticucci et al, 2016).

La relación entre la temperatura y la mortalidad suele tener forma de “U” de “V” o de “J”, con una temperatura de mínima incidencia que varía de unos lugares a otros (Almeira et al, 2016; Gasparrini et al, 2015)

En Argentina, se ha estudiado la mortalidad por OC desde dos enfoques, un abordaje temporal longitudinal sobre dos ciudades, tal es el caso de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y Rosario (Almeira et al, 2016; Chesini et al, 2019) y otro centrado en un verano particularmente cálido (2013-2014) para la región centro-norte del país (Chesini et al, 2022). Sin embargo, no se ha estudiado el comportamiento de la mortalidad por OC en diferentes ciudades del país que incluya a la Patagonia.

2) METODOLOGÍA

El presente es un estudio epidemiológico observacional, de tipo ecológico con un enfoque estadístico de series temporales.

Las unidades de análisis llamadas “ciudades” corresponden a la sumatoria de las defunciones ocurridas en los departamentos cubiertos total o parcialmente por la mancha urbana. Criterios de selección: la ciudad más poblada de cada provincia y contar con una estación meteorológica del SMN. Se excluyeron ciudades que presentaron un promedio diario de defunciones muy bajo que imposibilitaran el análisis y aquellas que no contaron con registros completos.

La información meteorológica fue suministrada por el SMN y la de mortalidad provista por el Ministerio de Salud. El análisis se realizó para una serie de quince años comprendidos entre 2005 y 2019.

Se definieron cinco variables resultado: mortalidad natural (A00 a R99), varones, mujeres, 0 a 64 años, 65 años y más. Además, para estudiar los desfases temporales entre la exposición a la OC y las defunciones se construyeron variables con rezagos de +1, +2, +3 y +4 días.

El análisis de series temporales se realizó con modelos aditivos generalizados (GAM). Los resultados se presentan como riesgo relativo (RR) entre expuestos y no expuestos a las OC, acompañados por su intervalo de confianza del 95%. Para el análisis se utilizó el software libre R versión 4.3.1. con el paquete “mgcv” versión 1.8-42, para la construcción de gráficos y tablas, Microsoft Excel y para los mapas el programa Surfer versión 7.0.

3) RESULTADOS

Al analizar el riesgo de mortalidad natural durante las OC y sus rezagos se observó un incremento en 14 ciudades, en 10 de ellas se incrementó el riesgo durante los eventos de OC, con valores comprendidos entre 1.06 (IC95%: 1.03-1.09) para Buenos Aires y 1.27 (IC95%: 1.12-1.44) para La Rioja (figura 1). Son 12 las ciudades con incrementos significativos en el riesgo de mortalidad natural para el rezago de dos días, con valores que van de 1.08 (IC95%: 1.05-1.10) a 1.32 (IC95%: 1.17-1.49).

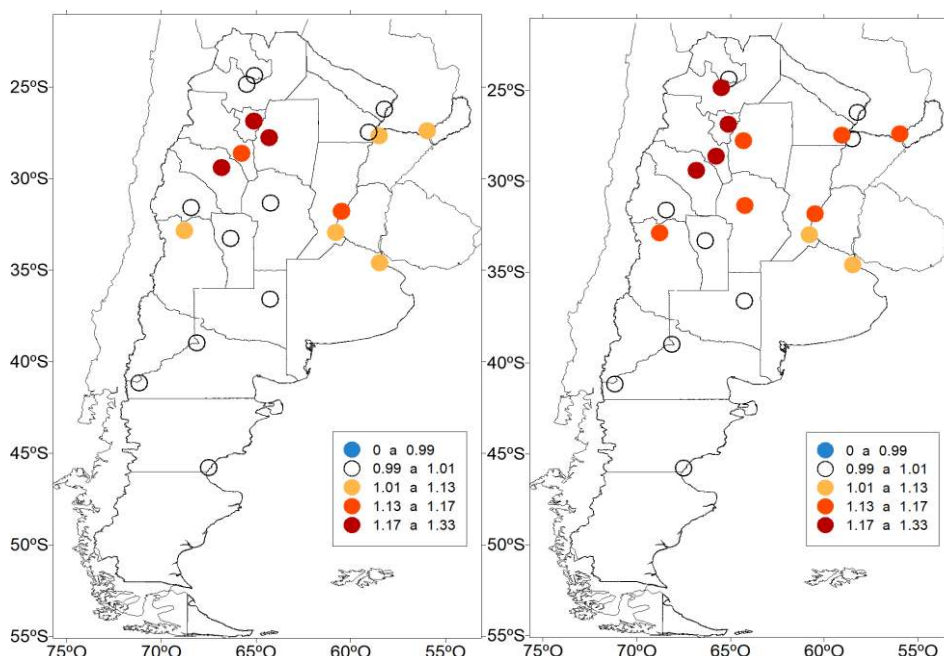


Figura 1. Riesgo relativo de mortalidad natural durante olas de calor (a) y rezago de dos días (b) en 21 ciudades de Argentina, 2005-2019

El riesgo de mortalidad se incrementó en la mitad de las ciudades para los varones (N=12) y para las mujeres (N=11) durante las OC y sus rezagos. Sin embargo, al analizar los incrementos en la mortalidad solo durante las OC, fueron ocho ciudades para los varones y en nueve para las mujeres (fig.2), con valores más elevados para éstas (entre RR=1.09; IC95%: 1.05- 1.13 y RR=1.40; IC95%: 1.17-1.67) que para aquellos (entre RR=1.04; IC95%: 1.01-1.08 y RR=1.25; IC95%: 1.13-1.37).

Los cambios en el riesgo de mortalidad se analizaron en dos grandes grupos etarios: 0 a 64 años y 65 años y más. En el primer grupo el riesgo de mortalidad aumentó en siete ciudades durante las OC y sus rezagos (CABA, Comodoro Rivadavia, Mendoza, Neuquén, Rosario, Salta y Tucumán) con valores de RR entre 1.08 y 1.45. En el grupo de personas mayores (65 años y más), el riesgo de mortalidad se aumentó en el 80% de las ciudades bajo análisis (N=17) y en siete de ellas (Buenos Aires, Catamarca, La Rioja, Mendoza, Rosario Santiago del Estero y Tucumán) el RR se incrementó durante las OC y todos sus rezagos.

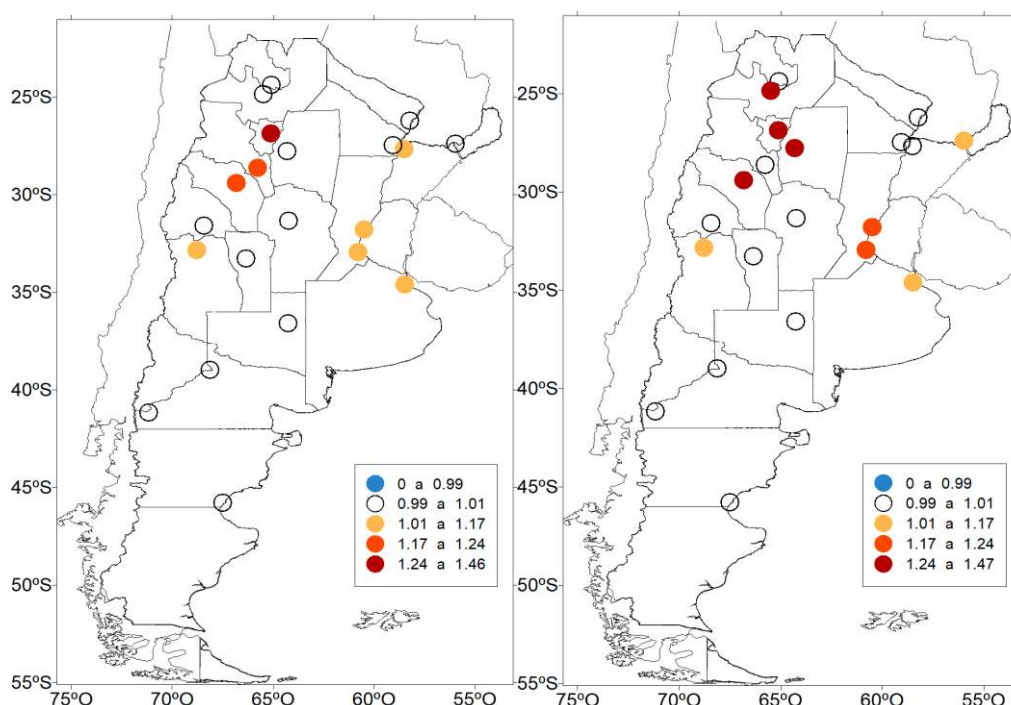


Figura 2. Riesgo relativo de mortalidad durante olas de calor en varones (a) y mujeres (b) en 21 ciudades de Argentina, 2005-2019

4) CONCLUSIONES

El presente estudio aporta nueva evidencia sobre el riesgo de mortalidad en ciudades argentinas. Las ciudades de la Patagonia merecen una mención especial, dado que fueron excluidas de estudios previos y en el presente se ha documentado incrementos en el riesgo. El recorte espacial a nivel de ciudad contribuye a contar con información para la definición de políticas de prevención, preparación y respuesta a las olas de calor en el nivel local.

REFERENCIAS

- Almeira, G., Rusticucci, M., & Suaya, M.: 2016.** Relación entre mortalidad y temperaturas extremas en Buenos Aires y Rosario. *Meteorológica*, 65-79.
- Chesini, F., Abrutzky, R., & de Titto, E.: 2019.** Mortalidad por olas de calor en la ciudad de Buenos Aires, Argentina (2005-2015). *Cadernos de Saúde Pública*, 1-11.
- Chesini, F., Herrera, N., Skansi, M., González Morinigo, E., Fontán, S., Savoy, F., & de Titto, E.: 2022.** Mortality risk during heat waves in the summer 2013-2014 in 18 provinces of Argentina. *Ecological study. Ciência & Saúde Coletiva*, 2022; 27(5).
- Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Lavigne, E., Zanobetti, A., Schwartz, J., et al.: 2015.** Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet*, 369-75. doi:10.1016/S0140-6736(14)62114-0
- IPCC.: 2021.** Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press
- Herrera, N.: 2024.** Climatología de las Olas de Calor en Argentina en el período 1961/62 - 2022/23. Buenos Aires: Servicio Meteorológico Nacional.
- Rusticucci, M., Kysely, J., Almeida, G., & Lhotka, O.: 2016.** Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theor Appl Climatol*, 679-689.
- Servicio Meteorológico Nacional. (01 de 02 de 2025).** Obtenido de <https://www.smn.gob.ar/estadisticas>

CONFIGURACIONES SINÓPTICAS ASOCIADAS A GRANDES INCENDIOS FORESTALES EN CHILE CENTRO-SUR

Natalia Ruiz^{1,2}, Martín Jacques-Coper^{1,2,3}, Francisco de la Barrera^{4,5}
naruiz2019@udec.cl. Autor/a correspondiente.

¹Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción, Chile

²Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Concepción, Chile

³Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental COPAS Coastal, Chile

⁴Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, Chile

⁵ Centro de Desarrollo Urbano Sustentable, CEDEUS, Chile

Palabras clave: Eventos extremos, Meteorología extrema, Predictibilidad.

1) INTRODUCCIÓN

El aumento en la frecuencia e intensidad de incendios forestales a nivel global, en el contexto del cambio climático, ha motivado una creciente investigación sobre sus causas e impactos (Bowman et al., 2009; Sayedi et al., 2024), especialmente en regiones como la centro-sur de Chile, donde ecosistemas mediterráneos reconocidos como hotspots de biodiversidad se ven particularmente afectados (Miranda et al., 2017). La ignición de los incendios en Chile es principalmente debida a la actividad humana. Por otra parte, las condiciones meteorológicas juegan un rol clave en su propagación (González et al., 2018, 2020).

En la última década, los megaincendios (>10.000 ha) han aumentado significativamente en su frecuencia, destacando casos como Las Máquinas (Maule, 2017) y Santa Ana (Biobío, 2023). Ambos estuvieron marcados por condiciones sinópticas dominadas por una dorsal de gran extensión frente a las costas de Chile y un anticiclón migratorio en el sur del continente, lo que favoreció viento subsidente desde el este (Puelche), generando condiciones cálidas y secas que incrementaron la propagación del fuego. Además, la presencia de vaguadas costeras intensificó las temperaturas máximas durante los días críticos (Carrasco-Escaff et al., 2024). En este contexto, los índices meteorológicos —que integran variables como temperatura, humedad, viento y precipitación— pueden resultar útiles para estimar el nivel de peligrosidad de las condiciones atmosféricas frente a la ocurrencia y expansión de incendios (Lawson & Armitage, 2008). Evaluar estos índices y desarrollar nuevos indicadores permite anticipar escenarios de riesgo y fortalecer la toma de decisiones en prevención y preparación. Esta investigación busca establecer relaciones entre categorías de incendios de distinta magnitud y las configuraciones sinópticas asociadas, considerando el uso de suelo y la ubicación geográfica de los eventos. Para ello, se identifican configuraciones características asociadas a señales meteorológicas destacadas durante incendios históricos ocurridos en la temporada de verano extendido (octubre–abril) en la región centro-sur de Chile.

2) METODOLOGÍA

La zona de estudio abarca el centro-sur de Chile, desde la Región de Valparaíso hasta Los Lagos, y se enfoca en el periodo de verano extendido (octubre-abril). Se utilizaron datos diarios de incendios forestales registrados por CONAF entre 1984 y 2021 (Rapanague, 2022), considerando información sobre ubicación, fecha de inicio, duración y superficie quemada. Se seleccionaron incendios mayores a 520 ha (P75 de los incendios mayores a 100 ha) y menores a 10.000 ha (megaincendios), lo que dejó un total de 600 eventos para el análisis. Se clasificaron los incendios según su magnitud, zona geográfica y uso de suelo, utilizando

coberturas vegetales anuales entre 2000 y 2022 del proyecto MapBiomás Chile (2024). Se descargaron datos atmosféricos diarios del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2023), tanto en superficie como en niveles de presión, para un rango de 7 días previos y 7 posteriores a la fecha de inicio. El análisis incluyó temperatura máxima, presión promedio, humedad relativa mínima y magnitud del viento máximo, cuyas series fueron estandarizadas y agrupadas mediante el algoritmo k-means.

Dado que la fecha de inicio no siempre coincide con las condiciones meteorológicas más críticas, se identificó el día de mayor propagación del fuego por evento, usando una base shapefile de resolución de 1 km construida con datos MODIS/TERRA (Fondecyt 11190530 GINSEC). Esto permitió construir series de área quemada diaria y evitar errores en el agrupamiento por desfases temporales.

Finalmente, se caracterizaron configuraciones sinópticas predominantes por categoría de incendio mediante análisis de compuestos de anomalías con respecto a la climatología DEF (1991–2020), y se realizó un análisis de sensibilidad que determinó como óptimo el rango de 7 días previos y 4 posteriores al evento.

3) RESULTADOS

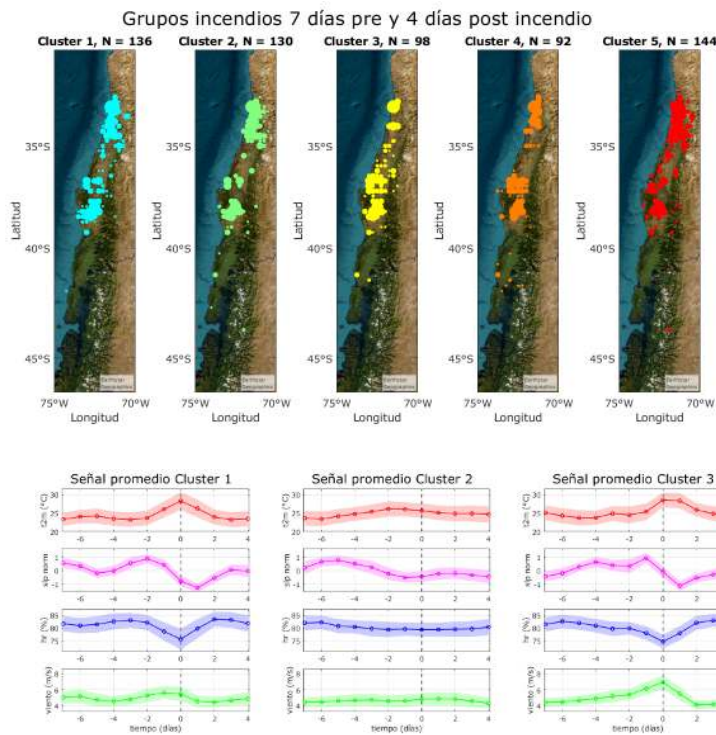


Figura 1: Ubicación de los incendios para cada clúster obtenido utilizando k-means. El tamaño de los puntos es proporcional al número de incendios por grilla.

Figura 2: Evolución temporal de la señal meteorológica promedio de cada clúster, considerando 7 días antes y 4 días después de la fecha de inicio (día 0) de los incendios asociados. Los valores diarios promediados fueron el máximo de temperatura, la presión promedio diaria (normalizada), el mínimo de humedad relativa y el máximo de velocidad del viento. El intervalo sombreado corresponde a 0.5 desviaciones estándares.

El agrupamiento por señal meteorológica muestra algunos grupos con preferencias ubicacionales (Fig. 1) y diferencias en la intensidad de las perturbaciones de las señales promedio (Fig. 2). En el clúster 1, muestra una clara perturbación en el día 0, similar a lo que ocurre en el clúster 3 pero con menor intensidad del viento. Mientras que en el clúster 4 las fluctuaciones de las variables son más suaves, tardías y permanecen por más de un día. En el caso del clúster 2 y 5, las variables se mantienen relativamente constantes, por lo que se descarta que exista un rol significativo de la meteorología en la propagación de estos eventos.

AGRADECIMIENTOS

Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)2 (ANID/FONDAP/1523A0002), Center for Oceanographic Research COPAS COASTAL (ANID/FB210021), wildfires and weather variability in South-central Chile (INTENSE) (ANID/FONDECYT/1251907)

REFERENCIAS

Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., DeFries, R. S., Doyle, J. C., Harrison, S. P., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M. A., Kull, C. A., Marston, J. B., Moritz, M. A., Prentice, I. C., Roos, C. I., Scott, A. C. y Pyne, S. J., 2009: Fire in the earth system. *Science*, 324(5926).

Carrasco-Escaff, T., Garreaud, R., Bozkurt, D., Jacques-Coper, M. y Pauchard, A., 2024: The key role of extreme weather and climate change in the occurrence of exceptional fire seasons in south-central Chile. *Weather and Climate Extremes*, 45.

González, M. E., Gómez-González, S., Lara, A., Garreaud, R. y Díaz-Hormazábal, I., 2018: The 2010–2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(8).

González, M. E., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, M., Jacques, M., Pauchard, A., Hoyos, J., Cordero, L., Vásquez, F., Lara, A., Aldunce, P., Delgado, V., Arriagada, Ugarte, A. M., Sepúlveda, A., Farías, L. y García, I., 2020: Informe a las naciones. Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia. *Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Chile, Universidad de Concepción y Universidad Austral de Chile*.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D. y Thépaut, J.-N., 2023: ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*.

Lawson, B. D. y Armitage, O. B., 2008: Weather Guide for the Canadian System of Forest Fire Danger Rating. *Weather*, July.

Miranda, A., Altamirano, A., Cayuela, L., Lara, A. y González, M., 2017: Native forest loss in the Chilean biodiversity hotspot: revealing the evidence. *Regional Environmental Change*, 17(1).

Proyecto MapBiomás Chile, 2025: Colección 1.0 de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo de Chile, consultada el 05 de enero de 2025 en: <https://chile.mapbiomas.org>

Rapanague, M. J., 2022: Proyecciones del riesgo de incendios forestales en Chile centro-sur bajo distintos escenarios de cambio climático. *Tesis de pregrado*, Universidad de Chile.

BENEFICIOS DE LA MITIGACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA EN UNA MEGALÓPOLIS EN EXPANSIÓN

Miguel Angel Altamirano del Carmen¹, Francisco Estrada^{1,2}, Bernardo A. Bastien-Olvera¹, Rodrigo Muñoz Sánchez¹, Oscar Calderón Bustamante¹
maltamirano@pincc.unam.mx. Autor/a correspondiente.

¹ Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático y Programa de Investigación en Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

² Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Amsterdam, Netherlands

Palabras clave: Mitigación, WRF, beneficio ambiental y social, UHI

1) INTRODUCCIÓN

En las ciudades habita más del 50% de la población mundial, alcanzando el 68% para 2050 (Naciones Unidas, 2019). Las ciudades son el centro de desafíos emergentes para las personas que allí viven. Los cambios en el uso del suelo y la infraestructura construida causan cambios en el balance energético de las ciudades (Grimm et al., 2008), haciéndolas notablemente más cálidas que sus alrededores rurales. Esto se define como el efecto de isla de calor urbana (UHI) (Oke, 1987). El efecto de UHI aumenta los extremos de calor y la propensión a eventos climáticos extremos (Huang et al., 2018), lo que provoca impactos adversos en el bienestar humano, la salud pública, la demanda energética, entre otros (Gong et al., 2012). Identificar adecuadamente la ubicación y la magnitud del efecto UHI permite a los tomadores de decisión tomar en cuenta el aumento de la exposición. Así que, caracterizar la UHI es un paso inicial para gestionar el calentamiento local (Xu et al., 2022). Evaluar la UHI y las medidas de mitigación en zonas urbanas de rápido crecimiento que concentran a millones de personas es fundamental para el desarrollo y la planificación urbana, con el fin de garantizar el bienestar humano y ambiental en el contexto urbano y de cambio climático (Dang y Kim, 2023).

Este trabajo tiene dos objetivos: 1) cuantificar los efectos de la expansión urbana en la magnitud de la UHI modelada con el modelo atmosférico regional WRF para una megalópolis tropical de rápido crecimiento, y 2) evaluar el efecto ambiental de la reducción de la UHI mediante medidas de intervención para modificar el albedo urbano en el modelado numérico.

2) METODOLOGÍA

La Megalópolis del Valle de México (MVM) es el área de estudio con una elevación heterogénea reflejada en el amplio rango de temperaturas del aire (Figura 1). Integra seis estados (Hidalgo, Ciudad de México, Morelos, Puebla, Estado de México y Tlaxcala) y contiene desde pequeñas zonas urbanas hasta la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMVM). En la MVM viven aproximadamente 30.4 millones de habitantes: el 79.5% de la población total de los seis estados en 2015 y una cuarta parte de la población de México (CONAPO, 2024).

Usamos la temperatura superficial media anual (TSM) modelada con el modelo WRF entre 2040 a 2060 para un dominio anidado con resolución de 2.5km x 2.5km centrado en la MVM, de acuerdo con la configuración descrita por Altamirano et al. (2025). El WRF es ampliamente utilizado para estudiar el impacto de la urbanización y medidas de reducción de la UHI (2023). El WRF es forzado por un modelo climático de circulación global (Giorgi, 1990) e incluyó la

proyección de la expansión urbana en la MVM al año 2050 (Mendoza et al., 2025) bajo el escenario SSP 3-7.0.

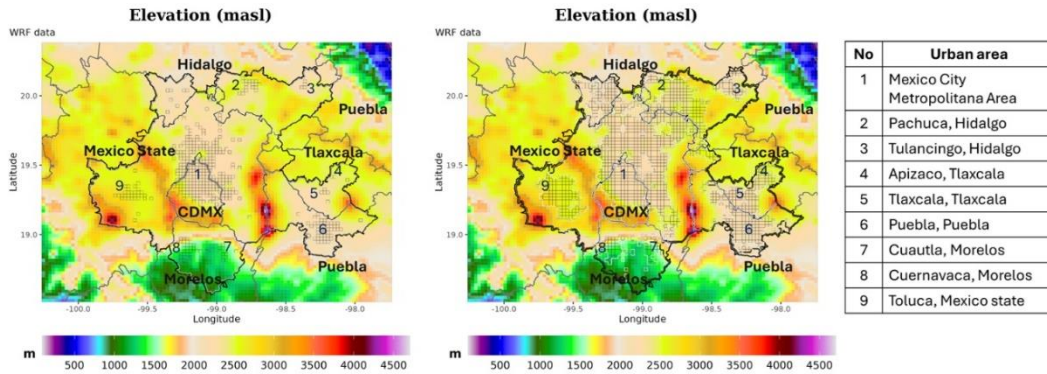


Figure 1. Elevación en la zona de estudio en el periodo histórico (panel izquierdo) y expansión urbana proyectada a mediados de siglo (panel derecho). Contorno en gris son estados, en negro la MVM y en malla áreas urbanas.

Entre las medidas comunes referidas en la literatura para reducir la intensidad de la UHI están el cambio de superficies reflectantes en techos y pavimentos (He, 2019). Se incrementaron los valores promedio del campo del albedo para todas las celdas urbanas en el WRF como una aproximación simplificada para representar el efecto de medidas de reducción de la UHI. El albedo se modificó en las celdas de malla en valores en torno al 60% (Wang et al., 2022) mediante

$$A_{(i,j,t)} = A_{WRF(i,j,t)} + 0.45 * \delta_{(i,j)} \quad (1)$$

Donde $A_{WRF(i,j,t)}$ es el albedo en cada celda de malla i, j en el mes t , $\delta_{(i,j)} = 1$ en celdas urbanas y 0 en celdas con uso de suelo diferente. La intensidad de la UHI se calculó con

$$UHI_{(i,j)} = T_{(i,j)} - \bar{T}_{rur} \quad (2)$$

$T_{(i,j)}$ es la TSM ajustada por elevación de acuerdo con Altamirano et al. (2025) para cada celda de malla i, j , $\bar{T}_{rur}$ es el promedio de las celdas rurales en el dominio con la TSM ajustada. El uso de suelo rural agrupa usos de suelo diferente al urbano y a cuerpos de agua en el WRF.

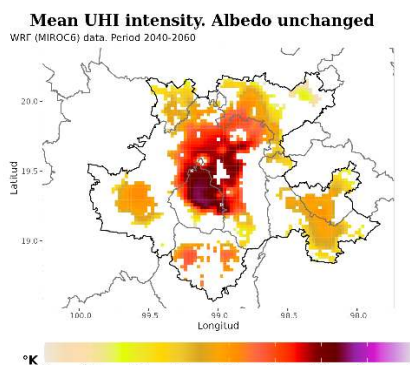


Figura 2. Intensidad de la UHI en el horizonte cercano considerando expansión urbana y sin intervención en el albedo.

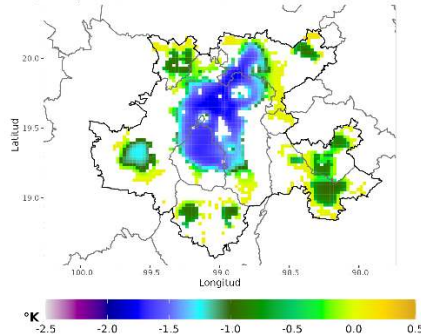
3) RESULTADOS

La intensidad de la UHI en el horizonte cercano 2040-2060 es entre 0°C y 0.3°C mayor que en el período de referencia en las zonas urbanas de la MVM cuando no hay expansión urbana y el albedo no es intervenido. La UHI se intensifica cuando se incluye la expansión de las celdas urbanas en el WRF. La UHI sería entre 2.5°C y 3.2°C en la mayor parte de la ZMVM en el horizonte cercano, con máximos del centro al norte de la Ciudad de México, y entre 1.5°C y 2.1°C en Puebla y Toluca (Figura 2). Por lo tanto, la UHI en el horizonte cercano es hasta 0.5°C más intensa en las celdas actualmente ocupadas por áreas urbanas, particularmente en la dirección de

expansión urbana, y aumenta proporcionalmente con la expansión de nuevas áreas. Se esperan aumentos adicionales de la UHI entre 1.5°C y 2.5°C con respecto al periodo de referencia en nuevas áreas urbanas al norte y noreste de la ZMVM, al noroeste de Puebla, al sur de Pachuca y alrededor de Toluca.

La intensidad de la UHI se reduce al intervenir el albedo en el 60% de las celdas urbanas en el WRF en el horizonte cercano, con respecto al total de celdas proyectadas en la expansión urbana. El beneficio ambiental sería una reducción de la UHI entre 0.8°C y 1.8°C en las nuevas

UHI intensity reduced. Modified albedo in 60% urban grid-cells
WRF (MIROC6) data. Period 2040-2060



áreas urbanas, en comparación con el escenario de expansión urbana sin intervención, y entre 0.9°C y 1.7°C en las superficies actualmente ocupadas por áreas urbanas. El efecto de la intervención se extiende a celdas urbanas vecinas, donde la proporción de la UHI sin intervención es de al menos el 85%. Los beneficios ambientales de regular áreas con nueva expansión urbana en el horizonte cercano, en comparación con un escenario de desarrollo urbano sin intervención en el albedo, serían entre 1.5°C y 2.2°C, además de conservar otros servicios ambientales y la biodiversidad.

Figura 3. Reducción en la UHI en el horizonte cercano al intervenir el albedo en el 60% de las celdas urbanas proyectadas, en comparación con un escenario sin intervención.

CITAS Y REFERENCIAS

- Altamirano del Carmen M.A., F. Estrada, B.A. Bastien-Olvera¹, R. Muñoz Sánchez, O. Calderón B., 2025:** Estimating Urban Heat Island Effect: Balancing Proximity and Comparability Through Altitude-Adjusted Temperature Analysis. Preprint.
- CONAPO, 2024:** Reconstrucción y proyecciones de la población de los municipios de México 1990-2040.
- Dang, L., y Kim, S., 2023:** An Analysis of the Spatial and Temporal Evolution of the Urban Heat Island in the City of Zhengzhou Using MODIS Data. *Applied Sciences*, 13(12), 7013.
- Giorgi, F., 1990:** Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, 3, 941–963.
- Gong, P., Liang, S., Carlton, E.J., Jiang, Q., Wu, J., y Wang, L., 2012:** Remais, J.V. Urbanisation and health in China. *Lancet* 2012, 379, 843–852.
- Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman, C.L., Wu, J.; Bai, X., y Briggs, J.M., 2008:** Global change and the ecology of cities. *Science* 2008, 319, 756–760.
- He, B.-J., 2019:** Towards the next generation of green building for urban heat island mitigation: Zero UHI impact building. *Sustainable Cities and Society* Article 101647
- Mendoza A., F. Estrada, J. Campo, O. Calderon, A. González, M.A. Altamirano del Carmen, 2025:** Land-Use Dynamics and Projections in Mexico's Valley Megalopolis. Submitted to *Journal of Land Use Science*
- Oke, T.R., 1987:** *Boundary Layer Climate*, 2nd ed.; Routledge: Abingdon, UK.
- Wang, W., Zhou, W., Ng, E.Y.Y., y Xu, Y., 2016:** Urban heat islands in Hong Kong: statistical modelling and trend detection. *Natural Hazards*, 83, 885-907.
- Xu, H., Li, C., Wang, H., Zhou, R., Liu, M., y Hu, Y., 2022:** Long-Term Spatio temporal Patterns and Evolution of Regional Heat Islands in the Beijing–Tianjin–Hebei Urban Agglomeration. *Remote Sens.* 2022, 14, 2478. <https://doi.org/10.3390/rs14102478>

ACTIVIDAD CONVECTIVA EN EZEIZA: EVALUACIÓN DE CORRESPONDENCIA ENTRE OBSERVACIONES AERONÁUTICAS DE SUPERFICIE Y RED DE DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE RAYOS

Victoria Valladolid Carluccio^{1,2}, Luciano Vidal², Melina Sol Yabra^{2,3}

vvalladolid@smn.gob.ar

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO, FCEN, UBA)

²Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

³NASA Goddard Space Flight Center, MD, USA

Palabras clave: METAR, Tormenta, Aeropuerto.

1) INTRODUCCIÓN

Las tormentas dan origen a un amplio abanico de fenómenos meteorológicos que resultan adversos para la actividad aeronáutica: fuertes cortantes de viento, turbulencia, engelamiento, reducción de visibilidad, actividad eléctrica y caída de granizo (Taszarek y otros, 2020). Estos fenómenos afectan tanto a aeronaves en vuelo como al desarrollo de operaciones en los aeropuertos, pudiendo generar demoras, desvíos y cancelaciones en los vuelos programados, e incluso incidentes y/o accidentes. Esta situación afecta de forma directa usuarios y agentes involucrados en la actividad aeronáutica, durante y luego del evento de tormenta (Markovic y otros, 2008; Sasse y otros, 2003). A pesar de los riesgos e impactos que implican para la actividad aeronáutica, la información e investigación disponible en torno a las tormentas sobre los aeropuertos de Argentina es limitada a pocos aeropuertos, principalmente por la falta de observaciones acordes. Por ese motivo, se propone buscar una técnica alternativa de identificación de horas con tormenta utilizando sensoramiento remoto. Desde el año 2018, Argentina se encuentra cubierta por la red de detección automática de rayos “Earth Networks Global Lighting Network” (ENGLN). Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la correspondencia entre las observaciones aeronáuticas de superficie de tormenta y la detección de rayos de dicha red en el Aeropuerto Internacional Ministro Pistarini (Ciudad de Ezeiza, Provincia de Buenos Aires).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para abordar el objetivo propuesto, se utilizaron reportes meteorológicos de aeródromo (METAR) horarios, y los datos de la red de superficie ENGLN para el periodo 2018-2022. A partir de los datos METAR se identificaron las horas con tormenta (METAR-TS) considerando el tiempo presente y horas con nubes de tipo Cumulonimbus (METAR-CB) considerando el reporte de nubosidad. Los datos de la red ENGLN incluyen la variable “horas con tormenta” predeterminada para puntos de retícula de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$, la cual vale 1 si en una ventana de una hora se detecta actividad eléctrica, y de lo contrario vale 0. Este conjunto se dividió en 3 regiones concéntricas: el punto de retícula más cercano al aeropuerto de Ezeiza (“RAYOS-EZE”), los puntos de retícula dentro de un radio de 8 km (“RAYOS-8KM”) y dentro de un radio de 16 km (“RAYOS-16KM”). Estos umbrales fueron elegidos por su importancia en la delimitación del área que corresponde al aeródromo (hasta 8 km) y a su vecindad (entre 8 y 16 km). Para cada subconjunto mencionado se estudió la frecuencia de ocurrencia mensual y horaria promedio, valores mínimos y máximos y probabilidades condicionales de ocurrencia.

3) RESULTADOS

Para el periodo de estudio, se identificaron en total 516 METAR-TS y 780 METAR-CB. Considerando la información de la red ENGLN se encontraron 689 horas con tormenta para

RAYOS-EZE, 851 para RAYOS-8KM, y 1100 para RAYOS-16KM. En la Figura 1 se muestran las frecuencias relativas de ocurrencia mensual, donde se puede identificar un periodo de máximas frecuencias en los meses de primavera-verano y un máximo local de invierno en el mes de Julio. Los meses que presentan un amplio rango de valores extremos, como diciembre y octubre, sugieren que en algunos años la actividad convectiva puede ser más intensa que en otros. La frecuencia de ocurrencia horaria (Figura 2) muestra las máximas frecuencias en las últimas horas de la tarde y durante la noche, coincidiendo con los resultados previos de otros autores para la región, como Vidal (2014). Los valores máximos y mínimos presentan mayor amplitud en horas nocturnas, sugiriendo mayor variabilidad en esos periodos. Dada la condición de que se identificó una hora con METAR-TS, la probabilidad de que la red ENGLN detecte actividad eléctrica varía entre 67,8% y 79,3%, considerando solamente RAYOS-EZE y RAYOS-16KM, respectivamente. Esto sugiere que los reportes METAR incluyen información no solo de lo que sucede en el aeropuerto, si no también que consideran su vecindad. De forma análoga, la probabilidad de que se reporte tormenta en el METAR dada la condición de que se detectó actividad eléctrica en la red ENGLN se encuentra entre 50,8% y 37,2%, sugiriendo que hay cierta actividad eléctrica detectada por la red que no deriva en un reporte de tormenta en el METAR. Esto puede deberse a limitaciones de los datos, tanto por subestimación de los METAR —condicionados por restricciones visuales, sonoras y espaciales del observador— como por sobreestimación de la red. Al considerar también los METAR-CB, se reduce la probabilidad de que la red detecte un rayo dado un reporte de cumulonimbus para todos los radios (máximo de 66,5%). Por el contrario, la probabilidad de que se reporte dicha nubosidad ya habiendo una detección por parte de la red aumenta en todos los radios, alcanzando 58,5% en el punto central. Esto sugiere que disminuye la cantidad de rayos que no llegan a ser reportados por el observador.

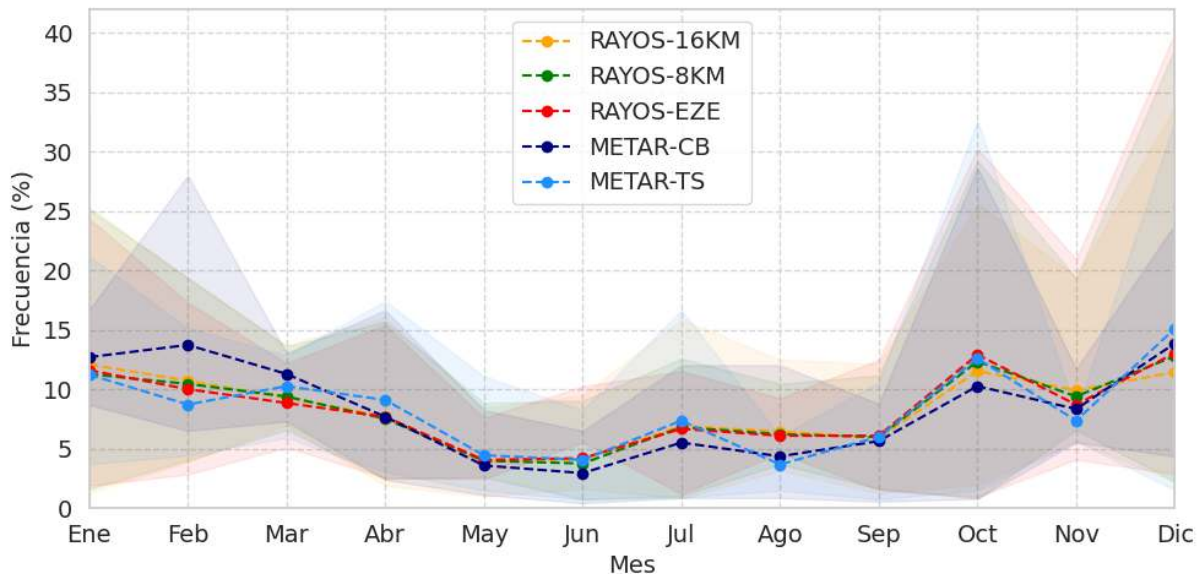


Figura 1: frecuencia relativa mensual de horas con actividad convectiva (líneas punteadas), junto con sus valores máximos y mínimos (sombreado), a partir de datos ENGLN y METAR.

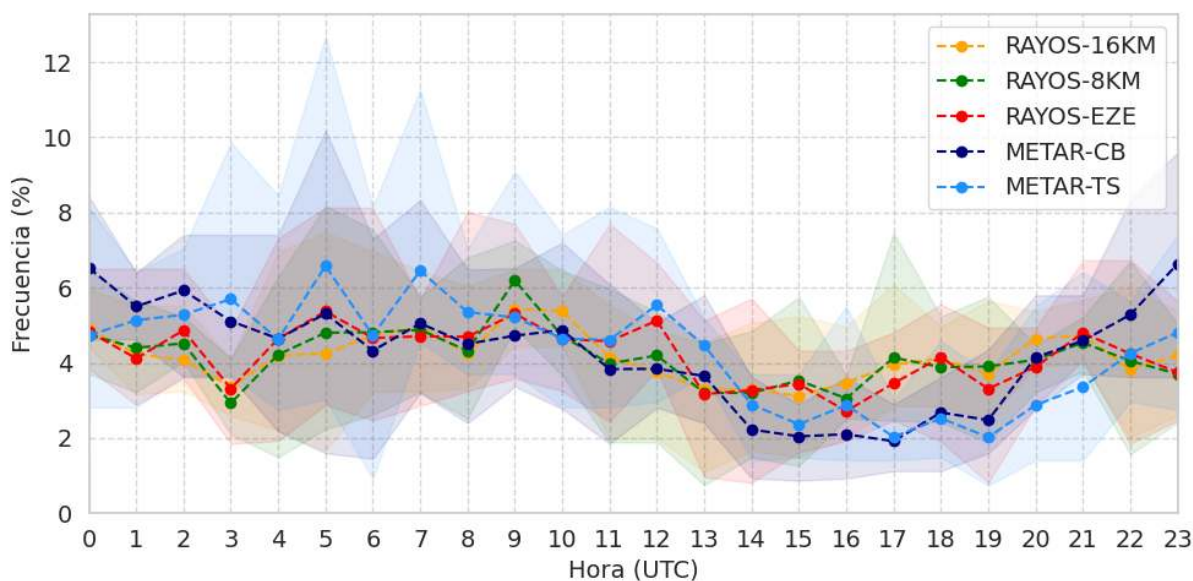


Figura 2: Idem Figura 1, para frecuencia relativa horaria.

4) CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó la correspondencia entre observaciones de horas con tormenta provenientes de reportes METAR y detecciones de rayos de la red ENGLN sobre el aeropuerto de Ezeiza y su entorno para el periodo 2018-2022. Los resultados obtenidos muestran comportamientos similares en las frecuencias de ocurrencia mensual y diaria. Las probabilidades de ocurrencia condicional reflejan que cada fuente de información tiene sus correspondientes implicancias y limitaciones, y ninguna puede considerarse como verdad absoluta. La inclusión de reportes de CB muestra que, a pesar de que se reduce el grado de acuerdo entre METAR y ENGLN, se logra omitir menos fenómenos meteorológicos potencialmente peligrosos. Se concluye que la red de detección automática de rayos es un buen estimador de la ocurrencia de tormentas y actividad convectiva en regiones donde no se dispone de observaciones de superficie. Estos resultados refuerzan la importancia de incorporar información de sensores remotos como complemento de las observaciones de superficie.

REFERENCIAS

Markovic, D., Hauf, T., Röhner, P. y Spehr, U., 2008: A statistical study of the weather impact on punctuality at Frankfurt Airport. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 15, 2, 293–303.

Sasse, M. y Hauf, T., 2003: A study of thunderstorm-induced delays at Frankfurt Airport, Germany. *Institut für Meteorologie und Klimatologie, University of Hannover*, Herrenhäuserstr. 2, 30419 Hannover, Germany.

Taszarek, M., Kendzierski, S. y Pilguy, N., 2020: Hazardous weather affecting European airports: Climatological estimates of situations with limited visibility, thunderstorm, low-level wind shear and snowfall from ERA5. *Weather and Climate Extremes, Elsevier B.V.*

Vidal, L., 2014: Convección extrema sobre Sudamérica: estructura interna, ciclos de vida e influencia de la topografía en la iniciación. *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires*.

CARACTERIZACIÓN DE APTITUD CLIMATICA DE REGIONES DE PRODUCCION DE UVA MALBEC EN ARGENTINA

María Fernanda Cabré^{1,3,4}, Silvina Solman^{2,3,4}, Mario Núñez^{2,3,4}
cabre@cima.fcen.uba.ar Autora correspondiente.

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Buenos Aires, Argentina.

²Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

³CONICET-Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

⁴CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: Zonificación Vitivinícola, Indices Bioclimáticos, Simulaciones CORDEX-CORE

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es utilizar los modelos climáticos regionales (MCRs) de las simulaciones CORDEX-CORE (Gutowski y otros, 2016) para representar la actual zonificación de las regiones de producción de uva Malbec en Argentina, zonificación evaluada en Solman y otros (2018) a través de un Índice Unico Combinado (UCI), el cual está formado por cuatro índices bioclimáticos significativamente relacionados con la producción de esta variedad en Argentina. Ellos son: temperatura media, precipitación acumulada y amplitud térmica media del periodo octubre-marzo y temperatura mínima de marzo. El desempeño de los MCRs fue evaluado a través de la representación espacial del valor medio de UCI y de sus componentes. Los resultados muestran que las simulaciones CORDEX-CORE reproducen satisfactoriamente las principales características de la zonificación observada. Por lo tanto puede concluirse que las mismas son confiables para estudios de zonificación de uva Malbec en Argentina.

ABSTRACT

The objective of this work is to use regional climate models (RCMs) from CORDEX-CORE simulations (Gutowski et al., 2016) to represent the current zoning of Malbec grape production in Argentina. This zoning was evaluated in Solman et al. (2018) through a Unique Combined Index (UCI), which is composed by four bioclimatic indices significantly related to the production of this variety in Argentina. These are: mean temperature, accumulated precipitation, and mean thermal amplitude for the period October-March, and the minimum temperature in March. The performance of the RCMs was evaluated through the spatial representation of the mean value of UCI and its components. The results show that the CORDEX-CORE simulations satisfactorily reproduce the main characteristics of the observed zoning. Therefore, it can be concluded that they are reliable for Malbec grape zoning studies in Argentina.

1) INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es utilizar los modelos climáticos regionales (MCRs) de las simulaciones CORDEX-CORE (Gutowski y otros, 2016) para representar la actual zonificación de las regiones de producción de uva Malbec en Argentina identificada por Solman y otros (2018). Los estudios de zonificación desempeñan un rol fundamental para evaluar la influencia de las condiciones climáticas en la aptitud vitivinícola de una región para una determinada variedad, ya que las mismas influyen durante el periodo de desarrollo y maduración y, en consecuencia, en la producción. Particularmente, *vitisvinifera L. cv Malbec* es la cepa insignia destinada a la producción vitivinícola en Argentina, actividad de suma importancia en el desarrollo socio-económico tanto a nivel regional como nacional. Lo anteriormente mencionado motiva el interés del presente trabajo. Trabajo que presenta resultados de un artículo recientemente aceptado (Cabré y otros, 2025), en el cual se evaluó el desempeño del conjunto de simulaciones CORDEX-CORE en términos de la representación espacial del valor medio de UCI y de sus componentes.

2) METODOLOGÍA Y BASE DE DATOS

Dos bases de datos fueron utilizadas: (a) observacional Climate Research Unit (CRU), Time-Series (TS), Versión 3.21 (CRU TS3.21), período: 1901-2012, resolución horizontal $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (Jones y Harris, 2013); (b) MCRs del conjunto de simulaciones CORDEX-CORE para Sudamérica, período: 1951-2005, resolución horizontal $0.22^\circ \times 0.22^\circ$ (Gutowski y otros, 2016), formadas por seis combinaciones RCMs/GCMs 2 MCRs (REMO, RegCM4.7) anidados en 3 modelos climáticos globales del conjunto CMIP5 (MCGs) (MPI, HadGEM2, NorESM1). Para ambas bases de datos, las series temporales de temperatura máxima, mínima y media mensual y precipitación mensual fueron procesadas. Un método de corrección de errores fue aplicado a las variables de interés a fin de obtener información más adecuada para caracterizar la zonificación climática; luego con éstas corregidas se calcularon las cuatro componentes de UCI y el índice UCI. Período de calibración: 21 años (1975-1995) para calcular los factores de corrección; período de validación: 10 años (1996-2005) para validar la metodología de corrección de error, siendo este último el periodo mostrado en este trabajo. Dominio de estudio: región comprendida entre 43°S - 21°S y 72°O - 56°O .

El índice UCI identifica los índices bioclimáticos clave y sus intervalos óptimos para la producción de uva Malbec (MGP, por su sigla en inglés) en Argentina. Los valores de UCI se encuentran entre 4 y 12. Un valor de $\text{UCI} = 4$ indica que cada componente pertenece a la categoría de aptitud climática limitante; mientras que un valor de $\text{UCI} = 12$ indica que cada componente pertenece a la categoría de aptitud climática óptima. Un valor de $\text{UCI} \leq 3$ indica que al menos uno de los componentes de UCI se encuentra en categoría de no aptitud climática. Este índice debe interpretarse en términos de su valor absoluto: cuanto mayor (menor) sea el valor de UCI, mejores (peores) serán las condiciones climáticas para la MGP, lo que se traduce en mayor (menor) aptitud vitícola. Por consiguiente, el índice UCI proporciona información sobre si las condiciones climáticas de una región son aptas o no para la producción de uva Malbec; y en el caso de ser aptas indica dónde esta aptitud es mayor o menor. Información sobre metodología de determinación de UCI, sus componentes, rangos y ecuaciones en Solman y otros (2018).

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En esta sección, solamente a modo de ejemplo se describen los resultados de la distribución espacial de UCI (Figura 1). La distribución espacial de UCI observada representa la actual zonificación de uva Malbec en Argentina y es considerada la representación más cercana a la realidad. Dicha zonificación se localiza en una franja con orientación noroeste-sudeste desde

La Rioja (en el norte) hasta Río Negro-Chubut (en el sur), la cual está adecuadamente representada por ambos RCMs, REMO y RegCM. Sin embargo, algunas diferencias en ubicación geográfica y/o la extensión pueden mencionarse. La distribución espacial observada de UCI muestra sólo un área de aptitud vitivinícola alta ubicada en la tradicional región vitivinícola. Sin embargo, la mayoría de las combinaciones RCMs/GCMs (excepto REMO/MPI) además de representar esta región, representan otra área de aptitud vitivinícola alta en el este de Río Negro. En líneas generales, ambos RCMs muestran una buena representación de las áreas de aptitud vitivinícolas media y baja. Sin embargo, las combinaciones REMO/NorESM1 y RegCM/NorESM1 parecen no representar la zona de aptitud vitivinícola baja localizada en el límite entre el este de Neuquén y el noroeste de Río Negro.

Finalmente, independientemente de las diferencias descritas, los resultados son alentadores ya que ambos RCMs muestran una muy buena representación del patrón espacial de UCI. Resultados que concuerdan con la actual zonificación observada de MGP identificada en Solman y otros, (2018), la cual ubica el área de mejor aptitud vitivinícola en el norte de Mendoza, coincidiendo con la región de mayor producción de uva Malbec en Argentina. Por lo que puede concluirse que el conjunto de simulaciones CORDEX-CORE es confiable para representar la actual zonificación de uva Malbec en Argentina.

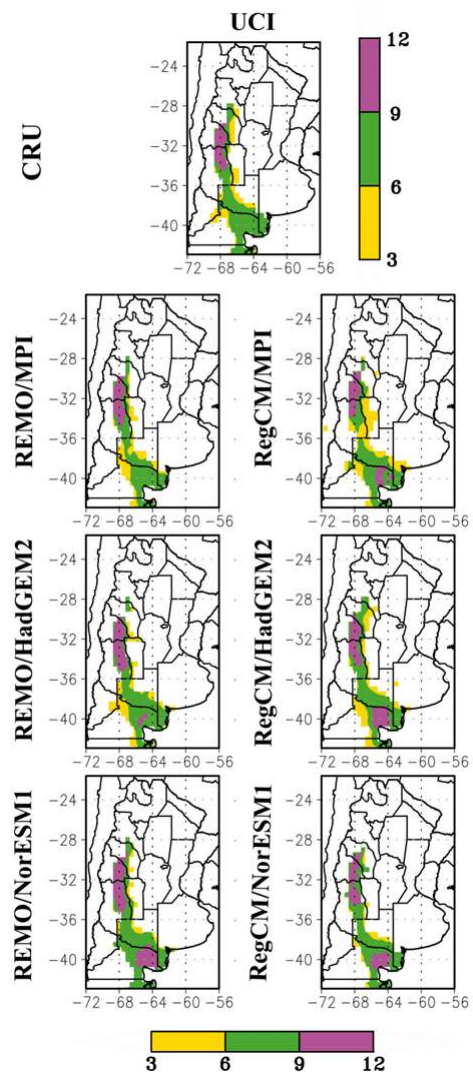


Figura 1. Distribución espacial de UCI: observada CRU (panel central superior) y modelada CORDEX-CORE (6 paneles inferiores): para REMO y RegCM, columna izquierda y derecha respectivamente. Unidades: Adimensional. (Figura 5 de Cabré y otros, 2025) De acuerdo a Solman y otros (2018), los sombreados indican diferentes niveles de aptitud vitivinícola: alta ($9 < UCI \leq 12$; púrpura); media ($6 < UCI \leq 9$; verde); baja ($3 < UCI \leq 6$; amarillo); nula ($UCI \leq 3$; blanco).

REFERENCIAS

- Gutowski, W.J., Giorgi, F., Timbal, B., Frigon, A., Jacob, D., Kang, H.-S., Krishnan, R., Lee, B., Lennard, C., Nikulin, G., O'Rourke, E., Rixen, M., Solman, S., Stephenson, T. y Tangang, F., 2016: WCRP Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX): A Diagnostic MIP for CMIP6. Geoscientific Model Development. [DOI: 10.5194/gmd-2016-120]
- Solman, S.A., Cabré, M.F., González, M.H. y Núñez, M.N., 2018: Bioclimatic zoning of Argentinean Malbec grape productivity regions by means of a Unique Combined Index. Clim Res DOI: 10.3354/cr01498. Volume 74, Number 3, pages 185-199, Print ISSN: 0936-577X; Online ISSN: 1616-1572.
- Cabré, M.F., Solman, S.A. y Núñez, M.N., 2025: Malbec viticultural zoning studies in Argentina based on the UCI index and bias-corrected CORDEX-CORE simulations. Revista Agrociencia Uruguay. [Aceptado para publicación]
- Jones, P.D. y Harris, I.C., 2013: CRU TS3.21: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.21 of High Resolution Gridded Data of Month-by-month Variation in Climate (Jan. 1901- Dec. 2012). NCAS British Atmospheric Data Centre, 23 September 2013. doi:10.5285/D0E1585D-3417-485F-87AE-4FCECF10A992. Available from: <https://dx.doi.org/10.5285/D0E1585D-3417-485F-87AE-4FCECF10A992>



3

Procesos y variabilidad de la atmósfera y el océano

TENDENCIAS OBSERVADAS DE LA ARIDEZ EN LOS SITIOS PILOTOS DE MONITOREO DE DESERTIFICACIÓN EN ARGENTINA

Pedro Samuel Blanco^{1,2,3}, Moira Evelina Doyle^{1,2,3}
pedro.blanco@cima.fcen.uba.ar

¹Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO)

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)

³Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI) – IRL 3351 – CNRS-CONICET-IRD-UBA

Palabras clave: Aridificación, Precipitación, Índice de aridez.

1) INTRODUCCIÓN

La aridez se define como la escasez persistente de agua, donde la precipitación es insuficiente para satisfacer la demanda evaporativa atmosférica (Middleton and Thomas, 1997). El aumento de la aridez, denominado “aridificación”, fue reportado en diversas regiones, tal como en Europa occidental, Asia central, Norteamérica y la Patagonia (Ullah et al., 2022), lo que ha sido un desafío crítico para los ecosistemas y sociedades debido a la creciente presión sobre los recursos hídricos (Grünig et al., 2023). La aridificación, sumada a las prácticas humanas insostenibles, intensifica la degradación sistemática de los suelos y acelera la desertificación. La ocurrencia simultánea de desertificación y aridificación genera serios problemas como la inseguridad alimentaria, pobreza, migraciones, pérdida de cultivos, etc. (Hoffmann, 2022). En Argentina, los esfuerzos para combatir el avance de la desertificación están articulados por el Observatorio Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación (ONDTyD). Esta red de organismos proporciona información sobre las tendencias y riesgos de desertificación para asesorar a tomadores de decisiones y concientizar a la población (Therburg et al., 2019). El ONDTyD opera mediante sitios piloto (SP), donde se reúnen equipos de trabajo presentes en el territorio y actores de la comunidad local para generar conocimientos sobre la degradación de las tierras e identificar problemas vinculados con los aspectos biofísicos y socioeconómicos de la desertificación (Therburg et al., 2019). Uno de los aspectos biofísicos clave que acelera la desertificación es la aridez, pero el conocimiento sobre su evolución en los SP sigue siendo limitado. En este trabajo, se analizan las tendencias de aridez y sus variables climáticas asociadas (precipitación y evapotranspiración) en los SP durante el período 1961-2022.

2) DATOS Y MÉTODOS

Se utilizaron datos mensuales de temperatura media y precipitación para la Argentina continental, correspondientes al período 1961-2022, de la base de datos Climatic Research Unit v4.06 (CRU). Dado que esta base de datos ofrece una retícula de resolución espacial limitada ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$), se aplicó una interpolación bilineal para remuestrear la información a una resolución más alta ($0.16^\circ \times 0.16^\circ$), permitiendo una representación más detallada y precisa de las variaciones climáticas regionales en el área de estudio.

Se calculó el Índice de Aridez Anual (IA), propuesto por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés). Este índice se define como el cociente entre la precipitación anual y la evapotranspiración potencial anual, siendo esta última estimada a partir de la temperatura media mediante el método de Thornthwaite. El IA es una medida adimensional, cuyo valor disminuye a medida que aumentan las condiciones de aridez. Según determinados rangos establecidos por la UNEP (Middleton and Thomas, 1997), el IA se

clasifica en seis categorías climáticas: Hiperárido (< 0.05), Árido ($0.05-0.2$), Semiárido ($0.2-0.5$), Subhúmedo seco ($0.5-0.65$), Subhúmedo húmedo ($0.65-1$) y Húmedo (> 1).

Se elaboró un campo medio del IA (período 1961-2022) para el área de estudio y se identificaron las regiones correspondientes a cada categoría climática definida para este índice. A continuación, se seleccionaron los puntos de grilla más cercanos a la ubicación geográfica de los 24 SP (Figura 1, Panel A) y se generaron series temporales anuales del IA y sus variables climáticas asociadas (precipitación y evapotranspiración potencial). Sobre estas series, se aplicó el test de Mann-Kendall (nivel de confianza del 95%) para detectar la presencia de componentes determinísticas. Finalmente, se estimaron tendencias mediante regresión lineal simple y regresión polinómica de tercer orden, evaluando la significancia de las pendientes con el test de Student y el ajuste de los modelos con el test de Fisher (nivel de confianza del 95%).

3) RESULTADOS

El test de Mann-Kendall reveló la presencia de componente determinística en las series del IA de siete SP: Almirante Brown, Cuenca del Morro, Ingeniero Jacobacci, Carrenleufú, Ecotono Fueguino, Colonia Cushamen y Puerto Patriada. Entre ellos, los cinco últimos también presentaron componente determinística en las series de precipitación. En el caso de la evapotranspiración potencial, se detectó esta característica en 22 de los 24 SP analizados.

En Argentina, los climas árido y semiárido se extienden desde el noroeste andino hasta el sur de la Patagonia (Figura 1, Panel A). El clima semiárido conforma una región continua, mientras que el clima árido aparece de forma fragmentada en sectores de la Patagonia y en la porción occidental del país, aproximadamente a los 30°S . Los climas subhúmedo (seco y húmedo) se concentran mayormente en el centro del territorio nacional, desde la costa atlántica (alrededor de 40°S y 63°O) hacia el centro-norte y noroeste, y también en una estrecha franja sobre el flanco oriental de los Andes, al sur de los 30°S . El clima húmedo predomina en el sector oriental del país, especialmente en la Llanura Chaco-Pampeana, y además se extiende en una franja delgada de los Andes Centrales y Patagónicos, también al sur de los 30°S . De acuerdo con esta clasificación, seis SP se localizan en zonas semiáridas, once en regiones subhúmedas (cinco en subhúmedo seco y seis en subhúmedo húmedo), y siete en áreas de clima húmedo.

Todos los SP presentaron una tendencia lineal negativa del IA, lo que indica un incremento promedio y sostenido de la aridez durante el período analizado. Esta disminución fue estadísticamente significativa (95% de confianza) y resultó más pronunciada en nueve SP (Figura 1, Panel B), destacándose a Carrenleufú y Puerto Patriada con las reducciones más marcadas (0,056 y 0,063 por década, respectivamente). En cuanto a las tendencias no lineales, se identifican patrones de evolución similares entre distintos SP. Por un lado, algunos SP (Ingeniero Jacobacci, Almirante Brown, Arroyo Santa Rita, Cuenca del Morro y Portal de los Andes) exhiben un aumento del índice hasta mediados o fines de la década de 1980, seguido por una disminución progresiva hasta la actualidad. Por otro lado, otros SP (Carrenleufú, Colonia Cushamen, Ecotono Fueguino y Puerto Patriada) experimentan una leve disminución hasta fines de la década de 1970 o comienzos de los '80, luego un leve aumento hasta principios o mediados de los 2000, y finalmente una nueva disminución hacia el presente.

La distribución de las tendencias de precipitación y evapotranspiración potencial para los SP (Figura 1, Panel C) muestra un patrón generalizado de reducción en la precipitación y aumento en la evapotranspiración. Las tendencias negativas más pronunciadas de la precipitación se registran en 13 SP, con disminuciones superiores a 8 mm/década, destacándose a Puerto Patriada (31,1 mm/década) y Carrenleufú (27,1 mm/década). La mayoría de los SP presentan tendencias positivas leves a moderadas (entre 1 y 8 mm/década) de la evapotranspiración, mientras que los incrementos más significativos se observan en Arroyo Garupá (8,6 mm/década), Chaco Semiárido (13 mm/década) y Almirante Brown (13 mm/década).

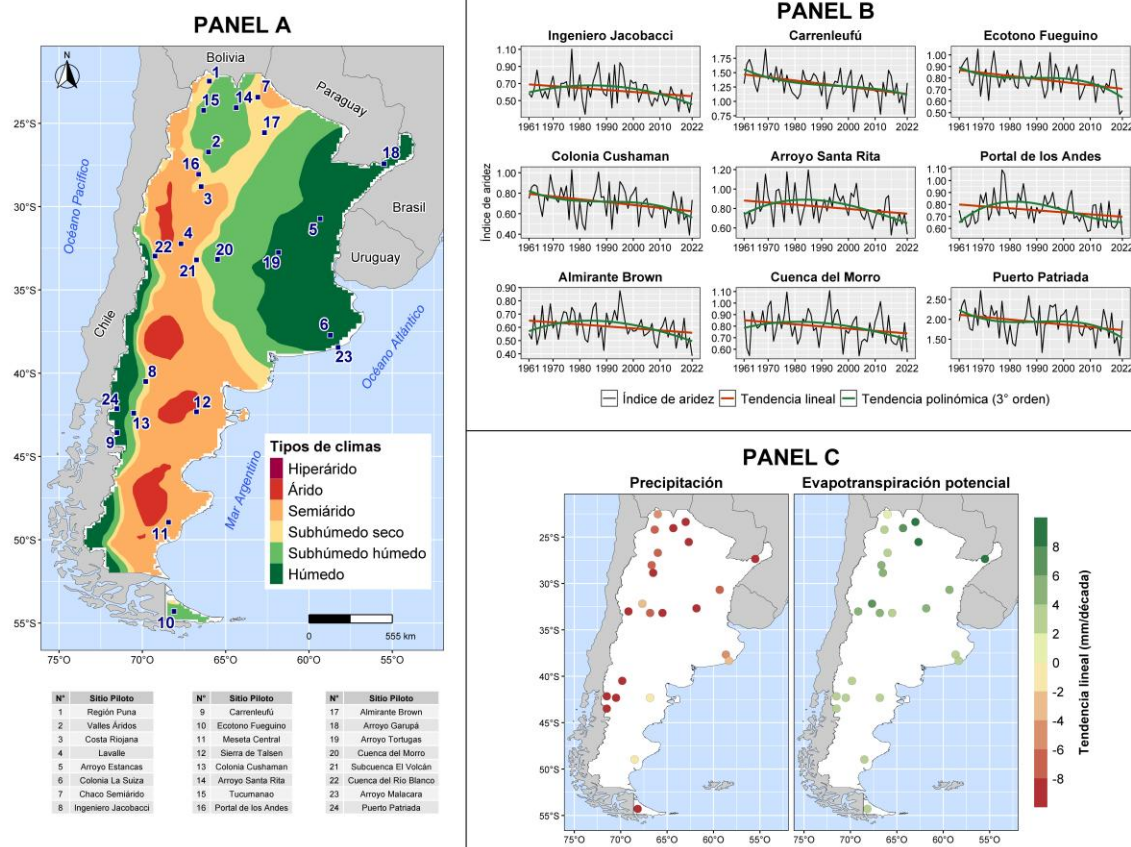


Figura 1. Panel A. Ubicación geográfica de los SP (puntos azules) y distribución de las categorías climáticas definidas para el índice de aridez de la UNEP, promediado para el período 1961–2022 (sombreado). **Panel B.** Series temporales del índice de aridez para los SP con tendencia lineal estadísticamente significativa (nivel de confianza del 95%). Se incluye las tendencias lineal y polinómica de 3° orden. **Panel C.** Distribución de las tendencias de la precipitación y evapotranspiración potencial para los SP.

4) CONCLUSIÓN

Los SP de monitoreo de desertificación de Argentina muestran un aumento progresivo de la aridez, impulsado principalmente por la disminución de la precipitación y, en menor medida, por el incremento de la demanda evaporativa atmosférica. En sitios como Carrenleufú y Puerto Patriada, estos cambios han sido especialmente marcados, consolidando a la aridez como un factor biofísico clave en el avance de la desertificación. Este proceso resalta la utilidad de los SP como herramienta de seguimiento de la aridificación y desertificación en el país.

REFERENCIAS

- Grünig, M., Seidl, R., y Senf, C., 2023:** Increasing aridity causes larger and more severe forest fires across Europe, *Global Change Biology*, 29, 6, 1648-1659.
- Hoffmann, R., 2022:** Contextualizing climate change impacts on human mobility in African drylands. *Earth's Future*, 10, 6, e2021EF002591.
- Middleton, N., y Thomas, D., 1997:** *World Atlas of Desertification*, United Nations Environment Programme (UNEP).
- Therburg, A., Corso, M., Stamati, M., Bottero, C., Lizana, P., y Pietragalla, V., 2019:** Síntesis de resultados de la evaluación de la degradación de tierras: 2012-2017, IADIZA.
- Ullah, S., You, Q., Sachindra, D. A., Nowosad, M., Ullah, W., Bhatti, A. S., ... y Ali, A., 2022:** Spatiotemporal changes in global aridity in terms of multiple aridity indices: An assessment based on the CRU data. *Atmos. Res.*, 268, 105998.

SIMULACIONES DE CAMBIOS DE TEMPERATURA GLOBAL EN LOS ULTIMOS 6.000 AÑOS

Ana Laura Berman, Gabriel Silvestri, Nicolás J. Cosentino

alberman@cima.fcen.uba.ar

Universidad de Buenos Aires (UBA)-CONICET- Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) –
Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI) /IRL 3351-CNRS-CONICET-IRD-
UBA. Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: paleoclima, simulaciones numéricas.

1) INTRODUCCIÓN

Uno de los indicadores clave del cambio climático durante las últimas décadas es la variación de la temperatura del aire cercano a la superficie (TAS) del planeta. A nivel global, los cambios en TAS no son uniformes. En particular, el calentamiento global muestra un patrón con marcada asimetría latitudinal (Anderson y otros, 2013) y calentamiento en el Hemisferio Norte (HN) mucho mayor que en el Hemisferio Sur (HS) (Drost y otros, 2012). Estos desfases, junto con la diferencia de capacidad calorífica entre los océanos y los continentes, juegan un papel fundamental en la dinámica del sistema climático. En este contexto, Berman y otros (2017, 2020) mostraron que el aumento de TAS en Sudamérica desde 1850 se está produciendo con una rapidez que no tiene precedentes en los últimos 20.000 años. En otras palabras, los cambios de temperatura en respuesta al forzante antropogénico se están acelerando de manera muy marcada respecto a los cambios en periodos pre-Industriales producidos por forzantes naturales.

En el marco de simulaciones climáticas, los estudios de escenarios futuros pueden enriquecerse con la inclusión de análisis de climas pasados (paleoclima) dado que éstos proporcionan un contexto histórico más amplio que el descripto sólo por condiciones durante lo que usualmente se considera periodo pre-Industrial (PI) (Berman y otros, 2020). En este sentido, el Paleoclimate Modelling Intercomparison Project (PMIP; <https://pmip.lsce.ipsl.fr>) contiene simulaciones de climas pasados realizadas con los mismos modelos usados en las proyecciones futuras del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) permitiendo entonces integrar condiciones de climas pasados y futuros. El proyecto PMIP se inició durante la década de 1990 (versión identificada como PMIP1) con modelos globales atmosféricos simples. Luego continuó con simulaciones más complejas realizadas con modelos acoplados atmósfera-océano en las versiones PMIP2 (década de 2000), PMIP3 (década de 2010) y la más reciente PMIP4 (disponible desde 2020). El paso de una versión PMIP a la siguiente consistió en la incorporación de simulaciones con modelos cada vez más complejos y computacionalmente más costosos.

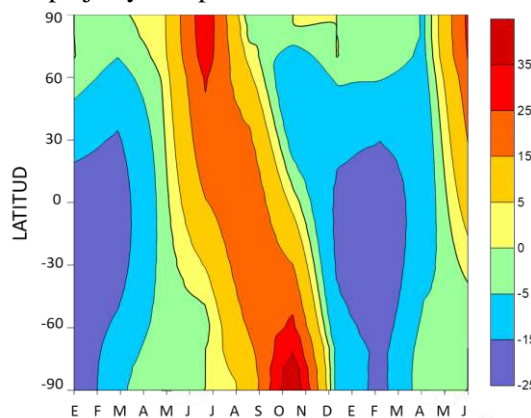


Figura 1: Diferencia de insolación (W/m^2) entre HM y PI (HM menos PI). Las diferencias se repiten en el eje horizontal para mostrar con más claridad el cambio durante el verano austral.

Un periodo del pasado que resulta relevante en PMIP es el conocido como Holoceno Medio (HM) desarrollado 6.000 años antes del presente. El interés en este periodo del pasado se debe a que la topografía del planeta y la composición de la atmósfera fueron similares a las de PI pero la insolación fue diferente debido a cambios en los parámetros orbitales de la Tierra alrededor del Sol (Figura 1). Considerando que el periodo HM fue simulado en todas las versiones PMIP, el objetivo de este trabajo es mostrar el impacto sobre TAS del cambio de insolación durante HM y la relación de ese cambio con el calentamiento antropogénico. También se comparan los resultados obtenidos en cada versión de modelos PMIP.

2) DATOS Y METODOLOGIA

El análisis presentado en este trabajo se basa en todas las simulaciones de modelos PMIP2 (diez modelos), PMIP3 (catorce modelos) y PMIP4 (quince modelos) disponibles. Los datos de cada modelo fueron regrillados a una cuadrícula común de resolución de 2° de latitud y longitud. Se estudia la coincidencia en el signo y magnitud de las diferencias de TAS entre HM y PI (HM menos PI referidas como anomalías HMPI) en PMIP2, PMIP3 y PMIP4 para identificar la robustez de las mismas. Se identifica nivel alto (medio) de coincidencia entre los modelos de cada fase PMIP cuando más del 80% (60%) de los modelos coinciden en el signo de anomalías HMPI estadísticamente significativas. La significancia estadística de las anomalías se obtiene con test t-Student al 90%. Se hace el mismo estudio para las diferencias de TAS entre HM y el presente (PRE) (HM menos PRE referidas como anomalías HMPRE) en los modelos PMIP3 y PMIP4 no pudiéndose hacer en PMIP2 porque PRE no fue simulado en esa fase PMIP.

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las anomalías HMPI en PMIP2 (Figuras 2a-d) muestran coincidencia entre los modelos en anomalías frías sobre todos los continentes en la banda 40°N – 40°S y los océanos tropicales en DEF que se extienden sobre gran parte del planeta en MAM. Esta coincidencia se pierde sobre los continentes del HS en JJA al tiempo que hay coincidencia en anomalías cálidas sobre los continentes del HN al norte de 30°N . La coincidencia en anomalías cálidas se extiende a regiones continentales y oceánicas de ambos hemisferios en SON, cubriendo especialmente los continentes del HS. Estos patrones de cambios de temperatura estacional entre HM y PI son la consecuencia de los cambios de insolación descritos en Figura 1 con enfriamiento (calentamiento) sobre continentes y océanos producido por disminución (aumento) de insolación. No obstante, la respuesta de TAS a los cambios de insolación puede estar desfasada uno o más meses dependiendo de la inercia térmica del tipo de superficie (tierra, nieve, hielo marino o agua). Además, los campos de anomalías de cada modelo (figuras no mostradas) permiten concluir que la ausencia de coincidencia (las áreas en blanco en cada figura) se debe a la forma particular en la que cada modelo describe la transición entre meses de anomalías frías y cálidas. Por ejemplo, la ausencia de coincidencia en Sudamérica durante JJA se debe a diferencias entre los modelos respecto a la manera en que se produce la transición de las anomalías frías en MAM a las anomalías cálidas en SON. Aun cuando los modelos pueden coincidir en el signo de las anomalías, existen discrepancias respecto a la intensidad de esas anomalías (figuras no mostradas). En otras palabras, la coincidencia entre modelos PMIP2 respecto al signo del cambio de TAS no se replica en coincidencia en la intensidad de ese cambio.

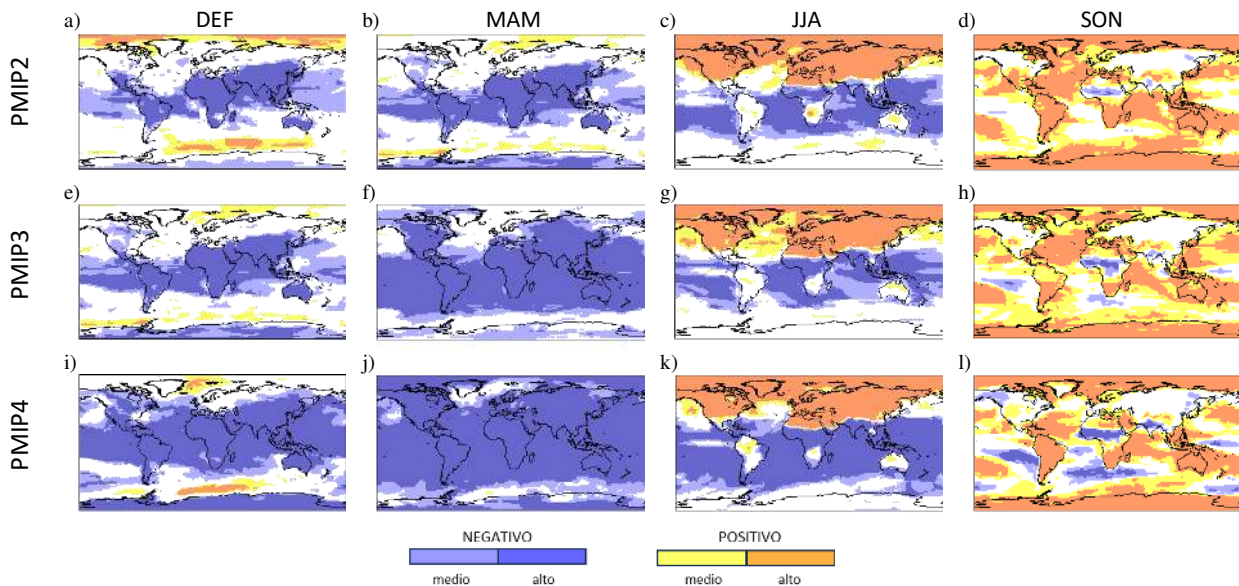


Figura 2: Coincidencia en el signo de anomalías HMPI estadísticamente significativas en cada estación del año. En color se indican las áreas con nivel alto y nivel medio de coincidencia entre modelos de cada fase PMIP en el signo de la anomalía. DEF se refiere al trimestre diciembre-enero-febrero, MAM a marzo-abril-mayo, JJA a junio-julio-agosto y SON a setiembre-octubre-noviembre.

Los campos de anomalías HMPI en modelos PMIP3 (Figuras 2e-h) y PMIP4 (Figuras 2i-l) son esencialmente similares a los de PMIP2 encontrándose también discrepancias respecto a la intensidad de esas anomalías (figuras no mostradas).

Las anomalías HMPRE son la suma de dos componentes: anomalías HMPI por cambios de insolación (descriptas previamente) y el calentamiento generalizado entre PI y PRE por forzante antropogénico (figuras no mostradas). Los campos estacionales de anomalías HMPRE en modelos PMIP3 se muestran en Figura 3a-d y los de modelos PMIP4 en Figura 3e-h. Se observan características esencialmente similares en ambas fases PMIP. En DEF y MAM, el calentamiento desde HM hasta PI por cambio de insolación (Figura 2) es continuado por el calentamiento antropogénico. Como resultado, los modelos coinciden en anomalías HMPRE frías sobre casi todo el planeta en ambas estaciones. Por el contrario, los modelos coinciden en anomalías HMPRE cálidas en los continentes del HN en JJA y en áreas continentales del HS en SON. Estas anomalías cálidas indican que el enfriamiento desde HM hasta PI en respuesta al cambio de insolación (figuras 2h y 2l) aún no ha sido revertido por el calentamiento antropogénico y, en consecuencia, hay regiones en donde las temperaturas del presente son todavía más frías que las de HM. De manera similar a lo que ocurre con las anomalías HMPI, la coincidencia en el signo de anomalías HMPRE no se replica en coincidencia en la magnitud de ese cambio (figuras no mostradas).

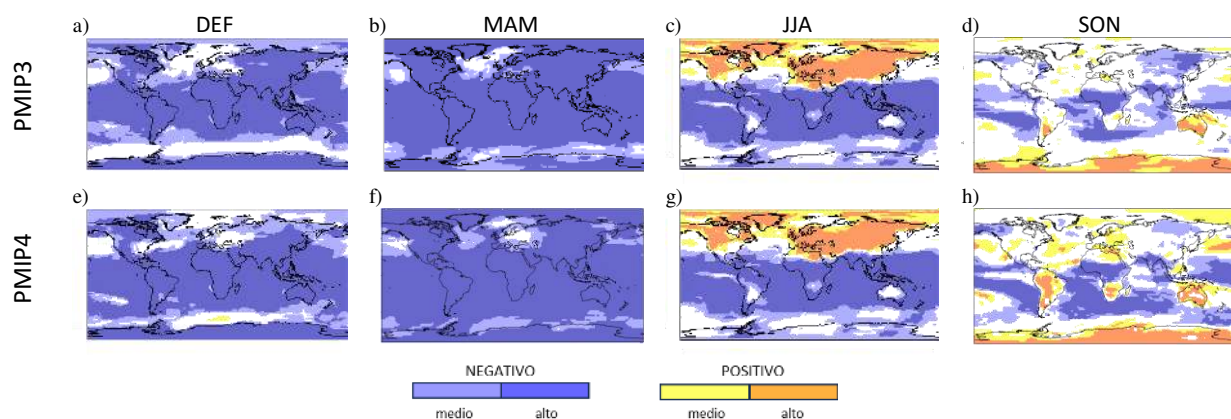


Figura 3: Como Figura 2 pero para anomalías HMPRE.

En conclusión, las anomalías de temperatura HMPI y HMPRE simuladas por los modelos de última generación contenidos en PMIP4 son esencialmente similares a las simuladas por los modelos de las fases previas PMIP2 y PMIP3. Esta conclusión es muy relevante para el desarrollo de nuevas simulaciones de climas pasados porque indica que, al menos para temperatura, los resultados con modelos relativamente simples (como los contenidos en PMIP2 y PMIP3) pueden ser similares a los obtenidos con modelos altamente complejos y computacionalmente más costosos (como los contenidos en PMIP4).

REFERENCIAS

- Anderson, D., Mauk, E., Wahl, E., Morrill, C., Wagner, A., Easterling, D. y Rutishauser T., 2013:** Global warming in an independent record of the past 130 years. *Geophysical Research Letters*, 40, 189-193.
- Berman, A.L., Silvestri, G., Rojas, M. y Tonello, M., 2017:** Accelerated greenhouse gases versus slow insolation forcing induced climate changes in southern South America since the Mid-Holocene. *Climate Dynamics*, 48, 387-404.
- Berman, A.L., Silvestri, G. y Tonello, M., 2020:** Paleoclimatic context of projected future warming in southern South America. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 173-181.
- Drost, F., Karoly, D. y Braganza, K., 2012:** Communicating global climate change using simple indices: An update. *Climate Dynamics*, 39, 989-999.

CLIMATOLOGÍA DE TORMENTAS EN UN VALLE DEL NOROESTE ARGENTINO MEDIANTE SENSORES REMOTOS Y REANÁLISIS

Fabrizio Lopretto, Luciano Vidal
flopretto@smn.gob.ar.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Tormentas, RMA-11, GLM, ERA-5, WRF-SMN.

1) INTRODUCCIÓN

En el Noroeste Argentino (NOA), la Depresión del Noroeste Argentino (DNOA) modula la humedad y las precipitaciones (Ferreira, 2008), mientras que la convergencia de masa en niveles bajos es un factor determinante en la iniciación de tormentas (Vidal, 2014).

Además, la caracterización de tormentas ha sido abordada mediante estudios de reflectividad de radar, estableciendo umbrales que permiten identificar eventos convectivos intensos y presencia de granizo (Vidal y otros, 2020).

Este trabajo analiza las tormentas en un valle del NOA entre diciembre y febrero de las temporadas 2019-2024 utilizando datos de sensores remotos y reanálisis. Se investigan patrones atmosféricos previos a las tormentas y se analiza la variación de humedad específica con los campos iniciales del modelo *Weather Research and Forecasting* del Servicio Meteorológico Nacional (WRF-SMN), con 4 km de resolución (Dillon y otros, 2020).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos de actividad eléctrica del sensor *Geostationary Lightning Mapper* (GLM) del satélite GOES-16 (Goodman y otros, 2013) y del Radar Meteorológico Argentino 11 (RMA-11) perteneciente al SINARAME y ubicado en Termas de Río Hondo, para detectar tormentas eléctricas en el valle entre diciembre de 2019 y febrero de 2024.

Se considera que hay una tormenta eléctrica en el valle cuando se detecta al menos un *flash* mediante el sensor GLM del GOES-16, y el mapeo ocurre dentro del intervalo temporal de un volumen del radar RMA-11 que presenta una reflectividad horizontal igual o superior a 45 dBZ en la zona del valle.

Se analizó el comportamiento sinóptico de los días con tormenta eléctrica mediante el cálculo de anomalías de diversas variables, siendo obtenidas de los reanálisis de ECMWF *Reanalysis 5th Generation* (ERA-5) (Hersbach y otros, 2023). Las anomalías se calcularon comparando los valores medios diarios de los días con tormenta con los valores climatológicos del período 2003-2023.

Para estudiar la dinámica atmosférica en el valle, se utilizaron los campos iniciales de alta resolución del modelo WRF-SMN inicializados con el modelo global *Global Forecast System* (GFS). Los aportes de los términos de advección y convergencia de humedad específica sobre la tasa local se calcularon a partir de la Ecuación 1:

$$\partial q / \partial t = -u \cdot \partial q / \partial x - v \cdot \partial q / \partial y - q \cdot (\partial u / \partial x + \partial v / \partial y) \quad (1)$$

Donde x e y son la distancia longitudinal y latitudinal respectivamente, t es el tiempo, u y v son las componentes zonal y meridional del viento respectivamente, y q es la humedad específica.

3) RESULTADOS

En cuanto a la distribución espacial de los *flashes*, se encontraron los mayores valores en las laderas oriental y occidental del valle, especialmente en el ingreso al mismo desde el norte. Cabe mencionar que la cantidad total de *flashes* contabilizados en el valle fue de 85952, si se consideran mapeos en los que se verifica el criterio propuesto. En el caso de los volúmenes con $Z \geq 45$ dBZ, se detectó un máximo en el piedemonte occidental, aunque en la zona oriental no se observó el mismo patrón claro. Estos resultados se muestran en la Figura 1.

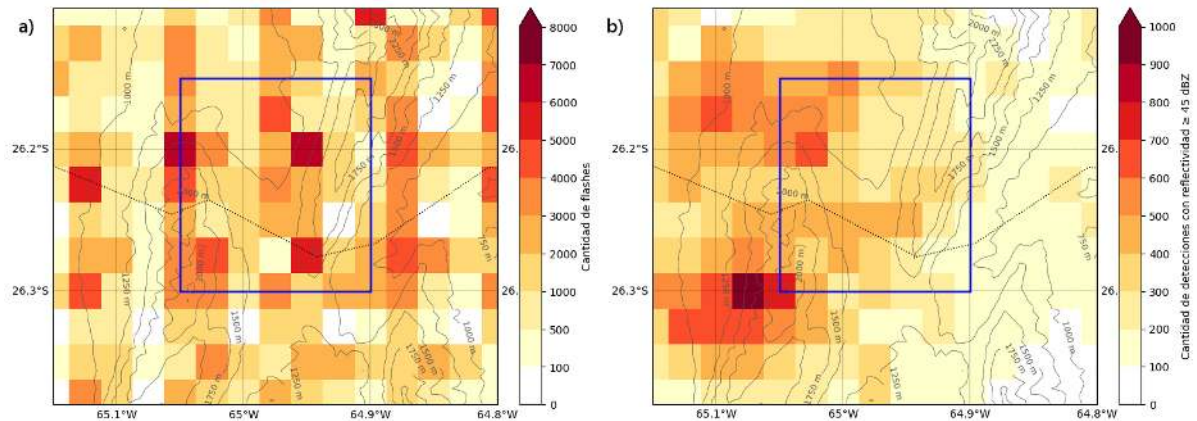


Figura 1. Distribución espacial de (a) flashes detectados por el sensor GLM del GOES-16 y (b) volúmenes de muestreo con reflectividad ≥ 45 dBZ identificados por el RMA-11, en casos que cumplen con el criterio de detección propuesto en el valle. El recuadro azul indica la región de interés analizada en el estudio.

El análisis de las anomalías de variación local de humedad específica en capas bajas en alta resolución indicó que el término de convergencia fue el principal mecanismo que favoreció la formación de tormentas en el valle. Aunque el término de advección mostró valores negativos, su intensidad fue menor en comparación con la convergencia. Estos resultados, que se pueden ver en la Figura 2, sugieren que los procesos convectivos en el valle estuvieron impulsados principalmente por la convergencia de humedad, lo que proporcionó las condiciones necesarias para los desarrollos convectivos.

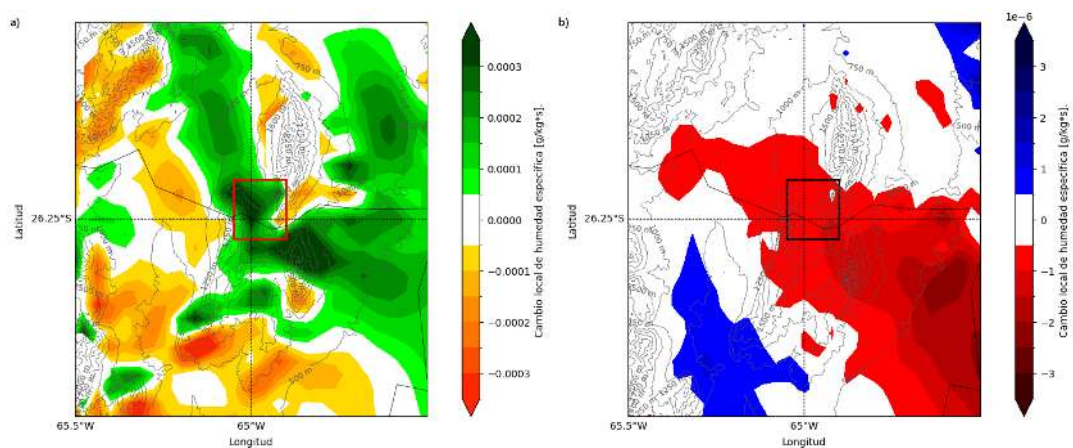


Figura 2. Campos medios del término de a) convergencia y b) advección de humedad específica que contribuyen a la tasa de cambio local de humedad específica en 800 hPa. Las líneas de contorno grises representan la topografía. El rectángulo negro indica la región de interés para el análisis.

4) CONCLUSIONES

El uso de mapeos del GLM como criterio de detección fue adecuado. La incorporación de datos de radar permitió filtrar falsas detecciones, pero el 71% de las detecciones de *flashes* en el valle ocurrieron sin datos de radar. Esto sugiere que, con más datos de reflectividad, se podrían identificar más tormentas. Además, la frecuencia de detección se mantuvo constante durante los meses de diciembre a febrero, con un ligero aumento en enero.

El análisis de los datos de reanálisis del ERA-5 mostró condiciones inestables previas a las tormentas, con una masa de aire cálido y un frente frío avanzando hacia el noreste. Los análisis de alta resolución WRF-SMN revelaron que la convergencia de humedad específica es causa principal del aumento de esta en la región (a diferencia de la advección), lo que favorece la formación de las tormentas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Cynthia Matsudo y Marcos Saucedo por su tiempo y aportes a este trabajo, que ha sido fundamental.

REFERENCIAS

Dillon, M. E., C. Matsudo, Y. García Skabar, M. Sacco, 2020: Implementación del sistema de pronóstico numérico en el HPC: Configuración de los pronósticos determinísticos. Nota Técnica SMN 2020-78.

Ferreira, L., 2008: Causas y variabilidad de la depresión del Noroeste argentino e impactos sobre los patrones regionales de circulación. Tesis de doctorado, Universidad de Buenos Aires.

Goodman, S. J., Blakeslee, R. J., Koshak, W. J., Mach, D., Bailey, J., Buechler, D., Carey, L., Schultz, C., Bateman, M., McCaul, E., Stano, G., 2013: The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM), Atmospheric Research, Volumes 125–126, 2013, Pages 34-49, ISSN 0169-8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006>.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47) (Accessed on 10-10-2024)

Vidal, Luciano, 2014. "Convección extrema sobre Sudamérica: estructura interna, ciclos de vida e influencia de la topografía en la iniciación". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Vidal, L., Ishikame, G., Pappalardo, L., Rugna, M. (2020): Sobre el uso del radar meteorológico para el diagnóstico de granizo. Nota Técnica SMN 2020-77.

ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO DE LA SEQUÍA EXTREMA OCURRIDA EN EL SUROESTE DE URUGUAY EN 2022-2023

Emilio Deagosto¹, Marcelo Barreiro¹
emilio.deagosto@pedeciba.edu.uy

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos, Instituto de Física,
Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay

Palabras clave: sequía extrema, variabilidad climática, Sureste de Sudamérica

El suroeste de Uruguay experimentó una sequía sin precedentes entre principios de 2022 y mediados de 2023, destacada particularmente por su intensidad, duración, distribución espacial e impactos socioeconómicos. Las pérdidas directas en el sector agropecuario se estimaron en 2.000 millones de dólares, lo que representó más del 3% del PIB nacional y 40% del PIB sectorial. Asimismo, la sequía afectó severamente el suministro de agua potable en la zona metropolitana de Montevideo, donde vive el 60% de la población de Uruguay. La principal reserva de agua bruta cayó por debajo del 2% de su capacidad de almacenamiento, lo que resultó en la incapacidad de la empresa estatal OSE de satisfacer la demanda de agua potable durante varias semanas, un hecho sin precedentes en la historia del país.

Este trabajo presenta un análisis diagnóstico de la sequía 2022-23 como caso de estudio de un evento climático de alto impacto y su comparación con eventos anteriores. Como primer paso, para poner la sequía de 2022-23 en contexto histórico, se desarrolló una regionalización del país basada en el Índice Estandarizado de Precipitación de 12 meses (SPI-12) a partir de datos observados del Instituto Uruguayo de Meteorología entre 1961 y 2023. El SPI-12 se construyó considerando la ventana temporal junio-mayo (SPI-12-may) con el fin de capturar la influencia de El Niño-Oscilación Sur (ENSO), principal modo de variabilidad interanual de las precipitaciones en el Sureste de Sudamérica. Los eventos extremos identificados en el histórico de datos para cualquier región de Uruguay fueron caracterizados en base a su intensidad (SPI-12-may), duración (meses consecutivos con precipitación inferior a la mediana del período 1961-2023) y factores climáticos determinantes, tanto de gran escala como de escala regional/local. Se evaluó el potencial impacto de los modos de variabilidad con reportada influencia sobre las precipitaciones en la región; ENSO, Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), Dipolo del Océano Índico (IOD), Modo Anular del Sur (SAM) y Oscilación de Madden-Julian (MJO).

Desde 1961 a la fecha, diferentes regiones de Uruguay han experimentado numerosos episodios de sequía, destacándose tres eventos extremos (SPI-12-may < 2,0): 1964-65, 1988-89 y 2022-23. Los tres eventos afectaron diferentes partes del territorio -así como países vecinos-, siendo las sequías más severas aquellas registradas en la región centro-oeste en 1964-65, y en la región suroeste en 2022-23. Cabe destacar que la ocurrencia de períodos secos y húmedos en todas las regiones de Uruguay presenta una correlación estadísticamente significativa con ENSO (Índice ONI; CPC, NOAA) cuando se considera la ventana temporal junio-mayo (nivel de confianza 95%). Aunque La Niña genera condiciones de escala regional y local que favorecen el déficit de precipitaciones en Uruguay (Barreiro, 2024), los eventos más intensos identificados en el registro histórico no estuvieron vinculados con años Niña particularmente intensos. Esta observación evidencia el carácter multifactorial y la complejidad de los eventos de sequía extremos. A pesar de coexistir con una Niña débil, la sequía de 2022-23 fue un evento excepcional en términos de intensidad (SPI-12-may = -3,3) y duración (17 meses consecutivos con precipitaciones inferiores a la mediana 1961-2023 entre marzo 2022 y julio 2023; *Figura 1*), destacándose como el episodio de sequía más prolongado dentro del período analizado, no solo en el suroeste sino en todo el territorio, donde ningún otro evento se le asemeja.

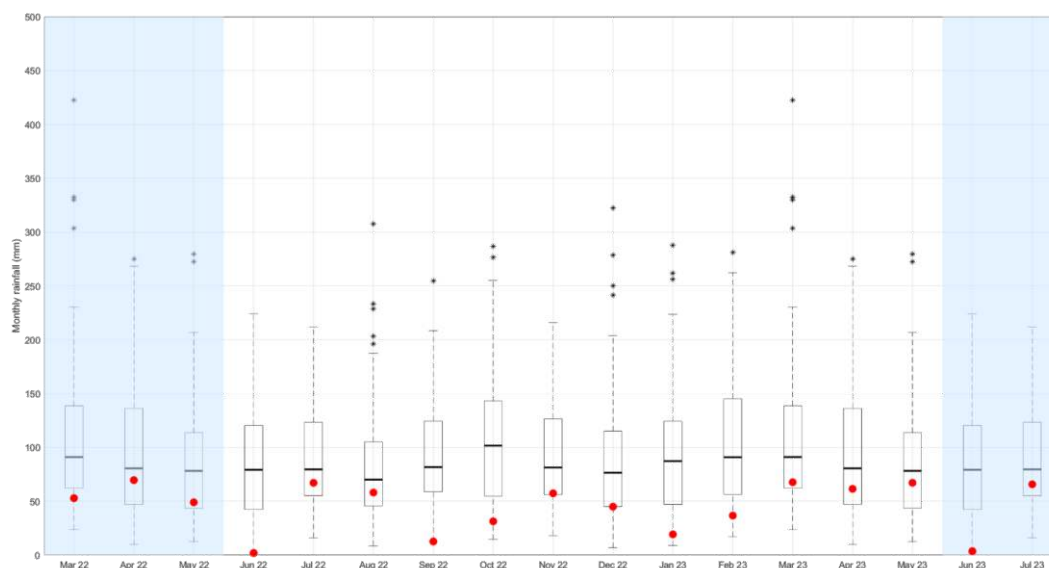


Figura 1: Precipitación acumulada mensual (mm) en el suroeste de Uruguay entre marzo de 2022 y julio de 2023 (círculos rojos). El diagrama de cajas representa el período 1961-2023 y los outliers indican valores por encima de 2.7σ y por debajo de -2.7σ . El área sin sombrear corresponde al año corrido junio 2022-mayo 2023 sobre el que se calcula el SPI-12-may.

A continuación, se analizaron las anomalías de circulación asociadas a las tres sequías extremas considerando variables oceánicas y atmosféricas (temperatura de superficie del mar (SST), altura de geopotencial en 500 hPa (z_{500}), vientos en 200 hPa y 850 hPa, transporte de humedad integrado en la vertical (VIMT) y divergencia de VIMT (VIMD)). La *Figura 2* muestra las anomalías de circulación regional y hemisférica asociadas a la sequía 2022-23. La comparación entre sequías sugiere que diversas configuraciones de patrones de anomalías climáticas pueden dar lugar a eventos de sequía de similar intensidad, pero distinta duración y distribución espacial en la región, lo que añade complejidad a su análisis y predictibilidad. Aunque las tres sequías extremas ocurridas en Uruguay desde 1961 comparten características comunes (por ejemplo, su ocurrencia durante fases frías de ENSO y PDO), los patrones de circulación asociados difieren notablemente en cada caso. Esto último podría vincularse con la influencia estacional y subestacional de otros modos de variabilidad que actúan en conjunto con ENSO y modulan sus impactos en la región, como SAM, MJO e IOD.

Adicionalmente, otro conjunto de factores podría haber influido también en el inicio e intensificación de la sequía 2022-23, particularmente las interacciones superficie-atmósfera y los cambios en el uso del suelo. A diferencia de la última sequía, los eventos de 1964-65 y 1988-89 fueron precedidos por años húmedos. En cambio, el evento 2022-23 fue precedido por tres años consecutivos con precipitaciones por debajo de lo normal, lo que podría haber intensificado el evento debido a la importancia del reciclaje local como fuente de humedad (Leyba et al., 2023). Además, el Amazonas, otra fuente crucial de humedad para la región, ha estado atravesando un proceso de deforestación acelerado en los últimos años, lo que ha sido señalado en estudios previos como un factor contribuyente a la sequía prolongada registrada en la región entre 2019 y 2023 (Arias et al., 2023; Ruv Lemes et al., 2023).

Asimismo, a pesar del papel significativo de la variabilidad natural en la ocurrencia de la sequía 2022-23, es probable que el aumento de temperatura en superficie vinculado con el cambio climático antropogénico haya intensificado su desarrollo, tal como lo han reportado estudios previos. En este sentido, el prolongado período seco ocurrido en el sureste de Sudamérica entre 2019 y 2023 ha sido propuesto como un ejemplo de la interrelación entre la variabilidad y el cambio climático (Geirinhas et al., 2023; Arias et al., 2023).

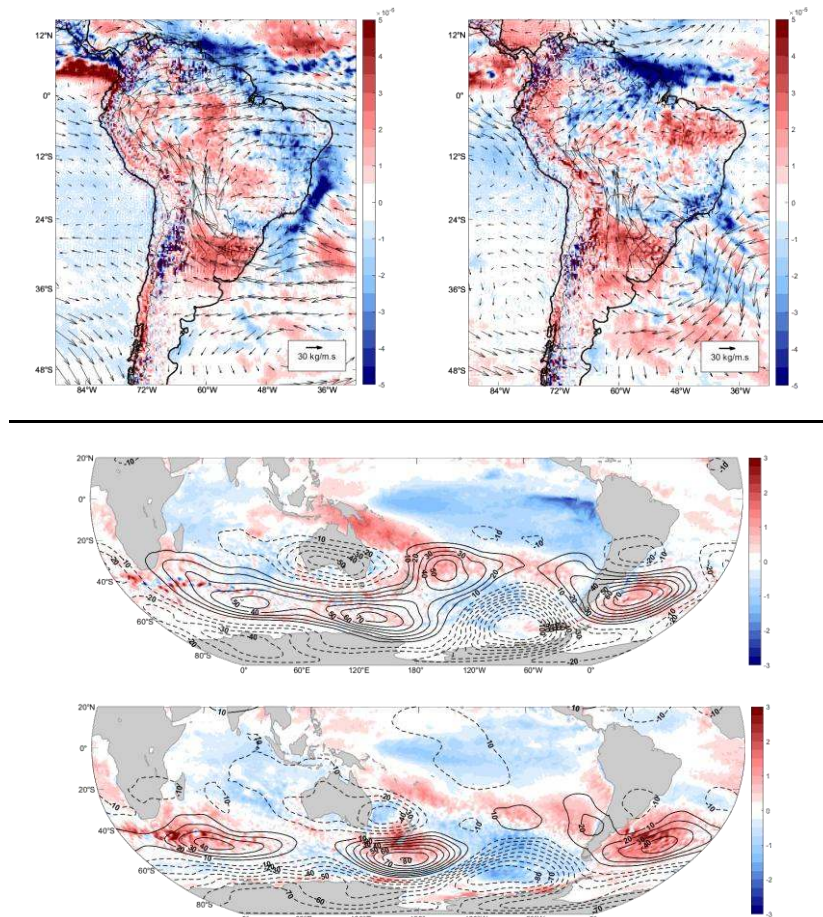


Figura 2: (Panel superior) anomalías de VIMD ($\text{kg/m}^2\text{s}$), sombreado, y VIMT ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$) vectores, para SON (izq.) y DEF (der.) de 2022-23; (Panel inferior) anomalías de SST ($^{\circ}\text{C}$), sombreado, y z_{500} , contornos, para SON (arriba) y DEF (abajo) de 2022-23.

REFERENCIAS

Arias, P. A., Rivera, J. A., Sörensson, A. A., Zachariah, M., Barnes, C., Philip, S., Kew, S., Vautard, R., Koren, G., Pinto, I., Vahlberg, M., Singh, R., Raju, E., Li, S., Yang, W., Vecchi, G. A., & Otto, F. E. L., 2023: Interplay between climate change and climate variability: the 2022 drought in Central South America. *Climatic Change*, 177(1).

Barreiro, M., 2024: Combined Effects of the Tropical and Extratropical Modes of Variability on Precipitation in Southeastern South America. In *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. Oxford University Press.

Geirinhas, J. L., Russo, A. C., Libonati, R., Miralles, D. G., Ramos, A. M., Gimeno, L., & Trigo, R. M., 2023: Combined large-scale tropical and subtropical forcing on the severe 2019–2022 drought in South America. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1).

Leyba, I. M., Solman, S. A., Saraceno, M., Martinez, J. A., & Dominguez, F., 2023: The South Atlantic Ocean as a moisture source region and its relation with precipitation in South America. *Climate Dynamics*, 61(3–4), 1741–1756.

Ruv Lemes, M., Sampaio, G., Garcia-Carreras, L., Fisch, G., Alves, L. M., Bassett, R., Betts, R., Maksic, J., Shimizu, M. H., Torres, R. R., Guatura, M., Basso, L. S., & Bispo, P. da C., 2023: Impacts on South America moisture transport under Amazon deforestation and 2°C global warming. *Science of the Total Environment*, 905.

EL AUMENTO DEL NIVEL MEDIO DEL RÍO DE LA PLATA Y SU IMPACTO EN LA EVOLUCIÓN DE LAS ONDAS DE TORMENTA NEGATIVAS

M. Florencia de Azkue¹, Enrique E. D'Onofrio²

maria.azkue@defensa.gob.ar

¹Servicio de Hidrografía Naval (SHN), Departamento Oceanografía

²Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería (FIUBA)

Palabras clave: calentamiento global, marea astronómica, cambio climático.

1) INTRODUCCIÓN

El Río de la Plata (RdP) es un estuario de poca profundidad, con orientación NNO-SSE, compartido por Argentina y Uruguay. El nivel del agua está determinado por la combinación de un régimen micro-mareal semidiurno con desigualdades diurnas (D'Onofrio et al., 2008) y una circulación forzada por el viento. Así pues, las condiciones meteorológicas pueden generar diferencias entre las alturas observadas y la marea astronómica. Estas anomalías son llamadas ondas de tormenta. Las anomalías positivas (ODTP) están asociadas a niveles más altos que la marea astronómica predicha y pueden generar inundaciones y anegamientos, mientras que las negativas (ODTN) corresponden a niveles más bajos y pueden afectar la navegación y el suministro de agua potable en la ciudad de Buenos Aires (Campetella et al., 2007; D'Onofrio et al., 2008, Dinápoli et al., 2024). Entre la marea astronómica, el aumento del nivel del mar y las ondas de tormenta pueden ocurrir interacciones fuertes; aunque la importancia de cada mecanismo de interacción es muy heterogénea según la ubicación considerada (Idier et al., 2019). Para las ODTP se encontró que el aumento del nivel medio del RdP no es el único factor ni el más importante que afecta sus variaciones (de Azkue y D'Onofrio, 2024). Es por ello que, en este trabajo, nos enfocamos en estudiar si dicho aumento afecta la evolución de las ODTN.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos de base utilizados en este trabajo corresponden a alturas horarias del estuario del RdP durante el período comprendido entre 1905 y 2024, con un intervalo de datos faltantes entre 1963 y 1965. Para obtener el nivel medio anual del río y su tendencia lineal, la serie de observaciones se divide en dos subconjuntos de datos. El primer subconjunto corresponde a las observaciones del período 1905-1962, y el segundo al período 1965-2024 (denominados P1 y P2, respectivamente). Esta distinción se basa en los cambios observados en el aumento del nivel medio del RdP, el cual ha acelerado su incremento, alrededor de 1960 (e.g., de Azkue y Fiore, 2021). Para calcular los eventos de ODTN, es necesario contar con una serie de residuos que consisten en la diferencia entre la altura observada y la marea astronómica. Así, se realizan análisis armónicos por mínimos cuadrados siguiendo la Ecuación 1

$$h(t) = Z_0 + \Delta Z \cdot t + \sum_{j=1}^n H_j f_j \cos((V + u)_j - g_j) \quad \text{Ecuación (1)}$$

donde el subíndice j se refiere a cada componente de marea, t corresponde al tiempo de cada observación, h es la altura observada, Z_0 es el nivel medio del río durante el período, ΔZ es la variación del nivel medio, H es la amplitud de las componentes, f es el factor nodal, $(v + u)$ es el argumento de equilibrio, y g corresponde a la época modificada. Para considerar posibles cambios y abordar el ciclo Metónico, se realizan análisis armónicos a las observaciones, dividiéndolas en períodos de 19 años (1905–1923, 1924–1942, 1965–1983, 1984–2002), de 20 años (1943–1962) y de 22 años (2003–2024). Las predicciones de la marea astronómica se estiman de dos maneras diferentes para cada período (P1 y P2). La primera considera: i) las constantes armónicas obtenidas en los períodos de 19/20/22 años, ii) el nivel medio del río durante el período, y iii) la variación lineal del nivel medio durante el período. La segunda sigue los mismos criterios que la primera, excepto que no considera la tendencia del nivel

medio del río. A partir de estas cuatro series de predicciones, se obtienen series de residuos para estimar las ODTN, restando de las observaciones la serie de predicciones en cada caso. Las series de residuos que conservan la variación del nivel medio del río en ambos períodos corresponden a un escenario realista, mientras que las del escenario hipotético son las que no la consideran. No todos los residuos obtenidos corresponden a ODTN. Los eventos deben cumplir con los siguientes criterios: i) nunca deben ser superiores a -0.30 m, ii) el residuo mínimo del evento debe ser menor o igual a -1.20 m, y iii) los eventos deben tener una duración mínima de seis horas. Una vez determinados los eventos, se estiman las tendencias anuales de las series temporales de las siguientes variables: número anual de eventos, duración mínima anual, duración media anual, altura mínima observada anual y mínima ODTN anual. Para ello, primero se aplica un filtro de Savitzky-Golay y luego se obtiene la tendencia mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados estimando el coeficiente de Pearson (r). El mismo tratamiento se aplica para obtener la tendencia del nivel medio del río en P1 y P2. Además, se realiza un estudio estacional de los eventos en ambos períodos en el escenario realista.

3) RESULTADOS Y DISCUSIONES

El valor obtenido de la tendencia anual del nivel medio del río para el P2, de 2.5 mm/año, resulta ser más del doble que el del P1, de 1.1 mm/año. La Tabla 1 muestra las tendencias de las variables de ODTN analizadas y los valores del coeficiente de Pearson (r). Las celdas verdes resaltan los valores de $r > 0.5$. Solamente el número de eventos en ambos escenarios y períodos, y la duración media en el P1 superan dicho umbral, por lo que el resto de las variables pueden considerarse sin una tendencia significativa.

El número de eventos registra tendencia negativa en el escenario realista, y disminuye al pasar de P1 a P2, lo cual sería un comportamiento afín al aumento del nivel medio. Sin embargo, mientras el nivel medio se duplica, la disminución del número de eventos no llega a esa proporción. Además, el número de eventos también registra tendencia negativa en el escenario hipotético donde la tendencia del nivel medio no fue considerada, y en el P2 al cambiar de escenario se mantiene el valor constante, por lo que los cambios en esta variable no pueden ser explicados únicamente por el aumento del nivel medio del río.

Variable	Período	Escenario Hipotético	r (Hipotético)	Escenario Realista	r (Realista)
Número de eventos [evento/año]	p1	-0.0337	0.7131	-0.0476	0.8085
	p2	-0.0508	0.862	-0.0508	0.8344
Observación mínima [m/año]	p1	-	-	0.0045	0.431
	p2	-	-	0.0016	0.2276
ODTN mínima [m/año]	p1	0.0023	0.2486	0.0025	0.2657
	p2	0.0037	0.4327	0.0032	0.4064
Duración máxima [h/año]	p1	-0.0956	0.2647	-0.0623	0.2308
	p2	-0.016	0.1597	0.0129	0.139
Duración media [h/año]	p1	-0.0743	0.5018	-0.0612	0.5602
	p2	-0.0216	0.4565	-0.0065	0.2629

Tabla I- Tendencias de las variables de ODTN y sus respectivos coeficientes de Pearson (r)

La tendencia de la duración media del P1, muestra que los eventos tienden a durar menos en ambos escenarios, pero si el comportamiento siguiera al aumento del nivel medio, en P2 debería registrarse una tendencia menor que en P1, y ocurre lo contrario. Así es que tampoco el aumento del nivel del río está modulando directamente la duración de los eventos.

En la Figura 2 se presentan los resultados de los análisis estacionales de ambos períodos, del número de eventos, de la observación mínima, de la ODTN mínima y mínima media, y de la duración máxima y media.

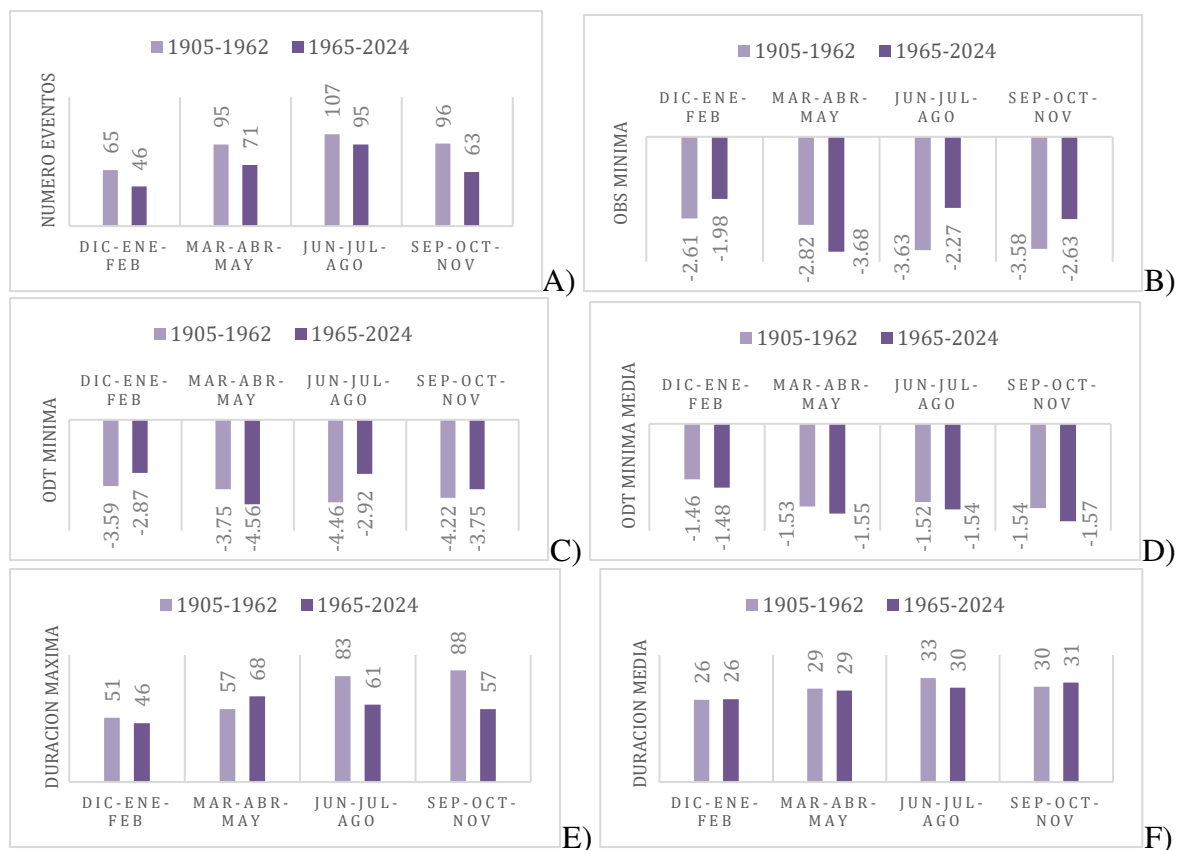


Figura 2- Análisis estacional para P1 y P2 en el escenario realista de A) número de eventos, B) observación mínima, C) ODTN mínima, D) ODTN mínima media, E) duración máxima y F) duración media.

El análisis estacional de las ODTN tampoco revela una relación evidente con el comportamiento del aumento del nivel del río entre períodos, si bien el número de eventos disminuye de P1 a P2 en todas las estaciones del año. Por su parte, vemos que son los inviernos los que concentran la mayor cantidad de ODTN, en contraposición con el verano que registra la mínima. Se presenta un aumento en la altura mínima observada al pasar de P1 a P2 en todas las estaciones, excepto en el otoño donde las observaciones tienen menores valores en P2. Lo mismo ocurre con la ODTN mínima, que aumenta su altura en todas las estaciones entre períodos, excepto en el otoño. Sin embargo, los valores medios de la ODTN son menores en P2 para todas las estaciones. La duración máxima resulta mayor en P1 para todas las estaciones, excepto en los otoños, si bien los valores medios resultan similares en cada estación del año.

REFERENCIAS

- Campetella, C.M., D'Onofrio, E., Cerne, S.B., Fiore, M.E. y Possia, N.E., 2007:** Negative storm surges in the port of Buenos Aires. *International Journal of Climatology*, 27, 1091–1101.
- de Azkue, M. F. y D'Onofrio, E. E., 2024:** Contributions of rising mean river level of the Río de la Plata estuary on recorded changes in positive storm surges. *Ocean and Coastal Research*, 72, e24055.
- de Azkue, M. F. y Fiore, M. M. E., 2021:** Análisis de la tendencia relativa del nivel medio del Río de la Plata entre 1905 y 2020. *Terra Mundus*, 8(1), 1-12.
- Dinápoli, M. G., Simionato, C. G., Alonso, G., Bodnariuk, N., y Saurral, R., 2024:** Negative storm surges in the Río de la Plata Estuary: mechanisms, variability, trends and linkage with the Continental Shelf dynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 305, 108844.
- D'Onofrio, E.E., Fiore, y M.M.E., Pousa, J.L., 2008:** Changes in the regime of storm surges at Buenos Aires, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 24, 260–265.
- Idier, D., Bertin, X., Thompson, P. y Pickering, M. D., 2019:** Interactions between mean sea level, tide, surge, waves and flooding: mechanisms and contributions to sea level variations at the coast. *Survey Geophysics*, 40, 1603– 1630.

CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN MEDIANTE DATOS SATELITALES EN LA CUENCA DEL SALAR DE RINCÓN (SALTA, ARGENTINA)

Ramiro Domínguez Paris^{1,3}, Luis Guarracino², Verónica Rocha Fasola³
ramiro.dominguezparis@gmail.com

¹CONICET, Polo Tecnológico Vaqueros, Salta, Argentina

²CONICET, CIGEOF, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP)

³Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta

Palabras clave: Evaporación, salares andinos, datos satelitales, minería de litio.

1) INTRODUCCIÓN

Los recursos de litio en Argentina se encuentran en la región de la Puna, ocupando el extremo sur del denominado “Triángulo del Litio” que comprende la región norte de Chile y sur de Bolivia. Esta región contiene más de la mitad de los recursos de litio del planeta que se presentan en depósitos de salmueras en cuencas cerradas. El conocimiento del proceso de evaporación en estas regiones resulta clave tanto para entender la formación de los depósitos de salmuera como para la explotación sustentable del litio.

En este trabajo se propone una metodología de cálculo de la evaporación en salares mediante datos satelitales. El proceso de evaporación depende no solo de las variables meteorológicas sino también de factores hidrogeológicos como la densidad del agua, la profundidad del nivel freático y la textura de los sedimentos. En el caso particular de los salares de la Puna los datos de campo son escasos o suelen pertenecer a compañías mineras, lo que dificulta su análisis. En este sentido, la información satelital combinada con información de campo disponible representa una alternativa valiosa para el estudio de la evaporación.

La metodología propuesta se aplicará a la cuenca del Salar de Rincón en la provincia de Salta. Las temperaturas medias en la región oscilan entre los 15° y -5°C a lo largo del año con grandes amplitudes térmicas diarias debido a la intensa radiación solar y un aire extremadamente seco. Las escasas precipitaciones anuales se producen principalmente durante el verano y como resultado solo subsiste poca vegetación muy especializada.

2) METODOLOGÍA

La evaporación (E_v) a escala de cuenca se estimará con la siguiente expresión general:

$$E_v = E_p k_s k_{nf} \quad (1)$$

donde E_p es la evaporación máxima o potencial para agua dulce, k_s un coeficiente de salinidad y k_{nf} un factor que controla la evaporación que se produce desde el nivel freático. Para estimar E_p se empleará la fórmula de Priestley y Taylor (1972) dada por:

$$E_p = \left[\alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_n \right] f_c^{-1} \quad (2)$$

donde α es el parámetro de Priestley-Taylor, Δ es la pendiente de la curva de vapor saturado, γ la constante psicrométrica, R_n la radiación neta y f_c un factor de conversión de unidades.

Los parámetros α y Δ dependen de la temperatura del aire en superficie mientras que R_n depende de la radiación de onda corta recibida, el albedo y las radiaciones de onda larga ascendente y descendente.

Para estimar el coeficiente de salinidad se utilizará una expresión empírica obtenida por Ide (1978) para el salar de Atacama:

$$k_s = -3.7628d^2 + 6.3353d - 1.5725 \quad (3)$$

siendo d la densidad del agua expresada en gr/cm^3 . Finalmente, el factor hidrogeológico k_{nf} será evaluado mediante la expresión propuesta por Johnson y otros (2010) para cuencas del altiplano chileno:

$$k_{nf} = \begin{cases} 1 & z \leq z_1 \\ e^{-a_1(z-z_1)} & z_1 < z \leq z_2 \\ a_2 z^{-a_3} & z_2 < z \end{cases} \quad (4)$$

siendo a_1 , a_2 , a_3 , z_1 y z_2 parámetros empíricos que dependen de la textura del medio poroso, y z la profundidad del nivel freático. Resulta importante destacar que la evaporación solo resulta significativa cuando el nivel freático se encuentra cercano a la superficie.

3) RESULTADOS

La metodología propuesta fue utilizada para estimar la evaporación en el Salar de Rincón. La evaporación potencial E_p se calculó mediante la ecuación 2 utilizando datos mensuales de temperatura del aire y radiaciones de onda (larga y corta) de datos satelitales CERES (<http://ceres.larc.nasa.gov/>). El albedo se estimó en celdas de 1km por 1km a partir de datos OLI Landsat (<https://espa.cr.usgs.gov/>). Los productos satelitales de temperatura y radiación de onda larga incidente fueron validados previamente con datos de una estación meteorológica ubicada en el núcleo del salar.

Para estimar los factores k_s (ecuación 3) y k_{nf} (ecuación 4) se utilizaron datos de densidad y de niveles freáticos extraídos de informes de impacto ambiental disponibles (E&C asociados 2021 y Ausenco 2018). Los coeficientes de la ecuación 4 utilizados se definieron para las distintas litologías de la cuenca y corresponden a curvas que representan valores medios, altos y bajos de evaporación estimados por Johnson y otros (2010).

Una vez estimados los valores de E_p , k_s , k_{nf} para todo el salar y zonas aledañas, se calculó el valor de la evaporación E_v mediante la ecuación 1. En la figura 1 se ilustran los valores de cada uno de estos términos para el mes de noviembre del año 2018.

4) CONCLUSIONES

El patrón espacial de la evaporación en los salares del altiplano está fuertemente condicionada tanto por el albedo como por las condiciones hidrogeológicas. La metodología propuesta permite analizar el rol que cumple cada uno de estos factores y de este modo comprender mejor la dinámica de este complejo proceso. La utilización de datos satelitales para estimar la evaporación potencial permite salvar la limitación de datos meteorológicos existente en la zona. Los resultados en el salar de Rincón muestran que el fenómeno de evaporación se limita esencialmente a las zonas del núcleo y de mezcla, donde los niveles freáticos son someros y no superan el metro de profundidad. En la zona del núcleo el nivel

freático medio es de aproximadamente 30 cm pero la alta densidad del agua y la fuerte presencia de precipitados de cloruros en el medio poroso y superficies escabrosas reducen significativamente el proceso de evaporación. Estos resultados reafirman la hipótesis de que la evaporación en el núcleo de los salares suele ser muy baja.

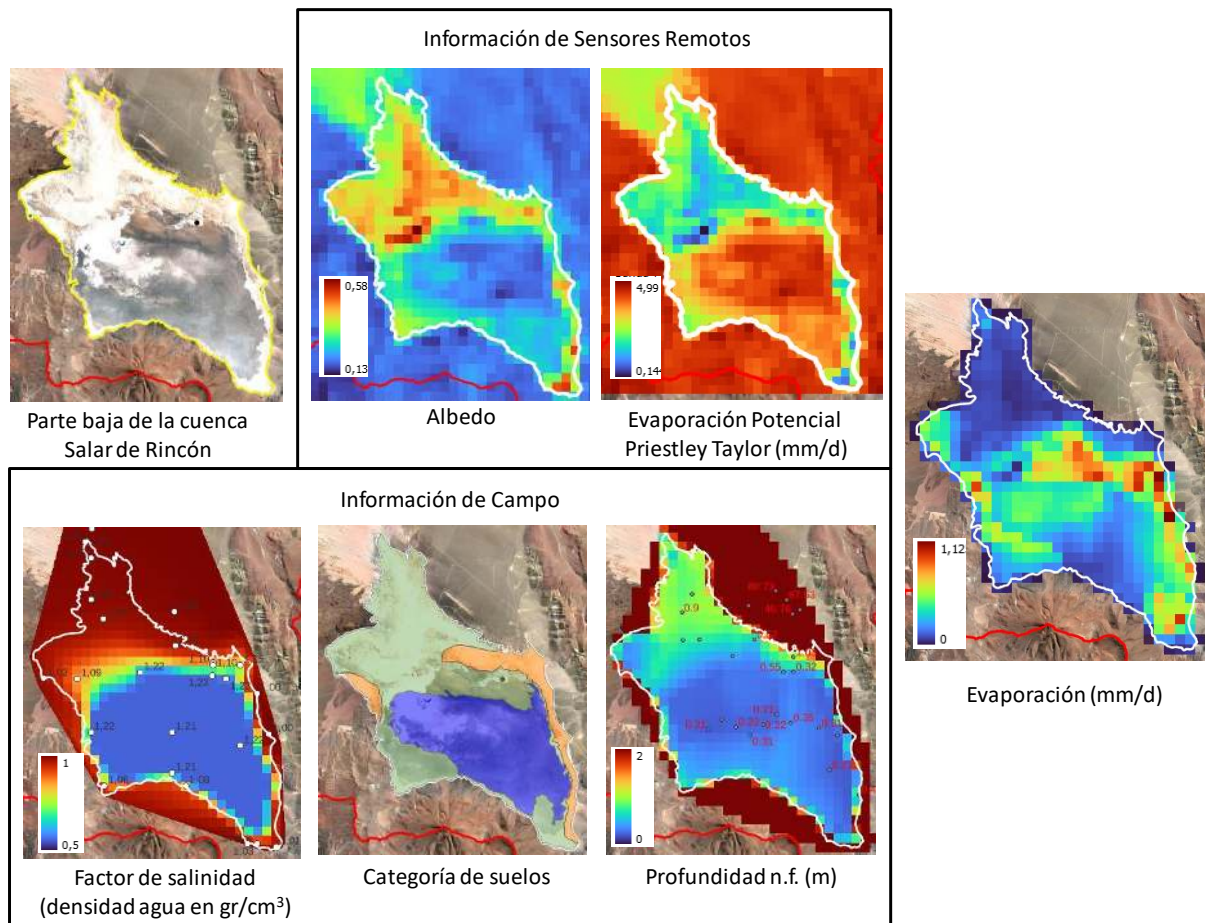


Figura 1: Distribución espacial de los datos de sensores remotos y de campo utilizados para estimar la evaporación en el Salar de Rincón (noviembre de 2018).

REFERENCIAS

Ide F., 1978: Cubicación del yacimiento salar de atacama. Memoria de Título, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Johnson, E., Yáñez, J., Ortiz, C. y Muñoz, J. 2010: Evaporation from shallow groundwater in closed basins in the Chilean Altiplano, Hydrol. Sci. J. 55(4), 624–635.

Priestley, C. H. B. y Taylor, R. J. 1972: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, 100 (2), 81-92.

E&C asociados, 2021: Informe de Impacto Ambiental. Etapa de Explotación Fase 3. Proyecto Rincón Puna Mining, Salar de Rincón, Dpto. Los Andes, Provincia de Salta.

Ausenco, 2018: Actualización de Informe de Impacto Ambiental del Proyecto Rincón Rincon Mining Limited, Dpto. Los Andes, Provincia de Salta.

MODULATION OF ENSO TELECONNECTIONS BY THE INDIAN OCEAN DIPOLE OVER SOUTH AMERICA DURING AUSTRAL SPRING

Marisol Osman¹²³, Luciano Gustavo Andrian¹²³, Carolina Susana Vera¹²³
osman@cima.fcen.uba.ar

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

²CONICET-Universidad de Buenos Aires, Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), Buenos Aires, Argentina.

³CNRS-IRD-CONICET-UBA, Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL3351 IFAECI), Buenos Aires, Argentina.

Keywords: Predictability, Precipitation, Temperature.

1. INTRODUCTION

The El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and the Indian Ocean Dipole (IOD) are key modes of tropical variability with strong impacts across the Southern Hemisphere. Although ENSO is known to influence South American precipitation and temperature anomalies during austral spring (SON), the role of the IOD in modulating these patterns has received less attention. This study investigates how the IOD modulates the atmospheric circulation and surface climate response in South America to ENSO during SON.

2. DATA AND METHODOLOGY

The analysis uses ERA5 reanalysis data for 1940–2020, including geopotential height at 750 hPa and 200 hPa, GPCC precipitation, and CRU TS v4.05 temperature datasets. ENSO and IOD events are identified using the Oceanic Niño Index (ONI) and Dipole Mode Index (DMI), respectively. In addition, a large ensemble of CFSv2 model outputs is used to assess robustness and sampling uncertainty, following methodologies from Kumar and Chen (2017) and Andrian et al. (2024). Partial linear regression is used to isolate the signal of ENSO and IOD on regional climate anomalies. The regressions are computed with and without including the influence of one pattern onto the other (i.e. full ENSO regression includes the influence that IOD might have on ENSO whereas ENSO-based regression excludes this potential influence). Composite analyses are computed to evaluate individual and simultaneous events of the two large-scale climate patterns, with statistical significance tested using a Monte Carlo approach. The signal-to-noise ratio (SNR) is estimated from the ensemble to assess the intra-event variability and to explore nonlinear responses. Puro events are those in which the influence of one of the modes was removed (i.e. pure ENSO events do not include the influence of IOD and vice versa).

3. RESULTS

The regression analysis reveals that both ENSO and IOD exert significant influences on South American climate during SON. The full regression patterns for ENSO and IOD display notable similarities, likely due to the high correlation between their respective indices. ENSO-associated anomalies show the expected behavior: increased precipitation over southeastern South America (SESA) and central Chile, with reduced precipitation over northern South America. Temperature anomalies show warming over tropical western South America and eastern Brazil, and cooling over Patagonia. However, when the IOD signal is removed, the intensity and spatial coverage of the ENSO-associated anomalies diminish, particularly the precipitation anomaly dipole, and the warming pattern over eastern Brazil disappears. On the other hand, the IOD-based regression exhibits a strong anticyclonic circulation anomaly centered around 20°S–50°W, that is not present in the ENSO-based regression. The circulation anomaly seems to modulate the meridional extent of ENSO's precipitation influence by constraining positive rainfall anomalies around 20°S and inhibiting their northward extension into tropical regions. When the ENSO signal is removed the circulation retains its structure, and temperature anomalies, especially warming over central South America, become even more intense and statistically significant, suggesting an important standalone role for the IOD in this region.

Composites further support the regression findings and highlight nonlinearities. Pure El Niño events (Fig. 1a) depicts the well-documented ENSO signal, while pure positive IOD events (Fig. 1b) show an anticyclonic anomaly at midlatitudes and a marked dipole in precipitation over Brazil and SESA. Their co-occurrence (Fig. 1c) produces stronger and more confined positive precipitation anomalies in SESA and enhanced warming in central South America. The constructive interference reflects the reinforcing nature of both circulation anomalies and their associated surface climate anomalies. Conversely, the composites for the negative phases, La Niña and negative IOD, are more variable. Pure La Niña events (Fig. 1d) are associated with a weak, largely non-significant signal in circulation and rainfall anomalies, while temperature anomalies are only notable in central regions. Negative IOD events (Fig. 1e) do not display a simple reverse of those for the positive phase. While the precipitation anomalies mainly reverse signs, the temperature anomalies are weak. The combined La Niña–negative IOD events (Fig. 1f) show a disrupted and inconsistent response: negative rainfall anomalies are enhanced over SESA, but significance is low, and warming is discernible over Patagonia. The CFSv2 model simulations are largely consistent with the observed composite distributions for the positive phases of both large-scale climate patterns. For both El Niño and positive IOD events, the simulated precipitation and temperature anomalies reproduce the observed dipoles, circulation centers, and regional impacts. The combined El Niño–IOD+ cases show enhanced intensity and greater statistical coherence, confirming the modulating effect of the IOD. In the negative phase, the model again captures the ENSO signal reasonably well. However, as in the observational dataset, composites for negative IOD and La Niña are weaker and more spatially variable. A key finding from the model is that the combination of La Niña and negative IOD tends to produce results more consistent with the negative IOD pattern—suggesting that in these cases, IOD dominates the joint response. This is particularly clear in temperature anomalies over Patagonia and precipitation reductions over central Argentina

4. CONCLUSIONS

The IOD plays a key role in modulating ENSO-related climate anomalies in South America in SON. Positive IOD events tend to reinforce El Niño signals, while the influence of negative IODs in La Niña signals is less consistent. The magnitude of both large-scale climate patterns strongly conditions the sign and intensity of the resulting regional anomalies, emphasizing the need for joint monitoring and prediction of ENSO and IOD in climate services. Regional differences, particularly in N-SESA and Patagonia, highlight the importance of understanding IOD–ENSO combined influence for improving seasonal forecasts.

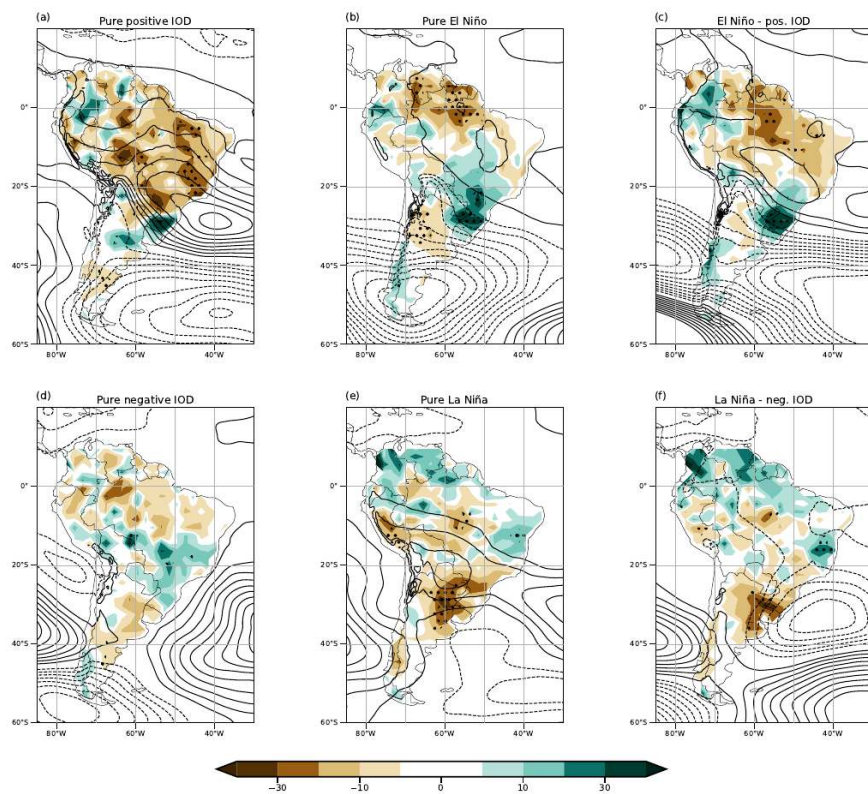


Figura 1: Composites of geopotential height anomalies at 750hPa (m, lines) and precipitation (mm/day, shading) for positive (top) and negative (bottom) events of IOD (left), ENSO (middle), and simultaneous ENSO-IOD (right). Dotted regions indicate 95% statistical significance with a Monte Carlo test.

REFERENCES

- Andrian, L. G., Osman, M., and Vera, C. S.: The role of the Indian Ocean Dipole in modulating the austral spring ENSO teleconnection to the Southern Hemisphere, *Weather Clim. Dynam.*, 2025, 5, 1505–1522, <https://doi.org/10.5194/wcd-5-1505-2024>, 2024.
- Kumar, A. and Chen, M. (2017). What is the variability in us west coast winter precipitation during strong el niño events? *Climate Dynamics*, 49(7):2789–2802.

CARACTERIZACIÓN DE LAS OLAS DE CALOR EN URUGUAY, ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL Y VARIABILIDAD DIARIA.

Santiago de Mello¹, Madeleine Renom¹
demello.santiago@gmail.com.

¹ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos – Universidad de la República - Uruguay

Palabras clave: Olas de calor, Variabilidad interanual y diaria, Patrones Sinópticos.

1) INTRODUCCIÓN

Este trabajo se centra en las Olas de Calor (OC) que afectan a Uruguay, en particular en Olas de Calor Generalizadas (OCG) en el período 1950-2014. Define con precisión tanto las OC como las OCG, estableciendo una metodología que permite su análisis a lo largo de todas las estaciones del año. Se lleva a cabo un análisis interanual que relaciona las características de las OCG con diversos índices oceánicos, atmosféricos y del estado hídrico. El análisis a escala diaria se realizó a través de la determinación de Patrones Sinópticos (PS).

2) METODOLOGÍA

Para definir una OC, se calculó una climatología diaria de los percentiles 90 (P90), tanto de temperatura máxima (Tx) como mínima (Tn), para cada estación meteorológica y cada día del año. Se determinó el P90 de Tx o Tn para cada fecha del año usando una ventana móvil de ± 15 días de cada fecha, cuando Tx y Tn superan por tres o más días consecutivos el P90 de la climatología diaria. Dado que la condición es muy exigente, se flexibiliza permitiendo en cualquier sub conjunto de tres días consecutivos dentro de la ola, se cumplan 5 de los 6 requisitos (3 de Tx y 3 de Tn). Para analizar estos eventos a escala país se definen las olas de calor generalizadas (OCG) cuando ocurre OC en el 75% de las estaciones meteorológicas del país.

Se evaluaron los cambios en frecuencia, duración e intensidad. Se examinó la relación entre las OCG y patrones climáticos mediante correlaciones con índices como el ENSO (El Niño-Oscilación del Sur), el SAM (Modo Anular del Sur), TSA (Índice del Atlántico Sur Tropical), PDO (Oscilación Decadal del Pacífico) y los índices de precipitación estandarizada (SPI) de 1, 2, 3 y 6 meses (SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6).

A escala sinóptica, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) a campos de presión a nivel del mar, identificando Patrones Sinópticos (PS) asociados a OCG. Se clasificaron los días con OCG según su circulación atmosférica dominante, considerando estacionalidad, se emplearon las metodologías aplicadas en Lee, et. al. 2023 y Bettolli, et. al (2010).

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se observa un incremento en la frecuencia de OC en el norte del país al examinar las tendencias por estación meteorológica. Se identifican y definen 82 OCG durante el período estudiado, representando el 1.45 % de los datos. El invierno registra la mayor cantidad de OCG (33), seguido por el otoño (28), verano (11) y primavera (10). Otoño e invierno 3 veces más OCG que primavera y verano. Sin embargo, no se detectan tendencias significativas en cuanto a la

cantidad, duración e intensidad de las OCG a lo largo de los años (Fig. 1).

Durante el verano, se observa que un déficit de precipitaciones se asocia con un aumento tanto en la cantidad como en la intensidad de las OCG, y viceversa. Además, el SAM sugiere que valores negativos están correlacionados con OCG más prolongadas e intensas.

Durante los eventos de El Niño, las OCG tienden a ser más prolongadas y menos frecuentes, mientras que durante La Niña son más frecuentes pero de menor duración. La combinación de un SAM negativo y un evento de El Niño da como resultado OCG más prolongadas, menos frecuentes y de mayor intensidad, revelando el impacto sinérgico de estos fenómenos en Uruguay (Fig. 2).

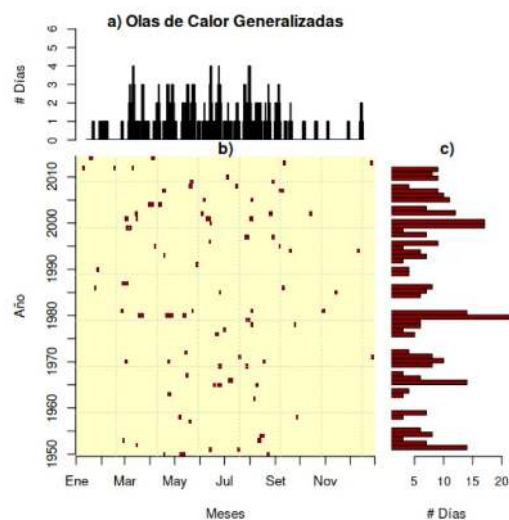


Fig. 1: Olas de calor generalizadas. a) Cantidad (#) de días con olas de calor en la marcha anual. b) Distribución de las olas de calor. c) Cantidad (#) de días con ola de calor que ocurrieron por año.

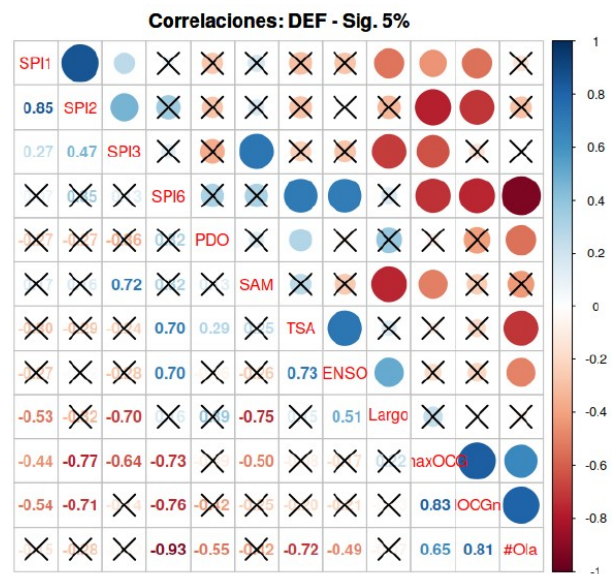


Fig. 2: Correlación de Pearson cruzada entre: largo de las OCG (Largo), IOCGn (intensidad máxima normalizada), lmaxOCG(intensidad máxima), la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, con un nivel de significancia estadística al 5 %. Para DEF.

El análisis a escala diaria se realizó a través de la determinación de Patrones Sinópticos (PS), lo que permitió identificar 4 PS asociados a días de OCG (PS-1, PS-2, PS-3 y PS-7), dos con predominancia del viento del norte y dos del noreste. Estos patrones varían según las estaciones, siendo PS-1 y PS-3 predominantes en invierno, PS-2 en verano, PS-7 junto con PS-2 en otoño, y PS-7 en primavera. Al comparar los días con OCG vs. los días sin OCG dentro de cada PS, se encontró en todos casos que los días con OCG presentan una estructura barotrópica en los niveles 500hPa y 300hPa, consistentes con la presión es superficie (no mostrados).

Este estudio es pionero en determinar estos patrones de circulación para Uruguay que abarca todo el año, lo que supone un avance en la comprensión de estos fenómenos meteorológicos para Uruguay.

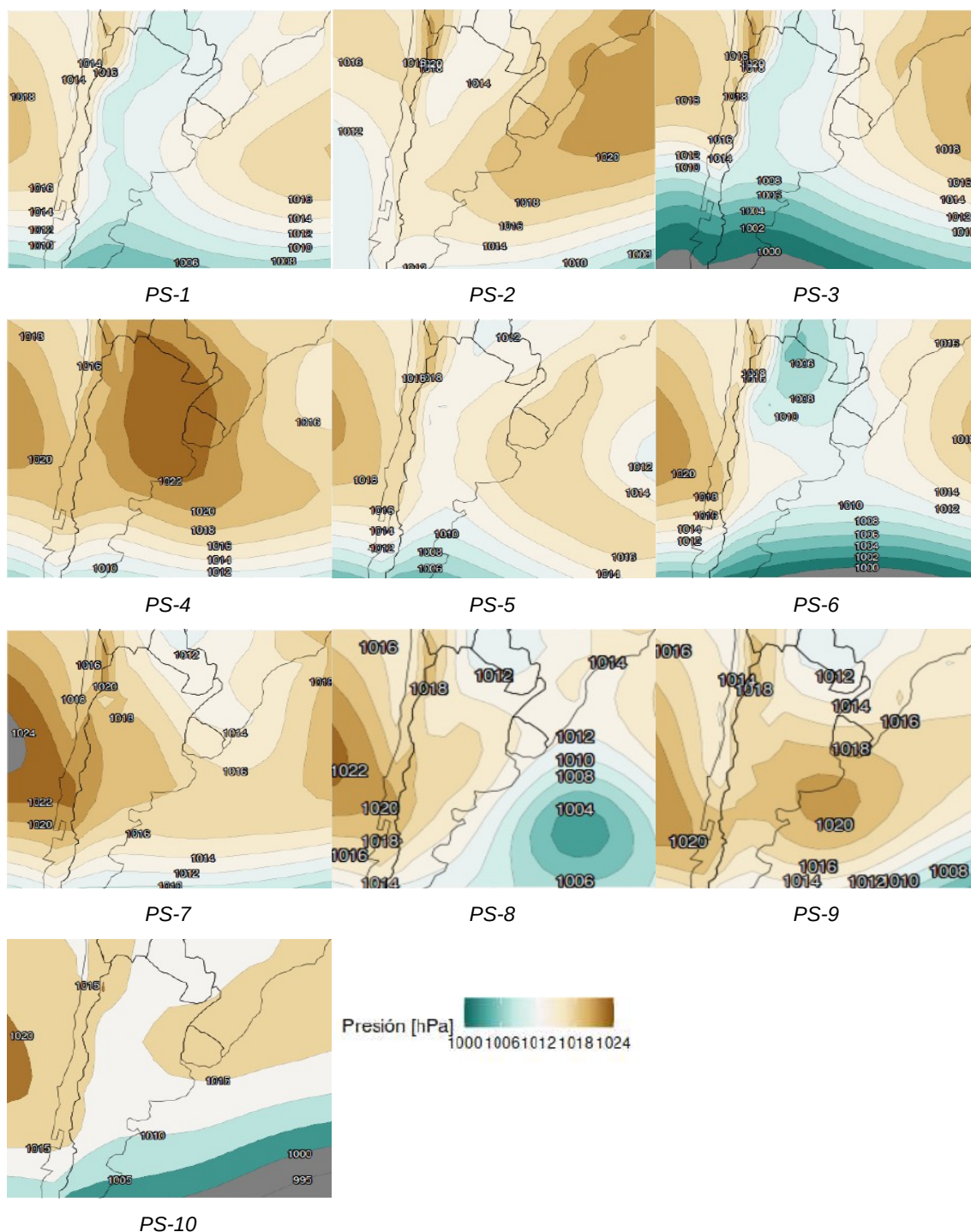


Fig. 3: Campo de presión es superficie en hPa para cada patrón sinóptico asociado.

REFERENCIAS

de Mello, S., 2024: Caracterización de las olas de calor en Uruguay, análisis de la variabilidad interanual y variabilidad diaria. Tesis de maestría. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ciencias - PEDECIBA.

Bettolli, M. L., O. C. Penalba, and W. M. Vargas, 2010: Synoptic weather types in the south of South America and their relationship to daily rainfall in the core crop-producing region in Argentina. *Aust. Meteor. Oceanogr. J.*, 60, 37-48.

Lee, S. H., M. K. Tippett, and L. M. Polvani, 2023: A new year-round weather regime classification for North America. *J. Climate*, 36, 7091-7108.

RELACIÓN ENTRE LA OSCILACIÓN INTERDECADAL DEL PACÍFICO (IPO) Y LA OSCILACIÓN MULTIDECADAL DEL ATLÁNTICO (AMO) CON EL CLIMA DEL SUR DE SUDAMÉRICA

Santino Adduca^{1,2,3}, Leandro B. Díaz^{1,2,3}, Santiago I. Hurtado⁴
santino.adduca@cima.fcen.uba.ar. Autor correspondiente.

¹Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO). Buenos Aires, Argentina.

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI) – IRL 3351 – CNRS-CONICET-IRD-UBA. Buenos Aires, Argentina.

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: variabilidad interdecadal, temperatura, precipitación.

1) INTRODUCCIÓN

La variabilidad de la temperatura y la precipitación en escalas inter- a multi-anales en el sur de Sudamérica (SSA) está fuertemente influenciada por forzantes remotos que actúan a través de patrones climáticos de gran escala. Estos patrones, ya sea individualmente o en combinación, pueden generar impactos significativos sobre actividades socioeconómicas regionales. Comprender mejor la relación entre dichos patrones y la temperatura y la precipitación en la región es clave, especialmente en el contexto del cambio climático, donde la señal antropogénica se ve modulada por la variabilidad natural (Masson-Delmotte y otros, 2021).

En escalas multianuales, se ha identificado que tanto la Oscilación Interdecadal del Pacífico (IPO) como la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) pueden modular las anomalías climáticas en el SSA (Reboita y otros, 2021). Pese a estas evidencias, son escasos los estudios que analicen de forma integrada estas interacciones y su impacto en la circulación y clima del SSA, especialmente en invierno. La mayoría de los trabajos se concentran en escalas anuales o estaciones cálidas (verano o verano extendido), dejando un vacío en el conocimiento sobre la influencia de estos forzantes durante el invierno. Por ello, este trabajo se enfocó en analizar la influencia conjunta de la AMO y la IPO en la variabilidad de la temperatura y la precipitación del invierno extendido (mayo a septiembre).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron los índices mensuales filtrados AMO y TPI de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) para describir a la AMO y la IPO, respectivamente, en el periodo 1861-2017. Para estudiar la influencia de estos modos en el clima del sur de Sudamérica se utilizaron las series temporales de la temperatura media mensual del aire (T) y los acumulados mensuales de precipitación (PP) de la base observada-interpolada de la Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia (CRU; Harris et al., 2020) para el periodo 1901-2017, la cual tiene una resolución espacial de 0,5°. Para filtrar en el análisis la tendencia asociada al calentamiento global, se restó a las series temporales de T y TSM de cada punto de retícula, su recta de regresión lineal obtenida a través de regresión lineal simple. La influencia de la AMO y la IPO sobre el clima del sur de Sudamérica se investigó mediante campos de anomalías compuestas. Ambos fueron evaluados estadísticamente mediante la aproximación de Welch del test de Student para poblaciones con varianzas distintas (Welch, 1938). Los compuestos de anomalías se

hicieron para las siguientes categorías: valores de índice pertenecientes al tercil 1 (de aquí en más referidos como *valores bajos*) y al tercil 3 (*valores altos*) respecto a años con valores pertenecientes al tercil 2 (*valores intermedios*).

3) RESULTADOS

La Figura 1 muestra el gráfico de dispersión entre los valores medios de los índices AMO y TPI para el invierno extendido y las series temporales de los valores medios de dichos índices para el invierno extendido en el periodo 1861-2017. En general, se observa que los índices comparten poca cantidad de valores en el mismo tercil (bajos, intermedios o altos), considerando que en la mayoría de años los índices presentan categorías opuestas con AMO alto/TPI bajo o AMO bajo/TPI alto. Esta característica es consistente con la correlación de Pearson negativa entre ambos índices, la cual es de -0,25. Por otra parte, considerando estos índices se puede identificar que la AMO tiene un periodo de oscilación de aproximadamente 60 años, mientras que la IPO presenta un periodo de aproximadamente 30 años.

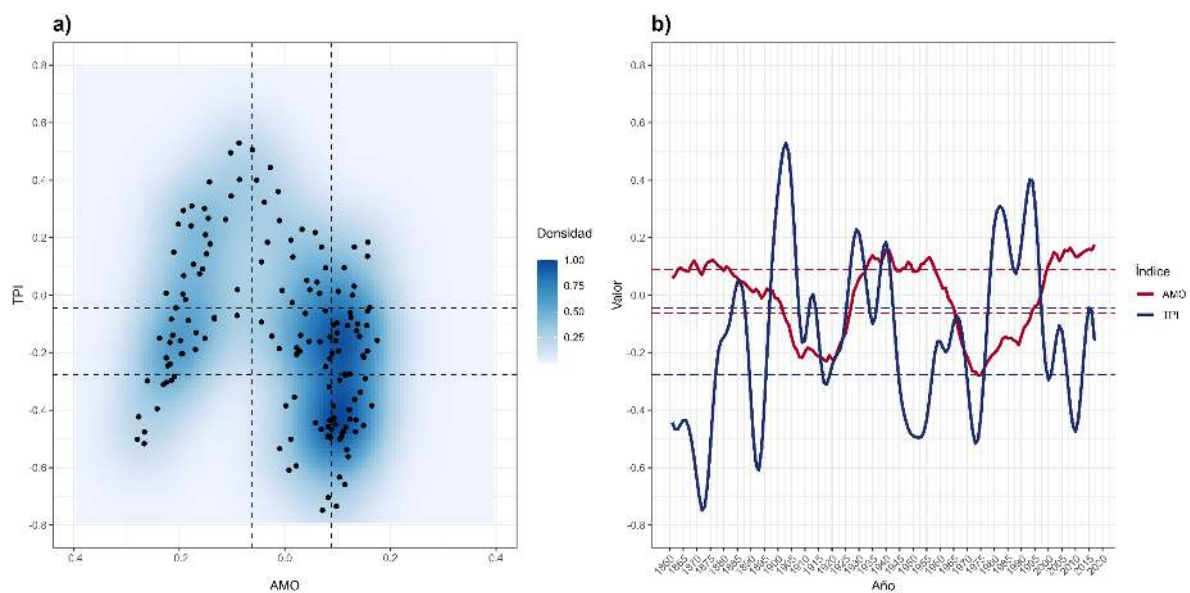


Figura 1: a) Gráfico de dispersión entre los valores medios de los índices AMO y TPI para el invierno extendido (mayo a septiembre) para el periodo 1861-2017. Las líneas verticales (horizontales) indican los cuantiles 0,33 y 0,66 del índice AMO (TPI). b) Series temporales de los valores medios del invierno extendido (mayo a septiembre) de los índices AMO y TPI. Las líneas horizontales rojas (azules) indican los cuantiles 0,33 y 0,66 del índice AMO (TPI).

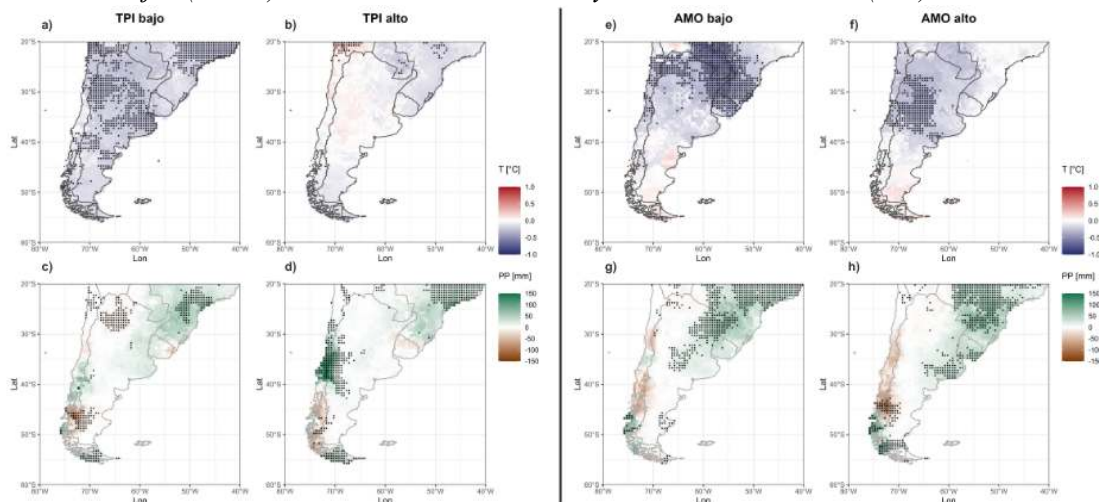


Figura 2: Diferencia entre los compuestos de anomalías de T (en °C) y PP (en mm) del invierno extendido (mayo a septiembre) para valores altos (columnas a la izquierda) y bajos (columnas a la derecha) con respecto a los compuestos para los valores intermedios de los índices TPI (panel izquierdo) y AMO (panel izquierdo). Los puntos negros indican las regiones con anomalías estadísticamente significativas con un nivel de significancia del 10%.

La Figura 2 muestra la diferencia de los compuestos de anomalías de T y PP para valores altos y bajos con respecto a los compuestos para valores intermedios de los índices AMO y TPI, respectivamente. Observando los compuestos del AMO para valores bajos se identifican anomalías negativas y significativas de T en el norte de Chile y Argentina, Paraguay, Uruguay y sur de Brasil, mientras que para valores altos también se observan anomalías negativas y significativas pero en el centro-este de Argentina y el centro de Chile. Respecto a la PP, se observan, tanto para valores bajos y altos del índice, anomalías positivas y significativas en el cuadrante noreste del dominio. A su vez también se observa un dipolo de anomalías de PP en el sur de la Patagonia, que es más intenso y significativo para valores altos del AMO.

4) CONCLUSIONES

A través del análisis de los índices AMO y TPI y su relación con las anomalías de temperatura y precipitación, se ha identificado que estos patrones modulan de manera diferenciada el clima de la región. Es interesante mencionar que el hecho de que tanto para valores bajos como altos se hayan observado anomalías del mismo signo, estaría implicando que los años con valores intermedios de los índices presentan condiciones opuestas. En la T, valores intermedios del AMO (TPI) estarían asociados a anomalías positivas en gran parte del sur de Sudamérica (sudeste de Sudamérica), mientras que en PP se detectaron anomalías positivas y significativas en el noreste del dominio tanto en fases bajas como altas de los índices, y un dipolo en el sur de Patagonia más intenso para AMO alto.

Los compuestos de anomalías sugieren que la relación entre estos índices y las variables no es completamente lineal, lo que podría implicar que la interacción entre los patrones climáticos analizados podría estar condicionada por otros factores, como la influencia de modos de variabilidad de mayor frecuencia. Asimismo, las limitaciones en la cantidad de años disponibles para el análisis representan un desafío, dado que la frecuencia de los ciclos asociados a la AMO y la IPO requiere registros más extensos para una caracterización más robusta de sus impactos climáticos. La posible interferencia de procesos de mayor frecuencia dificulta una atribución clara de la influencia de estos patrones sobre la temperatura y la precipitación en la región.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el proyecto UBACyT20020220100075BA.

REFERENCIAS

- Masson-Delmotte V, y otros, 2021:** Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2(1), 2391.
- Harris I, Osborn TJ, Jones P, Lister D, y otros, 2020:** Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Scientific data 7(1):109.
- Reboita MS, Ambrizzi T, Crespo NM, Dutra LMM, Ferreira GWDS, Rehbein A, y otros, 2021:** Impacts of teleconnection patterns on South America climate. Annals of the New York Academy of Sciences, 1504(1), 116-153.
- Welch BL, 1938:** The significance of the difference between two means when the population variances are unequal. Biometrika 29:350–362.

ESTUDIO DE OLAS DE CALOR EN LA CIUDAD DE LA PLATA EN EL PERÍODO 1909 - 2024

Narela Alvarez⁽¹⁾, Mauricio Bocanegra⁽¹⁾, Micaela Cabrera⁽¹⁾, Juan Augusto Diaz⁽¹⁾⁽²⁾, Mora Ledesma⁽¹⁾, Lisandro Pinto⁽¹⁾, Serena Sanchez⁽¹⁾, Victoria Vahnovan⁽¹⁾, Alejandro Godoy⁽¹⁾⁽²⁾, Rubén H. Sarochar⁽¹⁾

grupopronolp@gmail.com

⁽¹⁾Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas – UNLP

⁽²⁾ Servicio Meteorológico Nacional

Palabras clave: olas de calor, La Plata, criterios.

Introducción

Una ola de calor se define a partir de la entrada de aire particularmente cálido que tiene una persistencia de varios días, al menos tres, con temperaturas máximas y mínimas por encima de un umbral determinado. En el sur de Sudamérica las olas de calor son características de la temporada cálida del año, ocurriendo principalmente en enero y febrero (Stella – Aldeco, 2009) y en menor medida en los meses de noviembre, diciembre o marzo. En estas situaciones, los principales forzantes son la presencia de una cuña muy visible en 500 hPa sobre toda la zona centro - norte del país que se intensifica en los niveles superiores de la troposfera y la acción de la corriente en chorro en capas bajas que aporta aire cálido y húmedo de la región norte. La cuña tiende a permanecer estacionaria, lo cual impide la llegada de frentes fríos al centro/norte del país. En la región persisten vientos del norte en superficie y niveles bajos ya que, en estos casos, el anticiclón del Atlántico aumenta su intensidad, resultando en mayor subsidencia en toda la franja central y norte de nuestro país. Por ende, la temperatura en superficie aumenta por la conjunción de tres factores: la radiación, cielos despejados y disminución de la nubosidad producto de la presencia de la cuña; por advección, los vientos del norte llevan aire desde latitudes menores y por subsidencia, el aumento la temperatura se debe al descenso de aire *caliente* desde niveles medios hacia capas bajas.

Las olas de calor no cambian el patrón de tiempo de un momento a otro, sino que se van gestando a lo largo de los días, a medida que la masa de aire se va calentando y humedeciendo progresivamente. Suelen terminar con eventos de fuerte precipitación convectiva y tiempo severo (Norte y otros, 2007). En este trabajo se definen y analizan distintos criterios con el objetivo de identificar olas de calor en la ciudad de La Plata en el período que va del 1 de enero de 1909 al 31 de marzo de 2024 utilizando datos de la estación La Plata Observatorio.

Datos y metodología

El Servicio Meteorológico Nacional define una ola de calor en una localidad o región como un período de al menos tres días consecutivos en los que las temperaturas máximas y mínimas diarias son iguales o superiores a determinados valores umbrales. Estos umbrales se calculan para cada localidad a partir del percentil 90 de los registros de temperatura correspondientes a la temporada cálida (octubre a marzo).

En este estudio se utilizaron las series diarias de temperatura máxima y mínima correspondientes al período comprendido entre el 1 de enero de 1909 y el 31 de diciembre de 2024, registradas en la estación La Plata Observatorio, dependiente de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata. Se consideró el verano extendido, definiendo la temporada cálida como los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo.

Dado que la serie abarca **115 años** de datos, se llevó a cabo un análisis de homogeneidad siguiendo la metodología de Hurtado et al. (2020), mediante el cual se identificaron dos quiebres o saltos climáticos en la serie de temperatura máxima y uno en la de temperatura mínima. Como estos quiebres no coincidieron temporalmente entre ambas series y con el fin de trabajar sobre un período homogéneo, se

optó por restringir el análisis al intervalo 2002–2024 para el cálculo de los valores umbrales. A partir de este recorte, se establecieron tres criterios distintos para la determinación de dichos umbrales:

- **Criterio 1:** Se definieron umbrales a partir del percentil 90 de las temperaturas máximas y mínimas calculado para cada día de la temporada cálida.
- **Criterio 2:** Los umbrales se establecieron a partir del percentil 90 de las temperaturas máximas y mínimas calculado para cada mes de la temporada cálida.
- **Criterio 3:** Los umbrales se determinaron utilizando el percentil 90 de las temperaturas máximas y mínimas considerando toda la temporada cálida en su conjunto.

A partir de estos valores de referencia, se identificaron eventos de olas de calor en el período 1909–2024, definidos por la persistencia simultánea de temperaturas máximas y mínimas por encima del umbral correspondiente durante al menos tres días consecutivos.

Resultados

Durante el período analizado, y según los criterios previamente definidos, se identificaron un total de 37, 28 y 35 olas de calor conforme a los Criterios 1, 2 y 3, respectivamente, que afectaron a la ciudad de La Plata. La distribución temporal de estos eventos se presenta en la Figura 1, donde se observa un aumento en la frecuencia de olas de calor hacia el final del periodo, especialmente marcado en los resultados obtenidos mediante los Criterios 2 y 3. El evento de mayor duración se extendió durante 19 días y fue detectado por los Criterios 1 y 2 en marzo de 2024. Mientras tanto, la Figura 2 muestra la distribución mensual de la frecuencia de olas de calor en la ciudad de La Plata, según los tres criterios considerados. Los Criterios 1 y 2 presentan patrones similares, con el mayor número de eventos detectados en el mes de marzo. En contraste, el Criterio 3 muestra un máximo en enero, con 20 eventos sobre un total de 35.



Figura 1: Distribución temporal y duración de las olas de calor detectadas en la ciudad de La Plata entre 1909 y 2024, según tres criterios distintos de umbral térmico. Cada gráfico corresponde a un criterio: (izquierda) Criterio 1; (centro) Criterio 2; y (derecha) Criterio 3. En el eje vertical se representa la duración (en días) de cada evento, mientras que en el eje horizontal se indica el año de ocurrencia. Los eventos están coloreados según el mes en el que iniciaron (de noviembre a marzo).

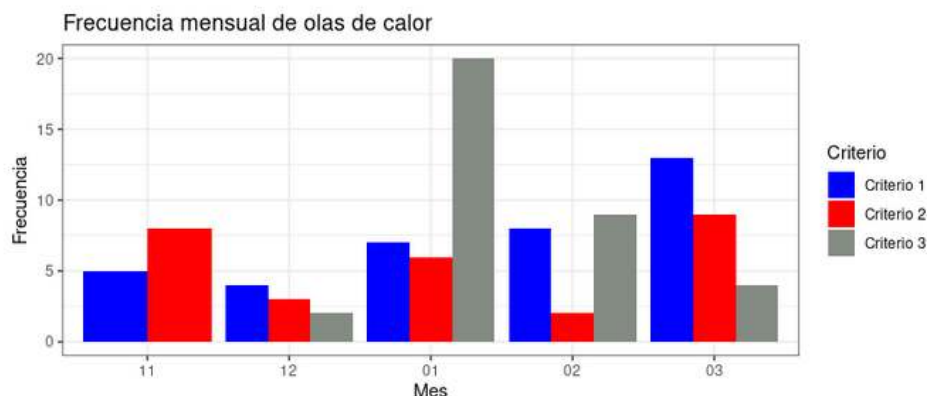


Figura 2: Frecuencia mensual de olas de calor según Criterio 1 (azul), Criterio 2 (rojo) y Criterio 3 (gris) para los meses de noviembre (11), diciembre (12), enero (01), febrero (02) y marzo (03).

Conclusiones

A pesar de haber utilizado tres criterios diferentes para el cálculo de olas de calor, en los tres casos se identificó un aumento en el número de eventos en los últimos años. Además, se observó un aumento en la duración o persistencia de días cálidos, siendo más notable para los Criterios 1 y 2. Resulta interesante observar que el criterio 3 no detectó una ola de calor de 19 días para marzo del 2024, sino que en su lugar se identificaron 3 eventos de menor duración. Al analizar los histogramas, se distinguió que la elección de criterio determinó la frecuencia de olas de calor por mes. Al utilizar el criterio clásico de umbrales por temporada, se observó que el mayor número de eventos se detectó en el mes de enero, sin identificar olas de calor para el mes de noviembre. En cambio, mediante los criterios 1 y 2 se obtuvieron olas de calor en todos los meses de la temporada cálida, con un aumento en el número de eventos en el mes de marzo a medida que nos acercamos al presente. Asimismo, los valores de los umbrales del criterio 3 son superiores a los obtenidos para el criterio 2, salvo para los meses de enero y febrero, donde el percentil 90 de temperatura máxima y mínima mensual superó al de la temporada.

REFERENCIAS

- **Aldeco, L., Chesini F. (2019).** Predicción, Preparación y Respuesta a las Olas de Calor en Argentina. Primera reunión para pilotear la guía “Ola de Calor y Medidas a Tomar - Revisión preliminar”. Santiago de Chile, 26 y 27 de agosto de 2019.
- **Norte, F. A., Seluchi, M. E., Gomes, J. L., & Simonelli, S. C. (2007).** Análisis de una ola de calor extrema en la región subtropical de América del Sur. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 22, 373-386.
- **Stella, J. L., Aldeco, L., (2009).** Análisis climatológico de períodos cálidos y fríos en la ciudad de Buenos Aires. X Congreso argentino de Meteorología (CONGREMET X): Buenos Aires, 5 al 9 de Octubre de 2009.
- **Rusticucci, M., & Barrucand, M. (2001).** Climatología de temperaturas extremas en la Argentina. Consistencia de datos. Relación entre la temperatura media estacional y la ocurrencia de días extremos. *Meteorológica*, 26, 69-84.
- **Hurtado, S. I., Agosta, E. A. & Zaninelli, P. G., (2020).** A multi-breakpoint methodology to detect changes in climatic time series. An application to wet season precipitation in subtropical Argentina. *Atmospheric Research*, 241, 104955.

CARACTERÍSTICAS Y CUANTIFICACIÓN DEL TRANSPORTE DE HUMEDAD HACIA EL CENTRO DE ARGENTINA EN LOS MESES DE ENERO Y JULIO

Catalina Andruchow Colombo¹, Moira Doyle^{1,2,3} y Maximiliano Viale⁴

catalina.andruchow.colombo@gmail.com

¹Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO)

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)

³Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI) – IRL 3351 – CNRS-CONICET-IRD-UBA

⁴CONICET – Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA)

Palabras clave: vapor de agua, Sudamérica, corriente en chorro de capas bajas

1) INTRODUCCIÓN

El vapor de agua es un gas que si bien presenta una baja concentración en la atmósfera, es un elemento esencial para los procesos de radiación, de energía, de conversión en calor latente y de transporte (Wang y Paegle, 1996).

Las corrientes en chorro de capas bajas juegan un papel importante en el transporte de humedad, desde los trópicos-subtrópicos hacia latitudes medias (CCCB; Gimeno y otros, 2016). En Sudamérica una de las más estudiadas se encuentra al este de los Andes (CCCBSA) y se la define como una corriente angosta de aire que circula predominantemente de norte a sur a una velocidad superior a los 36 km/h y asociada a cortantes verticales superiores a los 21.6 km/h en los primeros 1500 m de la atmósfera (Vera y otros, 2006).

Dada la necesidad de profundizar sobre los mecanismos de transporte de vapor de agua y su relación con las tormentas en el centro de Argentina, el objetivo general de este trabajo es caracterizar y cuantificar a las corrientes en chorro de capas bajas de Sudamérica hacia el centro de Argentina considerando dos posibles fuentes de vapor de agua.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para este trabajo se utilizaron datos horarios de enero y julio del reanálisis ERA5 del reservorio de datos climáticos disponibles en Copernicus y generados por el Servicio de Cambio Climático de Copernicus, gestionado por el [Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo \(ECMWF\)](#) para el período 2000-2022. Las variables utilizadas son las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento en los niveles 850 y 700 hPa, y las componentes zonal (TVIx) y meridional (TVIy) del transporte de humedad integrado verticalmente (TVI) entre superficie y el tope de la atmósfera. El interés de este trabajo se enfoca en el transporte de humedad que ingresa a la Argentina por el norte. Por ende, para la detección de los eventos de corriente en chorro de capas bajas, la región de estudio está comprendida entre 5°N-40°S; 40°O-75°O. Trabajos previos mostraron la existencia de 2 posibles productores de humedad relacionadas con distintas trayectorias de la CCCB y quizás a zonas de ingreso diferentes indicadas más adelante en el texto. Se utilizó el Criterio 1 de Bonner (Bonner, 1968) para la detección de la CCCBSA

considerando dos posibles ramas: tropical (RT) y subtropical (RS). Se tomó como nivel de viento máximo el de 850 hPa y mínimo superior el de 700 hPa. Luego, se tomó v negativo en 850 hPa, que v sea más intenso que u en dicho nivel (Salio y otros, 2002) y se mantuvo el umbral de la cortante en 6 m/s. Por un lado para RT (RS) se mantuvo el umbral de 12 m/s (se redujo a 10 m/s), al viento se lo consideró del norte-noroeste (noreste) y la región de referencia estaba dada por 18-25°S y 65-57.5°O (18-25°S; 57.5-54°O). Para los eventos detectados en cada rama en enero y julio se estimó su duración y se la caracterizó considerando intervalos cada 10 horas. Para el análisis de la intensidad se estimó el promedio del máximo viento norte para cada punto de grilla dentro de cada región de referencia.

Una vez seleccionados los eventos CCCBSA por año para enero y julio para cada rama, se calculó la magnitud de TVI para cada punto de retícula de las CCCBSA en las horas de ocurrencia de los eventos detectados. Para cada región, se clasificaron estos sucesos en dos categorías principales: a) TVI en la corriente en chorro es inferior a 250 kg/ms; y b) TVI es igual o superior a 250 kg/ms para algún momento y punto de grilla.

3) RESULTADOS

Aplicando el Criterio 1 de Bonner modificado, se identificó un total de 676 eventos de CCCBSA, de los cuales un 56% corresponden a la rama tropical y un 44% a la subtropical. Para RT el 28.5% del total de eventos detectados, estuvieron asociados al mes de enero y el 27.5% a julio. En cambio, para RS el 16% de los casos se dieron en enero y 28% en julio. Esto indica que en la RS, CCCBSA es menos frecuente que en RT, y a su vez es más frecuente en invierno que en verano mientras que la RT no presenta diferencias marcadas entre ambas épocas del año.

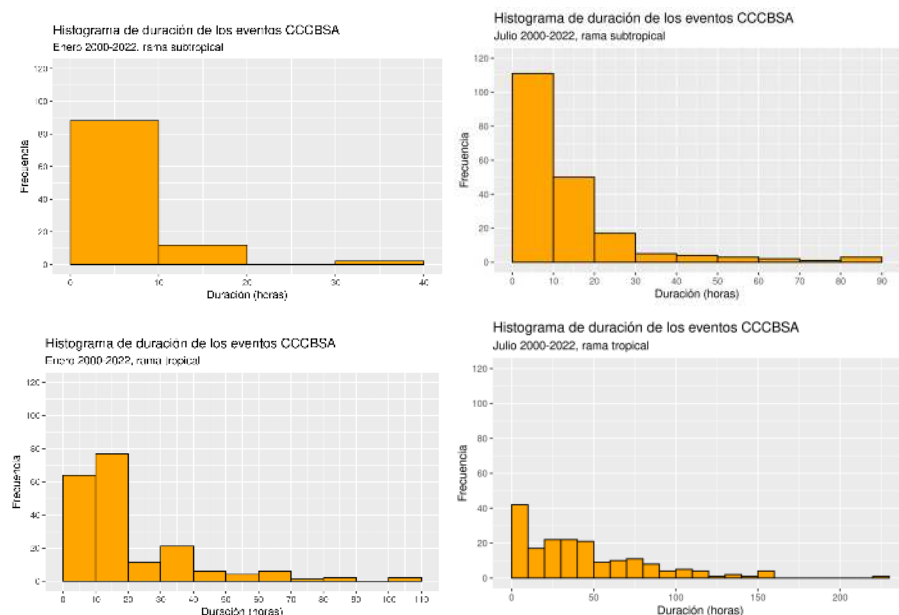


Figura 1: Histogramas de duración en horas para las ramas subtropical (arriba) y tropical (abajo) y para los meses de enero (izquierda) y julio (derecha).

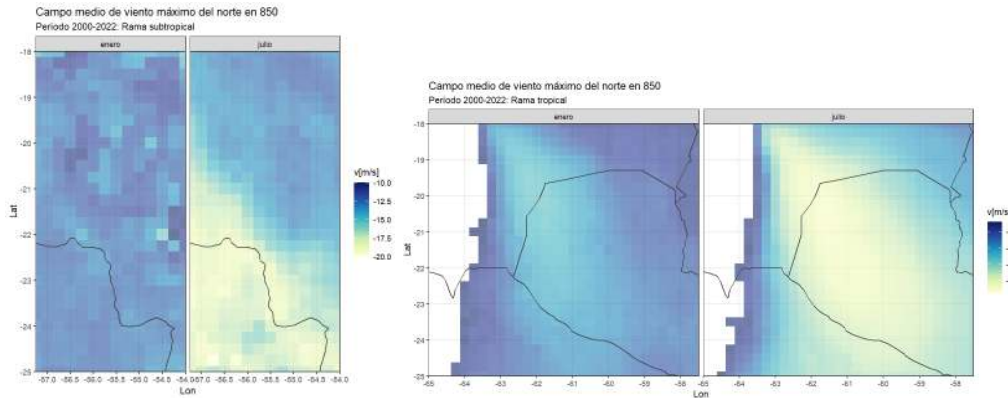


Figura 2: Campos medios de viento máximo del norte para rama subtropical (izquierda) y rama tropical (derecha) para los meses de enero y julio .

En la Figura 1 (2) se presentan los histogramas de duración (intensidad) de los eventos de CCCB para cada rama y mes considerando los intervalos cada 10 hs. Se puede ver que la CCCBSA suele tener corta duración, siendo más persistente en invierno que en verano y de mayor tiempo de vida para la RT que para la RS. En consonancia con la duración, se aprecia que la CCCBSA es más intensa en julio que en enero y más intensa la RT que la RS.

Para vincular las CCCB con el TVI se realizó un primer análisis que consistió en discriminar los casos de ocurrencia de la CCCB de cada mes y ramas superiores e inferiores a 250 kg/ms. Se obtuvo que, del total de eventos detectados de CCCB, un 34.76% transporta humedad por debajo del umbral, asociado principalmente a la RT con un 27.96%. A su vez, se obtuvo que un 65.24% de las CCCBSA detectadas transportan humedad por encima del umbral de 250 kg/ms, vinculado especialmente a la RS con un 37%. Además, se encontró que la CCCB transporta humedad por encima del umbral de 250 kg/ms con más frecuencia en julio que en enero, con mayor diferencia para RS que para RT. Esto significa que, si bien la CCCBSA transporta humedad frecuentemente por encima del umbral de 250 kg/ms, la RS tiene más frecuencia en dichos transportes intensos que la RT.

REFERENCIAS

- Bonner, W. D., 1968:** Climatology of the low level jet. Mon. Wea. Rev., 96, 833–850, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1968\)096<0833:COTLLJ.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096<0833:COTLLJ.2.0.CO;2).
- Gimeno, L. y otros, 2016:** Major Mechanisms of Atmospheric Moisture Transport and Their Role in Extreme Precipitation Events. Annu. Rev. Environ. Resour. 41.117-141. 10.1146/annurev-environ-110615-085558.
- Salio, P., Nicolini M. y Saulo A. C., 2002:** Chaco low-level jet events characterization during austral summer season. J. Geophys. Res. 107. 4816. <https://doi.org/10.1029/2001JD001315>.
- Vera, C. y otros, 2006:** The South American low-level jet experiment. Bulletin of the American Meteorological Society. 87(1). 63–78. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-1-63>.
- Wang, M. y Paegle, J., 1996:** Impact of analysis uncertainty upon regional atmospheric moisture flux. J. Geophys. Res., 101, 7291–7303.

HUELLA URBANA EN EL CAMPO ELÉCTRICO DE BUEN TIEMPO

Yasmin R. Velazquez^{1,2,4}, M. Gabriela Nicora^{2,4,5}, Vito Galligani^{1,3,4}, Elian A. Wolfram^{2,3,6}, Raúl L. D'Elia²
yasmin_rv@outlook.com.

¹Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), Av. Intendente Cantilo, C1428, Cdad. Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

²UNIDEF (MINDEF – CITEDEF), Departamento de Investigaciones en Láseres y sus aplicaciones (DEILAP), J. B. de La Salle 4397, 1603 Villa Martelli, Pcia. de Buenos Aires, Argentina.

³ CONICET - Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), Av. Intendente Cantilo, C1428, Cdad. Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

⁴ CNRS - IRD - CONICET - UBA. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), Av. Intendente Cantilo, C1428, Cdad. Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

⁵ Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Paseo del Bosque, C1900, Pcia. de Buenos Aires, Argentina.

⁶ Servicio Meteorológico Nacional. Dirección de Redes de Observación, Av. Dorrego 4019, C1425GBE, Cdad. Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: Electricidad atmosférica, Circuito eléctrico, tráfico vehicular.

1) INTRODUCCIÓN

Nuestro complejo e intrigante planeta posee lo que se conoce como el Circuito Eléctrico Atmosférico Global (CEAG). Al tratarse de un circuito eléctrico, existen zonas con corrientes descendentes y otras con corrientes ascendentes. Este hecho implica que la atmósfera presentará distintas características dependiendo del sentido de la corriente.

Los sitios donde fluye la corriente desde la ionosfera hacia el suelo se denominan regiones de Buen Tiempo (FW por sus siglas en inglés). Estos sitios son especialmente relevantes porque permiten observar la señal del CEAG mediante el campo eléctrico atmosférico en superficie, conocido como gradiente de potencial (PG, por sus siglas en inglés). Sin embargo, la atmósfera es dinámica y, cuando no se presentan condiciones de FW, la corriente puede invertirse y fluir en la dirección opuesta. En los sitios donde se invierte la corriente se hallan las principales fuentes del circuito eléctrico, las tormentas. El impacto de estas “baterías” sobre el CEAG puede detectarse en las variaciones medias diarias de PG en condiciones de FW.

Además de los elementos del CEAG ya mencionados, existen otros factores que impactan de manera local. Uno de ellos es la presencia de partículas emitidas del flujo vehicular. Estas pueden alterar la señal recibida por el CEAG en el PG, dependiendo del nivel de contaminación del sitio de estudio.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es analizar la relación entre el PG en condiciones de FW y dos tipos de forzantes: por un lado, la señal global del CEAG (asociada a la actividad de tormentas en el planeta), y por otro, los efectos locales de origen antropogénico, en particular el tráfico vehicular en la estación Buenos Aires (CITEDEF), entre 2017 y 2021.

2) METODOLOGIA

Para cumplir con el objetivo, se emplearon datos del gradiente de potencial (PG) medidos en la estación Buenos Aires, ubicada en el techo del Instituto CITEDEF (34°49'S, 58°29'O), mediante un medidor de campo modelo CS110 de Campbell Scientific; datos de flujo vehicular obtenidos de sensores de la Secretaría de Innovación y Transformación Digital del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires (sensor del Centro Naval, Av. Cantilo); datos de dióxido de nitrógeno (NO₂) —extraídos de la base de datos publicada por Díaz Resquin y otros (2021)—, medidos en el sitio CNEA-CAC a menos de 2 km de CITEDEF; y datos de profundidad óptica de aerosoles (AOD)

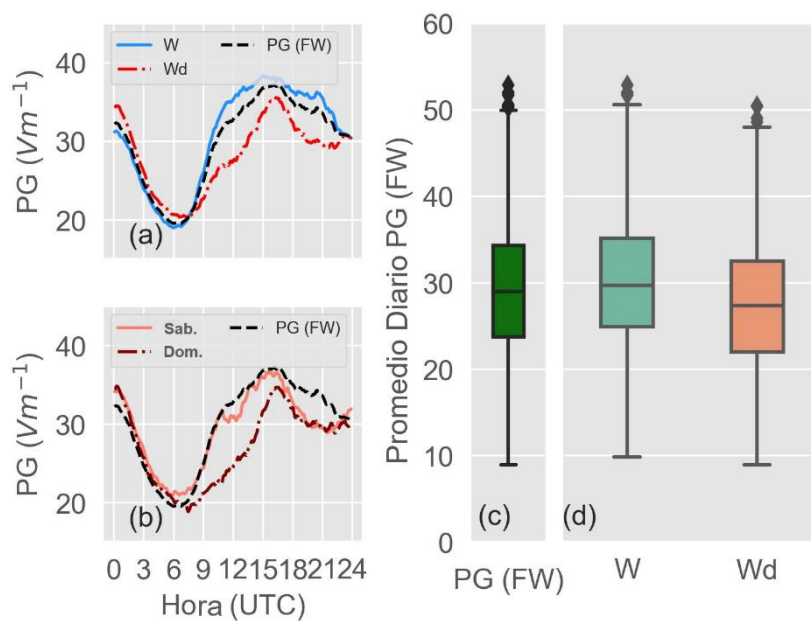
obtenidos del fotómetro de la red AERONET instalado junto al sensor de PG en CITEDEF.

Se utilizaron técnicas estadísticas robustas para la selección de días de FW, basadas en la mediana y la desviación absoluta mediana (MAD), según el procedimiento propuesto en Velázquez et al. (2024). Para evaluar la dependencia semanal del PG(FW), los datos fueron divididos en días laborables (W) y fines de semana (Wd), y se calcularon las curvas promedio diarias. Adicionalmente, se seleccionaron exclusivamente los días domingo para construir curvas medias diarias trimestrales de PG, con el objetivo de compararlas con la señal trimestral esperada del CEAG. Asimismo, se aplicaron pruebas de hipótesis y análisis espectral (Lomb-Scargle) para identificar ciclos semanales y otras periodicidades relevantes.

En un segundo análisis, se compararon los comportamientos durante el confinamiento por COVID-19 en 2020 (20 de marzo al 14 de mayo) con los mismos períodos en años previos (2017–2019), con el objetivo de evaluar el impacto de la drástica reducción del tráfico sobre el PG(FW) y sus variables asociadas.

3) RESULTADOS

Los resultados muestran una variación significativa del PG(FW) entre los días laborables y los fines de semana. Durante los días W, el PG presenta una curva diaria con forma "U invertida" en la



segunda mitad del día, mientras que durante los días Wd adopta una forma más aguda ("V invertida") y con menores valores, especialmente después de las 09 UTC (ver Figura 1). En términos estadísticos, la mediana del PG(FW) fue 30.03 V/m durante días W y 27.59 V/m en días Wd, lo que representa una reducción del 8,1 %, significativa al 99 % de confianza.

Figura 1: Curvas promedio diarias de PG (BT): a) días laborables (W, línea celeste) y fines de semana (Wd, línea roja); la línea negra representa la curva de referencia de Velázquez et al. (2024). b) sábados (salmón) y domingos (bordó), con la misma curva de referencia. c-d) Diagramas de caja de PG (BT) diario para todos los días, días laborables y fines de semana. Los valores atípicos se muestran con círculos (extraído de Velázquez y otros, 2025).

Además, el análisis del comportamiento trimestral de las curvas diarias de PG correspondientes a los días domingo revela un patrón coherente con la señal del CEAG. Se observa que los valores de PG son más altos durante casi todo el día en invierno austral (JJA) y alcanzan sus mínimos en verano (DEF), lo que coincide con la variación estacional esperada del circuito eléctrico global.

El análisis espectral reveló, además de la esperada periodicidad diaria y anual del CEAG, un ciclo significativo de 7 días que no responde a fenómenos naturales, sino a patrones semanales antropogénicos, principalmente el tráfico vehicular.

Las curvas diarias promedio del flujo vehicular y de NO_2 muestran un comportamiento altamente correlacionado con el PG(FW), tanto en forma como en variación diaria. En días W, estos parámetros presentan un máximo suave a media mañana, similar al PG, mientras que en Wd los picos son más estrechos y de menor amplitud. La correlación entre PG y flujo vehicular es alta y significativa: 0.90 para días W y 0.86 para días Wd. Las pruebas estadísticas confirmaron que los valores promedio diarios de flujo vehicular y NO_2 también difieren significativamente entre W y Wd. En cambio, la

AOD mostró diferencias en su forma diaria pero no en sus valores medios, indicando que no es suficientemente sensible a cambios semanales del tráfico en una ciudad como Buenos Aires.

Durante el período de confinamiento de 2020, el PG(FW) también mostró una disminución significativa (15.1 %) respecto al período equivalente en años anteriores. Esta reducción estuvo acompañada por una caída en el flujo vehicular y en las concentraciones de NO₂, lo que sugiere una respuesta directa del PG(FW) a la disminución de las emisiones antropogénicas. La forma de la curva diaria de PG(FW) durante la pandemia fue similar a la de los fines de semana, reforzando la hipótesis del vínculo entre el tráfico y el comportamiento del campo eléctrico.

4) CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que, si bien el PG(FW) responde al patrón del CEAG bajo condiciones meteorológicas de FW, su comportamiento puede ser significativamente modulado por efectos locales, en particular por el tráfico vehicular. Se identificó una señal semanal robusta en los valores de PG(FW), asociada a la variabilidad del flujo vehicular y de NO₂, ambos indicadores de emisiones de origen antropogénico.

De forma complementaria, el análisis estacional de las curvas diarias construidas solo con los días domingo —cuando la circulación vehicular es mínima— mostró un patrón coherente con el comportamiento estacional del CEAG. Esto sugiere que, en días con bajo impacto antropogénico, el PG puede reflejar la señal del circuito eléctrico global.

El confinamiento por la pandemia constituyó un experimento natural que permitió observar una caída en el PG(FW) concurrente con la disminución de la movilidad urbana, lo que refuerza la hipótesis del vínculo entre las emisiones urbanas y el campo eléctrico en superficie.

Este trabajo pone de manifiesto la necesidad de considerar los efectos antropogénicos al interpretar mediciones de PG(FW) en entornos urbanos. Además, propone al PG(FW) como una herramienta complementaria para detectar cambios en la calidad del aire, brindando un enfoque novedoso dentro del campo de la electricidad atmosférica para evaluar el impacto de las actividades humanas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la UMI-IFAECI por haber subsidiado la participación en el CONGREMET.

REFERENCIAS

Diaz Resquin, M., Alessandrello, D., De Oto, M., Lichtig, P., Bajano, H., Ponso, A., Bajano, F., Gomez, D. y Dawidowski, L., 2021: *AQ-CNEA-CAC air quality dataset (2019–2020): a machine learning approach to address air quality changes during the COVID-19 lockdown in Buenos Aires, Argentina*. Disponible en: <https://doi.org/10.17632/h9y4hb8sf8.1>. Fecha de acceso: 23 de septiembre de 2024.

Velazquez, Y.R., Nicora, M.G., Galligani, V.S., Wolfram, E.A., Salio, P.V. y D'Elia, R.L., 2024: Exploring the global thunderstorm influence on the fair weather electric field in Buenos Aires. *Atmospheric Research*, 299, 107182. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107182>

Velazquez, Y.R., Nicora, M.G., Galligani, V.S., Wolfram, E.A. y D'Elia, R.L., 2025: Fair weather electric field variability in Buenos Aires: The role of traffic and pandemic lockdowns. *Atmospheric Research*, 321, 108087. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108087>

Explorando cómo las incertidumbres en la microfísica de los modelos de predicción numérica del tiempo se trasladan al espacio de radiancia de microondas

Vito Galligani^{1,2,3}

Vito.galligani@cima.fcen.uba.ar

¹Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), Av. Intendente Cantilo, C1428, Cdad. Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

² CONICET - Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), Av. Intendente Cantilo, C1428, Cdad. Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

³ CNRS - IRD - CONICET - UBA. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), Av. Intendente Cantilo, C1428, Cdad. Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: parametrización de microfísica, transferencia radiativa, microondas, convección

En paralelo al aumento de la capacidad de cálculo computacional de las últimas décadas, los modelos de predicción numérica del tiempo han alcanzado resoluciones espaciales capaces de resolver explícitamente la convección (es decir, de 5 km o menos), incorporado procesos microfísicos que ocurren a escalas muy pequeñas, resolviendo las interacciones dinámicas en sistemas convectivos. Existen numerosos esquemas, o parametrizaciones de microfísica. Estos pueden diferir en el número de especies pronosticadas, los momentos pronosticados, el número de procesos microfísicos simulados, las suposiciones sobre las relaciones masa-tamaño, $m(D)$, y tamaño-velocidad terminal, $v(D)$, y las distribuciones de tamaño de partículas asumidas $n(D)$. La relativa simplicidad de este enfoque ha sido exitosa en algunos aspectos de la parametrización de la microfísica (por ejemplo, la fase líquida, al separar las gotas en dos categorías: 'cloud water' y lluvia) y problemática en otros (por ejemplo, la fase de hielo donde se suelen separar los hidrometeoros de maneras abruptas en 'graupel', 'snow' y 'ice'). La parametrización de la microfísica de la fase de hielo o sólida es más desafiante porque, a diferencia de las gotas líquidas, las partículas de hielo presentan una gran variabilidad temporal y espacial de densidades y formas complejas, que a su vez afectan sus procesos de crecimiento y disipación. Para los sistemas convectivos y la precipitación en general, la incertidumbre en las parametrizaciones de microfísica se considera una de las fuentes más significativas de error en los modelos. Varios estudios también han demostrado que las simulaciones de transferencia radiativa en microondas (MW RT) (por ejemplo, Galligani et al., 2017; Kulie et al., 2010) y los retrievals de precipitación de la fase hielo (por ejemplo, Ekelund et al., 2020; Pfreundschuh et al., 2020; Geer, 2021) son extremadamente sensibles a las propiedades microfísicas del hielo como la forma y su densidad, que no están completamente determinadas por los esquemas microfísicos. Por lo tanto, muchas veces, se requieren realizar suposiciones que no son consistentes con la microfísica explícita de las parametrizaciones.

Este estudio, por lo tanto, se centra en explorar cómo las incertidumbres en la microfísica de los modelos se trasladan al espacio de radiancia (de microondas) utilizando el modelo de transferencia radiativa RTTOV (Saunders et al., 2018) para observaciones del radiómetro Microwave Humidity Sounder (MHS).

Para cumplir dichos objetivos, se evaluaron dos esquemas de microfísica diferentes del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para un caso extraído del periodo de Observación Intensa IOP #4 de la campaña de campo RELAMPAGO-CACTI (Nesbitt et al., 2021; Varble et al., 2021). Los esquemas de microfísica analizados incluyen el esquema de momento único WSM6 (Hong y Lim, 2006) y el esquema de Propiedades de Partículas Pronosticadas (P3, Morrison y Milbrandt, 2015; Milbrandt et al., 2021).

En dicho caso de estudio, cuatro radares Doppler de doble polarización observaron

simultáneamente una supercelda que produjo granizo. Se utilizaron dichas observaciones para analizar las diferencias en los campos modelados por las dos microfísicas.

Para evaluar el impacto de las incertidumbres de los esquemas de microfísica en el espacio de las radiancias, se analiza la sensibilidad de las temperaturas de brillo (Tbs) simuladas a diferentes formas de implementar de manera consistente las propiedades de dispersión de los hidrometeoros utilizando las base de datos de Liu (2008) con los esquemas de microfísica de interés (WRF-WSM6, WRF-P3) al modelo RTTOV.

Los resultados realizados hasta el momento con la microfísica WSM6 muestran una gran sensibilidad al enfoque de consistencia utilizado (ver **Figura 1**), con diferencias mayores al error que se utiliza en asimilación de datos como all-sky 'observation error' (Geer et al., 2024).

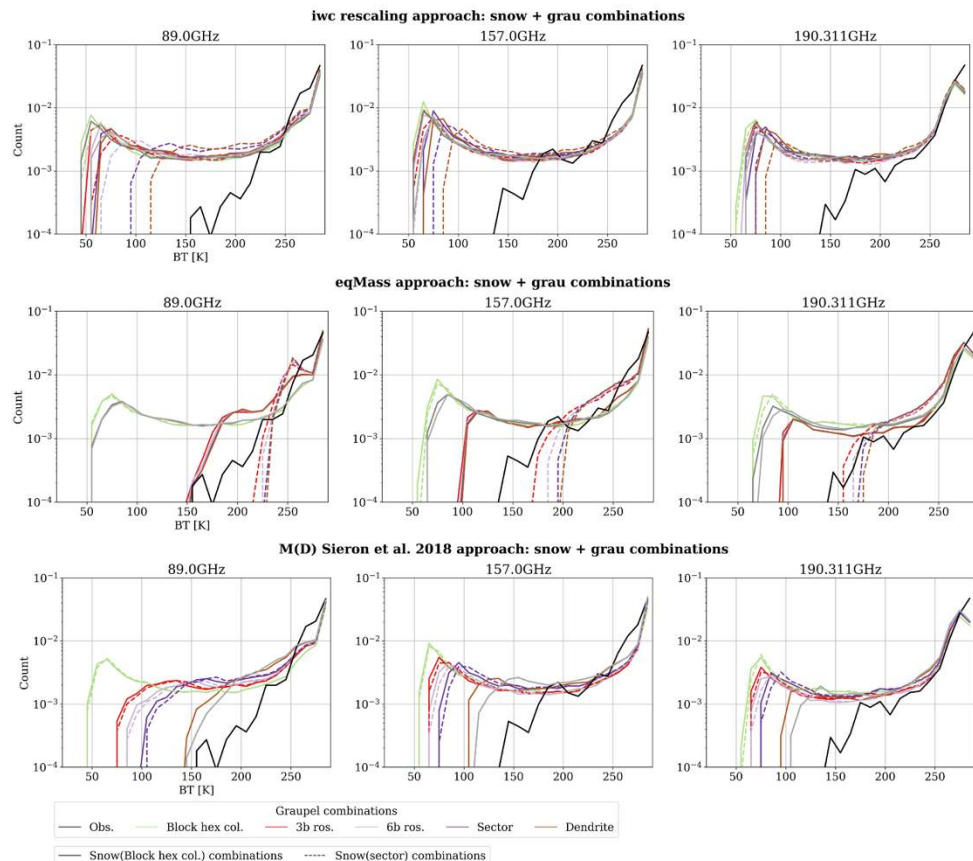


Figura 1: Histogramas de temperaturas de brillo (BT) observadas por MHS (línea sólida negra) y simuladas con RTTOV (10 de noviembre 2018 a las 20:30 UTC) provenientes de tres experimentos con diferentes enfoques de consistencia entre RTTOV y WRF-WSM6. Se utilizaron las propiedades de dispersión de Liu (2008) para modelar las propiedades de los hidrometeoros de 'graupel' y 'snow'. En esta figura se muestran las combinaciones de cinco especies diferentes de 'graupel' (Block hex. Col., 3b. ros, 6b. ros, sector y dendrite) para dos combinaciones diferentes de 'snow' (sector y dendrite).

Los resultados preliminares indican la importancia de explorar cual es la forma más adecuada de realizar simulaciones de transferencia radiativa consistentes con las parametrizaciones de microfísica. Se espera que el mismo ejercicio a realizarse con el esquema P3, el cual sí predice la densidad de hidrómetros, podría utilizarse para reducir las incertidumbres y permitir ajustar mejor el problema.

REFERENCIAS

- Ekelund, R., Eriksson, P., and Pfreundschuh, S.: Using passive and active observations at microwave and sub-millimetre wavelengths to constrain ice particle models, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 501–520, <https://doi.org/10.5194/amt-13-501-2020>, 2020.
- Galligani, V. S., Wang, D., Alvarez Imaz, M., Salio, P., and Prigent, C.: Analysis and evaluation of WRF microphysical schemes for deep moist convection over south-eastern South America (SESA) using microwave satellite observations and radiative transfer simulations, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 3627–3649, <https://doi.org/10.5194/amt-10-3627-2017>, 2017 .
- Geer AJ, Bauer P. Observation errors in all-sky data assimilation. *Q J R Meteorol Soc* 2011;137(661):2024–37. doi:[10.1002/qj.830](https://doi.org/10.1002/qj.830).
- Geer, A. J.: Physical characteristics of frozen hydrometeors inferred with parameter estimation, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 5369–5395, <https://doi.org/10.5194/amt-14-5369-2021>, 2021.
- Kulie, M. S., Bennartz, R., Greenwald, T. J., Chen, Y., and Weng, F.: Uncertainties in microwave properties of frozen precipitation: implications for remote sensing and data assimilation, *J. Atmos. Sci.*, 67, 3471–3487, <https://doi.org/10.1175/2010JAS3520.1>, 2010.
- Milbrandt, J. A., H. Morrison, D. T. Dawson II, and M. Paukert, 2021: A Triple-Moment Representation of Ice in the Predicted Particle Properties (P3) Microphysics Scheme. *J. Atmos. Sci.*, **78**, 439–458, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0084.1>.
- Morrison, H., and J. A. Milbrandt, 2015: Parameterization of Cloud Microphysics Based on the Prediction of Bulk Ice Particle Properties. Part I: Scheme Description and Idealized Tests. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 287–311, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0065.1>.
- Nesbitt, S.W.; **Salio, P.; Bechis H**; and coauthors (2021) A storm safari in Subtropical South America: Proyecto RELAMPAGO. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0029.1>
- Lim, K. S., and S. Hong, 2010: Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587–1612, <https://doi.org/10.1175/2009MWR2968.1>.
- Liu, Q., Weng, F., Han, Y., & Van Delst, P. (2008). Community radiative transfer model for scattering transfer and applications. *Igarss 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4, 1193–1196. <https://doi.org/10.1109/igarss.2008.4779942>
- Pfreundschuh, S., Fox, S., Eriksson, P., Duncan, D., Buehler, S. A., Brath, M., Cotton, R., and Ewald, F.: Synergistic radar and sub-millimeter radiometer retrievals of ice hydrometeors in mid-latitude frontal cloud systems, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 677–699, <https://doi.org/10.5194/amt-15-677-2022>, 2022.
- Saunders R, Hocking J, Turner E, Rayer P, Rundle D, Brunel P, Vidot J, Roquet P, Matricardi M, Geer A, Bormann N, Lupu C. An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). *Geosci Model Dev* 2018;11(7):2717–37. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2717-2018>.
- Varble, A. C., Nesbitt, S. W., **Salio, P.**, and coauthors (2021) Utilizing a Storm-Generating Hotspot to Study Convective Cloud Transitions: The CACTI Experiment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0030.1>.

¿PODEMOS ESTAR SUBESTIMANDO LA PRECIPITACIÓN EXTREMA ANTE LA OCURRENCIA CONJUNTA DE FORZANTES REMOTOS?

Caterina L. Basso¹, Vanesa C. Pántano^{2,3,4}
basso.lcaterina@gmail.com

¹ Departamento Meteorología, Servicio de Hidrografía Naval (SHN)

² Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata
(FCAG, UNLP)

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET-UBA)

⁴ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

Palabras claves: centro-este argentino, respuesta climática, extremos climáticos

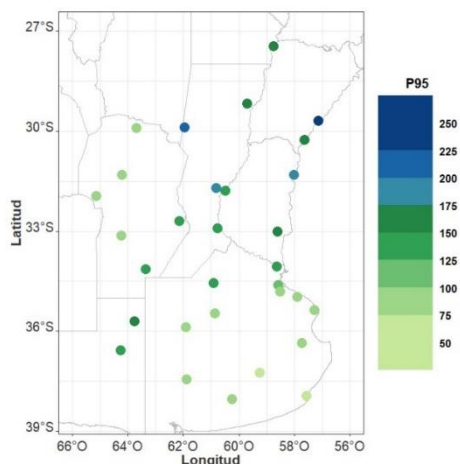
1) INTRODUCCIÓN

La respuesta climática de la precipitación (PP) a los principales forzantes remotos como El Niño-Oscilación del Sur, el Modo Anular del Sur y el Dipolo del Océano Índico (ENSO, SAM e IOD, por sus siglas en inglés) en el centro-este de Argentina (Figura 1.1) ha sido estudiada en las últimas décadas (Reboita et al., 2021). Adicionalmente, la coocurrencia de los forzantes mencionados puede presentar diversas respuestas climáticas, desde fuertes sequías hasta inundaciones extremas, por lo que esta acción conjunta resulta en un desafío para la previsión y la gestión de riesgos climáticos en la región de estudio (McPhaden et al., 2020).

Con respecto a nuestra región, Iacovone et al. (2024) han estudiado la influencia del ENSO, el SAM y el IOD en los extremos de PP de Sudamérica, pero en forma aislada. En este sentido, aún son escasos los estudios que presentan la señal conjunta de estos forzantes en eventos de PP extrema en la región.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar los extremos de PP, en el centro-este del territorio argentino, como respuesta a la combinación de los principales forzantes climáticos remotos, durante los meses de septiembre a febrero, a escala subestacional.

2) METODOLOGÍA



Para realizar este trabajo, se utilizaron datos observados de PP diarios para los meses de septiembre a febrero, entre 1980 y 2019, provenientes de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional. Para cada estación, se llevó a cabo un control de calidad.

Para obtener una serie de datos homogénea, se realizó una evaluación de puntos de quiebre (Aguilar et al., 2003) a través de Pettit (Pettitt, 1979) y Buishand-R (Buishand, 1982). Asimismo, se estudiaron las tendencias con Mann-Kendall (Hamed y Rao, 1998). Ambos análisis, con un nivel de significancia de 0.1.

Figura 1.1: Distribución de estaciones utilizadas. En color se indica el valor del umbral [mm] correspondiente al percentil 95 (P95) para el mes de diciembre.

Para caracterizar al ENSO, IOD y SAM se trabajó con el Índice Oceánico de El Niño, el Índice del Modo Dipolar y el Índice del Modo anular del Sur propuesto por Marshall (2003), respectivamente. Los dos primeros índices se obtuvieron de la “*National Oceanic and Atmospheric Administration*”, mientras que el SAM se obtuvo de “*British Antarctic Survey*”.

Para cada mes, se contabilizó la cantidad de eventos ENSO positivo, negativo y neutro (ENSO+, ENSO-, NEUTRO) que coincidieron con fase positiva o negativa del IOD y del SAM (IOD+, IOD-SAM+ y SAM-).

Para cada una de las combinaciones de los forzantes remotos estudiados, se contabilizó el número de eventos extremos de PP observados. Para esto, se consideró extremo cuando la anomalía de PP (A(PP)), calculada con respecto al período 1981-2010, supera el percentil 95 (P95).

Por último, para identificar eventos que hayan tenido un impacto regional, se detectaron aquellos años en los que se presentan extremos para el 25 % o más (8 o más) de las estaciones analizadas.

3) RESULTADOS

Para analizar los extremos de PP bajo la coocurrencia de fases de los diferentes forzantes, primero se estudió la climatología mensual del umbral P95 (no se muestra). A modo de ejemplo, en la Figura 1.1 se muestra el resultado para diciembre, donde los menores valores se registran en las estaciones de Córdoba y Buenos Aires, mientras que los mayores corresponden a las estaciones de Corrientes y Entre Ríos. Estos resultados inducen una gran variabilidad entre extremos de PP lo que expone la necesidad de pronosticar la ocurrencia de estos eventos para la toma de decisión, ya que pueden afectar gravemente la cosecha, la seguridad de la población y generar un impacto socioeconómico (Anagnostopoulou y Tolika, 2012; Vazquez et al., 2020).

Por lo tanto, es vital llevar a cabo un análisis mensual de ocurrencia bajo la combinación de los forzantes mencionados antes. En términos generales, al analizar la cantidad de eventos extremos observados para cada coocurrencia de fases, se obtuvo que la mayor cantidad de extremos se presenta en años ENSO+, tanto en combinación con fase IOD+ (Tabla 1.1) como con SAM+ (no se muestra) para los meses de septiembre, noviembre y diciembre (Basso, 2025). No se detectaron extremos en el caso de ENSO-SAM+ (no se muestra).

	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
ENSO+IOD+	23	11	20	28	18	17
ENSO+IOD-	4	0	14	1	6	14
ENSO-iod+	9	2	2	2	3	0
ENSO-iod-	8	10	3	3	10	22
ENSONIOD+	3	19	10	12	3	4
ENSONIOD-	15	20	13	16	22	5

Tabla 1.1: Cantidad de casos (incluye estaciones y años) bajo la coocurrencia de fases ENSO y de fases IOD. Los valores máximos de cada mes se indican en sombreado.

Continuando con el análisis, resulta interesante discretizar la frecuencia de extremos según la combinación de forzantes, en función de la cantidad de estaciones (8 o más) y de años analizados (Tabla 1.2). Además, se indica el signo de la fase de cada uno de los forzantes, demostrando que los extremos ocurren bajo diferentes combinaciones de fases de los tres forzantes. Se identifica que la mitad de los extremos regionales mencionados ocurre en coincidencia con la fase positiva del IOD y del SAM (independientemente de la fase ENSO).

Mes	Año	N° de estaciones afectadas	ENSO	IOD	SAM
Septiembre	1982	17 estaciones	+	+	+
Octubre	2012	18 estaciones	n	+	+
Noviembre	1985	10 estaciones	n	+	+
Diciembre	1997	8 estaciones	+	+	-
	2012	8 estaciones	n	+	-
Enero	1980	9 estaciones	n	-	+
	2018	9 estaciones	+	+	+
Febrero	1984	14 estaciones	-	-	-

Tabla 1.2: Año del evento extremo, número (N°) de estaciones afectadas y signo de las fases de los forzantes (-: negativa, +: positiva, n: neutra) según el mes de estudio.

4) CONCLUSIONES

A lo largo del presente trabajo se ha analizado la acción combinada de los principales forzantes remotos en extremos de PP, a escala mensual, para los meses de primavera-verano en el período 1980-2019. Las distintas combinaciones de fases generan variabilidad en la intensidad de eventos extremos para la región de estudio. En este sentido, se ha obtenido que existen importantes eventos de este tipo no solo durante la fase ENSO+ (se refuerza número de eventos cuando coincide con IOD+ y SAM+ para septiembre y noviembre), sino también durante las fases ENSOn y ENSO-, lo cual es importante conocer para la toma de decisión. Incluso se observaron eventos extremos de A(PP) durante los meses de enero y febrero, donde la señal de estos forzantes tiende a disminuir.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto UBA CyT2023 Nro. 20020220200111BA dirigido por la Dra. Olga C. Penalba.

REFERENCIAS

- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T. C., & Wieringa, J. (2003).** Guidance on metadata and homogenization. Wmo Td, 1186(January 2003), 1-53.
- Anagnostopoulou, C. y Tolika, K. (2012).** Extreme precipitation in Europe: statistical threshold selection based on climatological criteria. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 479-489.
- Basso, C. L. (2025).** Análisis de la precipitación media mensual y extrema bajo la influencia conjunta de forzantes climáticos remotos en el centro-este de Argentina. Tesis de grado, Universidad Nacional La Plata, La Plata, Argentina.
- Buishand, T. A. (1982).** Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of hydrology*, 58(1-2), 11-27.
- Hamed, K. H. y Rao, A. R. (1998).** A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196.
- Iacovone, M. F., Pántano, V. C., & Penalba, O. C. (2024).** The relationship between ENSO, IOD and SAM with extreme rainfall over South America. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(5), 1769-1782.
- Marshall, G. J. (2003).** Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *Journal of climate*, 16(24), 4134-4143.
- McPhaden, M. J., Santoso, A., & Cai, W. (2020).** Introduction to El Niño Southern Oscillation in a changing climate. *El Niño Southern Oscillation in a changing climate*, 1-19.
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Ferreira, G. W. D. S., Rehbein, A., ... & Souza, C. A. D. (2021).** Impacts of teleconnection patterns on South America climate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1504(1), 116-153.
- Pettitt, A. N. (1979).** A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135.
- Vazquez, M., Nieto, R., Liberato, M. L., & Gimeno, L. (2020).** Atmospheric moisture sources associated with extreme precipitation during the peak precipitation month. *Weather and Climate Extremes*, 30, 100289.

ESTUDIO DE LA NIEBLA MARINA EN EL OCÉANO ATLÁNTICO SUDOCCIDENTAL Y SU AFECTACIÓN EN LAS OPERACIONES MARÍTIMAS

Caterina L. Basso¹, Alvaro S. Scardilli¹
caterina.basso@defensa.gob.ar

¹Departamento Meteorología, Servicio de Hidrografía Naval (SHN)

Palabras claves: Visibilidad, seguridad náutica, Mar Argentino

1) INTRODUCCIÓN

La visibilidad reducida tiene un impacto considerable en el transporte marítimo, especialmente para evitar colisiones en zonas propensas a la presencia de obstáculos, como otros barcos, témpanos u objetos a la deriva (Heo et al., 2010). En este sentido, autores como Koračin et al. (2014) obtuvieron que el 32 % de los accidentes en el mar son causados por fenómenos de niebla advectiva. Asimismo, Gultepe et al. (2007b) encontraron que la frecuencia de estos fenómenos tiene un impacto significativo tanto en la economía como en la pérdida de vidas humanas, comparable al de otros eventos extremos, tales como tornados o huracanes.

En comparación con otras regiones del mundo, los estudios sobre la niebla marina en el Atlántico Sur son escasos. Norris (1998) documentó que, en el Atlántico y el Pacífico Norte, la niebla es más frecuente durante el verano boreal. Recientemente, autores como Dorman et al. (2020) identificaron máximos de niebla marina en tres giros oceánicos, incluyendo la plataforma continental argentina como una de las áreas con mayor ocurrencia durante la primavera y el verano.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es profundizar en el análisis climatológico de eventos de niebla advectiva que afectan el transporte marítimo en el océano Atlántico Sudoccidental. En particular, se busca estudiar su relación con parámetros tales como la visibilidad reducida, la intensidad y dirección del viento, así como con la diferencia entre la temperatura del aire y la de la superficie del mar.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se trabajó con los datos registrados en mensajes SHIP, reportados por buques que navegaron por el océano Atlántico Sudoccidental, entre las latitudes 35°S y 65°S, durante el período 1960-2019. Estos datos, agrupados en bandas latitudinales de 5°, integran la base de datos meteorológicos marinos del Departamento Meteorología del Servicio de Hidrografía Naval (Palastanga et al., 2017), la cual cuenta con un control de calidad conforme a estándares internacionales.

Para estudiar la climatología de la niebla advectiva, se utilizaron las siguientes variables: la visibilidad (VV), la intensidad y dirección del viento (FF y DD), la temperatura del aire (TA) y la temperatura superficial del mar (TSM). Se definió un evento de niebla advectiva como aquel en el que se registra una VV menor o igual a 4 km, y una diferencia entre la temperatura del aire y la del mar (TA-TSM) mayor o igual a cero ($VV \leq 4 \text{ km}$ y $TA-TSM \geq 0$).

Se aplicó la prueba de Pettitt (Pettitt, 1979), con el objetivo de detectar la existencia de cambios bruscos en los valores medios. Asimismo, se evaluó la presencia de tendencias en las series temporales de frecuencia relativa de eventos de niebla advectiva mediante el test de Mann-Kendall (Hamed y Rao, 1998).

Dado que tanto la DD y la FF como la TA-TSM en superficie desempeñan un rol fundamental en la formación de niebla advectiva, se estudiaron en detalle estos factores para cada banda de latitud y para cada estación del año.

3) RESULTADOS

Del análisis de resultados, se obtuvo que la mayor cantidad de registros de niebla advectiva se presenta durante los meses de primavera y verano, en concordancia con los resultados de Dorman et al. (2020). En particular, se encontró que estos eventos son más frecuentes durante la primavera entre 35°S y 50° S, y durante el verano entre 50°S y 65°S (no se muestra).

En la Figura 1 se presenta la rosa de viento para las bandas de latitud de 45°-50°S (izquierda) y de 50°-55°S (derecha). En general, se observa que, para todas las estaciones, el valor medio corresponde a la categoría de vientos moderados (12 a 22 Nds), con un porcentaje bajo de calmas. En su mayoría, este tipo de eventos ocurren con DD predominante del NO al NE, y una FF de categoría débil (1 a 11 Nds) a fuerte (23 a 41 Nds). Asimismo, se observan valores más intensos durante los casos en los que la DD es del sector O y SO.

La proporción de tiempo en que el viento está desde un cierto ángulo y rango de FF depende, en gran medida, de la estación del año y de la banda de latitud. En la Figura 1 se evidencia un aumento en el valor medio de la FF en todas las estaciones, acompañado de un cambio en la DD predominante entre las bandas latitudinales. Esto último hace referencia a que, para el caso 45°-50°S, predomina el viento del sector N, mientras que en la banda de 50°-55°S el predominio es del sector O. No obstante, durante el invierno, en esta última banda se observa una frecuencia cercana al 20 % de viento del NNE y NE.

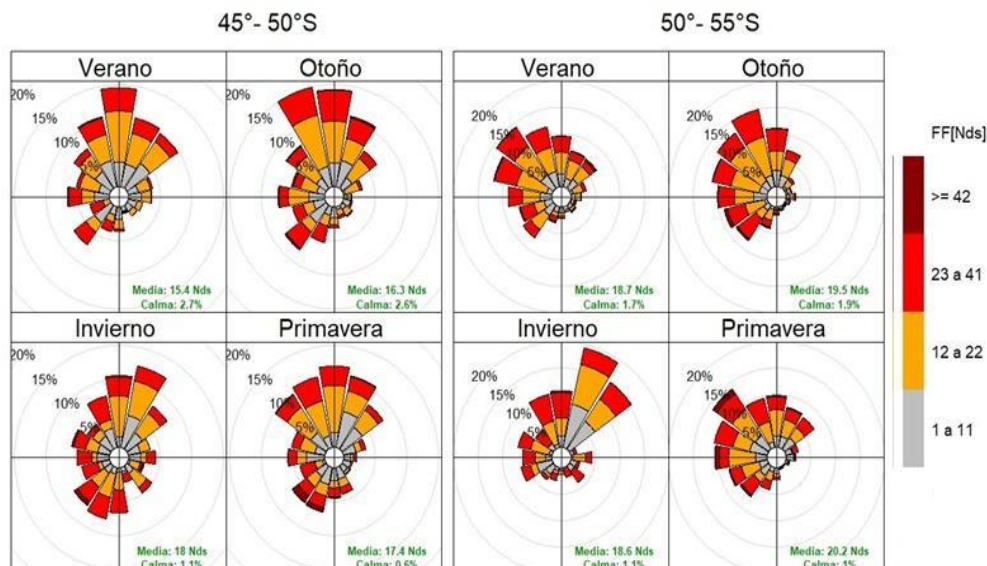


Figura 1: Rosa de vientos (%), dirección del viento en nudos -Nds-) para la banda de latitud 45°-50°S (izquierda) y para 50°-55°S (derecha), considerando solo reportes de niebla advectiva. Además, se indica la intensidad media del viento y el porcentaje de vientos en calma por cada estación.

Con el objetivo de estudiar la relación entre la TA-TSM con la VV, se presenta, a modo de ejemplo, el *hexbin plot* correspondiente a la banda de latitud 40°-45°S (Figura 2). Se observa que la mayor cantidad de casos corresponde a la categoría de 4 km y a una TA-TSM menor a 4°C. También se puede mencionar una cantidad importante de casos durante la primavera, con una categoría de VV inferior a 1 km (< 1 km).

4) CONCLUSIONES

A partir del análisis realizado para cada banda de latitud, se puede concluir que las nieblas advectivas ocurren predominantemente bajo DD del NO al NE, en coincidencia con resultados previos. No obstante, también se registran eventos asociados a otras DD, como las provenientes del E y SE. A su vez, la FF dominante en los eventos de nieblas advectivas corresponde a la categoría de vientos moderados (12 a 22 Nds).

Continuando con el análisis, la TA-TSM juega un papel clave en la formación de este tipo de nieblas, siendo en la mayoría de los casos solo de unos pocos grados. En este sentido, se registran muy pocos eventos con una diferencia mayor a 6°C.

Por lo tanto, a lo largo del trabajo se ha evidenciado que la formación de niebla advectiva depende tanto de los valores de variables meteorológicas-marítimas (DD, FF y TA-TSM), como de la estación del año y de la banda de latitud analizada. Considerando la importancia de este tipo de eventos para la seguridad náutica, resulta fundamental comprender la climatología de estas variables, a fin de identificar las regiones y rangos de valores más frecuentes, y así contribuir a una mejor predicción de la niebla advectiva.

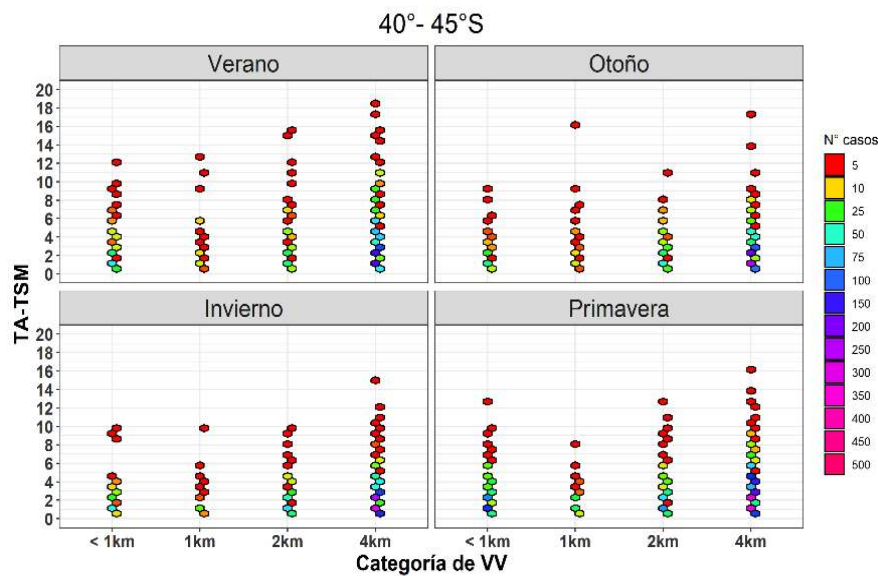


Figura 2: Reportes disponibles con niebla advectiva según la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie del mar (TA-TSM), por estaciones del año. Se excluyeron combinaciones con menos de cinco casos.

REFERENCIAS

- Dorman, C. E., Mejia, J., Koračin, D., y McEvoy, D. (2020).** World marine fog analysis based on 58-years of ship observations. *International journal of climatology*, 40(1), 145-168.
- Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S. C., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., ... y Cober, S. G. (2007).** Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Pure and applied geophysics*, 164, 1121-1159.
- Hamed, K. H., y Rao, A. R. (1998).** A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196.
- Heo, K. Y., Ha, K. J., Mahrt, L., y Shim, J. S. (2010).** Comparison of advection and steam fogs: From direct observation over the sea. *Atmospheric research*, 98(2-4), 426-437.
- Norris, J. R. (1998).** Low cloud type over the ocean from surface observations. Part I: Relationship to surface meteorology and the vertical distribution of temperature and moisture. *Journal of climate*, 11(3), 369-382.
- Pettitt, A. N. (1979).** A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28 (2), 126-135.
- Koračin, D., Dorman, C. E., Lewis, J. M., Hudson, J. G., Wilcox, E. M., y Torregrosa, A. (2014).** Marine fog: A review. *Atmospheric research*, 143, 142-175.
- Palastanga, V., Nuré, E. C., Collini, E. A., y Penalba, O. C. (2017).** Observaciones meteorológicas superficiales de buques en navegación en el Atlántico Sudoccidental: control de calidad estadístico. *Meteorológica*, 42(2), 3-22.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS TIERRAS SECAS EN ARGENTINA DURANTE LAS ÚLTIMAS DÉCADAS (1961–2022)

Pedro Samuel Blanco^{1,2,3}, Moira Evelina Doyle^{1,2,3}
pedro.blanco@cima.fcen.uba.ar

¹Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO)

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)

³Instituto Franco–Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI) – IRL 3351 – CNRS–CONICET–IRD–UBA

Palabras clave: Índice de aridez, Tendencias, Análisis espectral.

1) INTRODUCCIÓN

Las tierras secas se caracterizan por una escasa cobertura vegetal, baja fertilidad del suelo y precipitaciones insuficientes para satisfacer la demanda evaporativa de la atmósfera (Yao et al., 2020). En las últimas décadas, estas tierras se expandieron en un 3,1 % debido a un incremento de la aridez asociado a cambios en la temperatura y las precipitaciones (Chai et al., 2021). En Argentina, las tierras secas cubren más de la mitad del territorio y presentan una alta vulnerabilidad a la desertificación debido a la variabilidad climática y las presiones humanas sobre los ecosistemas (Torres et al., 2014). En este trabajo se pretende analizar la variabilidad temporal de las tierras secas argentinas entre 1961 y 2022, identificando los principales patrones de cambio como tendencias y ciclos de distinta frecuencia.

2) METODOLOGÍA

Se utilizó el Índice de Aridez Anual (IA), definido por el *United Nations Environment Programme* (UNEP), para delimitar las tierras secas según el criterio de la *United Nations Convention to Combat Desertification* ([UNCCD] 1996). El IA se calcula como el cociente entre los valores anuales de precipitación y evapotranspiración potencial, esta última estimada con la temperatura media a través del método de Thornthwaite. Los valores del IA se clasifican en seis categorías o tipos de clima (Middleton and Thomas, 1997): hiperárido ($< 0,05$), árido ($0,05–0,2$), semiárido ($0,2–0,5$), subhúmedo seco ($0,5–0,65$), subhúmedo húmedo ($0,65–1$) y húmedo (> 1). Bajo esta clasificación y siguiendo el criterio de la UNCCD (1996), las tierras secas están comprendidas por los climas árido, semiárido y subhúmedo seco, excluyendo las regiones hiperáridas y polares, consideradas como verdaderos desiertos.

El área de estudio abarca la Argentina continental, situada en el extremo sur de Sudamérica, y el período analizado se extiende desde 1961 hasta 2022. Se descargaron datos mensuales de temperatura media y precipitación acumulada de la base Climatic Research Unit v4.06 (CRU, https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.06/). Esta base cuenta con un conjunto de datos climáticos grillados en una resolución espacial de $0,5^\circ$ latitud $\times$ $0,5^\circ$ longitud, que fue remuestreada mediante interpolación bilineal a $0,16^\circ$ latitud $\times$ $0,16^\circ$ longitud, con el fin de representar con mayor detalle la distribución de tierras secas en el área de estudio.

Durante el período analizado, se calculó el porcentaje anual del área ocupada por tierras secas y sus tipos de climas asociados (árido, semiárido y subhúmedo seco) con respecto a la superficie total del país ($2.791.810 \text{ km}^2$). Para analizar la variabilidad a largo plazo, se estimaron tendencias polinómicas de 3° orden a cada serie, evaluando la significancia de los modelos con la prueba de Fisher (95 % de confianza), y se aplicó un filtro de medias móviles de 5 años para suavizar las variaciones interanuales. Luego, se identificaron las periodicidades

de cada serie mediante el análisis espectral con el método Blackman–Tukey y el suavizado de Hamming, obteniendo espectros de potencia que muestran la contribución de distintas frecuencias a la varianza total e incluyen bandas de significancia (5 y 95 %) para determinar los ciclos estadísticamente significativos. Dentro de los espectros, se clasificaron las periodicidades en multidecadales (0.0166–0.05 ciclos por año, 20–60 años), decadales (0.051–0.10 ciclos por año, 10–19 años), multianuales (0.11–0.33 ciclos por año, 3–9 años) e interanuales (más de 0.33 ciclos por año, menos de 3 años). Finalmente, se empleó el análisis wavelet con la función *wt* del paquete *biwavelet* en R para descomponer las series en el espacio tiempo–período y localizar temporalmente los modos de variabilidad (Torrence and Compo 1998).

3) RESULTADOS

La Figura 1 sintetiza el análisis de la variabilidad temporal de las tierras secas de Argentina y sus tipos de climas asociados para el período 1961–2022. En general, las tierras secas argentinas (Figura 1a–c) presentan una leve disminución desde comienzos de la década de 1960 hasta principios de los años 80, seguida por un incremento sostenido hasta la actualidad (95% de confianza). Hasta finales de la década de 1990, la superficie de tierras secas mostró una sucesión de ciclos cuasi–decadales, mientras que desde inicios del siglo XXI se observa una tendencia creciente persistente. Los análisis espectral y wavelet indican una fuerte concentración de energía en ciclos cuasi–decadales (alrededor de 9 años) entre 1970 y principios de 1990, junto con ciclos multianuales (5 años) entre los 2000 y mediados de la década de 2010, además de periodicidades interanuales (2–3 años) en intervalos puntuales, como a principios de las décadas de 1970 y 1990.

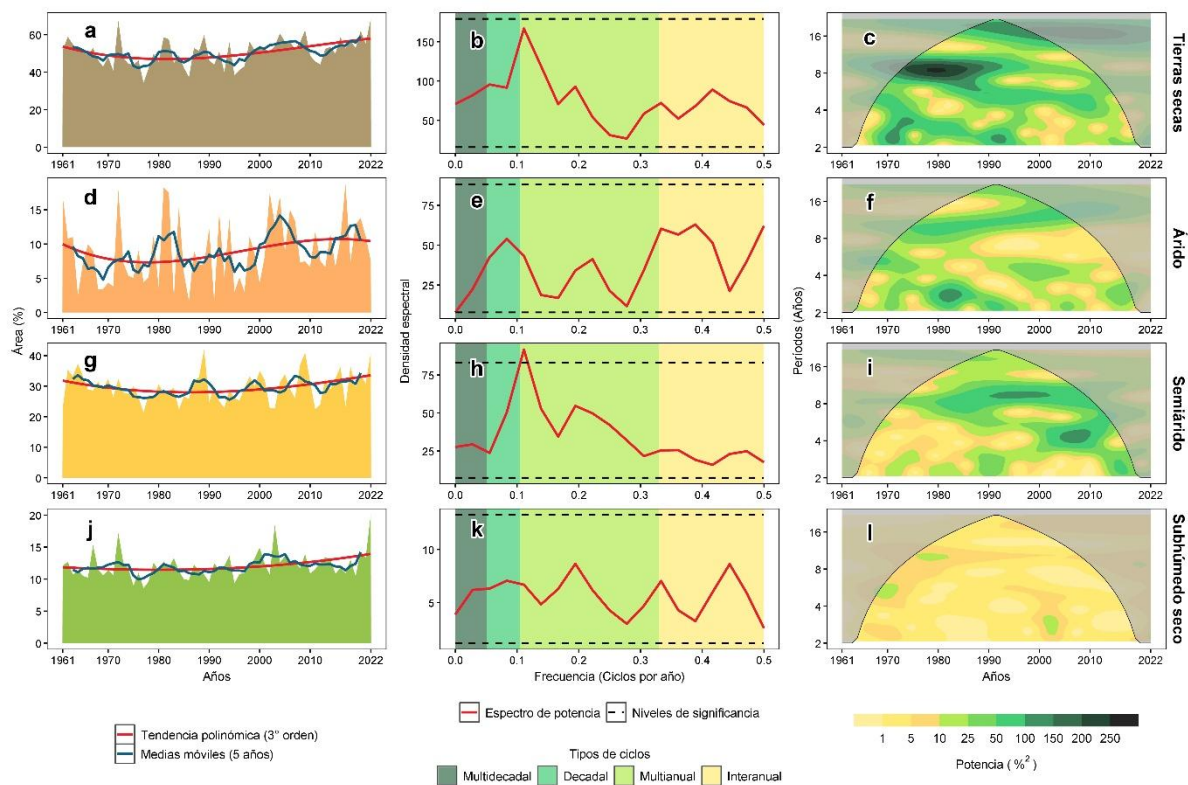


Figura 1. Variabilidad temporal de las tierras secas y sus climas asociados durante el período 1961–2022. Se muestran las series temporales con tendencia polinómica de 3° orden y las medias móviles de 5 años, junto con los espectros de potencia y los espectros de wavelet correspondientes a (a–c) las tierras secas totales y los climas (d–f) árido, (g–i) semiárido y (j–l) subhúmedo seco.

Las tierras áridas (Figura 1d–f) experimentaron una disminución hasta mediados de la década de 1970, seguida por un incremento sostenido hasta 2010 y luego una leve reducción de área en los últimos años. Las periodicidades del clima árido se caracterizan por ciclos interanuales (2–3 años) a inicios de la década de 1980 y multianuales (5 años) en torno al año 2000, aunque también se encuentran picos de menor intensidad de potencia en los ciclos decadales (10 años) desde mediados de los años 70 hasta mediados de la década de los 2000.

La serie de tierras semiáridas (Figura 1g–i) muestra ciertas similitudes con la de las tierras secas totales, aunque con oscilaciones de largo plazo menos marcadas. En este tipo de clima se detectan ciclos cuasi–decadales (alrededor de 9 años) desde comienzos de la década de 1980 hasta aproximadamente 2010, además de fluctuaciones multianuales (5 años) e interanuales (2–3 años) que coinciden temporalmente con las observadas en las tierras secas totales. El clima semiárido constituye la región núcleo de las tierras secas en Argentina, dado que representa aproximadamente el 60 % de su superficie total y se caracteriza por una mayor estabilidad climática y tiempos de respuesta más largos.

Con respecto a las tierras subhúmedas secas (Figura 1j–l), se observan variaciones de largo plazo similares a las de las tierras secas totales y las semiáridas, aunque con una variabilidad menos pronunciada. Se identifican ciclos de distintas frecuencias, entre ellos casi–decadales (alrededor de 9 años) entre mediados de los años 70 y fines de los 80, multianuales (5–6 años) a comienzos de los 70, e interanuales (2–3 años) tanto en ese mismo período como a inicios de los 2000. Al encontrarse en los márgenes de las tierras secas, las tierras subhúmedas secas responden con mayor rapidez a los cambios debido a su interacción más directa con las dinámicas de los climas semiárido y húmedos (subhúmedo húmedo y húmedo).

4) CONCLUSIÓN

Las tierras secas de Argentina y sus tipos de climas asociados presentan distintos patrones de variabilidad temporal, con tendencias no lineales significativas y oscilaciones de diversas frecuencias (cuasi–decadales, multianuales e interanuales). El clima semiárido se destaca como el componente central del sistema, ya que sus cambios a largo plazo se corresponden con los de las tierras secas totales. En cambio, los climas árido y subhúmedo seco contribuyen principalmente a las variaciones de corto plazo, con mayor presencia de ciclos interanuales y multianuales. Estos resultados muestran que la evolución de las tierras secas está asociada a la dinámica combinada de los distintos tipos de clima, y sugieren la posible influencia de forzantes comunes que modulan su comportamiento a lo largo del tiempo.

REFERENCIAS

- Chai, R., Mao, J., Chen, H., Wang, Y., Shi, X., Jin, M., ... y Wulschleger, S. D., 2021:** Human–caused long–term changes in global aridity. *Nat. Partner J. Clim. Atmos. Sci.*, 4, 65.
- Middleton, N., y Thomas, D., 1997:** *World Atlas of Desertification*, United Nations Environment Programme (UNEP).
- Torrence, C., y Compo, G.P., 1998:** A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61–78.
- Torres, L.M., Abraham, E., y Pastor, G., 2014:** Ventanas sobre el territorio: Herramientas teóricas para comprender las tierras secas, EDIUNC.
- United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), 1996:** United Nations Convention to Combat Desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa, United Nations (UN).
- Yao, J., Liu, H., Huang, J., Gao, Z., Wang, G., Li, D., ... y Chen, X., 2020:** Accelerated dryland expansion regulates future variability in dryland gross primary production. *Nat. Commun.*, 11, 1–10.

GLOBAL DROUGHT OBSERVATORY COMBINED DROUGHT INDICATOR: EVALUATION IN SOUTHERN SOUTH AMERICA

Spennemann, Pablo C.^{1,2}, Gustavo Naumann³, Mercedes Peretti⁴, Carmelo Cammalleri⁵, Mercedes Salvia⁶, Alessio Bocco⁷, Maria Elena Fernández Long⁴, Martin D. Maas¹, Hyunglok Kim⁸, Manh-Hung Le^{9,10}, John D. Bolten⁹, Andrea Toreti¹¹ and Venkataraman Lakshmi¹²

pspennemann@smn.gob.ar, Corresponding Author

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Buenos Aires, Argentina.

²Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), Buenos Aires, Argentina.

³European Research Executive Agency, Brussels, Belgium.

⁴Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas, Buenos Aires, Argentina.

⁵Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA), Politecnico di Milano, Milan, Italy.

⁶Grupo de Teledetección Cuantitativa, Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, UBA/CONICET), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

⁷Consultant of the Centro Regional del Clima para el Sur de Sudamérica.

⁸Department of Environment and Energy Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Republic of Korea.

⁹Hydrological Sciences Laboratory, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA.

¹⁰Science Applications International Corporation, Greenbelt, MD, USA.

¹¹European Commission, Joint Research Centre (JRC), Ispra, Italy

¹²Department of Engineering Systems and Environment, University of Virginia, Charlottesville, VA, USA.

Keywords: Droughts, Hydrological Cycle, Impacts

1) INTRODUCTION

Droughts pose serious threats to the agricultural sector, especially in rainfed-dominated agricultural regions like those in Argentina's Humid Pampas. This region was recently impacted by slow-evolving and long-lasting droughts as well as by flash droughts, resulting in losses reaching thousands of millions of US dollars. Improvements of drought early warning systems are essential, particularly given the projected increase in drought frequency and severity over southern South America. The spatial and temporal relationship between precipitation deficits, soil moisture and vegetation health anomalies are crucial for better understanding and representation of the agricultural droughts and their impacts. The Global Drought Observatory Combined Drought Indicator (GDO-CDI, Cammalleri et al., 2021) considers the causal and time-lagged relationship of these three variables. The study's objective is twofold: (1) Analyze the time-lagged response between precipitation deficits, soil moisture and satellite fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (fAPAR) anomalies; and (2) Evaluate the CDI's capability to characterize the severity of drought events on the Humid Pampas against agricultural yield estimations and simulations, as well as agricultural emergency declarations.

2) DATA AND METHODOLOGY

The dataset used for the CDI computation is based on the operational Copernicus GDO (<https://drought.emergency.copernicus.eu/tumbo/gdo/map/?id=2001>) data. The Global Precipitation Climatology Centre (GPCC, $1^\circ \times 1^\circ$) is used in GDO to construct monthly-updated Standardized Precipitation Index (SPI) over two different accumulation periods (1 and 3 months), for soil moisture anomalies an ensemble product is used (10 day and $0.1^\circ \times 0.1^\circ$), and the fAPAR 10-day standardized anomalies from MODIS ($0.08^\circ \times 0.08^\circ$) are used as a vegetation biomass indicator. The CDI is designed to reproduce the cascading effect of drought from precipitation to soil moisture and vegetation, exploiting regularly updated soil moisture and fAPAR data with dekadal (10 day interval) frequency, and monthly SPI-3 and SPI-1. In order to evaluate the delay in response in dekadal soil moisture and fAPAR anomalies to monthly SPIs, a simultaneous and lagged Pearson correlation was carried out as in Sepulcre-Canto et al. (2012): SPI of a specific month is compared with the anomalies of soil moisture and fAPAR of the 2nd and 3rd dekad of that month (lags $-1d$ and 0 respectively) and with the 1st, 2nd and 3rd dekads of the following month (lags $+1d$, $+2d$ and $+3d$ respectively). This was performed for the austral warm months (September-March, from 2001 to mid-2022), since the fAPAR better represents the crop phenology during this period (Sepulcre-Canto et al., 2012). Summer crop yields and agricultural emergency declarations are also used for the CDI evaluations. The CDI consists of 6 categories: Watch, Warning, Alert, Temporary Soil Moisture Recovery, Temporary Vegetation Recovery and Full Recovery. As shown in Table 1, the Watch category represents a precipitation deficit and corresponds to a $SPI-3 \leq -1$ or $SPI-1 \leq -2$; the Warning category corresponds to a Watch category + soil moisture anomaly ≤ -1 ; meanwhile, the Alert category implies a $SPI-3 \leq -1$ or $SPI-1 \leq -2$ and fAPAR anomalies ≤ -1 (for more detail see Figure 1 of Cammalleri et al., 2021).

3) RESULTS AND CONCLUSIONS

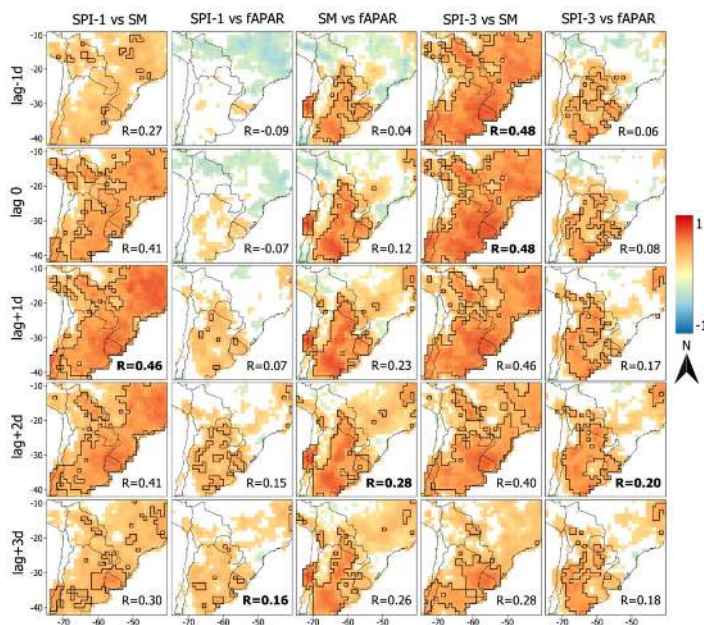


Figure 1. Pearson correlations between the different variables and temporal lags represented by dekads (d, i.e. $+1d=10$ day period). Black contour represents the $r=0.40$ value and points with no significant correlation values were masked out ($p < 0.05$). Warm months September to March for 2001-mid 2022 period. Sample size for correlations with SPI was $n=150$, and between soil moisture and fAPAR was $n=450$. The median spatial correlation is shown in the lower right corner of each panel, where the bold represents the highest correlation for each column

Based on Figure 1, the highest correlation was found at temporal lags ranging from 0 to 20 days (0 to $+2d$) between the precipitation deficit and soil moisture anomalies, lags of 0 to 20 days between soil moisture and fAPAR anomalies, and a lag of 10 to 30 days ($+1d$ to $+3d$) between SPI and fAPAR anomalies within the Humid Pampas. Then, a more detailed analysis was performed focusing on 14 sites within the Humid Pampas of Argentina. The correlation

values across these sites were slightly higher compared to those documented over Europe by Sepulcre-Canto et al. (2012) when comparing SPI-3, soil moisture and fAPAR anomalies (not shown). It is worth mentioning the higher correlation values between soil moisture and fAPAR observed over the Humid Pampas compared to Europe ($r=0.54$ vs. $|r|=0.35$). While this could be related to the difference in the analyzed period and/or to the region, it could also be due to a better representation of the ensemble soil moisture product currently used in the CDI. Given that the CDI evaluation performed by Sepulcre-Canto et al. (2012) used only soil moisture outputs from an hydrological model. Furthermore, despite the different climatic regimes, the temporal lag of maximum correlation across the 14 sites aligns with those documented in Europe, highlighting similarities in temporal signals across variables over both agricultural regions. Although the CDI has limitations, such as its coarse spatial resolution and monthly temporal resolution of precipitation data, it effectively tracks the progression of major drought events in the region (not shown). The CDI's frequency of Watch+Warning+Alert drought categories, aligns well with below normal estimations and simulations of soybean and corn yield (see Table I), as well with official declarations of agricultural emergencies.

Crop	Period	Yield estimations			Yield simulations		
		Median	Max	Min	Median	Max	Min
Corn	2001/02 to 2021/22	-0.30	-0.61	-0.06	-0.36	-0.61	-0.14
Corn	Dec to Feb	-0.40	-0.66	-0.13	-0.50	-0.55	-0.20
Soybean	2001/02 to 2021/22	-0.28	-0.49	-0.18	-0.29	-0.61	-0.05
Soybean	Dec to Mar	-0.46	-0.60	-0.29	-0.50	-0.60	-0.23

Table I. Median, maximum and minimum Tau correlations, over the 14 location sites, between corn and soybean yield estimations/simulations and the frequency/sum of dekads under CDI categories of WATCH, WARNING and ALERT. The complete crop campaign (September-March) and the critical growth periods for both summer crops were considered over the 2001–2022 period.

Insights from this study provide a basis for discussing potential improvements to the CDI, based on the regional agreement shown in Figure 1. Furthermore, this study highlights the global and regional significance of evaluating and enhancing the CDI for effective drought monitoring, emphasizing the role of collaborative efforts for future advancements in drought early warning systems.

REFERENCES

- Cammalleri, C., Arias-Muñoz, C., Barbosa, P., de Jager, A., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., McCormick, N., Naumann, G., Spinoni, J., and Vogt, J., 2021:** A revision of the Combined Drought Indicator (CDI) used in the European Drought Observatory (EDO), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 481–495, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-481-2021>
- Sepulcre-Canto G., Horion S., Singleton A., Carrao H., Vogt J., 2012:** Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12:3519– 3531. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3519-2012>

OLAS DE CALOR COMPUESTAS EN EL SUR DE SUDAMÉRICA Y SU MODULACIÓN POR FORZANTES CLIMÁTICOS DE GRAN ESCALA

Agustina Lopez Ramirez^{1,2}, Mariana Barrucand^{1,2}, Soledad Collazo^{1,3}
alopez@at.fcen.uba.ar

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, ARGENTINA

³Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, ESPAÑA

Palabras clave: ENSO, PDO, Eventos Extremos.

1) INTRODUCCIÓN

Las olas de calor compuestas, que combinan temperaturas extremas con déficits o excesos de precipitación, representan fenómenos de alto impacto en el sur de Sudamérica (SSA). Comprender los factores que controlan su ocurrencia es esencial para mejorar las estrategias de adaptación. En este estudio, se busca analizar la influencia de forzantes climáticos de gran escala, con especial foco en el ENSO, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), el dipolo del Océano Índico (IOD) y el Modo Anular del Sur (SAM) sobre la frecuencia de distintos tipos de olas de calor compuestas en SSA durante el período 1979-2018.

2) DATOS Y MÉTODOS

Se utilizaron datos diarios de temperatura máxima y precipitación de 132 estaciones meteorológicas distribuidas en SSA, correspondientes a los meses de octubre a marzo entre 1979 y 2018. Se aplicaron procedimientos de control de calidad para detectar y corregir posibles errores, valores atípicos e inconsistencias.

Una vez que se recopilaron los datos, se definieron los eventos compuestos como la ocurrencia simultánea o secuencial de olas de calor y déficits o excesos de precipitación. Las olas de calor se identificaron como periodos en los que la temperatura máxima superó el percentil 90 (calculado en base al periodo 1981-2010 con una ventana móvil de 15 días) durante al menos 3 días consecutivos. Los déficits y excesos de precipitación se determinaron a partir del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI, por sus siglas en inglés) para 1 y 3 meses. De este modo, se obtuvieron olas secas simultáneas (OSSSI), que son olas de calor coincidentes con sequías ($SPI1 < -1$ y $SPI3 < -1$); olas secas secuenciales (OSSE), caracterizadas por olas de calor que siguen a una sequía ($SPI1 > -1$ y $SPI3 < -1$); olas húmedas simultáneas (OHSI), definidas por olas de calor concurrentes con excesos de humedad ($SPI1 > 1$ y $SPI3 > 1$); y olas húmedas secuenciales (OHSE), en las que las olas de calor son seguidas por excesos de humedad ($SPI1$ en el mes $i < 1$ y $SPI3$ en el mes $i+2 > 1$, siendo i el mes donde ocurrió la ola de calor).

La influencia de los forzantes en la ocurrencia de eventos compuestos se analizó a partir de sus respectivos índices. El índice ONI se obtuvo en escala trimestral del Climate Prediction Center de NOAA (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>), mientras que los índices PDO (disponible en <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>), IOD (disponible en https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/international/ocean_monitoring/indian/IODMI/DMI_month.html) y SAM (disponible en <http://www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma/sam.html>) fueron descargado en escala mensual. Para cada ola de calor compuesta identificada, se determinó el

mes en que ocurrió y se asignó como forzante climático la fase de cada índice en el mes anterior. En el caso del ONI, que se encuentra en escala trimestral, se consideró el valor del trimestre centrado en el mes previo al de la ola de calor. Esta metodología busca capturar posibles influencias climáticas que preceden a la ocurrencia de los eventos.

Para cada forzante y fase, se calculó la frecuencia relativa como la proporción de eventos ocurridos bajo dicha fase respecto al total de eventos en cada estación. La significancia estadística de las diferencias fue evaluada mediante un test exacto de Fisher con un nivel de confianza del 95%. Si bien también se analizó la influencia del IOD y del SAM, la señal fue débil y, por lo tanto, sus resultados no se presentan en este trabajo.

Adicionalmente, se evaluó la influencia conjunta de los forzantes. Para ello, se definieron 24 combinaciones de forzantes (CF) en base a todas las posibles fases de ENSO (El Niño, Neutral, La Niña), PDO (positiva/negativa), IOD (positiva/negativa) y SAM (positiva/negativa). Cada mes de la estación cálida del período de estudio fue clasificado según su CF correspondiente. Luego, se identificaron los meses con al menos una estación afectada por olas de calor compuestas, y se calculó la probabilidad condicional de ocurrencia de cada tipo de evento. Finalmente, se estimó el porcentaje de estaciones afectadas para analizar la extensión espacial asociada a cada CF.

3) RESULTADOS

La Figura 1 muestra la influencia de las fases del ENSO en la frecuencia de olas de calor compuestas. La fase La Niña se asoció significativamente con un aumento en la frecuencia de eventos secos (OSSI y OSSE). En el caso de los OSSI, los eventos fueron más frecuentes durante La Niña, especialmente en el centro y noreste de Argentina, donde las frecuencias relativas superaron el 70%. En contraste, los OSSI durante El Niño fueron menos frecuentes. Por otro lado, los OSSE fueron más comunes bajo condiciones de La Niña, sobre todo en el noreste de Argentina y la región pampeana. Sin embargo, en el noroeste argentino, la ocurrencia de OSSE pareció estar vinculada a El Niño.

En el caso de los eventos cálidos y húmedos (OHSI y OHSE), su frecuencia absoluta fue considerablemente menor en comparación con los eventos cálidos y secos. En la región central de Chile y el sector noreste del área de estudio, estos eventos fueron más frecuentes durante El Niño. Fuera de estas zonas, los resultados estadísticamente significativos fueron escasos y no permitieron establecer patrones claros.

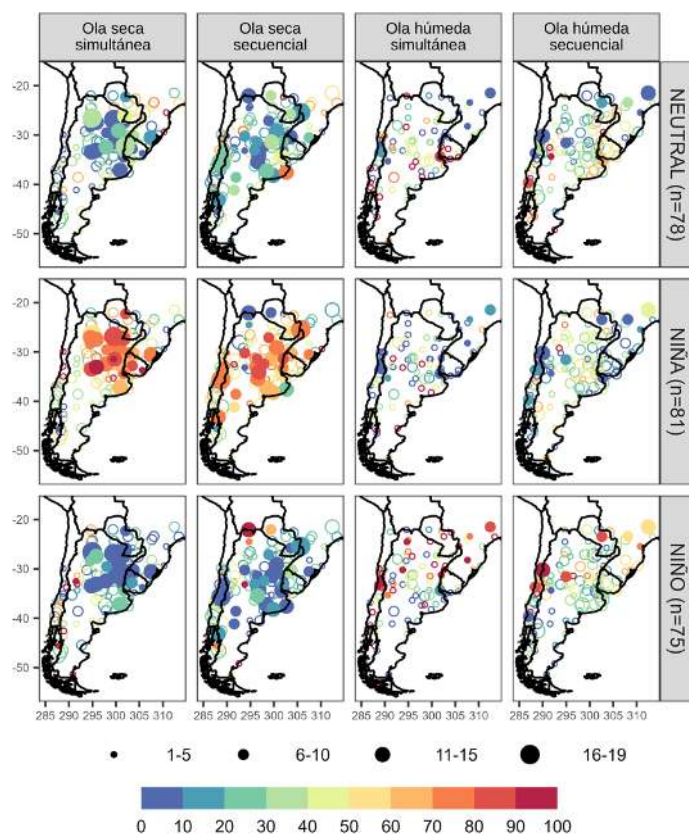


Figura 1: Frecuencias relativas de eventos en cada fase de ENSO, respecto a la frecuencia absoluta de eventos en cada estación. El tamaño de los puntos indica la frecuencia absoluta de eventos (agrupada en cuatro categorías). Los círculos rellenos representan resultados estadísticamente significativos al nivel del 5%. Los valores "n" entre paréntesis corresponden con la frecuencia absoluta de cada fase del forzante (expresada en meses) en el periodo 1979-2018.

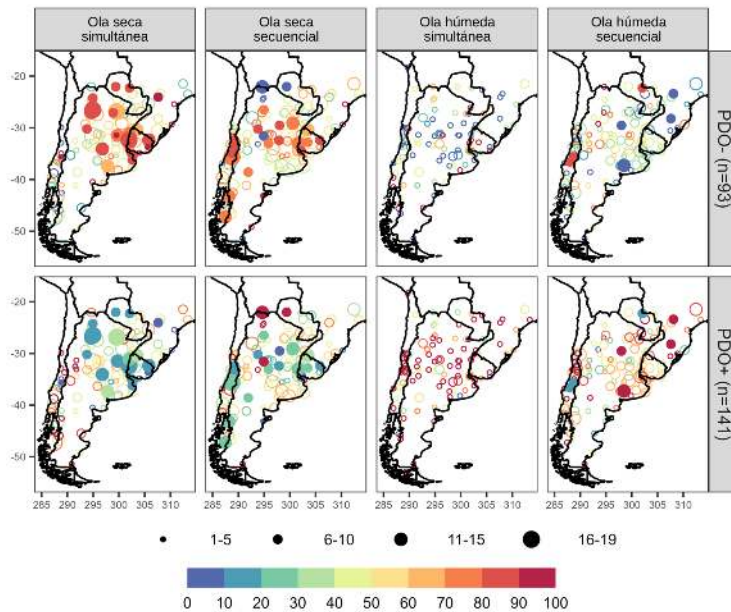


Figura 2: Igual a la Figura 1, pero para PDO.

Los resultados asociados a la PDO se presentan en la Figura 2. La fase negativa (PDO-) se vinculó con un aumento en la frecuencia de eventos secos (OSSI y OSSE), mientras que la fase positiva (PDO+) pareció favorecer los eventos húmedos (OHSI y OHSE). Para los OSSI, se observaron frecuencias relativas altas (>70%) durante la PDO- en el centro y noreste de Argentina. En cambio, durante la PDO+, las frecuencias relativas fueron inferiores al 30%. En el caso de los OSSE, los eventos fueron notablemente más frecuentes durante la PDO, especialmente en el centro de Argentina, Uruguay y Chile. Sin

embargo, cabe destacar que algunas estaciones del noroeste argentino registraron una mayor ocurrencia de eventos durante PDO+. Los eventos húmedos (OHSI y OHSE) no mostraron una señal clara en respuesta a las fases de la PDO. No obstante, ciertas estaciones en el centro de Chile, partes de Brasil y dos estaciones en el centro y noreste de Argentina presentaron frecuencias más altas de OHSE durante la fase positiva de la PDO.

Si bien no se encontró un patrón claro de asociación entre los eventos compuestos estudiados y los índices IOD y SAM, el análisis conjunto de los forzantes (no se muestra en este trabajo) reveló que la combinación de condiciones La Niña, PDO-, IOD- y SAM+, ejercen una influencia destacada sobre la ocurrencia de eventos. Esta configuración tendió a favorecer la aparición de eventos secos (OSSI y OSSE), mientras que inhibió los eventos húmedos (OHSI y OHSE), especialmente en el centro de Chile, centro de Argentina y Uruguay.

4) CONCLUSIONES

Los resultados evidencian el importante rol de ENSO y PDO en la modulación de las olas de calor compuestas en el SSA. La Niña y PDO- favorecen la ocurrencia de eventos secos, especialmente cuando se dan bajo una fase negativa del IOD y positiva de SAM. Los eventos cálidos y húmedos son mucho menos frecuentes que los cálidos y secos, siendo El Niño el principal forzante de este tipo de eventos para el centro de Chile y noreste de la región SSA.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por los proyectos PICT2019-2019-02933, CONICET PIP 0333 (2021-2023), UBACyT 20020220200111BA, proyecto SAFETE, financiado por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, según el acuerdo de subvención Marie Skłodowska-Curie n° 847635 (UNA4CAREER).

COMPARACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO SUPERFICIAL OBSERVADO Y ESTIMADO A PARTIR DE LA CARGA DE GOTAS DE LLUVIA DURANTE UNA TORMENTA

Rodolfo G. Pereyra^{1,4}, Lucía B. Martínez^{1,4}, María G. Nicora^{2,3,4}, Eldo E. Ávila^{1,4}

rodolfo.pereyra@unc.edu.ar

¹FAMAF, Universidad Nacional de Córdoba, IFEG-CONICET, Córdoba.

²Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata, UNLP.

³UNIDEF, MINDEF, CONICET, DEILAP, División Atmósfera, Villa Martelli.

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET.

Palabras clave: electrificación de nubes, campo eléctrico, gotas de lluvia.

Se analizaron mediciones del campo eléctrico superficial durante algunas tormentas, junto con mediciones de la carga eléctrica y la velocidad de caída de las gotas de lluvia, con el objetivo de evaluar en qué medida las partículas de precipitación cargadas contribuyen al valor del campo eléctrico observado. Para ello, se aplicó una reconstrucción temporal inversa de la trayectoria de las gotas, que permitió estimar el campo eléctrico generado por esa precipitación. Los resultados mostraron una buena correspondencia entre el campo medido y el estimado. Esto sugiere que la variabilidad del campo eléctrico está significativamente influenciada por los cambios en la carga eléctrica transportada por la precipitación.

1) INTRODUCCIÓN

Las nubes de tormenta suelen presentar distribuciones de carga eléctrica, que son producto de procesos de electrificación asociados a las colisiones entre partículas de hielo. La polaridad y magnitud de las cargas eléctricas separadas en estas interacciones están determinadas por complejos procesos microfísicos y dinámicos (Ávila and Pereyra, 2000; Pereyra and Ávila, 2002). Cuando estas partículas precipitan, alcanzando la superficie en forma de gotas de lluvia, pueden conservar parte de la carga adquirida previamente.

Durante una tormenta, el campo eléctrico en superficie está influenciado tanto por la distribución de carga de la nube como por las cargas transportadas por la precipitación. Este campo puede alcanzar magnitudes de varios miles de V/m y presentar rápidas inversiones de polaridad, lo que refleja la compleja dinámica eléctrica del sistema convectivo que lo origina.

En este trabajo se presentan observaciones obtenidas por dos instrumentos: un medidor de campo eléctrico superficial (CS110 Electric Field Meter, Campbell Scientific Inc.) y un sensor desarrollado en el Grupo de Física de la Atmósfera de FaMAF-UNC, diseñado para medir la carga eléctrica y la velocidad de caída de las gotas de lluvia (Pereyra et al., 2025). El objetivo principal fue comparar el campo eléctrico medido en superficie con el estimado a partir de una precipitación compuesta por gotas con las características eléctricas observadas.

2) DATOS EXPERIMENTALES

En la Figura 1 se presentan los datos experimentales correspondientes a las tormentas ocurridas el 18 y el 23 de diciembre de 2024, en la Ciudad Universitaria de Córdoba, Argentina. Las Figuras 1(a) y 1(b) muestran los campos eléctricos medidos, mientras que las Figuras 1(c) y 1(d) exhiben las cargas de las gotas registradas durante los períodos con precipitación de cada una de las tormentas, respectivamente.

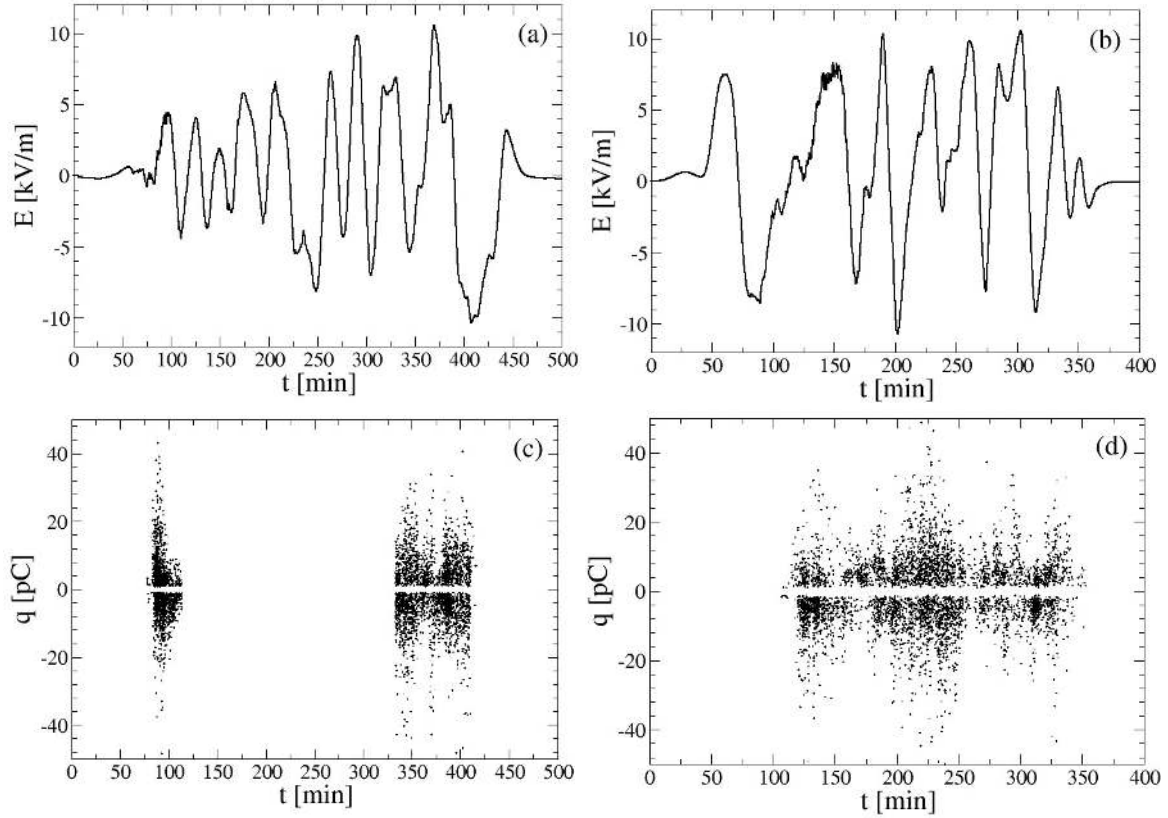


Figura 1. Campo eléctrico medido durante las tormentas del 18/12/24 (a) y 23/12/24 (b). Carga eléctrica de las gotas registrada durante la precipitación correspondiente al 18/12/24 (c) y al 23/12/24 (d). El tiempo 0 min en cada gráfico corresponde a las 08:15 para el 18/12/24 y a las 21:30 para el 23/12/24, respectivamente.

3) CÁLCULO DEL CAMPO PRODUCIDO POR LAS GOTAS CARGADAS

Para cada gota se conoce el instante en que llega al suelo, $t(h_0)$, así como su carga eléctrica $q(h_0)$ y su velocidad de caída $v(h_0)$, siendo h_0 la altura sobre el nivel del mar del sitio de medición. Para reconstruir la trayectoria de caída de cada gota, se determina el instante en que la misma se encontraba a una altura h , utilizando la siguiente integración: $t(h) = t(h_0) - \int_{h_0}^h \frac{dh}{v(h)}$, donde $v(h)$ es la velocidad de caída que puede estimarse con la aproximación: $v(h) = \left[\frac{\rho(h_0)}{\rho(h)} \right]^{0.4} v(h_0)$, donde ρ es la densidad del aire en la tropósfera (Markowitz, 1976).

Asimismo, es posible estimar la carga en función de h usando la expresión: $q(h) = q(h_0) \exp\left(\frac{t(h_0)-t(h)}{\tau_r}\right)$, donde τ_r es el tiempo de relajación de la descarga.

Discretizando el espacio en capas horizontales $\dots, h_{i-1}, h_i, h_{i+1}, \dots$, y al tiempo en intervalos $\dots, t_{j-1}, t_j, t_{j+1}, \dots$, se calculó el campo eléctrico en cada instante mediante la siguiente suma discreta:

$E(t_j) = -\frac{1}{2\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \sigma(h_i, t_j)$, donde $\sigma(h_i, t_j)$ es la densidad superficial de carga de cada plano estimada a partir de la información reconstruida para todas las gotas medidas.

4) RESULTADOS

En las Figuras 2(a) y 2(b) se comparan los campos eléctricos medidos directamente con los calculados a partir de las gotas de lluvia cargadas. Si bien las curvas no coinciden exactamente, se observa una buena correspondencia en cuanto a la magnitud y el signo durante varios tramos temporales. Es destacable que, a pesar de las simplificaciones asumidas en el cálculo y de la limitada cantidad de datos disponibles, la evolución temporal del campo estimado resulta muy similar a la observada. Este resultado sugiere que la variación temporal de la densidad de carga en la precipitación influye marcadamente en el comportamiento del campo eléctrico superficial.

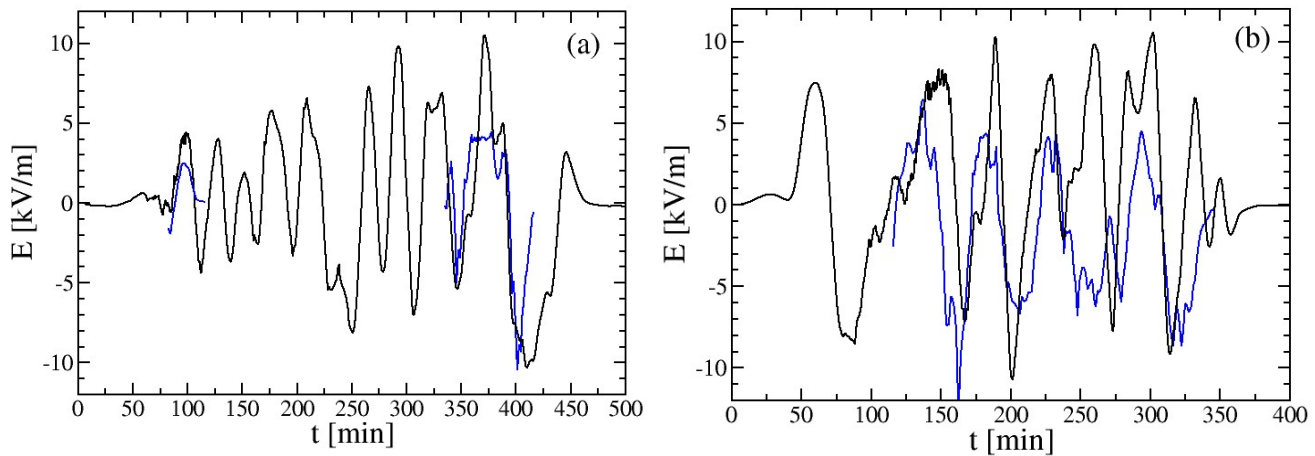


Figura 2: Comparación entre el campo eléctrico medido (línea negra) y el calculado (línea azul) para el 18/12/24 (a) y 23/12/24 (b).

REFERENCIAS

- Ávila E. E. y Pereyra R. G., 2000: Charge transfer during crystal-graupel collisions for two different cloud droplet size distributions. *Geophysical Research Letters*, 27, 3837-3840.
- Markowitz A. H., 1976: Raindrop Size Distribution Expressions. *Journal of Applied Meteorology*, 15, 1029-1031.
- Pereyra R.G. y Ávila E. E., 2002: Charge transfer measurements during single ice crystal collisions with a target growing by riming. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107, AAC 23-1-AAC 23-9.
- Pereyra R. G., Martínez L. B. y Ávila E. E., 2025: New experimental device for measuring electrical charge of precipitation particles. *Atmósfera*, 39, 283-295.

SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES DE SUPERFICIE A LOS PARÁMETROS MORFOLÓGICOS EN EL MODELO WRF: UNA APLICACIÓN SOBRE EL ÁREA METROPOLITANA DE BUENOS AIRES

Luis Muñoz^{1,2,3}, Lluís Fita^{1,2,3}, Andrea Carril^{1,2,3}, Federico Robledo^{1,2,3}

luis.munoz.pabon@cima.fcen.uba.ar. Autor correspondiente.

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina

² Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), CONICET-UBA, Argentina

³ Instituto Franco-Argentino Para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI), UBA-CONICET-CNRS-IRD, Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: Modelado Climático Urbano, Parámetros de Dosel Urbano, Ola de Calor

1) INTRODUCCIÓN

La rápida urbanización de la población mundial es uno de los principales problemas actuales. Mientras las ciudades crecen en extensión y densidad, demandan más recursos, concentran actividades económicas, y su población se vuelve más vulnerable, especialmente a riesgos hidrológicos y a los efectos del cambio climático (Masson et al., 2020). Afrontar estos retos requiere de medidas complejas que consideren la diversidad y características de los ambientes urbanos y su interacción con el clima a diferentes escalas (Langendijk et al., 2024).

Argentina es un caso de estudio particular al ser uno de los países más urbanizados del mundo. Según el último censo, el 92% de la población reside en áreas urbanas. El Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) alberga el 36% de la población total del país, convirtiéndose en el tercer conglomerado urbano más grande de Latinoamérica (INDEC, 2024). Su densidad poblacional incrementa la vulnerabilidad del AMBA a eventos climáticos extremos, como las olas de calor, cuyos efectos se magnifican por el fenómeno de Isla Urbana de Calor (UHI), disparidades sanitarias y desigualdades sociales (Camilloni & Barrucand, 2012). Sin embargo, los procesos del clima urbano en el AMBA se mantienen inexplorados, especialmente en términos de la morfología de pequeña escala y la representación del área urbana en los modelos. A tal fin, evaluar el desempeño de modelos climáticos como el Weather Research and Forecasting (WRF) en el ambiente urbano del AMBA es esencial. Estudios previos han analizado la sensibilidad del modelo WRF a diferentes configuraciones en diversos ambientes urbanos (Luque et al., 2023; Wu et al., 2023), remarcando el impacto de las parametrizaciones físicas y la representación de la morfología urbana. Los esquemas físicos han sido ampliamente estudiados, pero la caracterización de los ambientes urbanos a través de Parámetros de Dosel Urbano (UPCs, por sus siglas en inglés) aún requiere un análisis exhaustivo (Wu et al., 2023).

Este estudio busca abordar esta problemática con la mejora de la categorización morfológica del AMBA a través de Zonas Climáticas Locales (LCZ) y evaluando la sensibilidad de WRF a cambios en los UPCs durante un evento de ola de calor del 4 al 12 de diciembre de 2022.

2) MÉTODOS Y RESULTADOS

2.1. Mejora de la clasificación de las Zonas Climáticas Locales (LCZs)

Motivados por las limitaciones de los mapas globales y públicamente disponibles de las LCZ, en este estudio se recopiló toda la información local relevante para mejorar el mapa de LCZ para el AMBA, tal como se ha hecho en diferentes ciudades del mundo (e.g. Masson et al., 2020). Se focalizó en características urbanas como la morfología, parámetros arquitectónicos,

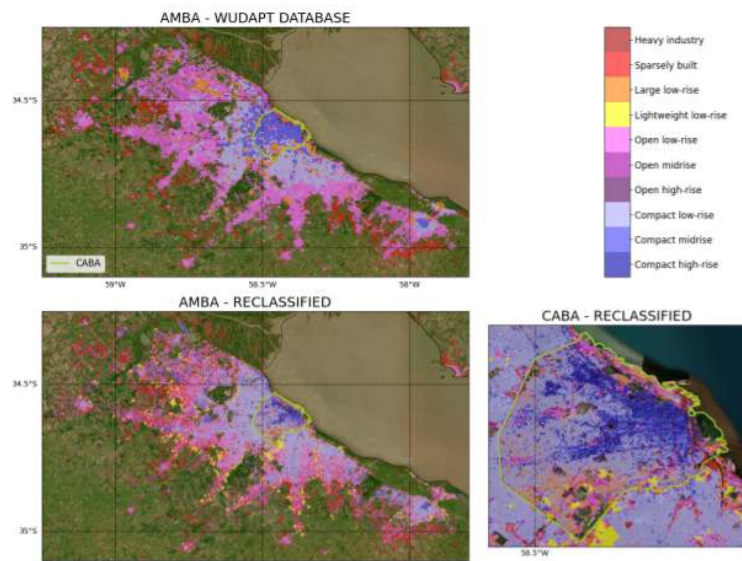


Figura 1. Resultado de la reclasificación de los datos WUDAPT. Panel superior: clasificación de LCZs original de WUDAPT (resolución 100 m). Panel inferior: clasificación de LCZs refinada tras la reclasificación con datos in situ para AMBA y CABA.

factores socioeconómicos, y vegetación urbana, que fueron recopilados de bases de datos públicas del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires (GCBA), el Instituto Geográfico Nacional (IGN), y el Portal Nacional de Datos Públicos (datos.gob.ar).

El proceso de reclasificación fue implementado usando Python, comenzando con el archivo GeoTIFF a 100 metros de una base de datos global (WUDAPT; Brousse et al., 2016). La mayoría de las 10 categorías LCZ se derivan de los datos de altura y densidad de edificios.

El proceso de reclasificación derivó en una base de datos, mostrada en la Figura 1 (Muñoz et al., 2025), que ofrece una representación más detallada de la estructura urbana, captando variaciones más sutiles en la altura y densidad de los edificios. La inclusión de la categoría LCZ 7 (barrios populares informales: 'tipo villas') es una mejora clave de la reclasificación ya que nos permite identificar la porción de la población potencialmente más vulnerable.

2.2. Análisis de Sensibilidad a los Parámetros de Dosel Urbano (UCPs)

Los UCPs describen la geometría y propiedades físicas de la morfología urbana, incluyendo la distribución espacial, forma, tamaño, y composición de materiales de los edificios, así como las actividades antropológicas como el consumo de electricidad y el uso de aire acondicionado. Dadas las dificultades para definir con precisión los UCPs, el objetivo de este estudio es evaluar la sensibilidad del modelo a variaciones menores de los parámetros. Esto se desarrolla bajo la hipótesis de que la respuesta del modelo sea identificable, pero acotada.

Se evaluaron 17 parámetros a través de 19 experimentos que fueron comparados contra una simulación de control y la variabilidad interna del modelo que se obtuvo de 3 experimentos

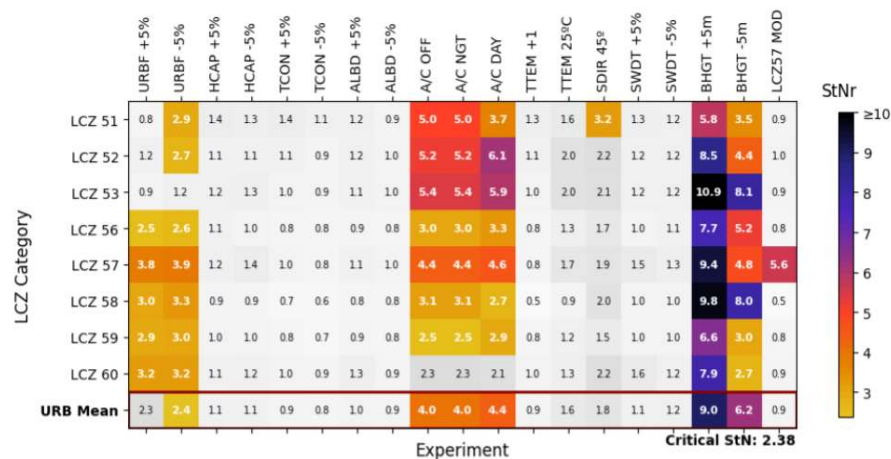


Figura 2. Matriz del percentil 75th del StNr para T2, las filas representan las LCZ y las columnas los experimentos evaluados. La última fila muestra el valor medio para todas las LCZ. Los valores inferiores a 2,38 aparecen en gris (insignificancia estadística con al 95% de confianza).

lagueados. Para determinar si el modelo era sensible a los cambios, se utilizó la ecuación del Signal-to-Noise ratio (StNr; Tovar et al., 2022), donde la señal se representa como la diferencia entre el experimento evaluado y la simulación control; y el ruido proviene de la

desviación estándar de los experimentos lageados. La significancia estadística de la señal se deriva de un test t de Student, que constituye un umbral de significancia. El resultado de esta ecuación de StNr, aplicada en cada paso de tiempo, es una serie de valores adimensionales. El análisis se realizó sobre el valor del percentil 75th de cada serie. Si este valor excede el umbral de significancia, indica que la señal es distinguible del ruido para al menos el 25% del periodo de simulación. La Figura 2 muestra un resumen de estos resultados.

De los experimentos analizados, los que se relacionan a los cambios en: la Fracción Urbana (URBF), el uso del Aire Acondicionado (A/C) y la Altura de Edificios (BHGT) son los que presentan los valores de señal más significativos en todas o la mayoría de categorías de LCZs. Adicionalmente, los experimentos de Orientación de Calles (SDIR) y la modificación de la LCZ relacionada a las 'villas' (LCZ57 MOD) solo presentan señal en un LCZ. Este resultado se esperaba en el experimento LCZ57 MOD, pero para SDIR, sugiere que la modificación de este UCP solo sería notable en zonas de edificios altos y compactos (LCZ 51).

Cuando sea posible, todos los UCP deberían ser revisados en detalle para minimizar la incertidumbre en las simulaciones climáticas urbanas. Sin embargo, cuando esto no es posible los esfuerzos deberían centrarse específicamente en la recolección de información sobre los parámetros que presentan mayor sensibilidad.

REFERENCIAS

- Brousse, O., Martilli, A., Foley, M., Mills, G., & Bechtel, B. (2016).** WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. *Urban Climate*, 17, 116–134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.04.001>
- Camilloni, I., & Barrucand, M. (2012).** Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(1–2), 47–58. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0459-z>
- INDEC. (2024).** Región Metropolitana Buenos Aires (Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022., p. 56). Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). https://censo.gob.ar/wp-content/uploads/2024/09/censo2022_rmba.pdf
- Langendijk, G. S., Halenka, T., Hoffmann, P., ... Yuan, J. (2024).** Towards better understanding the urban environment and its interactions with regional climate change—The WCRP CORDEX Flagship Pilot Study URB-RCC. *Urban Climate*, 58, 102165. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102165>
- Luque, S. E., Fita, L., & Pineda Rojas, A. L. (2023).** Performance evaluation of the WRF model under different physical schemes for air quality purposes in Buenos Aires, Argentina. *Atmósfera*, 38, 235–262. <https://doi.org/10.20937/ATM.53255>
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., & Voogt, J. (2020).** Urban Climates and Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 411–444. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623>
- Muñoz, L. E., Fita, L., & Carril, A. F. (2025).** LCZ Map of the Metropolitan Area of Buenos Aires (AMBA) [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.15271368>
- Tovar, C., Carril, A. F., Gutiérrez, A. G., Ahrends, A., Fita, L., ... Hollingsworth, P. M. (2022).** Understanding climate change impacts on biome and plant distributions in the Andes: Challenges and opportunities. *Journal of Biogeography*, 49(8), 1420–1442. <https://doi.org/10.1111/jbi.14389>
- Wu, M., Dong, M., Chen, F., & Yang, X. (2023).** Impacts of Urbanization and Its Parameters on Thermal and Dynamic Fields in Hangzhou: A Sensitivity Study Using the Weather Research and Forecasting Urban Model. *Land*, 12(11), 1965. <https://doi.org/10.3390/land12111965>

RESPUESTA HIDROLÓGICA A LA OLA DE CALOR DEL VERANO 2024 EN LA CUENCA DEL RÍO MENDOZA

Juan A. Rivera^{1,2}, Carolina Lauro¹, Leandro Alvarez¹
jrivera@mendoza-conicet.gob.ar. Autor/a correspondiente.

¹Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CCT CONICET Mendoza

² Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI)

Palabras clave: recursos hídricos, criósfera, ola de calor

1) INTRODUCCIÓN

El aumento en la temperatura global en las últimas décadas favoreció un incremento en la frecuencia y severidad de las olas de calor en casi todas las regiones del planeta. Sin embargo, este calentamiento no es homogéneo a nivel espacial, ya que, por ejemplo, las regiones montañosas presentan una señal de calentamiento dependiente de la elevación (Pepin et al., 2015). En la Cordillera de los Andes, la falta de estaciones meteorológicas impide evaluar los cambios a largo plazo en las olas de calor. No obstante, en las regiones circundantes de baja altitud, como el centro de Argentina y Chile, las olas de calor han aumentado su frecuencia desde la década de 1980 (González-Reyes et al., 2023; Rusticucci et al., 2016). Estudios recientes de atribución han demostrado que el cambio climático asociado a las actividades humanas ha aumentado la intensidad de las olas de calor sobre Argentina, junto con su probabilidad de ocurrencia (Collazo et al., 2024; Rivera et al., 2023). Sin embargo, los impactos de las olas de calor sobre la hidrología de las cuencas andinas siguen siendo poco conocidos. Asimismo, pocos estudios han evaluado las respuestas hidrológicas a las olas de calor en cuencas de montaña cuyos caudales dependen del aporte nivo-glaciar.

Durante el verano de 2024, la región de los Andes Centrales de Argentina registró un período prolongado de temperaturas superiores al promedio histórico. Este estudio tiene como objetivo caracterizar los impactos de estas anomalías térmicas en la hidrología de los ríos andinos, tomando como caso de estudio a la cuenca del río Mendoza, mediante el análisis de una combinación de observaciones, datos de reanálisis y estimaciones satelitales para la cuantificación de los cambios en la criósfera, el caudal y la superficie cubierta por agua a lo largo de las principales porciones de la cuenca.

2) DATOS UTILIZADOS

Se utilizaron registros diarios de caudales de los ríos Mendoza, Cuevas y Vacas, los cuales se obtuvieron a través del Sistema Nacional de Información Hidrológica (<https://snih.hidricosargentina.gob.ar/>) para el período 1985-2024. Para la evaluación de las anomalías regionales de temperatura durante la ola de calor se utilizaron datos diarios de altura de isoterma de 0°C del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020) en el período 1985-2024, sobre un dominio que abarca las nacientes del río Mendoza y sus principales afluentes (32,5°-33°S; 69,5°-70°O). Para la cuantificación de los impactos de la ola de calor en el manejo del agua en la cuenca, se analizaron los cambios temporales en la capacidad de almacenamiento del Embalse Potrerillos, junto con la erogación de agua de la presa hacia la porción inferior de la cuenca en el período noviembre de 2023 a marzo de 2024. Para medir los cambios en la superficie cubierta por agua en el tramo inferior de la cuenca (sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero), se procesaron imágenes satelitales Sentinel-2 con una resolución espacial de 10 m y se calculó el Índice de Diferencia Normalizada de Agua Modificado (MNDWI; Xu, 2006) para un período previo y durante la ocurrencia de la ola de

calor.

3) RESULTADOS

Las estimaciones de altura de la isoterma de 0°C presentaron niveles muy por encima de la media a largo plazo, en particular entre el 9 de enero y el 21 de febrero de 2024, período que se define como el correspondiente a la ola de calor. Las alturas superaron los 5000 m en 24 días del período de ola de calor (Figura 1A), con la isoterma de 0°C ubicada en promedio a 416 m por encima de la media a largo plazo y con varios días alcanzando una anomalía positiva superior a los 700 m. Durante este período, la cobertura de nieve registró una marcada reducción, pasando de valores normales a comienzos de enero a valores cercanos al percentil 10 al final del evento (no mostrado). El pulso de deshielo favorecido por la ola de calor provocó un marcado aumento en el caudal del río Mendoza, en un contexto en el que los caudales se encontraban por encima de la media de largo plazo antes de la ocurrencia del evento (Figura 1B). Esta situación tuvo serias implicancias para la gestión hídrica del Embalse Potrerillos, ubicado en la porción media de la cuenca (Figura 1D). Al comienzo de la ola de calor, el embalse se encontraba a una capacidad superior al 90%, nivel que aumentó rápidamente una vez que el pulso del deshielo llegó, antes de finales de enero de 2024 (Figura 1C). Las autoridades encargadas del manejo del agua tuvieron que erogar una cantidad significativa de agua, que superó los 150 m³/s los días 29 y 30 de enero. El caudal del río Mendoza estuvo por encima del percentil 90 durante gran parte de los días siguientes (Figura 1B), factor que provocó una erogación de agua que superó los 100 m³/s durante la mayor parte de la duración de la ola de calor en el mes de febrero de 2024 (Figura 1C). El pulso de deshielo viajó 170 km río abajo hacia la parte baja de la cuenca, incrementando en un 86% la superficie cubierta por agua en el sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Esto representó la llegada de agua a regiones que se encontraban secas desde el año 2006 y generó gran repercusión en los medios de comunicación locales (Figuras 1D, 1E, 1F).

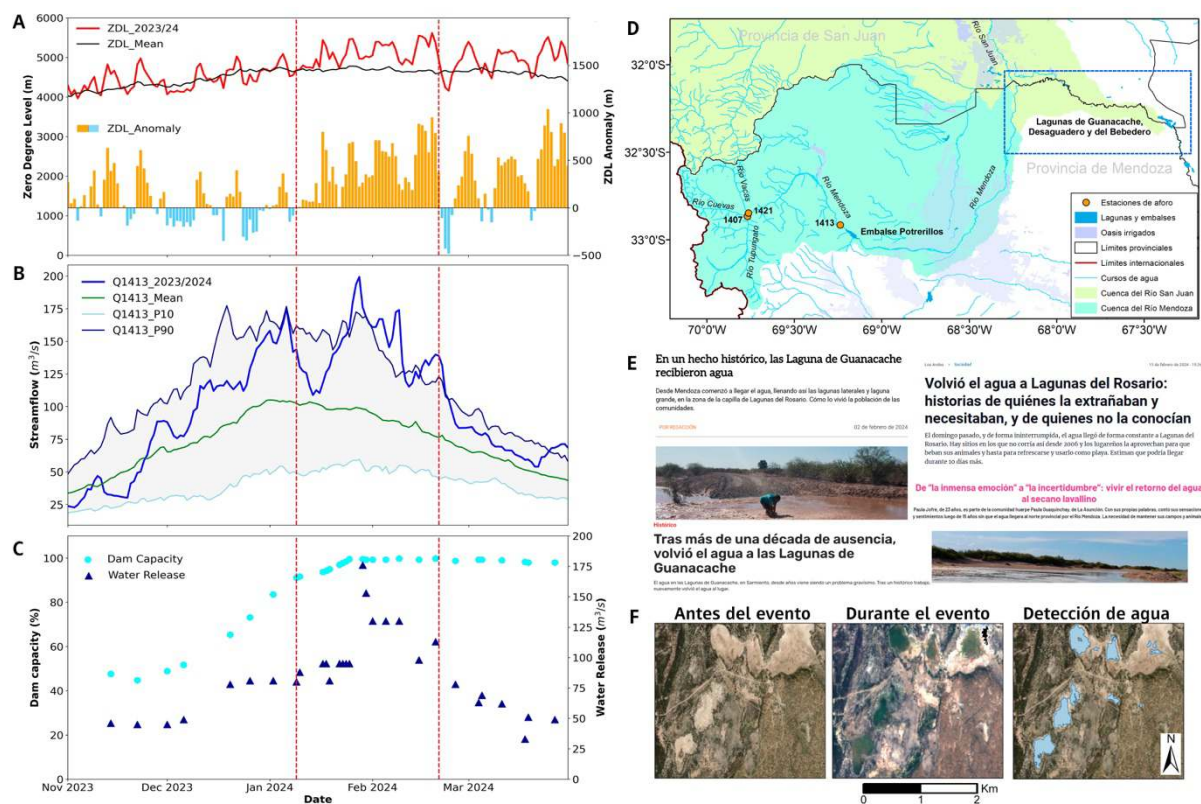


Figura 1: A) Evolución temporal de la altura de la isoterma de 0°C entre noviembre de 2023

y marzo de 2024, junto con la climatología para el período 1985-2024. Se muestran además las anomalías en barras. B) Evolución temporal del caudal del río Mendoza entre noviembre de 2023 y marzo de 2024, junto con la climatología para el período 1985-2024 y los percentiles 10 y 90. C) Evolución temporal de la capacidad del Embalse Potrerillos y la erogación de agua entre noviembre de 2023 y marzo de 2024. En los paneles A, B y C se indican con líneas verticales la extensión del período de ola de calor. D) Área de estudio. E) Cobertura periódica de los impactos del evento. F) Cambio en la cobertura de agua en las Lagunas de Guanacache identificado a partir del MNDWI.

4) CONCLUSIONES

La ola de calor de enero-febrero de 2024 causó un impacto significativo en la cuenca alta del río Mendoza, donde la isoterma de cero grados superó los 5000 m, casi 450 m por encima de las condiciones normales, factor que, junto con la acumulación de nieve por encima de lo normal durante el invierno anterior, dio lugar a un fuerte pulso de deshielo que recorrió casi 300 kms. La ola de calor provocó un aumento del caudal de los ríos no registrado desde 2008, superando el percentil 90 en el río Mendoza. El pulso del deshielo tuvo serias implicancias para la gestión del agua en la cuenca, teniendo en cuenta que el Embalse Potrerillos estaba cerca de su capacidad total, factor que obligó a las autoridades a liberar casi todo el exceso de caudal hacia las porciones más bajas de la cuenca. Esto provocó un notable aumento de la superficie cubierta de agua en el sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero, con regiones que recibieron agua por primera vez en casi dos décadas. Este caso de estudio muestra los impactos en cascada provocados por el cambio climático y la gestión local del agua, lo cual exige un nexo entre el monitoreo hidrológico, el pronóstico de fenómenos meteorológicos extremos a corto plazo, el modelado hidrológico y la planificación a largo plazo en la cuenca del río Mendoza.

REFERENCIAS

- Collazo, S., y coautores, 2024:** Influence of large-scale circulation and local feedbacks on extreme summer heat in Argentina in 2022/23. *Commun. Earth Environ.* 5, 231. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01386-8>
- González-Reyes, A. y coautores, 2023:** Evolution of heatwaves in Chile since 1980. *Weather and Climate Extremes* 41, 100588. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100588>
- Hersbach, H., y coautores, 2020:** The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Pepin, N., y coautores, 2015:** Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Clim. Change* 5, 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- Rivera, J.A., y coautores, 2023:** 2022 early-summer heatwave in Southern South America: 60 times more likely due to climate change. *Climatic Change* 176, 102. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03576-3>
- Rusticucci, M., y coautores, 2016:** Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theor. Appl. Climatol.* 124, 679–689. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1445-7>
- Xu, H., 2006:** Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Variabilidad del caudal del río Bermejo en la alta cuenca. Relación con la precipitación y principales forzantes del sistema acoplado océano-atmósfera.

Juan Olmo Aguirre Glik^{1,4}, Santiago I. Hurtado^{2,4}, Pablo G. Zaninelli^{3,4}, Santino Adduca^{2,5}.

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Buenos Aires, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina.

³ Departamento de Matemática e Informática Aplicadas a las Ingenierías Civil y Naval, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Profesor Aranguren, 3, 28040 Madrid, Spain

⁴ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (FCAG-UNLP). La Plata, Argentina.

⁵ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (FCEN-UBA). Buenos Aires, Argentina.

Palabras Clave: El Niño-Oscilación del Sur; saltos climáticos; Dipolo del Océano Índico.

1) INTRODUCCIÓN

El río Bermejo es uno de los principales afluentes de los ríos Paraguay y Paraná, desempeña un papel esencial en la economía y el entorno del norte argentino, destacando su importancia en el sector agroindustrial. Estudios previos han explorado la variabilidad de la precipitación y el caudal en la alta cuenca del río. En la escala interanual, investigaciones como las de González & Flores (2010), González & Murgida (2012), González et al. (2012) y Ayala et al. (2023) han identificado correlaciones entre la precipitación y las temperaturas superficiales de los océanos Pacífico e Índico en distintos momentos del año. Sus resultados sugieren que la fase fría de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) podría estar asociada con mayores precipitaciones en verano y otoño, mientras que su fase cálida en agosto estaría vinculada a mayores lluvias en primavera. Además, mayores precipitaciones estivales podrían relacionarse con anomalías negativas en la temperatura superficial del océano Índico. Por otro lado, Castino et al. (2017) han asociado variabilidades de 2 a 5 años en el caudal del río con fluctuaciones en la temperatura superficial del Atlántico sur y el ENOS, mientras que en la escala interdecadal, variabilidades de baja frecuencia (~20 años) se ha vinculado a la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). En este contexto, y con el objetivo de profundizar en la relación entre el caudal y los forzantes climáticos de gran escala, este estudio analizó datos de caudal de dos estaciones telemétricas, Aguas Blancas y Pozo Sarmiento, ubicadas en la alta cuenca del río Bermejo.



Figura 1: Ubicación satelital del área de estudio junto con la red de drenaje y la elevación del terreno en metros

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos históricos de caudal medio diario (1941-2018) provenientes de las estaciones Aguas Blancas y Pozo Sarmiento. Se aplicó un análisis de quiebres y tendencias para evaluar la estabilidad de las series temporales, complementado con un análisis espectral mediante la Transformada Rápida de Fourier para identificar periodicidades significativas. Se identificaron los meses del año donde la precipitación influye más en la variabilidad anual del caudal mediante correlaciones con tres bases de precipitación distintas, CRU, GPCC y ERA5. Además, se emplearon datos de diversas variables atmosféricas y oceánicas para calcular composiciones en diferencia y flujos de actividad de onda, con el fin de explorar los mecanismos dinámicos asociados a las variaciones de caudal.

3) RESULTADOS

Se identificaron dos fases hidrológicas bien definidas: una húmeda (noviembre a abril) y una seca (mayo a octubre), ambas moduladas por el monzón sudamericano y el régimen pluvial de la región. Se identificaron puntos de quiebre en la serie de caudales, con eventos clave en las décadas de 1950 y 1970 (Fig. 2), los cuales pueden asociarse a cambios en la variabilidad climática de gran escala, como el salto climático de 1976-1977 y variaciones en la PDO. Además, se observó un incremento en los caudales asociado a estos quiebres con aumentos de hasta un 40%.

Puntos de quiebre y tendencias

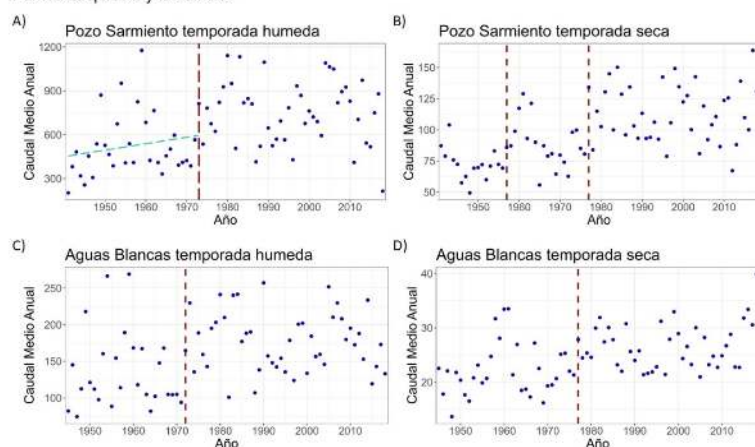


Figura 2: Datos medios anuales de caudal en la estación Aguas Blancas y Pozo Sarmiento. Las líneas rojas marcan los puntos de quiebre encontrados y la línea celeste marca la regresión lineal significativa luego de haber aplicado el test de Mann Kendall con un nivel de significancia $\alpha = 0.1$

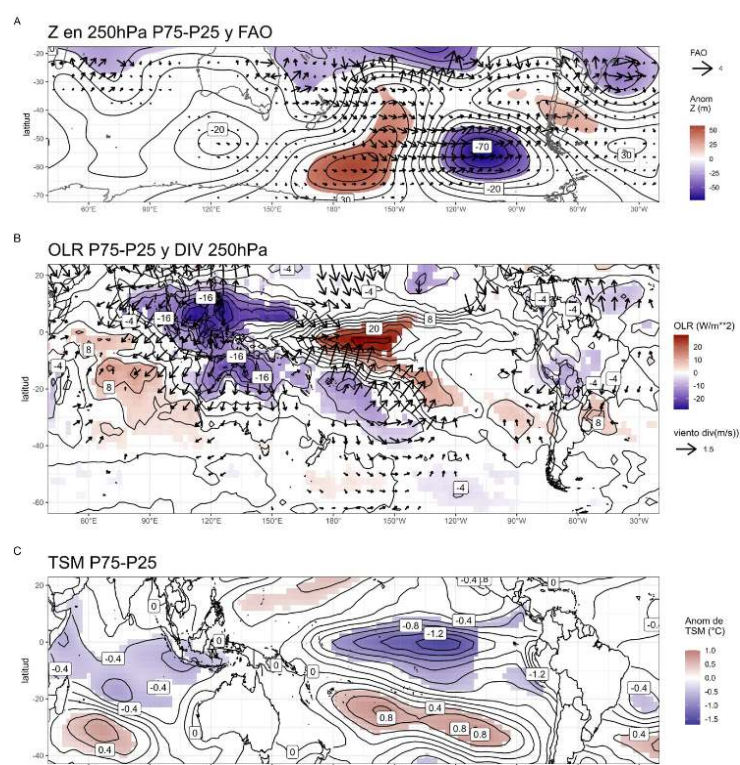


Figura 3: Composiciones de anomalías de Altura geopotencial en 250hPa (sombreado) y flujo de actividad de onda (vectores) (panel A), OLR (sombreado) y viento divergente en 250hPa (vectores) (panel B) y TSM (panel C). En los meses de enero a abril para la diferencia de percentiles p75-p25 del caudal medio anual en Aguas Blancas. Los colores representan las diferencias de anomalías significativas. Vectores en negro representan el flujo significativo. Nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Por otra parte, el análisis espectral reveló periodicidades asociadas a forzantes climáticos, sugiriendo que la variabilidad interanual del caudal está modulada por el ENOS, el IOD y la TSA, mientras que la variabilidad bidecadal podría estar vinculada a la PDO. Se pudo identificar un patrón de circulación atmosférica que modula el caudal de la alta cuenca del río Bermejo (Fig. 3). Este patrón está asociado a trenes de onda de Rossby, forzados por anomalías en las temperaturas superficiales de los océanos Pacífico e Índico, lo que resalta la conexión entre el caudal del río y los fenómenos del ENOS y el IOD.

4) CONCLUSIONES

Se identificaron puntos de quiebres en las series de caudal relacionados con cambios climáticos de gran escala, como el salto climático de 1976-1977 y la PDO y a partir de los cuales se observó un incremento en el caudal. Se evidenció que los caudales anómalos están influenciados por la interacción entre el ENOS y el IOD, modulando patrones de circulación que afectan la precipitación en la alta cuenca. Los resultados obtenidos en este trabajo subrayan la relevancia de incorporar la variabilidad climática de gran escala en la gestión y planificación de los recursos hídricos en la región.

5) REFERENCIAS

- Ayala, S. N., González, M. H., & Rolla, A. L., 2023: A statistical forecast scheme of precipitation in the upper bermejo river basin in argentina. *International Journal of River Basin Management*, 21(2), 153–166, <https://doi.org/10.1080/15715124.2021.1932952>
- González, M. H., Cariaga, M. L., & Skansi, M. d. I. M., 2012: Some factors that influence seasonal precipitation in argentinean chaco. *Advances in Meteorology*, 2012, <https://doi.org/10.1155/2012/359164>
- González, M. H. & Flores, O. K., 2010: Análisis de la precipitación en la llanura chaqueña argentina y su relación con el comportamiento de la circulación atmosférica y las temperaturas de la superficie del mar. *Meteorológica*, 35(2), 53–66.
- González, M. H. & Murgida, A. M., 2012: Seasonal summer rainfall prediction in bermejo river basin in argentina. *Climate Variability—Some Aspects, Challenges and Prospects*, 7, 141–160.
- Castino, F., Bookhagen, B., & Strecker, M. R., 2017: Oscillations and trends of river discharge in the southern central andes and linkages with climate variability. *Journal of Hydrology*, 555, 108–124, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.001>

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE EVENTOS EXTREMOS DE TEMPERATURA EN LA PENÍNSULA ANTÁRTICA

Eugenia M. Garbarini¹, Maria de los Milagros Skansi¹
egarbarini@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Temperatura, eventos extremos, Antártida.

1) INTRODUCCIÓN

La Península Antártica es una región de gran dinamismo atmosférico y fuerte sensibilidad a las variaciones del sistema climático. Su ubicación y características geográficas la convierten en un área clave para el monitoreo de procesos que tienen impacto a escala regional y global. Para Argentina, el interés por este sector se traduce en una presencia científica sostenida a través de seis bases que operan de forma permanente, permitiendo generar y mantener series de datos meteorológicos continuos.

Numerosos estudios han documentado tendencias de calentamiento a lo largo de la Península Antártica (PA) occidental en invierno y primavera (Vaughan et al, 2003, Clem y Fogt, 2015) y en verano en el noreste (Orr et al, 2008) aunque la tasa de calentamiento ha disminuido en décadas recientes. El estudio de eventos extremos ha cobrado creciente interés con el desarrollo de indicadores específicos para su detección y seguimiento a partir de datos diarios. Turner y otros (2021) encontraron un aumento de los extremos cálidos de temperatura diaria en la PA especialmente hacia finales del siglo XX, decreciendo lentamente en años subsiguientes. También encontraron una disminución no significativa en los extremos fríos de temperatura con el tiempo. En Orcadas la bibliografía evidencia cambios significativos en los extremos cálidos de temperatura relacionados con una intensificación de los vientos oestes (Turner et al 2021) y cambios en los extremos fríos desde mediados del siglo XX (Zazulie et al, 2010). Investigaciones recientes, como la de Gorodetskaya et al. (2018), también destacan la relevancia de los extremos de temperatura en la dinámica regional de la PA y sus posibles implicancias sobre la criosfera.

En este marco, el presente trabajo examina la evolución y variabilidad de los extremos de temperatura en las bases argentinas permanentes en la Antártida, a partir del análisis de percentiles diarios de temperatura máxima y mínima.

2) METODOLOGÍA

Se utilizaron datos diarios de temperatura máxima (TMAX), y mínima (TMIN) del aire en las 6 bases que operan de forma permanente (Fig. 1) para el período común 01/01/1986 a 31/12/2024. Los datos faltantes fueron completados con su media correspondiente, aunque en todos los casos no superaron el 10% de la serie. Se calcularon los percentiles diarios 5 y 95 de temperatura (P5 y P95), utilizando el período base 1991-2020 y una ventana móvil de 5 días según Zhang et al. (2005). Se calculó la serie anual del porcentaje de días en el año que se hubiesen superado dichos umbrales, y se analizó su tendencia lineal y su significancia a través del test no paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) utilizando un nivel de significancia de 0,05. A su vez, se definieron como eventos extremos cálidos (fríos) aquellos con temperatura máxima (mínima) superior al percentil P95 (inferior al percentil P5) durante al menos tres días consecutivos. Estos eventos se estudiaron en función de su fecha de inicio, duración y temperatura promedio.

2) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron las series de porcentaje de días en el año en los que TMAX superó su P95, y en los que no superó su P5 (no mostrado). En Marambio, San Martín y Carlini se observó una tendencia positiva con un 95% de confianza, indicando un aumento significativo de la cantidad de días con TMAX extremas. Por otro lado, en San Martín, Carlini, Esperanza y Belgrano II se encontró una disminución significativa de la cantidad de días en el año donde la TMAX fue extremadamente baja (inferior a su P5). El estudio análogo con la TMIN mostró una reducción significativa del porcentaje de días en el año con TMIN muy frías en Esperanza y Carlini y una mayor cantidad de días anuales con TMIN extremadamente cálidas en Esperanza.

El estudio de eventos extremos de temperatura muestra un patrón generalizado de intensificación de eventos cálidos en la mayoría de las estaciones, particularmente a partir de la década de 2010, lo cual concuerda en parte con lo encontrado por Turner et. al (2021). En bases como San Martín (Fig. 2) y Orcadas, estos eventos han aumentado en términos de frecuencia y duración incluso durante los meses invernales. En Marambio y Esperanza (figuras no mostradas), si bien no se observa un aumento sostenido en la frecuencia, sí destacan eventos cálidos de mayor duración. En contraste, los eventos fríos en el área de estudio han disminuido en frecuencia e intensidad, especialmente en las bases Carlini y Orcadas, donde en los últimos años del registro se reduce notablemente la ocurrencia. Sin embargo, algunas estaciones, como San Martín y Marambio, aún muestran eventos fríos relevantes aunque con características distintas: menor severidad térmica, pero mayor duración.

Bases argentinas permanentes en la Antártida

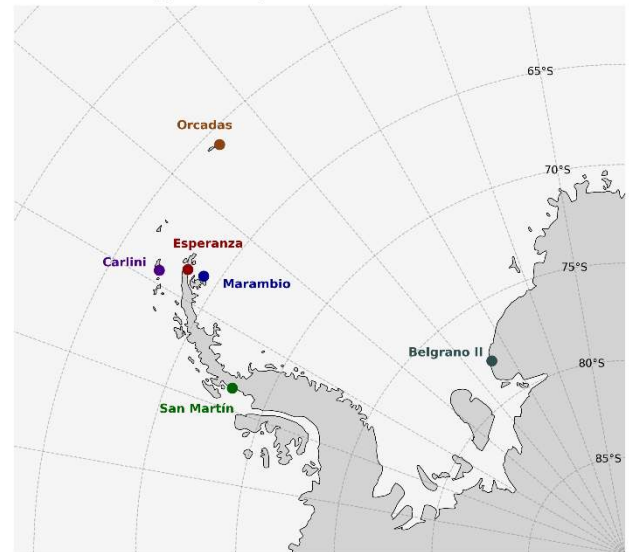


Figura 1: Mapa del área de estudio y distribución geográfica de las estaciones utilizadas.

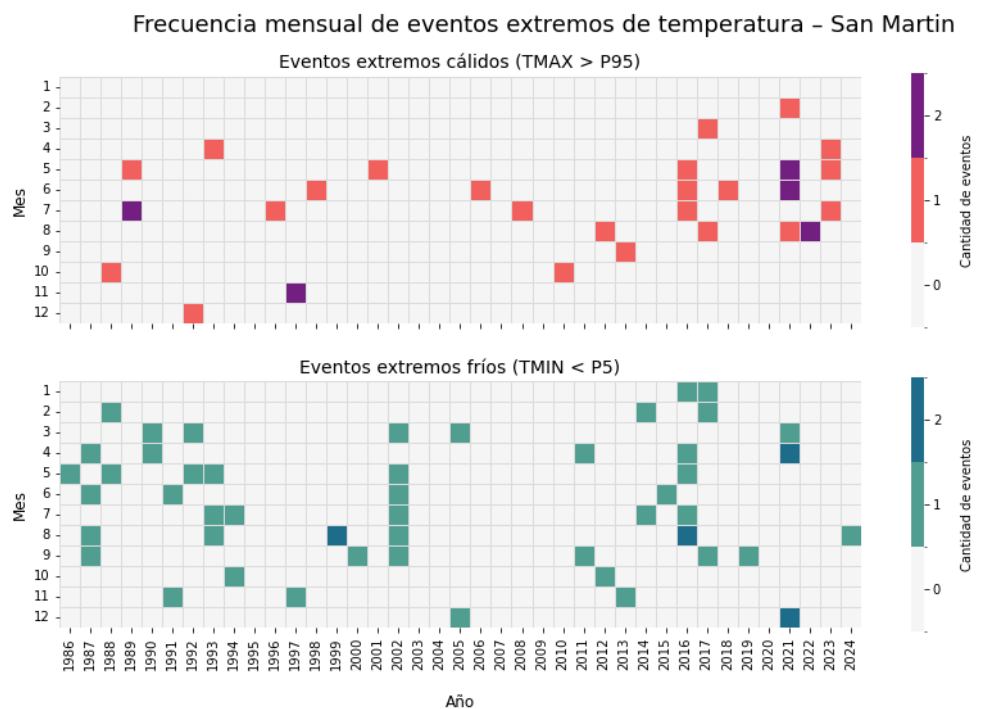


Figura 2: Heatmap de la frecuencia mensual de eventos extremos cálidos (panel superior) y de eventos extremos fríos (panel inferior) para la base San Martín

2) CONCLUSIONES

Este estudio evidencia una transformación en los extremos de temperatura en la región de la Península Antártica, con una reducción sostenida en la frecuencia e intensidad de los eventos fríos y una intensificación de los cálidos en varias de las bases estudiadas. En estaciones como Orcadas, San Martín y Belgrano II, los eventos cálidos han ganado presencia incluso en meses tradicionalmente fríos, lo que sugiere una mayor variabilidad térmica invernal. Por otro lado, estaciones como Carlini, Esperanza y Marambio muestran una disminución marcada de los eventos fríos desde los años 2000, acompañada por una mayor duración de los cálidos. Estos resultados refuerzan la necesidad de continuar con el monitoreo detallado en regiones polares para comprender mejor los cambios en la dinámica de los extremos de temperatura y su eventual impacto en las actividades que allí se desarrollan.

REFERENCIAS

- Clem, K.R.; Fogt, R.L. 2015:** South Pacific circulation changes and the connection to the tropics and regional Antarctic warming in austral spring, 1979-2012, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 2773–2792.
- Gorodetskaya, I.V., Durán-Alarcón, C., González-Herrero, S. et al. 2023:** Record-high Antarctic Peninsula temperatures and surface melt in February 2022: a compound event with an intense atmospheric river. *npj Clim Atmos Sci* 6, 202.
- Kendall, M.G. 1975:** Rank Correlation Measures. Charles Griffin, London.
- Mann, H.B. 1945:** Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13 (3), 245–259.
- Orr, A., Marshall, G. J., Hunt, J. C. R., Sommeria, J., Wang, C., van Lipzig, N. P. M., Cresswell, D., & King, J. C. 2008:** Characteristics of Summer Airflow over the Antarctic Peninsula in Response to Recent Strengthening of Westerly Circumpolar Winds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(4), 1396-1413.
- Turner, J., Lu, H., King, J., Marshall, G. J., Phillips, T., Bannister, D., & Colwell, S. 2021:** Extreme Temperatures in the Antarctic. *Journal of Climate*, 34(7), 2653-2668.
- Vaughan, D.G., Marshall, G.J., Connolley, W.M., Parkinson, C., Mulvaney, R., Hodgson, D.A., King, J.C., Pudsey, C.J., Turner, J. 2003:** Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula, *Clim. Change*, 60, 243–274.
- Zazulie, N., M. Rusticucci, and S. Solomon, 2010:** Changes in climate at high southern latitudes: A unique daily record at Orcadas spanning 1903–2008. *J. Climate*, 23, 189–196.
- Zhang, X., Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., & Kenyon, J. 2005:** Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. *Journal of Climate*, 18(11), 1641–1651.

ESTUDIO DE SEQUÍAS DE RÁPIDO DESARROLLO EN EL SUR DE SUDAMÉRICA MEDIANTE DIVERSOS ÍNDICES Y REANÁLISIS

Lucas L. Kucheruk^{1,2}, Pablo C. Spennemann², Juan A. Rivera³, Gustavo Naumann⁴, Mercedes Peretti⁵, Jason Otkin⁶

lkucheruk@smn.gob.ar. Autor/a correspondiente.

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA- FCEyN)

²Servicio Meteorológico Nacional-Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (SMN-CONICET)

³Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA)

⁴European Research Executive Agency, Bruselas, Bélgica

⁵Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía (FAUBA)

⁶Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison, Estados Unidos.

Palabras clave: Sequías de Rápido Desarrollo, Humedad del Suelo, Evapotranspiración

1) INTRODUCCIÓN

Las Sequías de Rápido Desarrollo (SRD) o Flash Droughts (FD) se caracterizan por su rápida evolución (pocas semanas), lo cual genera impactos severos en la producción agrícola debido al rápido agotamiento de la humedad del suelo (Otkin et al., 2021). Aunque no existe consenso sobre las variables o metodologías más adecuadas para su estudio, se destaca el uso de índices basados en la demanda evaporativa (ET), humedad del suelo (HS) o la combinación de variables meteorológicas (Christian et al., 2021; Otkin et al., 2021; Noguera et al., 2020). La mayoría de los estudios que caracterizan SRD son globales o se centran en el Hemisferio Norte. Las climatologías globales (Christian et al., 2021) y regionales (Kucheruk et al., 2024) de SRD en base a varias bases de datos identificaron su ocurrencia en las principales regiones agrícolas del mundo, como ser el sudeste de Brasil y la Pampa Húmeda argentina. Estos estudios muestran que la máxima frecuencia de eventos se observa en primavera y verano, aunque con resultados dispares según la base de datos utilizada. Ante la falta de estudios enfocados en Sudamérica que comparen la climatología de las SRD entre índices y bases de datos, este trabajo tiene como objetivo documentar las incertidumbres asociadas al uso de diferentes reanálisis e índices en el sudeste de Sudamérica.

2) DATOS Y MÉTODOS

Se utilizaron 3 índices de SRD (ver Tabla I) basados en HS, ET, evapotranspiración potencial y precipitación de los reanálisis ERA-5 Land (0,1°x0,1°) y MERRA-2 (0,5°x0,625°). El período de estudio es 1982-2022, en el dominio espacial 10-40°S, 69-36°O.

Índice	Condición de Intensificación	Umbrales
FDII (Otkin et al., 2021)	Caída mínima de 15 percentiles de HS entre el inicio de la SRD y las cuatro pñtadas previas al inicio.	Percentil de HS<20 en 4 pñtadas
SESR (Christian et al., 2021)	Percentil de ΔSESR menor o igual al percentil 25 entre pñtadas consecutivas. Valor final de SESR menor o igual al percentil 20.	Percentil de ΔSESR≤25 en 6 pñtadas
SPEI-1 (Noguera et al., 2020)	ΔSPEI-1 menor a -2 entre la pñtada de inicio de la SRD y las 6 pñtadas anteriores al inicio.	SPEI <-1.28 en 4 pñtadas

Tabla I: Características de los índices utilizados para la climatología de las SRD.

Se analizaron las tendencias anuales en la cobertura espacial afectada por eventos de SRD aplicando la prueba de Mann-Kendall y el estimador de Sen, con un nivel de confianza del 95%. Luego se comparó la frecuencia media de eventos entre los periodos 1983–2002 y 2003–2022 mediante una prueba t-Student.

3) RESULTADOS

La Figura 1 muestra las frecuencias totales de los índices FDII, SESR y SPEI-1 a partir de los reanálisis ERA-5 Land y MERRA-2 para el periodo 1982–2022. En el ERA-5 Land, el FDII presenta máximos en el sur de Brasil y centro-oeste de Bolivia (>35 eventos) y mínimos en el

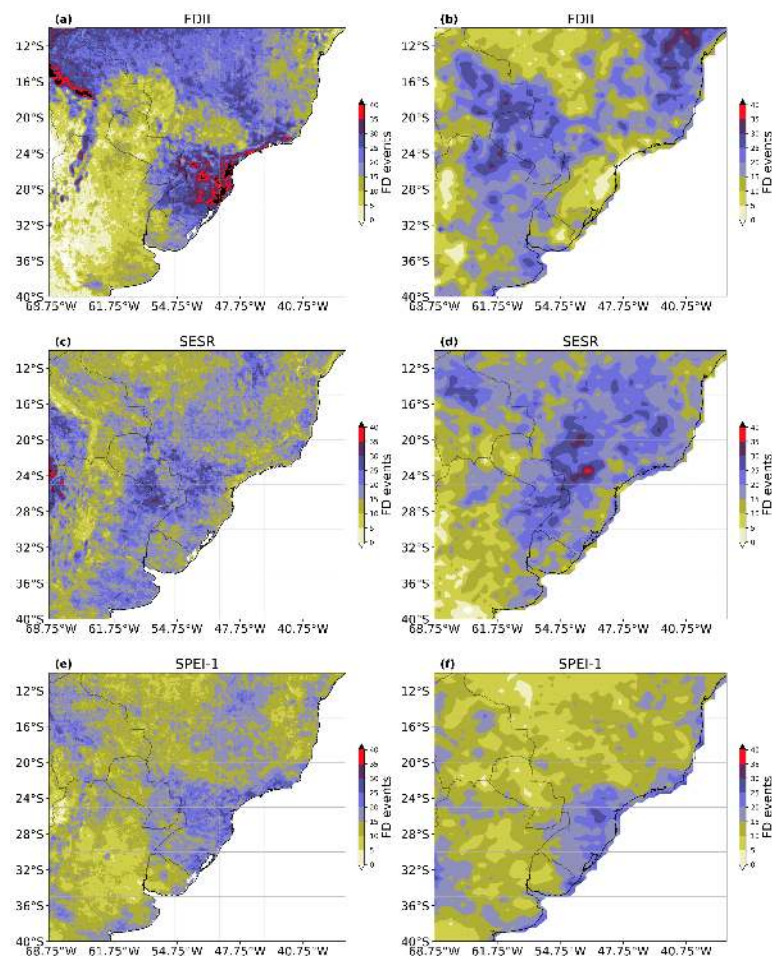


Figura 1: Frecuencia total de SRD en el periodo 1982–2022, para los índices FDII (primera fila), SESR (segunda fila) y SPEI-1 (tercera fila). Reanálisis ERA-5 Land (columna izquierda) y MERRA-2 (columna derecha).

Aunque los tres índices presentan patrones distintos, se destaca coincidencias entre FDII y SPEI-1, especialmente en zonas húmedas y semiáridas. Al comparar los índices obtenidos a partir de ERA-5 Land y MERRA-2, el SPEI-1 y SESR mantienen patrones similares, mientras que el FDII muestra las mayores discrepancias espaciales entre reanálisis. Con respecto a la estacionalidad de las frecuencias, las SRD ocurren usualmente en el periodo cálido octubre-marzo, donde la demanda evaporativa es mayor (no se muestra). Dado que los eventos de SRD son poco frecuentes en escala anual en ciertas regiones del dominio, el

oeste de Argentina (<10 eventos). El SESR alcanza sus mayores frecuencias en el centro del dominio, con valores muy altos al centro-oeste en áreas hiperáridas, mientras que sus mínimos se ubican en Bolivia, el centro-oeste de Argentina y el oeste de Brasil. El SPEI-1 muestra un patrón similar al FDII, aunque con valores más bajos, excepto en el oeste de Argentina donde registra mayores frecuencias. En el MERRA-2, el FDII alcanza sus máximos en la región central y noreste del dominio (25–35 eventos), y sus mínimos en el centro de Brasil (<10 eventos). El SESR muestra máximos al este de 61°O y mínimos en el sur de Bolivia, oeste de Paraguay y sur de Argentina. El SPEI-1 registra las mayores frecuencias en el sur de Brasil, este de Uruguay y oeste del dominio (20–30 eventos).

análisis de tendencias se enfocó en la cobertura espacial anual afectada por SRD (Tabla II). Considerando el reanálisis ERA-5 Land, los tres índices mostraron tendencias positivas y significativas, siendo el SPEI-1 y FDII los que mostraron mayor y menor pendiente respectivamente. El área afectada por SRD osciló entre valores cercanos a 1 y 5 millones de km² sobre un dominio total de 7,5 millones de km², alcanzando máximos en 2021 para el SPEI-1 y SESR (no se muestra). En base al MERRA-2 también se observaron tendencias positivas significativas, con el SESR mostrando la mayor pendiente y el FDII una pendiente menor. En este reanálisis, el FDII dominó hasta 2012, pero luego el SESR fue el índice con mayor cobertura (no se muestra). Al analizar las frecuencias de SRD entre 1983–2002 y 2003–2022 (no se muestra) se observó que, para ambos reanálisis, ocurrieron incrementos significativos principalmente en los índices SPEI-1 y SESR. El FDII en general no presentó cambios significativos.

Reanálisis/Índice	FDII	SESR	SPEI-1
ERA-5 Land	29.468 km ² /año	69.575 km ² /año	81.599 km ² /año
MERRA-2	28.219 km ² /año	68.474 km ² /año	55.938 km ² /año

Tabla II: Pendiente de Sen para cada índice y reanálisis usado.

4) CONCLUSIONES

Este estudio confirmó la ocurrencia de SRD en gran parte del dominio, pero con variaciones según el índice y la base de datos utilizada. Las mayores coincidencias se obtuvieron al comparar los resultados del FDII y el SPEI-1 con el ERA-5 Land. Entre índices, el SPEI-1 mostró un resultado similar entre ambos reanálisis, mientras que el SESR mostró buena coincidencia en el este del dominio y mayor discrepancia hacia el oeste. El FDII mostró diferencias según la base de datos utilizada. Por otro lado, para ambas bases de datos, los tres índices muestran un incremento en la ocurrencia espacial de SRD durante los últimos años. Temporalmente, el FDII no presentó cambios significativos.

REFERENCIAS

Christian, J.; Basara, J.; Furtado, J.; Hunt, E.; Mishra, V.; Otkin, J.; Randall, R.; Xiao, X., 2021: Global Distribution, Trends, and Drivers of Flash Drought Occurrence. *Nar. Commun.* 2021, 12 (1), 6330.

Kucheruk, L.; Naumann, G.; Rivera, J.; Spennemann, P., 2024: Climatología de Sequías de Rápido Desarrollo en la Pampa Húmeda Argentina. *Meteorológica* 2024, 49, 025.

Noguera, I.; Dominguez-Castro, F.; Vicente-Serrano, S., 2020: Characteristics and Trends of Flash Droughts in Spain, 1961-2018. *Amm. N. Y. Acad. Sci.* 2020, 1472 (1), 155-172.

Otkin, J.; Anderson, M.; Basara, J.; Christian, J.; Ford, T.; Hoell, A.; Hunt, E.; Nguyen, H.; Svoboda, M.; Wheeler, M.; Zhong, Y., 2021: Development of a Flash Drought Intensity Index. *Atmosphere* 2021, 12 (6), 741.

CO-OCURRENCIA DE OLAS DE FRÍO Y CALOR ATMOSFÉRICAS Y MARINAS EN LA COSTA URUGUAYA DE MAYO A OCTUBRE

Yilian Montesino¹ & Madeleine Renom^{1,2} & Gastón Manta¹

yilian.montesino@fcien.edu.uy

¹Departamento de Cs. de la Atmósfera y Física de los Océanos, Instituto de Física, Facultad de Ciencias (Udelar)

²Instituto Uruguayo de Meteorología (Inumet)

Palabras clave: Extremos de temperatura, interacción océano atmósfera, eventos compuestos

1) INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el calentamiento global ha intensificado los eventos extremos de temperatura en la atmósfera y el océano (IPCC, 2021), con impactos negativos sobre los ecosistemas y las actividades humanas. En Uruguay, los estudios siguen siendo limitados, especialmente sobre eventos durante el semestre frío y su interacción aire-mar, a pesar de su potencial para amplificar estos eventos (De Mello, 2024; Manta et al., 2018; Pastor et al., 2024). Este estudio busca identificar y caracterizar la co-ocurrencia de olas de calor y frío en la costa uruguaya, evaluando su distribución espacio-temporal y los patrones atmosféricos asociados.

2) METODOLOGIA

Se utilizaron datos diarios de temperatura máxima (Tx) y mínima (Tn) de las estaciones meteorológicas de superficie más cercanas a la costa: La Estanzuela (Colonia), Carrasco (Canelones) y Rocha (Rocha) (1982–2018), provistos por INUMET e INIA. Para el océano, se utilizaron datos diarios de temperatura superficial del mar (TSM) (OISST, NOAA), seleccionando tres puntos cercanos a estas estaciones.

Las olas de calor (frío) atmosféricas (OCA/OFA) se definieron como períodos de al menos tres días consecutivos con Tx y Tn por encima (debajo) de los percentiles diarios 90 (10), respectivamente (Rusticucci et al., 2016). En el caso de las olas marinas (OCM/OFM), se consideraron eventos de al menos cinco días con temperatura superficial del mar (TSM) superior o inferior a esos mismos percentiles (Hobday et al., 2016). La co-ocurrencia se evaluó mediante la coincidencia diaria de eventos entre estaciones costeras (sitio 1) y puntos marinos adyacentes (sitio 2), considerando desfases temporales (lags) de -4 a $+4$ días, normalizados por el menor número de eventos y comparados respecto al lag 0. Se definieron como olas coexistentes de calor (OCC₅₀) o frío (OFC₅₀) aquellas registradas simultáneamente en al menos dos estaciones costeras y dos puntos marinos.

3) RESULTADOS

En la Figura 1 se destaca una mayor duración y persistencia de las olas marinas en comparación con las atmosféricas, con lo cual se refleja la inercia térmica del océano. Asimismo, en el estuario se observa que las OFM presentan una mayor duración que las OCM, en relación con la costa atlántica. También se muestra una fuerte predominancia en frecuencia y duración de OCA sobre las OFA en el sur-sureste.

La co-ocurrencia entre olas atmosféricas y marinas mostró diferencias según el tipo de evento (Figura 2). En las olas de calor, las coincidencias aumentaron desde lag -2 , con mayor persistencia en Rocha y un acoplamiento más breve en Carrasco. En las olas de frío, las coincidencias fueron más altas, destacándose la sincronía en Carrasco, la anticipación

atmosférica en Estanzuela y la menor persistencia en Rocha. Con esto se observa un comportamiento del estuario más en sincronía con la atmosfera con relación al océano, esperable al ser más llano. En conjunto, se evidenció un acoplamiento más intenso en eventos fríos, con patrones espaciales diferenciados. Los lags positivos no indicaron precedencia de eventos oceánicos.

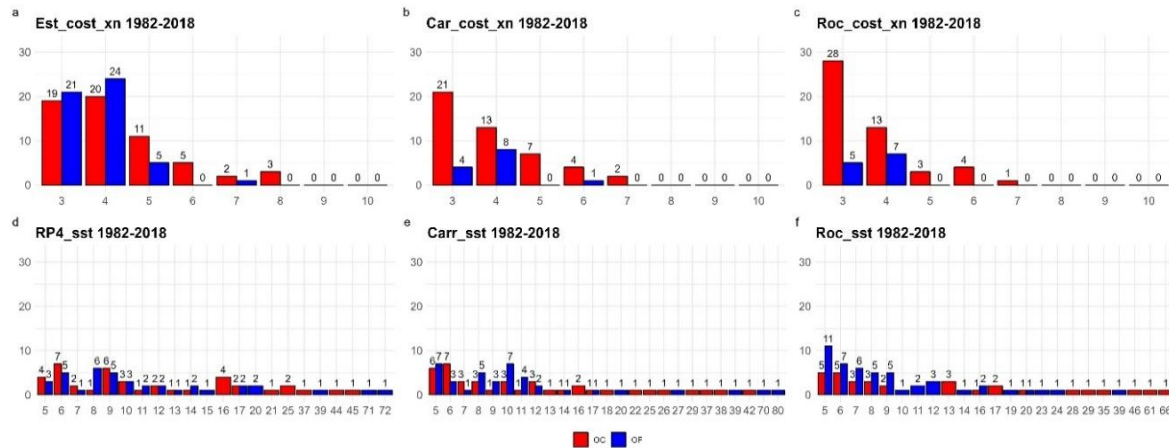


Figura 1. Duración de las olas atmosféricas (arriba) y marinas (abajo) en los sitios de estudio: (a-c) Sitio 1 y (d-f) Sitio 2.

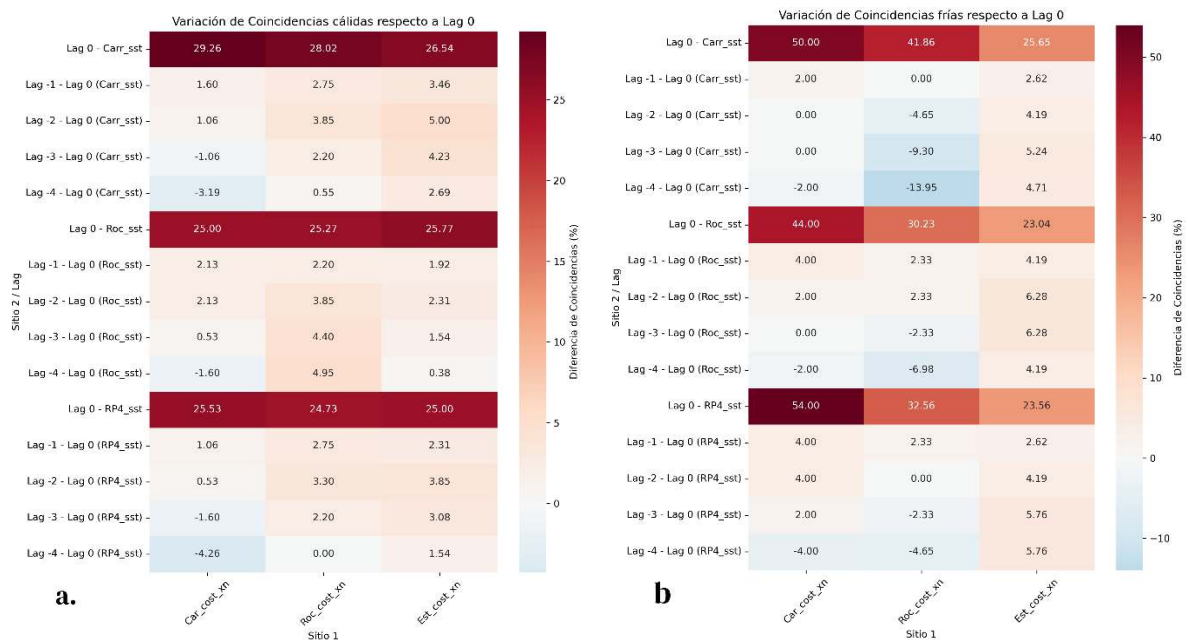


Figura 2. Variación de coincidencia de olas cálidas (a) y frías (b) entre sitios, en función del desfase temporal (lag). El lag 0 indica coincidencia simultánea; los lags negativos reflejan una ocurrencia previa en la atmósfera.

Se observó una mayor frecuencia de OCC_50 (13 eventos) frente a las OCF_50 (5 eventos) en la región costera. Los patrones sinópticos asociados (Figura 3) mostraron anomalías de t2m y TSM significativas. Estas OCC_50 (paneles izquierdos) se vincularon a la Baja del Chaco y una alta presión en el Atlántico suroccidental desplazada al S-SW, que intensificaron los vientos del noreste. En contraste, las OCF_50 (paneles derechos) se asociaron a un anticiclón en el Pacífico Sur y un ciclón en el Atlántico, favoreciendo el ingreso de aire frío y un enfriamiento marcado en la franja litoral.

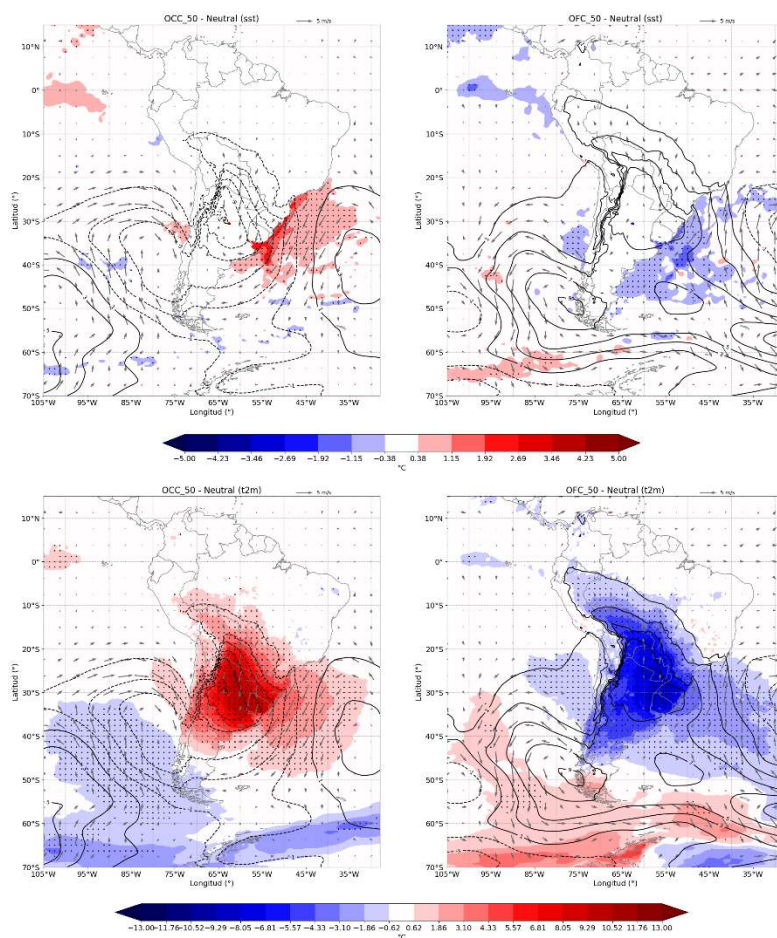


Figura 3. Composites sinópticos de las OCC_50 y OFC_50, con anomalías de TSM y t2m, presión a nivel del mar (hPa), viento a 10 m (m/s) y regiones con significancia estadística del 1% en las anomalías térmicas (prueba t de Student).

M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Scannell, H. A., sen Gupta, A., y Wernberg, T., 2016: A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227–238.

IPCC, 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* 1513–1766.

de Mello, S., (2024.): Caracterización de las olas de calor en Uruguay, análisis de la variabilidad interanual y variabilidad diaria. Tesis de maestría. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ciencias - PEDECIBA.

Manta, G., de Mello, S., Trinchin, R., Badagian, J., y Barreiro, M., 2018: The 2017 Record Marine Heatwave in the Southwestern Atlantic Shelf. *Geophysical Research Letters*, 45(22), 12,449–12,456.

Pastor, F., Paredes-Fortuny, L. y Khodayar, S., 2024: Mediterranean marine heatwaves intensify in the presence of concurrent atmospheric heatwaves. *Commun Earth Environ* 5, 797.

Rusticucci, M., Kysely, J., Almeida, G., y Lhotka, O., 2016: Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3–4), 679–689.

4) CONCLUSIONES

Las olas coexistentes de calor dominan en la zona costera, revelando un acoplamiento liderado por la atmósfera con leve desfase temporal hacia el océano, mientras que las olas de frío son menores en cantidad pero con una mayor sincronización. Los patrones sinópticos muestran circulación diferenciada para cada tipo de evento, modulada por la Baja del Chaco y el Anticiclón del Atlántico Sur, que favorecen la advección de masas de aire cálidas o frías.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el financiamiento recibido a través del del programa de becas de ANII y la Comisión Académica de Posgrado (CAP).

REFERENCIAS

Hobday, A. J., Alexander, L. v., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., Benthuisen, J. A., Burrows,

INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA DE LOS CAMBIOS DE PRECIPITACIÓN OBSERVADOS EN EL HEMISFERIO SUR A PARTIR DE SIMULACIONES CLIMÁTICAS

Leandro B. Díaz^{1,2,3}

ldiaz@cima.fcen.uba.ar. Leandro B. Díaz

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

² CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³ CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: gases de efecto invernadero, ozono, aerosoles, grandes ensambles, LESFMIP

1) INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han detectado diversos cambios en la circulación atmosférica del hemisferio sur (HS). Entre ellos se destacan el desplazamiento hacia el polo de la celda de Hadley y de la corriente en chorro de niveles altos o la intensificación de los storm tracks (Shaw et al. 2024). Estas alteraciones han generado, a su vez, tendencias en las precipitaciones de regiones continentales, incluyendo amplios sectores de Sudamérica.

Las tendencias de la circulación atmosférica del HS están siendo moduladas por la combinación de factores como el incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), la disminución del ozono estratosférico debido a las sustancias que debilitan la capa de ozono (ODS), o las emisiones antropogénicas de aerosoles troposféricos. La magnitud en que cada uno de estos forzantes influye en el clima superficial sigue siendo una pregunta abierta, particularmente en vista del aumento de los niveles de gases de efecto invernadero, la recuperación gradual del ozono estratosférico tras el Protocolo de Montreal y la disminución de las emisiones de aerosoles debido a las regulaciones de calidad del aire.

Este estudio tiene como objetivo analizar la atribución de las tendencias de la precipitación del SH durante el periodo histórico (1850-2014) a forzantes antropogénicos utilizando simulaciones climáticas del Large Ensemble Single Forcing Model Intercomparison Project (LESFMIP, Smith et al. 2022).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para este análisis se utilizaron simulaciones climáticas de modelos globales de circulación acoplados del conjunto LESFMIP. Las simulaciones de este conjunto utilizan el protocolo del CMIP6, pero consideran una gran cantidad de miembros por cada modelo y experimento. El gran tamaño del conjunto permite una mejor cuantificación de la variabilidad interna, mientras que la disponibilidad de múltiples modelos, permite cuantificar la incertidumbre del modelo. Por otro lado, como considera experimentos de un solo forzante, permite aislar la respuesta del clima a los distintos forzantes.

En particular, se analizaron los siguientes experimentos: simulaciones históricas (*historical*, 10 modelos), simulaciones históricas con solo forzante de gases de efecto invernadero

(*hist-GHG*, 10 modelos), simulaciones históricas con solo forzante de aerosoles (*hist-aer*, 10 modelos), y simulaciones históricas con solo forzante de ozono total (*hist-totalO3*, 6 modelos). Se consideraron para cada modelo y experimento todos los miembros disponibles. Todas las simulaciones comienzan en 1850 y finalizan entre 2014 y 2020. Todos los modelos fueron interpolados a una retícula común de 2,5° de resolución horizontal. Se muestran los resultados para las estaciones de verano (DEF, Diciembre-Enero-Febrero) e invierno (JJA, Junio-Julio-Agosto)

Se calculó la respuesta climática en cada uno de los forzantes como el cambio promedio en la variable calculada entre los períodos 1980-2014 (presente) y 1850-1884 (preindustrial). Para calcular la media multi-modelo, primero se realizó la media multi-miembro para cada modelo y luego se promediaron todos los modelos dándole a cada uno la misma ponderación.

3) RESULTADOS

En la Figura 1 se muestra la respuesta para la precipitación del multi-modelo para cada uno de los experimentos. Si observamos en primer lugar la respuesta de las simulaciones históricas, se puede notar que la respuesta para el verano muestra un mayor acuerdo entre modelos que la respuesta del invierno. Esto se puede relacionar con que lo mismo se observa para la respuesta de variables de circulación de gran escala (no se muestra). En segundo lugar, se observa un patrón heterogéneo para el verano, con incrementos en la zona antártica, disminución alrededor en latitudes medias, como por ejemplo en la región del sur de los Andes (SAn) y un aumento de la precipitación en algunas zonas continentales como el Sudeste de Sudamérica (SESA).

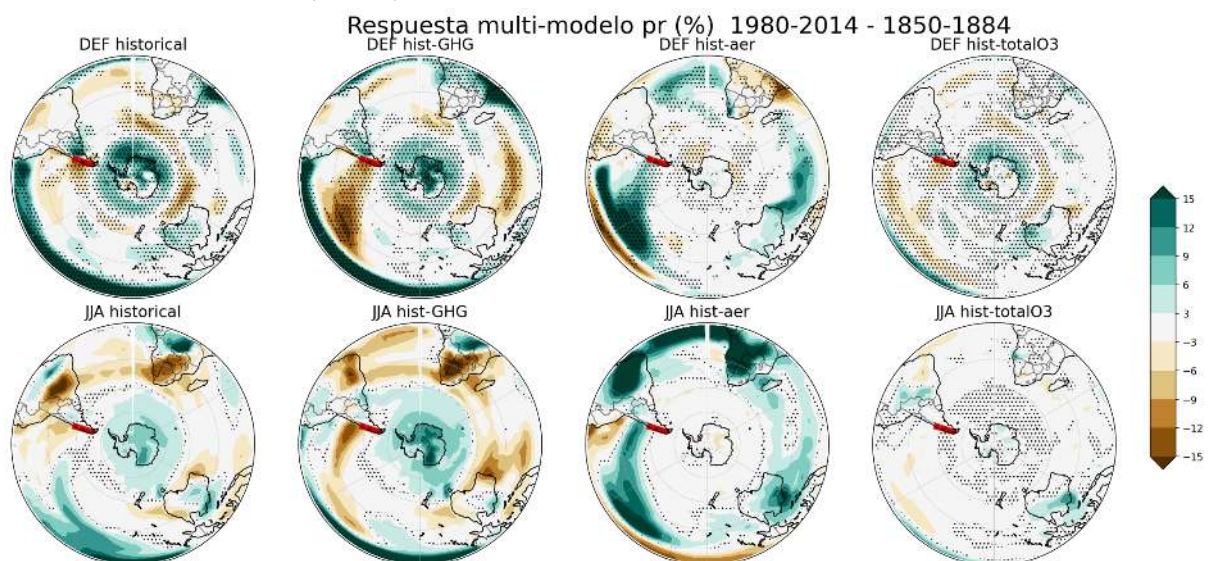


Figura 1: Cambios porcentuales simulados en la precipitación entre 1980-2014 y 1850-1884. Se muestra el promedio multi-modelo para los meses de DEF (fila superior) y JJA (fila inferior) en los experimentos historial (columna 1), hist-GHG (columna 2), hist-aer (columna 3) y hist-totalO3 (columna 4). Los puntos indican que al menos el 80% de los modelos coinciden en el signo del cambio. La caja roja indica la ubicación de la región SAn.

Al comparar los resultados para los distintos experimentos, los cambios históricos en las precipitaciones de SH del verano se explican sobre todo por el efecto de los GEI (Fig. 1). Por otro lado, en las regiones tropicales y subtropicales, el forzante de los aerosoles atenúa o anula los efectos del forzante de los GEI. Por último, en latitudes medias y altas, el forzante del ozono tiene un papel menor, aunque de mismo signo que el de los GEI.

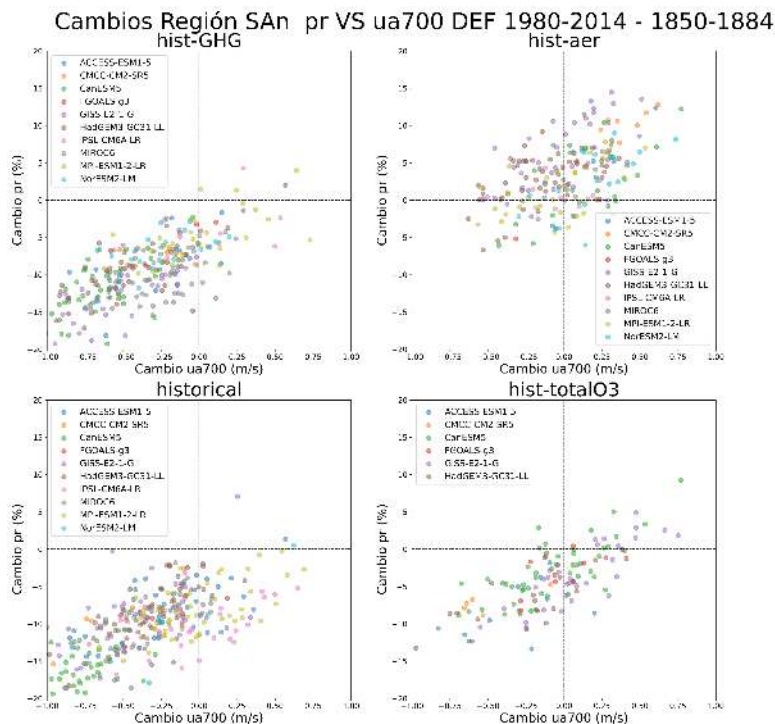


Figura 2: Cambios simulados en la región SAN para DEF del viento zonal en 700 hPa (eje x, m/s) y la precipitación (eje y, %) entre 1980-2014 y 1850-1884. Los paneles presentan los resultados para los experimentos: hist-GHG (arriba izquierda), hist-aer (arriba derecha), historical (abajo izquierda) y hist-totalO3 (abajo derecha). Cada punto individual representa un miembro del conjunto, y los colores distinguen los modelos.

influencia antropogénica significativa en los cambios de la precipitación en el hemisferio sur en el verano, mayormente asociada a la respuesta del aumento de la concentración de gases de efecto invernadero. Estos cambios podrían explicarse, en parte, por modificaciones lineales en la circulación atmosférica a gran escala. Sin embargo, aún se requiere mayor investigación para cuantificar el papel de la variabilidad natural en las tendencias a largo plazo de la circulación atmosférica, lo que permitiría una mejor atribución de los forzantes climáticos y reducir incertidumbres en proyecciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por los proyectos CONICET-PIBAA 28720210100758CO, CONICET-PIP 11220200102038CO, UBACYT 20020220100075BA y PICT-2021-GRF-TI-00498. Se agradece también al Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI).

REFERENCIAS

Shaw, T. A., Arblaster, J. M., Birner, T., Butler, A. H., Domeisen, D. I. V., Garfinkel, C. I., et al., 2024: Emerging climate change signals in atmospheric circulation. AGU Advances, 5, e2024AV001297.

Smith, D. M., Gillett, N. P., Simpson, I. R., Athanasiadis, P. J., Baehr, J., Bethke, I., et al., 2022: Attribution of multi-annual to decadal changes in the climate system: The Large Ensemble Single Forcing Model Intercomparison Project (LESFMI). Frontiers in Climate, 4, 955414.

Para analizar con más detalle los cambios en la precipitación sobre la región SAN, en la Figura 2 se muestran gráficos de dispersión para cada experimento, comparando la respuesta para el verano de la precipitación promedio en la región y en el cambio del viento zonal en niveles bajos (700 hPa). Se puede observar que la respuesta en la precipitación es casi lineal con los cambios en el viento zonal. Por lo tanto, se puede asociar la disminución de precipitación en la región (Fig. 1) al debilitamiento del flujo del oeste (Fig. 2), que es más pronunciado en las simulaciones con el forzante de GEI y, en menor medida, a las del forzante del ozono.

4) CONCLUSIONES

A partir del análisis de las simulaciones del Proyecto LESFMIP, se pudo identificar una

ANÁLISIS DE INCENDIOS Y DESPLAZAMIENTOS DE MASAS DE AIRE, EN RELACIÓN CON CONCENTRACIONES DE NO₂ EN SITIOS DEL GRAN ROSARIO

Julia Gastauto¹, Greta Ailín Piñol^{2,3}, Verónica Anibalini¹, María Isabel Micheletti^{2,4}
gastautojulia@fcv.unr.edu.ar

¹Facultad de Ciencias Agrarias (UNR) ²Instituto de Física Rosario (CONICET- UNR)

³Facultad de Química e Ingeniería del Rosario (UCA) ⁴Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas (FBIOyF, UNR)

Palabras clave: Contaminación atmosférica, Delta del Paraná, trayectorias.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el año 2008 son frecuentes los incendios en el Delta del Río Paraná, presentándose principalmente durante los meses de junio a septiembre (Binet et al., 2024). Cuando estos eventos se combinan con años secos se vuelven más intensos. Esta situación genera una alta producción de dióxido de nitrógeno (NO₂), siendo éste el producto de la reacción de oxidación del monóxido de nitrógeno, que ocurre pocos minutos después de su emisión por la quema de combustible fósil y la quema de biomasa a altas temperaturas. Este compuesto, cuando se encuentra en altas concentraciones en la atmósfera, es un importante contaminante del aire, debido a las graves consecuencias que ocasiona tanto para la salud humana como ambiental. Además, juega un rol importante en la generación de aerosoles secundarios.

En el año 2022, de gran sequía por el fenómeno de la Niña, en las islas del Delta superior se produjeron diversos focos de incendio afectando a las localidades ubicadas frente a dicha área. Esto generó tanto problemas ambientales como de salud en las comunidades afectadas. El objetivo de este trabajo es analizar la relación entre los incendios ocurridos en agosto y septiembre de 2022 y la contaminación por NO₂ a través del desplazamiento de las masas de aire, en comparación con el año 2023 que no presentó eventos significativos de incendios, para cuantificar el incremento de la concentración de NO₂ en distintas localidades del Gran Rosario (GR) para el año con incendios.

2. METODOLOGÍA

Para analizar la relación entre los valores de NO₂ con los incendios (Inc) ocurridos frente a las costas de la localidad (Loc) de Rosario (ROS; -32,963 -60,615) se trazó un buffer de 40 km desde el punto -32,9797 -60,4955. Se seleccionaron 4 sitios: ROS, San Lorenzo (SLO; -32,7453 -60,7262), Villa Constitución (VC; -33,2242 -60,3304) y Zavalla (ZAV; -33,01978 -60,87861). El período de estudio comprende los años 2022 (con incendios [cI]) y 2023 (sin incendios [sI]), donde se analizaron los meses de agosto (AGO) y septiembre (SEP). Se identificaron tres intervalos para AGO (1 al 6, sI; 13 al 24, cI y 25 al 31, sI) y dos para SEP (6 al 17, cI y 18 al 25, sI). Para cuantificar las emisiones de NO₂ asociadas a los Inc, se utilizaron datos de concentración de NO₂ troposférico del sensor TROPOMI a bordo del satélite Sentinel-5P de la Agencia Espacial Europea (ESA) (García Ferreyra and Lanfri, 2020). La extracción y procesamiento de los datos se realizó a partir del producto Copernicus Sentinel-5P NRTI Level 3 NO₂, a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE). Se calculó el promedio de las concentraciones diarias de NO₂ para los periodos de interés, en mol/m² (M/m²). Los datos procesados fueron exportados a QGIS, donde se organizaron y se utilizaron para la elaboración de mapas. Los valores de NO₂ se transformaron a micromol/m² (µM/m²). La información sobre los focos de calor activos durante el periodo de estudio fue obtenida de la web de la NASA Fire Information for Resource Management System. Los datos provinieron del instrumento VIIRS a bordo del satélite NOAA-20. Se aplicó un filtro de calidad. Se analizaron trayectorias de masas

de aire utilizando el algoritmo HYSPLIT/NOAA. Las mismas se calcularon a 20 metros sobre el nivel del suelo (AGL) debido a la cercanía de los focos con el área de estudio. Se computaron trayectorias horarias con inicio a las 00:00 hora local (GTM-3), obteniendo un total de 24 trayectorias por día. Para los días en los que se reconocían diferentes eventos de quemas, se seleccionaron diferentes puntos de inicio de las trayectorias para cada uno de ellos. Si bien los Inc, especialmente durante el período del 13 al 24 de AGO de 2022, se propagaron sobre un área muy extensa, se distinguen 3 zonas con quemas en AGO (frente a ROS – frente a VC - Centro del humedal) y 2 zonas en SEP (frente a Arroyo Seco (AS) / Villa Gobernador Gálvez (VGG) y frente a VC). La ubicación diaria de los focos fue cambiando durante el período de estudio. Esta distinción se utilizó para caracterizar cada evento en base al área quemada y el Fire Radiative Power (FRP).

3. RESULTADOS

El día 15/08 el Inc frente a ROS mostró el área quemada ($15,369 \text{ km}^2$) y FRP más alto ($3461,03 \text{ MV}$), mientras que el 14/08 el Inc más extenso ($50,76 \text{ km}^2$) e intenso ($12565,44 \text{ MV}$) ocurrió frente a VC. Por su parte el 19/8 fue el día con mayor FRP de las quemas que se desarrollaron en la zona media del humedal ($4,65 \text{ km}^2$ y $330,55 \text{ MV}$). Para SEP, durante los días 12, 13 y 16 se desarrollaron los Inc más extensos e intensos según los valores de área quemada y FRP obtenidos ($17,2 \text{ km}^2$ y $3386,22 \text{ MV}$; $31,02 \text{ km}^2$ y $3319,2 \text{ MV}$; y 20 km^2 y $3001,2 \text{ MV}$, respectivamente), frente a AS y VGG. A partir del análisis espacio temporal de NO_2 se obtuvieron los mapas correspondientes (Figura 1). Allí se observan las concentraciones de NO_2 , colores más oscuros indican mayor concentración. Durante AGO de 2022, para los Inc ocurridos entre el 13 y 24, VC fue la Loc que registró mayor concentración media ($170 \mu\text{M}/\text{m}^2$) para ese periodo. Los días 25 al 31/08 registraron los valores más bajos de NO_2 del total del periodo analizado, para todas las Loc (ROS: $70 \mu\text{M}/\text{m}^2$; SLO, VC y ZAV: $60 \mu\text{M}/\text{m}^2$). Durante los Inc de SEP, del 6 al 17, se obtuvieron los mayores valores en ROS ($120 \mu\text{M}/\text{m}^2$), SLO y ZAV ($90 \mu\text{M}/\text{m}^2$) y el segundo valor más alto para VC ($110 \mu\text{M}/\text{m}^2$). Luego de los mismos, los valores descendieron, pero se mantuvieron altos en las 4 Loc (ROS: $90 \mu\text{M}/\text{m}^2$; SLO y ZV: $80 \mu\text{M}/\text{m}^2$; VC: $70 \mu\text{M}/\text{m}^2$). Para el 2023 los valores registrados variaron entre 70 y $90 \mu\text{M}/\text{m}^2$ para ROS y entre 60 y $80 \mu\text{M}/\text{m}^2$ para el resto. Analizando las trayectorias de masas de aire para todos los días del período 13-24/08/2022 (Figura 2), se obtiene que para la mayoría de esos días las mismas pasan por VC. En cambio, las otras Loc sólo son atravesadas por masas de aire provenientes de las quemas en contadas ocasiones: 13/08 ROS y ZAV, 14/08 ROS, 16/08 ROS y SLO (en este caso se trata de trayectorias indirectas que arriban luego de realizar un recorrido más largo), 21/08 ROS y ZAV. Estos resultados condicen con los de los mapas presentados en la Figura 1, donde se observa un aumento significativo en el valor medio de la concentración de NO_2 sólo para VC en el período 13-24/08/22 respecto del período anterior sI y respecto del mismo período del año 2023 sI. Para el período cI del 6-17/09/22, la situación de las direcciones de las masas de aire se encuentra más distribuida que en el caso anterior, dirigiéndose a veces hacia el sur del Gran Rosario, llegando hasta VC, y otras veces hacia el centro, norte y oeste, arribando a ROS, ZAV y SLO. Los desplazamientos de las masas de aire provocan un aumento de las concentraciones de NO_2 en todos los sitios en comparación con el período posterior sI del 18-25/09/22 y con respecto al mismo período (6-17/09) del año 2023 sI. Este aumento es especialmente notorio en ROS y VC debido a su mayor cercanía a los focos de incendio, mientras que las masas de aire provenientes desde los mismos que llegan a SLO y ZAV lo hacen recorriendo mayores distancias. Esto puede notarse en los mapas de distribución de la concentración de NO_2 para este período (Figura 1).

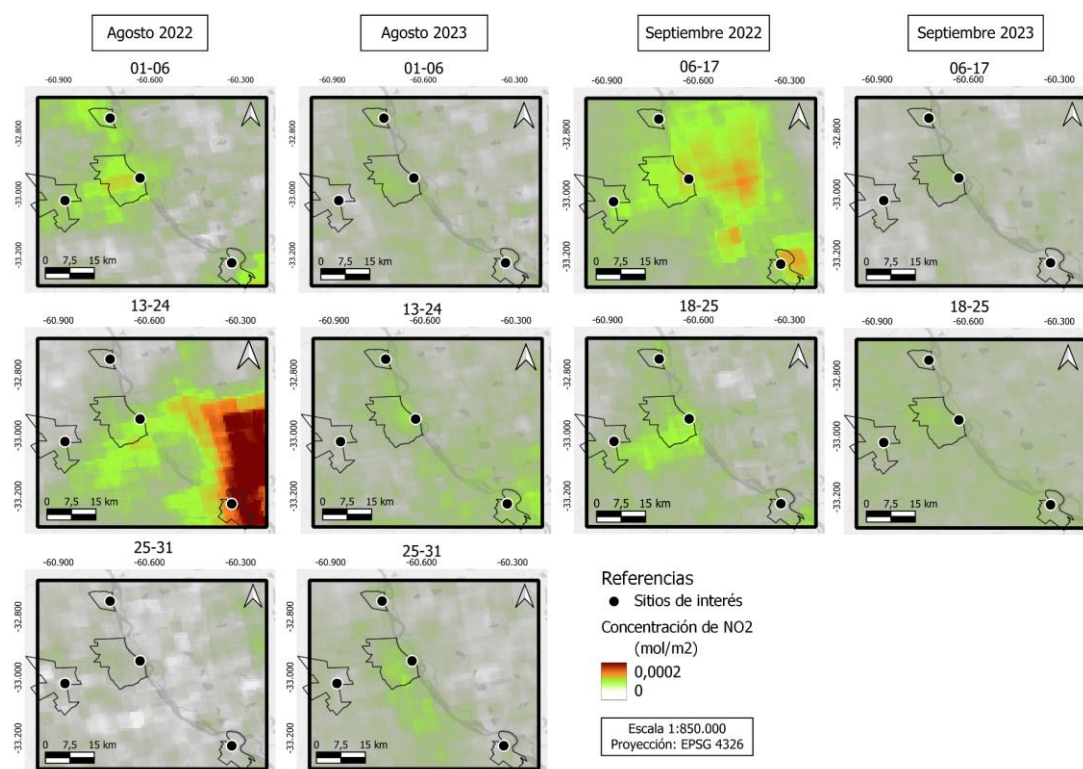


Figura 1. Evolución espacio temporal de las concentraciones de NO_2 (valores medios para cada período de días especificados) en la zona de estudio, durante agosto y septiembre de 2022 y 2023.

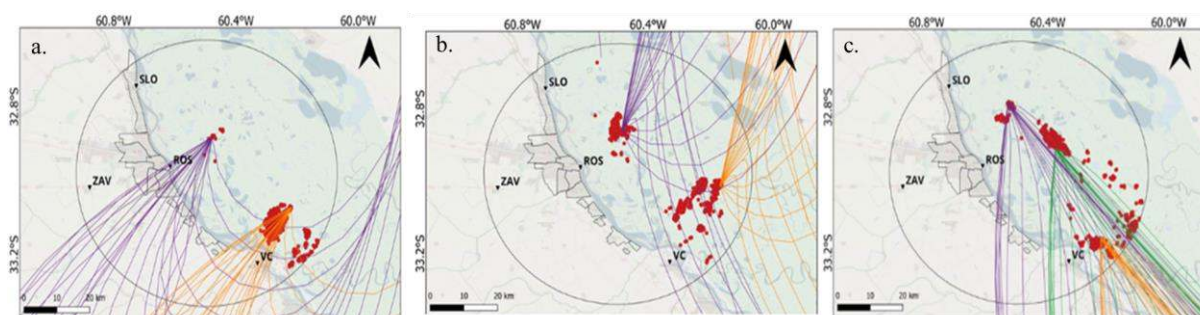


Figura 2. Incendios y trayectorias de masas de aire para los días 14/8 (a), 15/8 (b), 19/8 (c) de 2022. Violeta: trayectorias desde incendios frente a ROS. Naranja: trayectorias desde incendios frente a VC. Verde: trayectorias desde incendios del centro del humedal.

4. CONCLUSIONES

Se demostró una clara relación entre los incendios del Delta (2022) y el aumento de NO_2 en Loc del GR, especialmente en las costeras más cercanas a los focos, obteniéndose un incremento en la concentración media de NO_2 del 89% para VC y del 50% para ROS para los períodos donde estas Loc alcanzan sus máximos, respecto de los mismos períodos del año 2023 (sI). Las trayectorias de masas de aire confirmaron la llegada de NO_2 a áreas urbanas. Esto señala la urgencia de contar con un sistema eficiente de gestión de incendios, para controlar sus efectos en la calidad del aire y la salud.

5. REFERENCIAS

Binet, M.V., Micheletti, M.I., Piacentini, R.D., 2024: Propagation of NO_2 originated in intense fires in the Paraná River Delta analyzed from satellite observations. *Advances in Space Research*, 74, 682–694.

García Ferreyra, M.F. y Lanfri, M., 2020: Productos de Calidad del Aire. Promedio mensual de la columna troposférica de NO_2 TROPOMI/Sentinel- 5p. Comisión Nacional de Actividades Espaciales. V.2.0.

EFFECTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO DE *Pinus ponderosa* EN EL NOROESTE DE LA PATAGONIA

Mercedes Peretti¹, Mariana Weigandt², Sergent Anne Sophie², Alejandro Martinez-Meier², Federico Letourneau², José Villacide³, Juan Pablo Diez², Santiago A. Varela²
merperetti@agro.uba.ar; varela.santiago@inta.gob.ar. Autores correspondientes.

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas

² IFAB (INTA-CONICET), Grupo de Ecología Forestal - LEEMA (Laboratorio de Ecología, Ecofisiología y Madera), INTA EEA Bariloche, Argentina

³ IFAB (INTA-CONICET), Grupo de Ecología de Poblaciones de Insectos, INTA EEA Bariloche, Argentina

Palabras clave: sequías, SPEI, incremento en área basimétrica.

1) INTRODUCCIÓN

El estudio de la variabilidad climática y su relación con el crecimiento de los árboles ha cobrado una relevancia creciente en el contexto del cambio climático global. Las especies de coníferas introducidas representan un grupo particularmente interesante ya que, al encontrarse fuera de su rango de distribución natural y siendo especies de rápido crecimiento, pueden proporcionar información valiosa sobre cómo las condiciones climáticas influyen sobre su crecimiento y la productividad de los sistemas forestales implantados. Entre las variables climáticas, la precipitación (PP) y la temperatura (T) son dos de los factores críticos que más afectan el crecimiento de los árboles, condicionando en gran medida la recarga de agua en el suelo. En distintas regiones del mundo las variaciones en la disponibilidad de agua tienen fuertes impactos en el crecimiento anual de especies arbóreas (Pasho y otros, 2011; Akhmetzyanov y otros, 2023). En algunos casos, la escasez de precipitaciones puede influir en el crecimiento dentro de una ventana temporal amplia, incluyendo varios meses antes del inicio del período de crecimiento (Camarero y otros, 2013; Akhmetzyanov y otros, 2023). El objetivo de este trabajo fue identificar una ventana temporal adecuada para estudiar el impacto de las variaciones de un índice multiescalar de sequía en el crecimiento de *Pinus ponderosa* en el noroeste de la Patagonia.

2) METODOLOGÍA

Se utilizaron muestras de tarugos forestales recolectados en 20 sitios con plantaciones de *P. ponderosa*, dentro de un gradiente latitudinal y longitudinal. La cantidad promedio de plantas muestreadas por sitio fue de 24 individuos. Para construir las cronologías de crecimiento (incremento en área basal, IAB) se utilizó el ancho de los anillos y se calculó el IAB con la función *bai.out* del paquete *dplR* de *RStudio*. Las cronologías de cada individuo fueron validadas por sitio usando el software Interdat (Dupouey J.L., inédito). Este software compara la serie de IAB de cada individuo con la serie promedio del sitio al que pertenece. Para ser validada la serie individual debe tener una correlación ≥ 0.6 con la serie promedio. Una vez validadas, se generó una única serie promedio para cada sitio (Figura 1). Las cronologías de crecimiento obtenidas cubrieron el

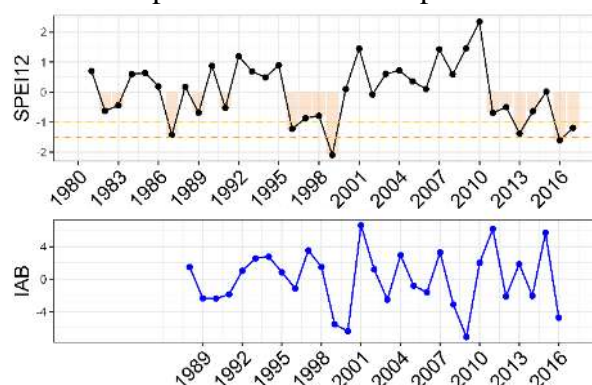


Figura 1: Serie temporal de SPEI 12 al mes de junio (arriba) y de los residuos del IAB (cm^2) (abajo) para uno de los sitios de estudio considerados.

periodo 1990-2015 en 10 sitios y en los restantes el año del primer anillo de crecimiento varió entre 1980 y 1987 y cubrió hasta el año 2017. Para representar las fluctuaciones de períodos secos y húmedos y/o cálidos o fríos se utilizó el Índice Estandarizado de la Precipitación y la Evapotranspiración (SPEI; Vicente-Serrano y otros, 2010), ya que capta la influencia conjunta de la PP y la evapotranspiración potencial (EP) sobre la disponibilidad de agua en el suelo. Éste se calculó con series mensuales de datos de PP y EP (calculada por Penman-Montieth) de la base de datos global de alta resolución CHELSA (Karger y otros, 2021), en las distintas escalas temporales (SPEI₁ a SPEI₁₈) y para los 12 meses del año. Para correlacionar las cronologías del IAB con las series de SPEI se eliminaron las tendencias a largo plazo de ambas variables. En el caso del IAB la remoción de tendencias se realiza con el fin de darle mayor importancia a las variaciones de alta frecuencia, eliminando también el efecto de la edad de cada individuo, y se utilizó la función Smooth Spline. Mientras que, para los datos de SPEI, se usó una función lineal. Las series de SPEI y IAB se correlacionaron con el método de Spearman, para cada sitio y para las distintas combinaciones de meses del año y escalas de SPEI (1 a 12 x 1 a 18). Se aplicó un Análisis de Conglomerados Jerárquico (HCA) con el método de Ward.D2 para agrupar los sitios según la similitud en sus correlogramas.

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La respuesta del IAB anual ante el SPEI presentó variaciones entre sitios (Figura 2 a y b). Esto es esperable al tratarse de ambientes con niveles distintos de PP anual y calidades de sitio para el establecimiento de *P. ponderosa* (Figura 2a). Según el HCA, se detectaron 3 grupos de respuestas (Figura 3a). Los sitios ubicados al norte de la región (grupo 1), mostraron una fuerte sensibilidad ($r = 0.4/0.6$) del crecimiento a las condiciones hidrológicas acumuladas en periodos largos (de 6 a 18 meses), contemplando así el periodo de lluvias de la región (otoño-invierno).

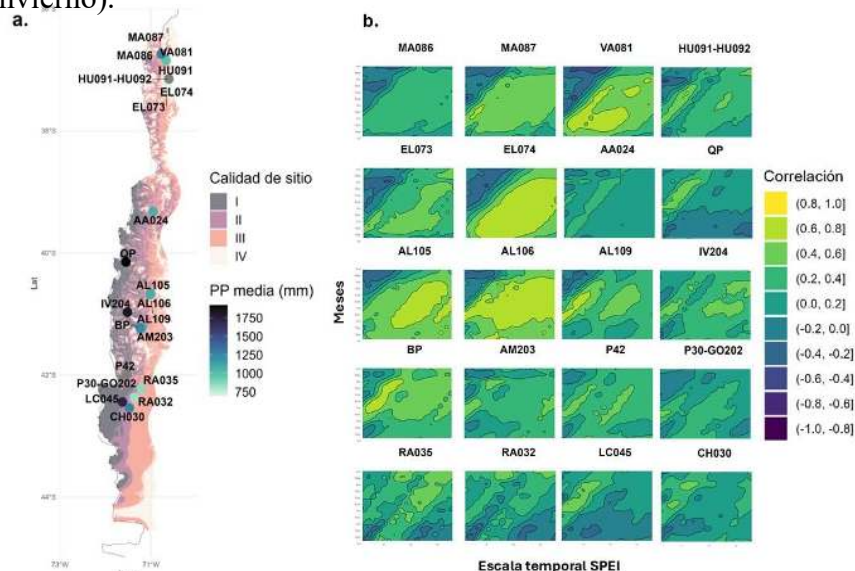


Figura 2: a) Ubicación de los 20 sitios de muestreo. Se muestra el detalle de las PP medias y la calidad de sitio para la especie *P. ponderosa* ($I >$ calidad que IV; Bava y otros 2016). b) Correlogramas SPEI-IAB para cada mes (eje y, periodo julio a junio) y escala del SPEI (eje x, 1 a 18).

Las correlaciones fueron bajas o nulas cuando se consideraron escalas cortas (menores a cinco meses) o meses fuera del período de crecimiento (octubre a abril). Los sitios del grupo 3, mostraron correlaciones positivas entre 0.4 y 0.6, aunque en una ventana temporal muy acotada dentro del periodo de crecimiento, particularmente entre octubre y marzo, para escalas del SPEI cortas (<5) (Figura 3c). Las plantas de este grupo responden a los aportes de agua de corto plazo. Las correlaciones restantes están en rangos cercanos a cero, lo que muestra que no hay señales significativas en otros meses. Por último, el grupo 2, que se separó del grupo 3, tiene muy poca o nula respuesta ($-0.2 < r < 0.2$) a los aportes de agua (Figura 3c), probablemente al tratarse de una zona más húmeda. Estos sitios tienen mayores PP anuales y mejores calidades de sitio.

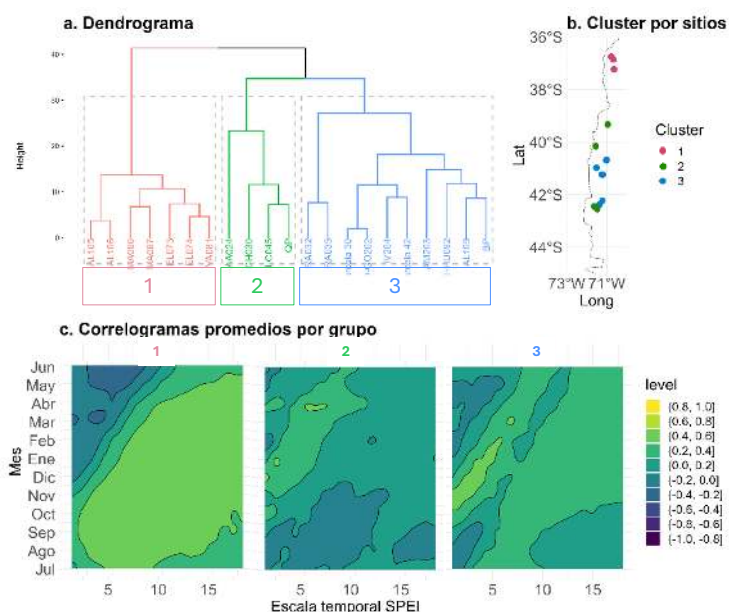


Figura 3: a y b) Resultados del HCA; c) Correlogramas promedio para cada grupo

4) CONCLUSIONES

A partir de este trabajo fue posible identificar un gradiente latitudinal en la respuesta a mediano y corto plazo del crecimiento de *P. ponderosa* a las variaciones de PP y EP reflejadas a través del SPEI. En zonas más secas, el crecimiento responde a acumulaciones hídricas de mediano plazo; en zonas de humedad intermedia responde a las condiciones de corto plazo durante la época de crecimiento y en zonas húmedas la respuesta es mínima. Estos patrones evidencian distintas sensibilidades a la variabilidad climática. Los resultados alcanzados permiten comprender impactos diferenciales para las regiones en las cuales se planta *P. ponderosa* a la vez que ayudan a tomar decisiones sobre el manejo forestal adaptativo (prever) en función del aumento regional esperado en la frecuencia e intensidad de sequías.

5) REFERENCIAS

- Akhmetzyanov, L., Sánchez-Salguero, R., García-González, I., Domínguez-Delmás, M., y Sass-Klaassen, U., 2023: Blue is the fashion in Mediterranean pines: New drought signals from tree-ring density in southern Europe. *Science of the Total Environment*, 856, 159291.
- Bava JO, GA Loguercio, I Orellana, MF Ríos Campano, MM Davel, HE Gonda, L Heitzmann, M Gómez, MA González, G Salvador, G. Zacconi: 2016. Evaluación Ambiental Estratégica. Una visión sobre dónde y cómo forestar en Patagonia.
- Camarero, J. J., Manzanedo, R. D., Sanchez-Salguero, R., & Navarro-Cerrillo, R. M., 2013: Growth response to climate and drought change along an aridity gradient in the southernmost *Pinus nigra* relict forests. *Annals of forest science*, 70, 769-780.
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, H.P. & Kessler, M., 2021: Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *EnviDat*. <https://doi.org/10.16904/envidat.228.v2.1>
- Pasho, E., Camarero, J. J., de Luis, M., & Vicente-Serrano, S. M., 2011: Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1800-1811.
- Vicente-Serrano S.M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno, 2010: A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI. *Journal of Climate* 23: 1696-1718.

PROYECCIONES DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN BASE A MODELOS CLIMÁTICOS REGIONALES A LO LARGO DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES, ARGENTINA

Georgina Marianetti¹, Juan A. Rivera¹, Maria L. Bettolli²
gmarianetti@conicet-mendoza.gob.ar

¹Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA, CONICET-Mendoza)

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN), Universidad de Buenos Aires (UBA)

Palabras clave: CORDEX, cambio climático, extremos.

1) INTRODUCCIÓN

La porción argentina de la Cordillera de los Andes ubicada al norte de 47°S presenta diversas características climáticas que dependen tanto de la elevación como la latitud (Viale et al. 2019), lo cual representa un desafío para la modelación. Los recursos hídricos que sostienen a las poblaciones ubicadas en las adyacencias de la cadena montañosa y a los ecosistemas altoandinos dependen altamente de las precipitaciones y del aporte nivo-glaciar a los ríos. Las tendencias climáticas recientes muestran una reducción en la precipitación invernal y un incremento en la temperatura a lo largo de la Cordillera de los Andes, aunque con diferencias en magnitud que dependen de la región considerada. Se espera que estas tendencias continúen a futuro, aunque existe una alta incertidumbre en relación a su magnitud y comportamiento espacial, lo cual requiere el uso de modelos climáticos regionales (MCR) para su cuantificación (Falco et al. 2019). Esto puede contribuir al desarrollo de medidas de adaptación y mitigación para las poblaciones locales en relación al manejo de los recursos hídricos, así como también la conservación de la biodiversidad. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es cuantificar los cambios proyectados en los valores medios y extremos de la temperatura y la precipitación a lo largo del siglo XXI en base a un conjunto de MCR que simulen adecuadamente las características climáticas a lo largo de la Cordillera de los Andes.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron simulaciones en escala diaria de temperatura y precipitación de 25 MCRs, 24 pertenecientes al proyecto Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, (CORDEX) y un modelo regional desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), para un dominio espacial que abarca la Cordillera de los Andes entre las latitudes 21°S y 47°S. Dado que la resolución espacial de los MCR varía entre 0.09° y 0.44°, las simulaciones se llevaron a una retícula común de 0.25° mediante una interpolación bilineal. La región de estudio se dividió en tres sub-regiones coherentes climática y geográficamente: Noroeste Argentino (NA), Andes Centrales (AC) y Patagonia Norte (PN). Para evaluar el desempeño de las simulaciones en un período histórico de referencia, se utilizó la base de datos CRU TS 4.07. Se calcularon diversas métricas estadísticas para seleccionar los modelos que mejor representan las características climáticas de la región y se cuantificaron los cambios proyectados de la temperatura y precipitación en base a los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para los horizontes temporales 2026-2045, 2051-2070 y 2081-2100, relativos al período de referencia 1986-2005. Se analizaron los cambios de los valores medios y de 9 índices extremos, 5 de precipitación (R20mm, CDD, RX1, RX5 y R75p) y 4 de temperatura (TXx, TNn, SU y FD).

3) RESULTADOS

Los modelos que mejor representan la temperatura y la precipitación a lo largo de la región de estudio son: CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0 (SMHI-RCA4), NCC-NorESM1-M (SMHI-RCA4), MPI-M-MPI-ESM-LR (MPI-CSC-REMO2009), CCCma-CanESM2 (SMHI-RCA4), MOHC-HadGEM2-ES (ICTP-RegCM4-3), donde se indica entre paréntesis los modelos regionales que utilizan como condiciones de contorno a los modelos globales. A partir del ensamble multi-modelo se realizó la cuantificación de los cambios proyectados en los valores medios y extremos de la temperatura y la precipitación (Figuras 1, 2 y 3). En general, se proyecta una disminución de la precipitación al sur de 30°S, la cual se intensifica considerando el escenario RCP8.5 y el horizonte temporal de fin del siglo XXI. Los cambios oscilan entre -20% a -30% (Figura 3c), lo cual se evidencia además en reducciones en los índices R20mm (Figura 2b), R75p (Figura 3b) y RX5, e incrementos en el índice CDD. En la región del NA se esperan cambios en la precipitación de entre 10% a -10% en todos los horizontes temporales y escenarios. Los cambios en los índices extremos muestran incrementos en el R20mm y CDD (Figura 1b), y una disminución del R75p.

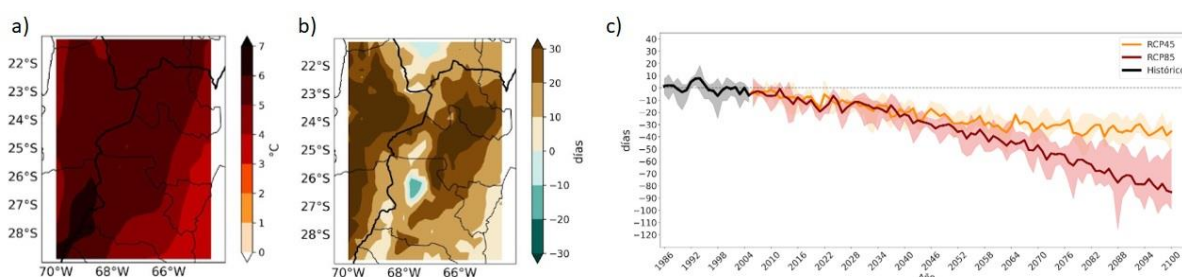


Figura 1. a-b) Patrón espacial de los cambios proyectados de la temperatura media (°C) y CDD (días), respectivamente, para el horizonte temporal 2081-2100 bajo el escenario RCP8.5, c) serie temporal FD (días) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en NA.

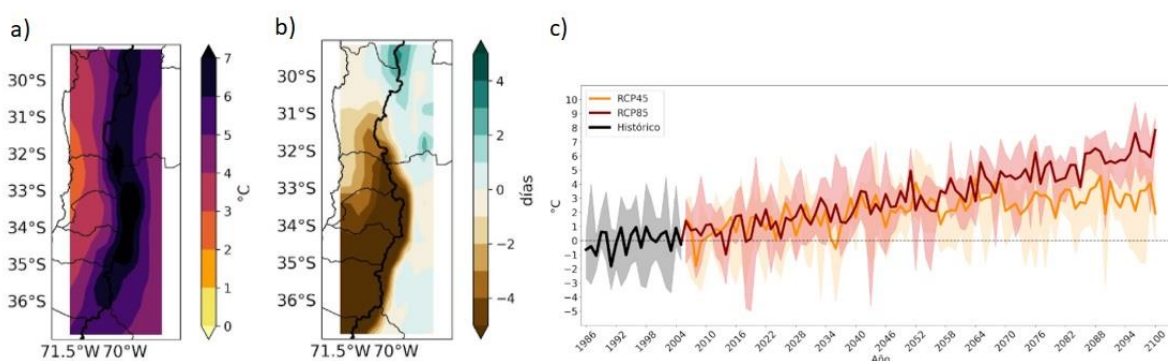


Figura 2. a-b) Patrón espacial de los cambios proyectados de TXx (°C) y R20mm (días), respectivamente, para el horizonte temporal 2081-2100 bajo el escenario RCP8.5, c) serie temporal del cambio de TNn (°C) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en AC.

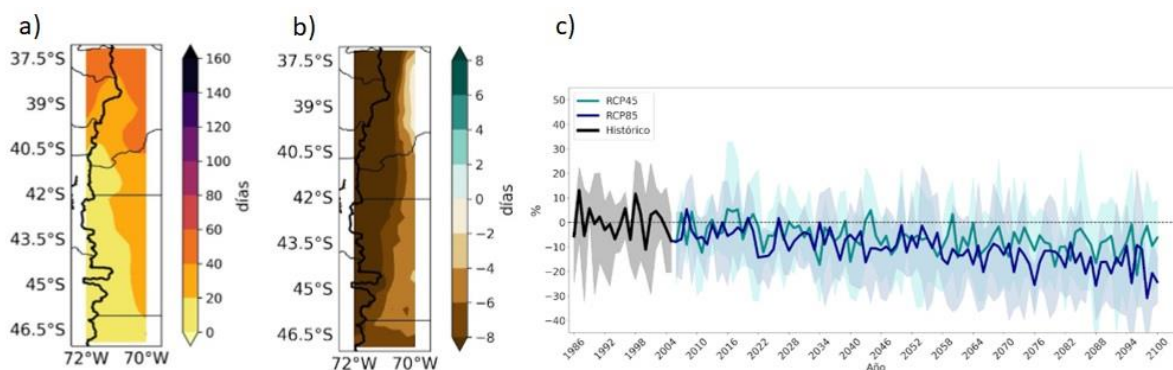


Figura 3. a-b) Patrón espacial de los cambios proyectados de SU y R75p, respectivamente, para el horizonte temporal 2081-2100 bajo el escenario RCP8.5, c) serie temporal del cambio de la precipitación media anual (%) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en PN.

En relación a la temperatura, se proyecta un calentamiento que depende fuertemente del escenario y horizonte temporal seleccionado, con los mayores incrementos proyectados en base al escenario RCP8.5 para el período 2081-2100. Además, estos incrementos presentan una dependencia de la elevación, lo cual presenta una grave amenaza para los cuerpos de hielo en la Cordillera de los Andes. En las regiones NA y AC se proyectan cambios de aproximadamente entre 1°C a 2°C y 4°C a 5°C para fin de siglo en base a los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. En PN los cambios son menos pronunciados, aunque alcanzarían los 4°C según el escenario RCP8.5 para fin de siglo. Los índices extremos de temperatura acompañan estos incrementos, con aumentos en los índices TXx (Figura 2a), TNn (Figura 2c) y SU (Figura 3b), y una disminución del índice FD (Figura 1c) en todas las sub-regiones, con los mayores cambios proyectados para el período 2081-2100.

4) CONCLUSIONES

En base a la selección del conjunto de MCR que simulan adecuadamente las características climáticas a lo largo de la Cordillera de los Andes, se analizaron las proyecciones climáticas futuras para los valores medios y extremos de la precipitación y la temperatura. Se proyecta una disminución de la precipitación media anual principalmente al sur de 30°S, lo cual está acompañado por reducciones en los índices de extremos húmedos e incrementos en los índices de extremos secos. Asimismo, se proyecta un calentamiento sostenido a lo largo del siglo XXI, intensificado en altitud, en sintonía con un incremento en los índices extremos cálidos y una reducción en los índices extremos fríos. Esto tendrá importantes implicancias en la disponibilidad de agua, dado que una reducción en la precipitación invernal y un mayor calentamiento en zonas de mayor altura impactará directamente en el balance de masa de los glaciares, los cuales constituyen las principales reservas de agua dulce en la región. Los cambios esperados suponen una reducción en la disponibilidad hídrica regional. Teniendo en cuenta el incremento en la demanda hídrica y energética futura, los resultados plantean desafíos no solo para la gestión de los recursos hídricos regionales, sino también para la conservación de la biodiversidad andina.

REFERENCIAS

- Falco, M. y coautores. 2019:** Assessment of CORDEX simulations over South America: added value on seasonal climatology and resolution considerations. *Clim. Dyn.* 52(7-8): 4771-4786. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4412-z>
- Viale, M. y coautores. 2019:** Contrasting Climates at Both Sides of the Andes in Argentina and Chile. *Front. Environ. Sci.* 7:69. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00069>

Evolution of Extreme Madden-Julian Oscillation Events and their Impact on South America.

Mónica Minjares ¹, Marcelo Barreiro ², and Álvaro Corral ^{3,4,5}

¹Departament de Física, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona, E-08193 Barcelona, Spain

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Igua 4225, 11400

Montevideo, Uruguay

³Departament de Matemàtiques, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona, E-08193 Barcelona, Spain

⁴Complexity Science Hub Vienna, Josefstädter Strasse 39, 1080 Vienna, Austria

⁵Centre de Recerca Matemàtica, Edifici C, Campus Bellaterra, E-08193 Barcelona, Spain

key words: Madden-Julian Oscillation, extreme events

1. INTRODUCTION

The Madden-Julian Oscillation is the leading mode of intraseasonal variability in the tropics, having large influence on the tropical circulation and precipitation within the time band of 30-60 days (Wheeler and Hendon, 2004; Kiladis et al., 2014) and is the most important source of predictability on subseasonal time scales (Ling et al., 2019). The influence of MJO is not limited to the tropics, it also impacts the extratropics through atmospheric teleconnection patterns. During austral summer the MJO influences the South American Dipole (SAD), a rainfall pattern characterized by opposite rainfall anomalies in the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) and southeastern South America (SESA).

ENSO is the most important source of interannual climate variability, is originated in the equatorial Pacific but has a strong influence around the globe. In particular in South America during austral summer the El Niño phase influences the rainy season in the coast of Peru, northeastern Brazil, southeastern Brazil, Uruguay, Argentina and Chile (e.g. Ambrizzi et al. 2004; Barreiro 2010, Barreiro 2024). Both, MJO and ENSO are known to influence the SAD through different mechanisms.

In a recent work (Corral et al. 2023), we studied the statistics of the size and duration of MJO events and found that there is increased probability of extinction after about 27 days, roughly half the characteristic period. Moreover, this analysis allows us to distinguish between weak MJO and extreme MJO events, which would be expected to have different impacts worldwide and particularly over South America. Hence in this study we focus characterizing the evolution of extreme MJO events and their impact in tropical and extratropical South America depending on the initiation phase. Following our previous work (Corral et al. 2023), MJO events are considered extremes when they exceed a certain threshold, based on the distribution of events. We further analyze whether ENSO influences MJO and its impacts over South America.

2. METHODOLOGY

The evolution of MJO is analyzed by means of the Wheeler and Hendon (2004), Real-time Multivariate (RMM) index during the period of 1979-2021. It is constructed using the first and second empirical orthogonal functions (EOF) considering latitudinal averages (15°S–15°N) of outgoing long-wave radiation (OLR) and zonal winds at 200 hPa and 850 hPa. The index provides the amplitude, or intensity of the MJO given by $A = \sqrt{RMM_1^2 + RMM_2^2}$ and its phase given by $\phi = \arctan2(RMM_2, RMM_1)$.

The index can be visualized in a phase diagram with RMM1 in the x-axis and RMM2 in the y-axis. It is divided in 8 phases which corresponds to geographical locations where the convection center is located. The western Hemisphere and Africa correspond to phases 8 and 1, the Indian Ocean to phases 2 and 3, the Maritime Continent (MC) to phases 4 and 5 and the western Pacific to phases 6 and 7. In our framework the MJO is active when the index amplitude is above or equal to 1. Therefore, the contiguous time periods with active MJO define an event. Given this, we define the duration of an event as the period in which the amplitude is larger than 1 and the size of the event (energy) as the sum of the amplitudes along the duration, i.e. $\sum A(t)$ as detailed in Corral et al. (2023). The winds were used to calculate the streamfunction (ψ) and velocity potential (χ) fields to describe the rotational and divergent components of the circulation, respectively.

To define extreme MJO events we apply the Clauset et al.'s method and the Deluca's method (Clauset et al., 2009; Deluca and Corral, 2013) to the event duration and size distributions. Both methods fit the tail of the distribution to a power-law by means of the maximum likelihood and goodness of fit by Kolmogorov-Smirnov test, using Montecarlo simulations. These methods allow to find a lower cut-off or threshold for extremes. Considering events during all year round we find for the duration that extreme events are the ones that exceed or equal 24 days and for the size extremes are the ones that exceed or equals a value of 39. In this study we use the threshold based on size to define extreme events.

By composite analysis we study the evolution of extreme MJO events during extended austral summer (NDJFM) depending on the phase of initiation and how they influence remote regions, particularly South America and the SAD. Here phases are grouped by pairs, i.e., 8-1, 2-3, 4-5, 6-7. We further separate the composites on events that coincide with the different ENSO phases: El Niño, La Niña and Neutral phase.

3. RESULTS

Figure 1a,b shows the composites of extreme MJO events (left column) and weak MJO events (right column). Each column shows the evolution of OLR and (a) eddy-streamfunction and (b) velocity potential for events starting in phases 2-3 where the center of enhanced convection is located in the Indian Ocean and the center of suppressed convection is to the east. Our results show that the centers of enhanced and suppressed convection during extreme MJO events are more intense and extend further east and south than those of weak MJO events. Over South America extreme MJO events present more intense rainfall and circulation anomalies and are larger in spatial extent. In particular, the SAD is well developed for extreme events during phase 2-3 and 4-5, while it has much smaller amplitude in weak events. Moreover, in extreme events the evolution of the MJO increases the SACZ activity during phases 8-1, while weak events do not last that long and thus show no significant anomalies. These differences arise because during extreme events tropical-extratropical teleconnections are strong while during weak events tropical-tropical teleconnections dominate.

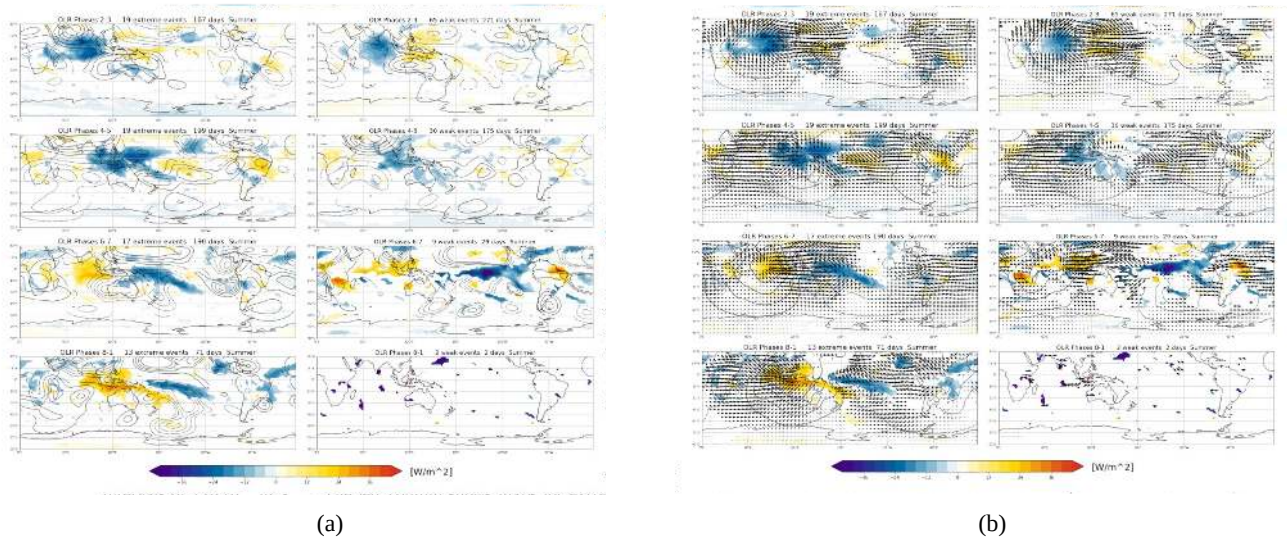


Figure 1. Composite maps of OLR anomalies and 200 hPa contours of eddy-streamfunction (a) and velocity potential (b) with intervals of $2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. The left column shows maps for extreme events, while the right column shows maps for weak events. Rows depict the composite maps of events starting in phases 2-3 (top) till they reach phases 8-1 (bottom). Positive streamfunction values (solid lines) represent a cyclonic gyre and negative values (dashed lines) represent anticyclonic gyre in the southern hemisphere. Each column shows the evolution of events starting in phases 2-3 (top) until they reach phases 8-1 (bottom). Only values significant at the 90% confidence level are displayed.

Regarding the Influence of ENSO on MJO our findings reveal that during the austral summer, extreme MJO events last longer during Neutral (NT) years. For events starting in phases 4-5 and 8-1, La Niña dominates in both duration and frequency relative to El Niño and NT. For MJO events starting in phases 2-3, the SAD appears more intense for phases 4-5 for the three ENSO states but the intensity and extent varies (Figure 2): OLR anomalies are strongest during El Niño years accompanied by well defined circulation anomalies. The SAD is also seen in phases 2-3 during El Niño and La Niña years, but not in NT years. However, in the latter MJO events tend to last longer and the SAD appears with anomalies of opposite sign from those in phases 4-5.

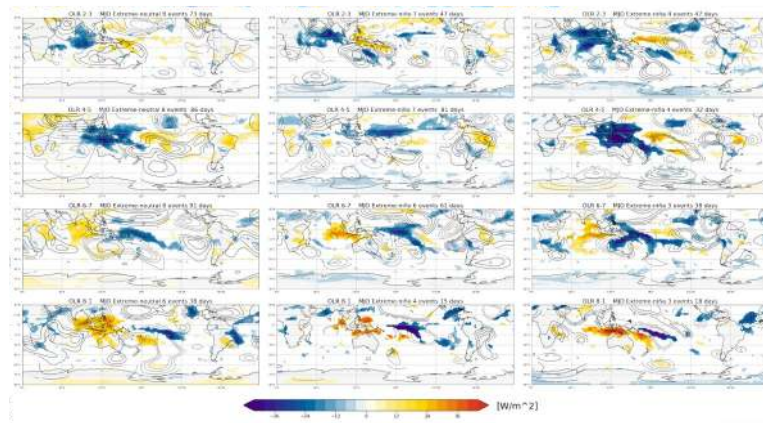


Figure 2: Evolution of austral summer extreme MJO events that start in phases 2-3, during (left column) Neutral ENSO phase, (middle column) El Niño phase and (right column) La Niña phase.

4. CONCLUSIONS

Overall, our results show that the impacts of the MJO over South America will depend not only on the particular phase in which the MJO is, but on its previous evolution, in particular where it initiates. The impact of the MJO is notably modulated by ENSO, with the strength and spatial patterns of anomalies varying according to the phase of initiation of MJO. When MJO is in phase with either EN or LN, these anomalies can be considerably amplified or diminished.

5. REFERENCES

- Ambrizzi, T., de Souza, E. B., & Pulwarty, R. S., 2004.** The Hadley and Walker regional circulations and associated ENSO impacts on South American seasonal rainfall. In *The Hadley circulation: present, past and future* (pp. 203-235). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Barreiro, M. (2010).** Influence of ENSO and the South Atlantic Ocean on climate predictability over Southeastern South America. *Climate dynamics*, 35, 1493-1508.
- Barreiro, M., 2024.** Combined Effects of the Tropical and Extratropical Modes of Variability on Precipitation in Southeastern South America. In *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*.
- Clauset, A., Shalizi, C. R., & Newman, M. E., 2009.** Power-law distributions in empirical data. *SIAM review*, 51(4), 661-703.
- Corral, Á., Minjares, M., & Barreiro, M., 2023.** Increased extinction probability of the Madden-Julian oscillation after about 27 days. *Physical Review E*, 108(5), 054214.
- Deluca, A., & Corral, Á. 2013.** Fitting and goodness-of-fit test of non-truncated and truncated power-law distributions. *Acta Geophysica*, 61, 1351-1394.
- Kiladis, G. N., Dias, J., Straub, K. H., Wheeler, M. C., Tulich, S. N., Kikuchi, K., ... & Ventrice, M. J., 2014.** A comparison of OLR and circulation-based indices for tracking the MJO. *Monthly Weather Review*, 142(5), 1697-1715.
- Ling, J., Zhang, C., Joyce, R., Xie, P. P., & Chen, G., 2019.** Possible role of the diurnal cycle in land convection in the barrier effect on the MJO by the Maritime Continent. *Geophysical Research Letters*, 46(5), 3001-3011.
- Wheeler, M. C., & Hendon, H. H., 2004.** An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly weather review*, 132(8), 1917-1932.

PRECIPITACION Y EROSIDAD EN LA ARGENTINA. VARIABILIDAD Y TENDENCIAS

María Paula Llano^{1,2}
mpllano@at.fcen.uba.ar

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO – FCEN – UBA)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras clave: precipitación, erosión, tendencias.

1) INTRODUCCIÓN

Los cambios en la intensidad y la frecuencia de las precipitaciones son uno de los principales factores que producen la erosión del suelo. Por lo tanto, comprender las características de la precipitación y su variabilidad en relación con la erosión es crucial para evaluar el riesgo de erosión del suelo. La erosividad se ve afectada por características de la precipitación como la cantidad, la duración, la intensidad, la distribución del tamaño de las gotas y la energía cinética (Cerdà, 1997). Dado que estos dos últimos factores requieren de datos continuos o de difícil obtención, existen otros índices basados en datos promedio mensuales. Como es el Índice de Fournier Modificado (MFI por su sigla en inglés) (Arnoldus, 1980) y el Índice de Concentración de Precipitación (PCI) (Oliver, 1980). La erosividad de la precipitación, representada por el MFI, es más severa donde hay altos valores de concentración de precipitación (PCI alto) y también donde la precipitación anual total (Pt) es elevada (de Luis et al., 2010). Por lo tanto, la concentración de la precipitación podría considerarse otro factor importante que afecta la erosividad de la precipitación (González-Hidalgo, 1996). El objetivo del presente trabajo es contribuir al conocimiento de la variabilidad espacial y las tendencias de la precipitación anual (cantidad y concentración) y la erosividad en Argentina y evaluar la estacionalidad de los índices.

2) DATOS Y METODOLOGÍAS

Se emplearon datos mensuales de precipitación de 64 estaciones de Argentina provenientes del Servicio Meteorológico Nacional, para el período 1991-2021. Se calcularon los acumulados anuales y estacionales de las mismas.

Para analizar la concentración de la precipitación se calculó el Índice de Concentración de la Precipitación (PCI) y el Índice de Fourier Modificado (MFI) para cada estación en escala anual y estacional, en base a las siguientes expresiones:

$$PCI = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{(p)^2} 100 \quad (1)$$

$$MFI = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{p} \quad (2)$$

En ambas ecuaciones p_i es la precipitación mensual y p es la precipitación total anual (en el caso de índice estacional, la p corresponde a la precipitación de cada estación; otoño: marzo-abril-mayo, invierno: junio-julio-agosto, primavera: septiembre-octubre-noviembre, verano: diciembre-enero-febrero).

Los valores de PCI presentan una clasificación sugerida por de Luis et al. (2011): menores a 10, la distribución de la precipitación es uniforme (la concentración es baja). Entre 11 y 15, la

concentración es moderada; valores entre 16 y 20 muestran una concentración irregular y PCI por encima de 20 implica una fuerte irregularidad en la distribución de la precipitación (alta concentración).

Los valores de MFI según la clasificación propuesta por CEC (1992): menores a 60 la erosividad es marcadamente baja, entre 60 y 90 es baja, entre 90 y 120 es moderada, entre 120 y 160 es alta y mayores a 160 implican una erosividad muy alta.

Para evaluar los cambios temporales de estos parámetros se empleó el test no paramétrico de Mann-Kendall ((Mann 1945, Kendall 1962) con un 95 % de significancia.

3) RESULTADOS

Para comenzar el análisis en las Tablas 1 y 2 se puede ver el comportamiento espacial de la concentración de la precipitación (PCI) y de la erosividad de la misma (MFI) a nivel anual y estacional. En cuanto a la concentración la categoría moderada domina en todas las escalas temporales, las precipitaciones se reparten a lo largo del período de análisis (año – estación). En verano se destaca un aumento en la categoría de baja concentración, lo cual sugiere que las precipitaciones están distribuidas de forma más uniforme a lo largo de esos tres meses. La categoría de alta concentración se observa en el invierno, período seco en varias estaciones, con mínimos casi nulos de precipitación.

PCI	anual	otoño	invierno	primavera	verano
baja	0	1,6	0	3,1	26,6
moderada	53,1	87,5	65,6	90,6	73,4
irregular	35,9	10,9	29,7	6,3	0
alta	10,9	0	4,7	0	0

Tabla 1: Porcentaje de estaciones en cada una de las categorías de concentración de la precipitación según el índice PCI.

Cuando se analiza la distribución espacial según la erosividad a nivel anual más de un 50% de las estaciones se encuentran categorizadas como con alta o muy alta erosividad. Esta situación se repite en el verano, producto de las altas precipitaciones (resultado no mostrado en este trabajo) y se invierte en el invierno donde dada la escasez de precipitaciones en la mayoría del territorio la categoría de erosividad dominante es la baja.

MFI	anual	otoño	invierno	primavera	verano
muy baja	20,3	26,6	70,3	34,4	23,4
baja	9,4	10,9	17,2	10,9	4,7
moderada	15,6	23,4	6,3	31,3	12,5
alta	32,8	26,6	3,1	14,1	29,7
muy alta	21,9	12,5	3,1	9,4	29,7

Tabla 2: Porcentaje de estaciones en cada una de las categorías de erosividad de la precipitación según el índice MFI.

En un breve análisis temporal de la precipitación se puede mencionar que más de un 60 % de las estaciones muestran tendencias negativas (en menos de 10% de ellas es significativa al 95%) a nivel anual y estacional, salvo para el verano donde la cantidad de estaciones con aumento o disminución de la precipitación es similar (Tabla 3). El índice PCI muestra en rasgos generales que la mayoría de las estaciones tienen una tendencia positiva lo que implica una mayor concentración con el paso de los años en todas las escalas temporales. Mientras que el índice MFI cambia este patrón y ahora la mayoría de las estaciones tienen una tendencia

negativa (en muy pocos casos significativa al 95%).

	Precipitación acumulada					PCI					MFI				
	anual	otoño	invierno	primavera	verano	anual	otoño	invierno	primavera	verano	anual	otoño	invierno	primavera	verano
neg sig (5%)	10,9	4,7	6,3	6,3	4,7	0	0	0	3,1	1,6	3,1	1,6	4,7	0	1,6
negativa	59,4	56,3	68,8	57,8	43,8	28,1	50,0	23,4	39,1	34,4	53,1	57,8	53,1	64,1	45,3
positiva	29,7	35,9	21,9	35,9	50,0	67,2	46,9	59,4	54,7	64,1	43,8	39,1	37,5	35,9	50,0
pos sig (5%)	0	3,1	3,1	0	1,6	4,7	3,1	17,2	3,1	0	0	1,6	4,7	0	3,1

Tabla 3: Porcentaje de estaciones con tendencias (MK-5%) positivas (negativas), significativas o no, para la precipitación acumulada, el índice PCI y el índice MFI a nivel anual y estacional.

4) CONCLUSIONES

El índice PCI a nivel anual nos muestra como las estaciones tienen diferentes regímenes de precipitación, presentando en más de un 50 % de ellas una distribución homogénea a lo largo del año. Mientras que un 10% tiene una distribución completamente irregular, haciendo que la precipitación se concentre en unos pocos meses.

El índice MFI también a nivel anual muestra que la mayoría de las estaciones están en las categorías altas de riesgo de erosividad.

La disminución de la precipitación y de la erosividad, al igual que el aumento de la concentración son cambios que se están observando a nivel global. Es de destacar que esta disminución de la precipitación en la mayoría de las estaciones no necesariamente implica una reducción en el potencial riesgo de erosión del suelo, ya que este puede verse incrementado por el aumento de la concentración.

Agradecimientos:

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de los proyectos: PIP-CONICET n° 112202101 00282CO y UBA n° 20020190100090BA.

REFERENCIAS

Arnoldus H., 1977: Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. FAO Soils Bulletin 34: 39–51.

CEC. 1992: CORINE soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community. Commission of the European Communities: Luxembourg; 97.

Cerdà A., 1997: Rainfall drop size distribution in the Western Mediterranean basin, Valencia, Spain. Catena 30: 169–182.

de Luis M., Gonzalez-Hidalgo J., Brunetti M., Longares L., 2011: Precipitation concentration changes in Spain 1946–2005. Natural Hazards Earth Syst. Sci 11,1259–1265.

González-Hidalgo J.C., 1996: Los índices de agresividad de la lluvia y su aplicación en la valoración de la erosión del suelo. Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología vol. 10, Geoforma Ediciones, Logroño.

Kendall, M., 1962: Rank correlation methods, 3rd edn. Hafner Publishing Company, New York. 321

Mann, H., 1945: Nonparametric tests against trend Econometrica. J. Econometric Soc. 13: 245-324 259.

Oliver J., 1980: Monthly precipitation distribution: a comparative index. Professional Geographer 32(3), 300-309.

EFFECTO DE SOMBRA DE PRECIPITACIÓN EN LOS ANDES NEUQUINOS

Florencia Ghatti Paciaroni^{1,2}, Moira Doyle^{1,3,4}, Maximiliano Viale⁵

florenciaghattipaciaroni@gmail.com.

¹ Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO)

² Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

³ CONICET - Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)

⁴ Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI) - IRL 3351 - CNRS-CONICET-UBA

⁵ Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA)

Palabras clave: Índice de sombra de precipitación, ríos atmosféricos, Patagonia norte

1) INTRODUCCIÓN

La cantidad de precipitación sobre los Andes Patagónicos se caracteriza climatológicamente por ser entre cuatro y diez veces más grande en la ladera a barlovento (Chile) que aquella en la ladera a sotavento (Argentina), observándose también en esta región gradientes significativos de vegetación. En ese sentido, el fenómeno de sombra de precipitación se describe como una “región con una brusca reducción de la precipitación a sotavento de la barrera orográfica, comparada con regiones a barlovento de ella” según la página web del Glosario de Meteorología (https://glossary.ametsoc.org/wiki/Rain_shadow). Sin embargo, esta definición no especifica la escala temporal del fenómeno, la distancia a la que se extiende desde la barrera, los mecanismos físicos que lo generan, ni cómo cuantificar esa reducción notable de precipitación (Stockham et al., 2018). En este sentido, nos enfocamos en este estudio en cuantificar con diferentes métodos o métricas la sombra de precipitación, analizando dos casos de estudio asociados con dos eventos de ríos atmosféricos (RAs) que penetran los Andes patagónicos sobre el norte de la provincia de Neuquén.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos de precipitación horaria y diaria de la región de estudio, definida entre los 36°S–38°S y 70°O–74°O y caracterizada por un gran gradiente longitudinal de precipitación, fueron obtenidos de 138 estaciones (107 chilenas y 31 argentinas) pertenecientes a diferentes organismos oficiales de Argentina (Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro, AIC; Red Hidrológica Nacional argentina, RHN; Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, IANIGLA) y Chile (Dirección General de Aguas de Chile, DGA; Dirección Meteorológica de Chile, DMC y Ministerio de Agricultura de Chile, Agromet) para los periodos del 8 al 9 de junio (Evento 1) y del 26 al 27 de junio (Evento 2) de 2018. En el caso del primer evento se lo puede asociar al impacto de dos ríos atmosféricos consecutivos con dirección predominante del noroeste, mientras que en el segundo evento se lo asocia al impacto de un solo río atmosférico con una orientación más zonal. En ambos casos se

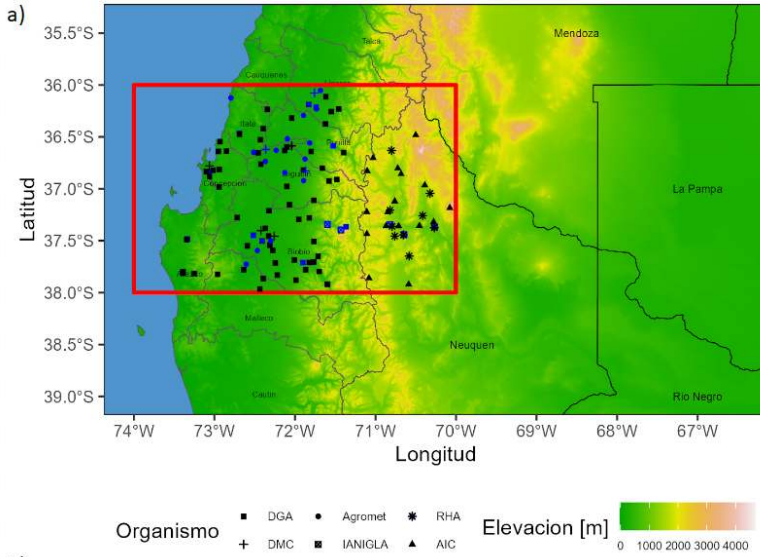


Figura 1: Mapa de la región de los Andes Neuquinos. El recuadro rojo señala el área de estudio. Los símbolos negros (azules) indican la ubicación de pluviómetros con observaciones diarias (horarias).

2013) definido como:

$$R = PO - PE \quad (1)$$

donde PO es la precipitación tri-horaria al oeste de la barrera y PE la precipitación tri-horaria al este. Este índice indica que para valores altos de R la sombra de precipitación es intensa, mientras que los valores bajos indican sombra de precipitación débil.

El segundo método se basa en el cálculo de la fracción de derrame y la distancia de derrame (Sinclair et al., 1997), calculadas cada 3 horas. En el caso de la fracción de derrame se calcula cada 3 horas a partir de dividir el área bajo la curva de mejor ajuste calculada mediante el análisis de Cressman a sotavento ($d > 0$)(Z_s) por el área bajo la curva a ambos lados de la barrera (Z_T):

$$\text{Fracción de derrame} = \frac{\sum Z_s}{\sum Z_T} * 100 \quad (2)$$

Mientras que la distancia de derrame equivale a la distancia corriente abajo de la barrera en la que cae la precipitación a sotavento y se calcula como:

$$\text{Distancia de derrame} = \frac{\sum d_s M_s}{\sum M_s} \quad (3)$$

donde la sumatoria es sobre todas las observaciones normalizadas de precipitación a sotavento (M_s) a una distancia d_s (>0) de la barrera.

El último método se basa en la diferencia de la tasa de precipitación horaria entre el lado oeste de la barrera (PO_{oeste}) y el lado este (PE_{este}), y se compara con los umbrales propuestos por Mass et al.(2015). Estos umbrales se definen como “precipitación mucho mayor a barlovento” ($PO_{\text{oeste}} - PE_{\text{este}} \geq 2.5 \text{ mm/h}$), “moderadamente mayor a barlovento” ($0.25 < PO_{\text{oeste}} - PE_{\text{este}} < 2.5 \text{ mm/h}$)

puede categorizar a los ríos atmosféricos como de categoría 2 según la escala de Ralph (Ralph et al., 2019).

Del total de las estaciones, 55 estaciones chilenas y 26 argentinas realizan observaciones diarias de la precipitación, mientras que en 52 estaciones chilenas y en 5 argentinas las observaciones son horarias (Figura 1). Estas observaciones, tras realizarles un control de calidad y una partición a datos tri-horarios (Sinclair et al., 1997), se utilizaron para cuantificar la sombra de precipitación en cada evento aplicando tres métodos diferentes. El primero consiste en calcular el “índice de sombra de precipitación” (Siler et al.,

), “casi igual en ambos lados” ($|POste - PEste| < 0.25 \text{ mm/h}$), “mayor a sotavento” ($POste - PEste < -0.25 \text{ mm/h}$).

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En el primer caso de estudio, asociado a dos Ríos Atmosféricos consecutivos, ambos con una marcada dirección del noroeste del transporte de vapor integrado en la vertical (IVT), la precipitación fue más homogénea a través de los Andes, con un índice de sombra de precipitación (R) con un valor de -7.24 mm , es decir, sin sombra significativa. En contraste, el segundo caso, con un IVT con dirección zonal, mostró una sombra de precipitación más intensa con un valor de R de 13.58 mm . A su vez, para ambos eventos, se analizaron variaciones intra tormenta mediante el índice R, la fracción y distancia de derrame cada tres horas. Se observó que R se maximiza tras las horas de precipitación más intensa, y que una sombra más fuerte implica menor fracción y distancia de derrame. Además, al comparar tasas horarias de precipitación a ambos lados de los Andes, en el primer evento hubo más horas con mayor precipitación al este, sugiriendo sombra débil; mientras que en el segundo, predominó al oeste, confirmando una sombra más intensa. A partir de estos resultados, se buscará aplicar las metodologías en distintas áreas de la región, considerando que la definición del fenómeno no especifica con claridad su alcance o extensión.

Se observa a su vez, que a pesar de ocurrir en la misma región, estos eventos presentan características diferentes, por lo que la investigación futura de ellos incluye el análisis de las condiciones sinópticas asociadas para comprender la influencia de la circulación atmosférica en la sombra de precipitación.

REFERENCIAS

Mass, C., Johnson, N., Warner, M., & Vargas, R., 2015: Synoptic Control of Cross-Barrier Precipitation Ratios for the Cascade Mountains. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 1014-1028.

Ralph FM, Rutz JJ, Cordeira JM et al., 2019: A scale to characterize the strength and impacts of atmospheric rivers. *Bull Am Met Soc.* 100(2):269–289.

Siler, N., Roe, G., & Durran, D., 2013: On the Dynamical Causes of Variability in the Rain-Shadow Effect: A Case Study of the Washington Cascades. *Journal of Hydrometeorology*, 14(1), 122-139.

Sinclair, M. R., Wratt, D. S., Henderson, R. D., & Gray, W. R., 1997: Factors Affecting the Distribution and Spillover of Precipitation in the Southern Alps of New Zealand—A Case Study. *Journal of Applied Meteorology*, 36(5), 428-442.

Stockham, A. J., Schultz, D. M., Fairman, J. G., Jr., & Draude, A. P., 2018: Quantifying the Rain-Shadow Effect: Results from the Peak District, British Isles. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(4), 777-790.

FRECUENCIA ESTACIONAL DEL VIENTO Y FENÓMENOS DE POLVO ATMOSFÉRICO DURANTE EL PERIODO 2015–2020 EN UNA LOCALIDAD DE LA PUNA NORTE DE ARGENTINA

Samuel Vazquez^{1,2}, Gonzalo Torres^{1,2}, Claudio Pérez^{2,3}, Liliana Lupo^{1,2}
svazquez@fca.unju.edu.ar

¹Instituto de Ecorregiones Andinas (INECOA), Universidad Nacional de Jujuy-CONICET, San Salvador de Jujuy, Argentina.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), FCEN, UBA, CABA, Argentina.

Palabras clave: Rosas de viento, Puna, La Quiaca Observatorio

1) INTRODUCCIÓN

El estudio del viento en regiones áridas posee especial interés debido a los múltiples efectos que éste puede ejercer sobre el ambiente y las actividades humanas. Entre ellos se destacan su relación con eventos de sequía, su capacidad de generar disturbios ecológicos, afectar la producción agrícola, propagar incendios y provocar erosión eólica. Además, el viento es un importante agente de transporte de material particulado en suspensión, como el polvo atmosférico (Terradellas y otros, 2013). Este último fenómeno es relevante en procesos ambientales, climáticos y ecológicos de escala local hasta regional. En la Puna argentina, el polvo atmosférico es un componente central del sistema climático y ecológico, íntimamente relacionado con vientos intensos y la formación de torbellinos. Las condiciones de esta ecorregión favorecen la deflación, abrasión y transporte, especialmente durante la estación seca (abril-octubre) (Gaiero y otros, 2013). En este contexto, comprender el comportamiento estacional del viento es fundamental, al condicionar la frecuencia, intensidad y dirección del transporte del polvo. Al respecto, existen pocos estudios enfocados en la relación viento-polvo atmosférico en la región. Esto se debe, en parte, a la complejidad de la variable y la escasez de estaciones meteorológicas con registros continuos, confiables y de alta resolución temporal que permitan abordar su estudio en detalle. El objetivo de este trabajo es caracterizar la estacionalidad del viento y los fenómenos de polvo atmosférico asociados, en La Quiaca (Jujuy, Argentina) durante el periodo 2015-2020.

2) METODOLOGÍA

Se utilizaron datos horarios de la estación meteorológica “La Quiaca Observatorio” del SMN (22°06'19.99" S, 65°35'55.16" O; 3460 m s.n.m.), correspondientes al período 2015-2020, y se elaboraron rosas de viento mensuales. Para identificar la presencia de polvo atmosférico, se emplearon las categorías de "tiempo presente" codificadas según el sistema SYNOP, elaborado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Estos eventos fueron representados mediante un gráfico de columnas apiladas mensuales.

3) RESULTADOS

Estacionalidad del viento

A lo largo del año se reconocen dos regímenes principales. El de verano, se extiende entre diciembre y abril y se caracteriza por el predominio de viento Noreste (NE) con intensidades en su mayoría bajas (inferiores a 10 m s^{-1}). Entre junio y septiembre se establece el régimen invernal, dominado por viento Noroeste (NO). Las intensidades aumentan ubicándose en el rango medio a alto ($10\text{-}30 \text{ m s}^{-1}$). El predominio de viento NO es más marcado entre junio y agosto, mientras que en septiembre, se restablece gradualmente el régimen de verano. En cuanto a los vientos intensos (velocidad superior a 20 m s^{-1}), presentan características diferentes en cada régimen. En verano, suelen asociarse a dirección NE, mientras que en invierno predominan desde el NO. En ambos casos, se registran con mayor frecuencia durante la tarde (14:00-19:00 hs, datos no mostrados) (Fig.1).

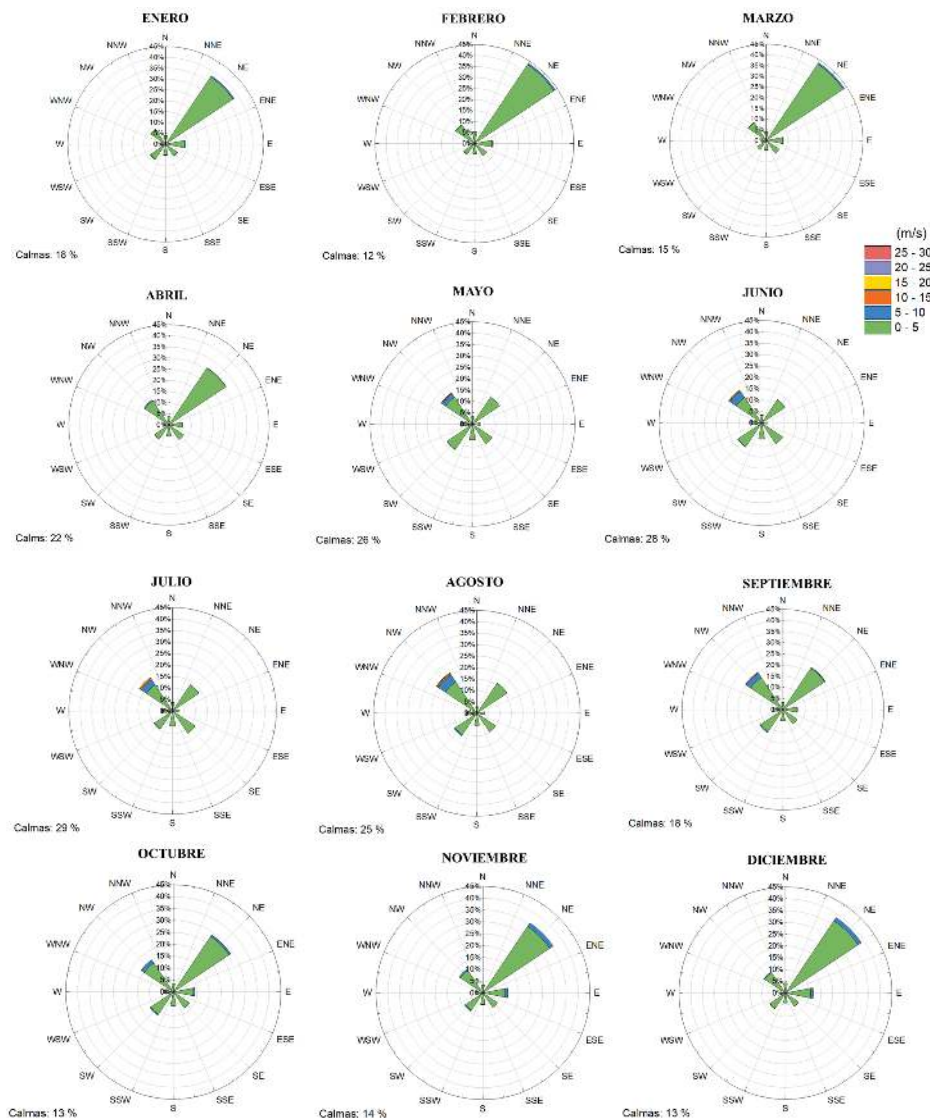


Fig. 1 Rosas de los vientos mensuales en la Quiaca 2015-2020.

El polvo atmosférico en La Quiaca

De diciembre a abril, predominan los eventos de las categorías A (22–39%) y D (10–49%), seguidos por B (15–30%) y C (10–31%) (Fig. 2). De junio a septiembre, dominan los eventos de categoría B, con frecuencias entre 46 y 78%. Le siguen las categorías C (9–20%) y A (2–27%). También se registran eventos correspondientes a las categorías D (2%,

exclusivamente en julio), E (2-4%), F (1-5%), G (1-7%) y H (1-5%), aunque en menores proporciones. La categoría C es la única que se mantiene presente durante todo el año, con pocas variaciones (9-31%).

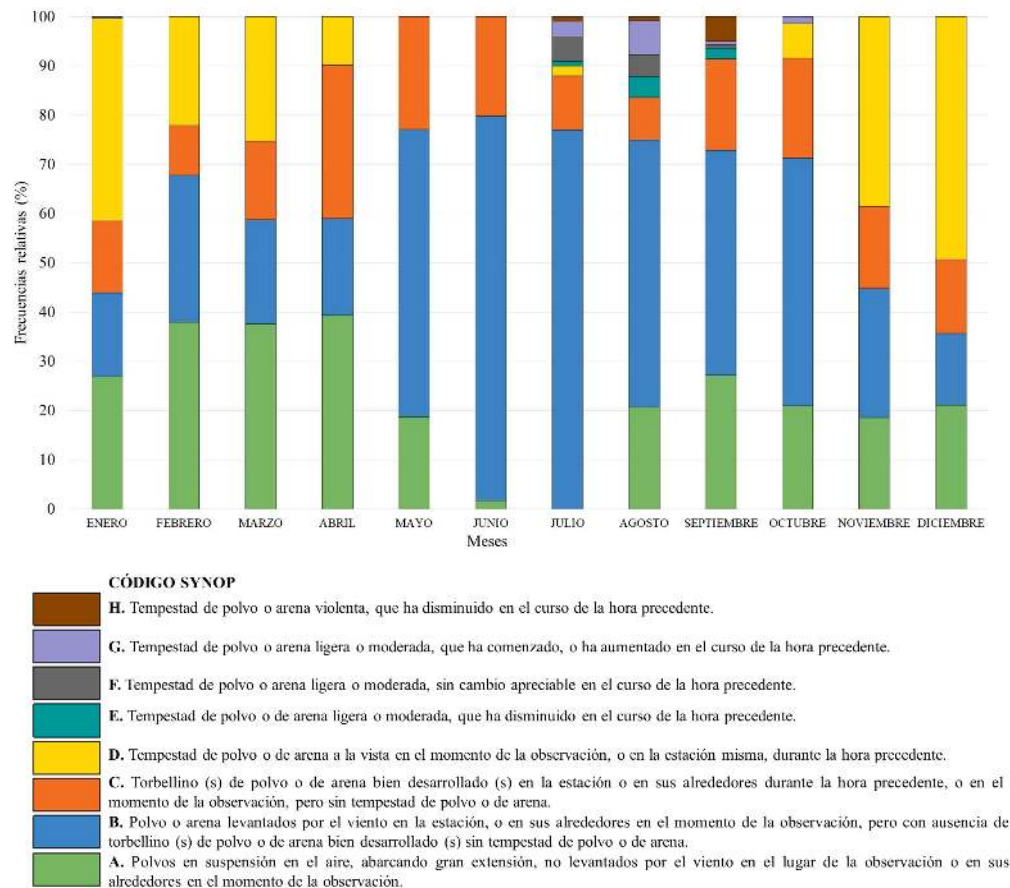


Fig. 2 Frecuencias relativas mensuales de códigos SYNOP referentes a la presencia de polvo atmosférico en la Quiaca 2015-2020.

4) CONCLUSIONES

En verano, ocurren los eventos de categorías A y D, asociados a viento NE de baja intensidad. En invierno, el viento NO, de intensidad moderada a alta, se asocia a un aumento de frecuencia de eventos de categoría B. Se registran eventos menos frecuentes de las categorías E y superiores, que se asocian a intensidades mayores a 20 m s^{-1} en agosto y moderadas ($10\text{-}20 \text{ m s}^{-1}$), en junio, julio y septiembre. La presencia permanente de la categoría C a lo largo del año, puede atribuirse a fenómenos de pequeña escala que se relacionan con el calentamiento de la superficie y no con la ocurrencia de fenómenos de otras escalas.

5) REFERENCIAS

- Gaiero, D.M., Simonella, L.E., Gassó, S., Gili, S., Stein, A.F., Sosa, P., Becchio, R.A., Arce, J., Marelli, H. 2013:** Ground/satellite observations and atmospheric modeling of dust storms originating in the high Puna–Altiplano deserts (South America): Implications for the interpretation of paleo-climatic archives. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(9), 3817–3831.
- Terradellas, E., Cuevas Agulló, E., Baldasano, J. M. 2013:** Polvo mineral en la atmósfera.

SUPERCELDA DE LARGA DURACIÓN DEL 19 DE MARZO DE 2024: ANÁLISIS INTEGRAL CON SENSORES REMOTOS Y CARACTERIZACIÓN DE IMPACTOS

Luciano Vidal¹, Martín Rugna¹, Silvana Carina Bolzi¹, Cam Córdoba Fradinger¹

lvidal@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Argentina

Palabras clave: supercelda, sensores remotos, daños.

1) INTRODUCCIÓN

Numerosos estudios basados en datos de sensores remotos, especialmente de satélites, muestran que la frecuencia de convección húmeda profunda asociada con una variedad de fenómenos meteorológicos severos (ej., granizo grande, lluvias intensas, vientos dañinos, entre otros) es muy alta en la parte sur de Sudamérica, especialmente en Argentina. En particular, Piscitelli et al. (2022) mostró una gran frecuencia de ocurrencia de superceldas productoras de granizo de gran tamaño. Estas tormentas de granizo suelen provocar la pérdida total de las cosechas. Tras estos eventos, el campo afectado es inspeccionado por un perito de seguros para evaluar las pérdidas de rendimiento (Bell et al., 2023). Este diagnóstico in situ muchas veces es difícil y el uso de la tecnología satelital juega un rol clave. Luego, el objetivo del presente trabajo es realizar una revisita de la supercelda de larga duración que afectó el norte de la provincia de Buenos Aires el día 19 de marzo de 2024, a fin de analizar sus características más relevantes a lo largo de su ciclo de vida y también analizar los daños en superficie mediante el uso de información satelital de muy alta resolución espacial.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para la caracterización de la supercelda a lo largo de su ciclo de vida se utilizó información de tres radares meteorológicos doppler banda C (INTA-Anguil, INTA-Pergamino y RMA2-Ezeiza) y datos de los sensores ABI (Schmit et al., 2017) y GLM (Goodman et al., 2013) a bordo del satélite GOES-16. Se realizó una caracterización de la estructura espacial de la tormenta así como de los patrones severos en imágenes satelitales asociados (Bedka et al., 2018), la evolución de la actividad eléctrica (Erdmann and Poelman, 2023) y su relación con los reportes de tiempo severo en superficie obtenidos de la base SAMHI (Salio et al., 2024). Por otro lado, para identificar visualmente los daños causados en superficie, se decidió generar una imagen de diferencia del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) entre el 5/3/2024 (antes) y el 25/3/2024 (después). Los datos de NDVI fueron procesados a partir del producto MYD09GQ del sensor MODIS a bordo del satélite Aqua, que suministra una estimación diaria de la reflectancia superficial en las bandas 1 (0.65 μm) y 2 (0.85 μm) a una resolución espacial de 250 metros.

3) RESULTADOS

En la Figura 1 se muestra la evolución temporal de la supercelda vista desde la óptica de los radares donde se ve una trayectoria cuasi-lineal con momentos de máxima intensidad que coinciden con las zonas de mayor daño en superficie (Fig. 2). La tormenta se inicia cerca de las 15:00 UTC (12:00 HOA) en el límite de los partidos de Trenque Lauquen y Carlos Tejedor y recorre una distancia aproximada de 400 km en unas 5:30 horas, hasta la zona de la zona sur del Gran Buenos Aires, afectando a 11 municipios de la provincia de Buenos Aires. A lo largo de su trayectoria generó diversos daños asociados a la caída de granizo de gran tamaño y a las fuertes rafagas de viento que en algunas zonas superaron los 150 km/h.

Al analizar la imagen de diferencia del NDVI (Fig. 2), se destacan claramente los daños en la vegetación en tonos oscuros provocados por la tormenta (polígono rojo), debido a los cambios en la reflectancia que indican áreas afectadas, algunas con un grado de afectación mayor que otras a lo largo de toda la traza de la tormenta.

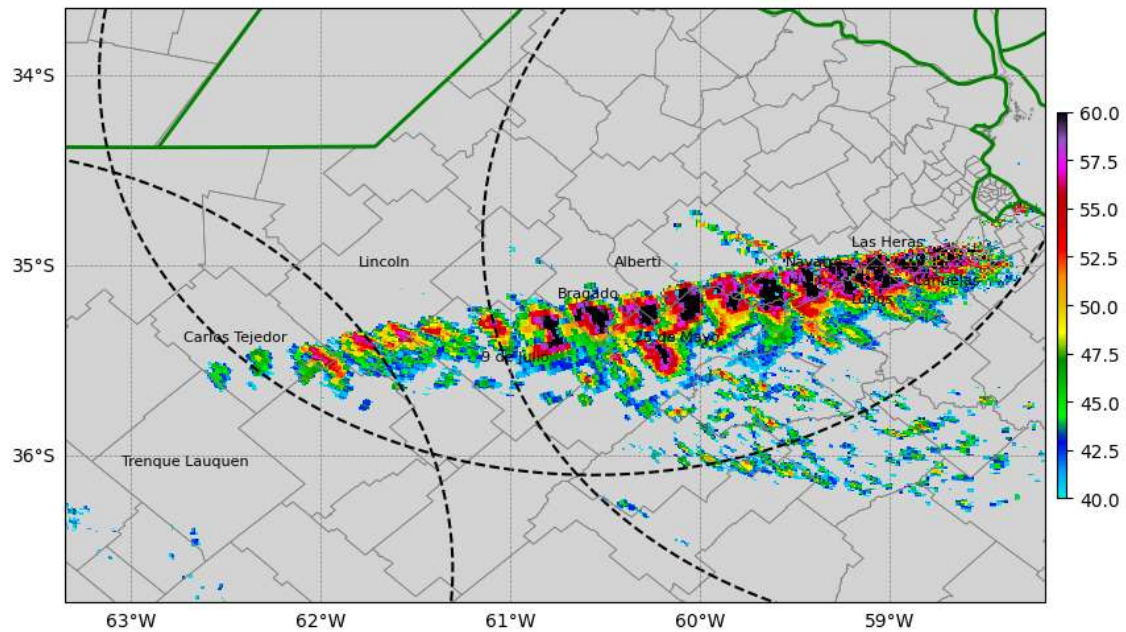


Figura 1: Compuesto temporal de reflectividad máxima de la columna (dBZ) para el 19/3/2024 entre las 15:00 UTC y las 20:30 UTC. Las líneas punteadas indican el área de cobertura de los tres radares utilizados.

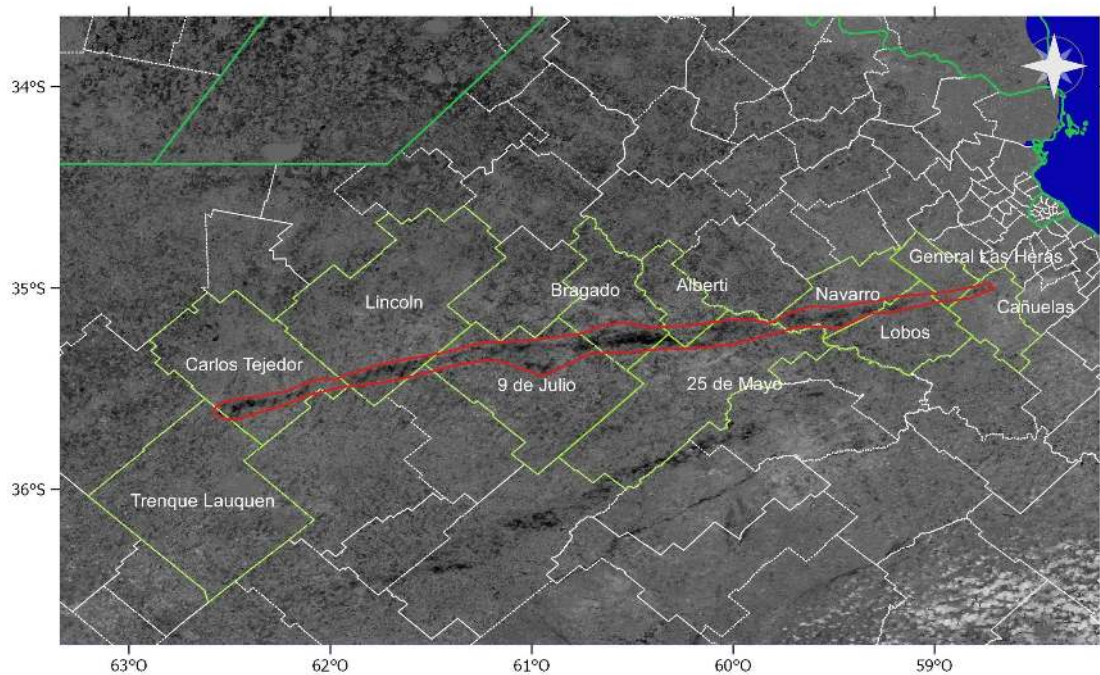


Figura 2: Imagen diferencia temporal de NDVI a partir de datos MODIS. En contorno rojo se marca la traza con los daños en cultivos.

4) CONCLUSIONES

Las tormentas severas generan anualmente pérdidas económicas de miles de millones de dólares en todo el mundo debido a los daños provocados por fuertes vientos y granizo. En particular, muchas de estas tormentas afectan a las regiones agrícolas del centro y norte de Argentina. Por ello, un análisis multisensor integral resulta clave: no solo para estudiar la dinámica y las características principales de estas tormentas, mejorando así los sistemas operativos de monitoreo y pronóstico a muy corto plazo del SMN, sino también para evaluar sus impactos. Este enfoque destaca la sinergia entre distintos sensores remotos, los cuales, al combinarse como un sistema complementario con diversas capacidades, permiten una caracterización más completa de estos eventos meteorológicos de alto impacto.

REFERENCIAS

- Bedka, K., E. M. Murillo, C. R. Homeyer, B. Scarino, and H. Mersiovsky, 2018:** The Above-Anvil Cirrus Plume: An Important Severe Weather Indicator in Visible and Infrared Satellite Imagery. *Wea. Forecasting*, 33, 1159–1181, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0040.1>.
- Bell, J. R., E. F. Wisinski, A. L. Molthan, C. J. Schultz, E. Gilligan, and K. G. Sharp, 2023:** Developing a Hail and Wind Damage Swath Event Database from Daily MODIS True Color Imagery and Storm Reports for Impact Analysis and Applications. *Wea. Forecasting*, 38, 1575–1588, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-22-0210.1>.
- Erdmann, F., and D. R. Poelman, 2023:** Automated Lightning Jump (LJ) Detection from Geostationary Satellite Data. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 62, 1573–1590, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0144.1>.
- Goodman, S. J., and Coauthors, 2013:** The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM). *Atmos. Res.*, 125–126, 34–49, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006>.
- Piscitelli, F., J. J. Ruiz, P. A. Negri, P. V. Salio, 2022:** A multiyear radar-based climatology of supercell thunderstorms in central-eastern Argentina; Elsevier Science Inc.; *Atmospheric Research*; 277; 10-2022; 1-14 <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106283>
- Salio, P., and Coauthors, 2024:** Toward a South American High-Impact Weather Reports Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 105, E1204–E1217, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0063.1>.
- Schmit, T. J., P. Griffith, M. M. Gunshor, J. M. Daniels, S. J. Goodman, and W. J. Lebair, 2017:** A Closer Look at the ABI on the GOES-R Series. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 681–698, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00230.1>.

CONTROLADORES CLIMÁTICOS QUE CONDUCEN A IMPACTOS EN LA CUENCA DEL PLATA: CAMBIOS PLAUSIBLES A FUTURO

Rosales, D. A.^{1,3,4}; Sörensson, A. A.^{2,3,4}; Ruscica, R. C.^{2,3,4}; Mindlin, J.⁵; Cos, P.⁶; Cappelletti L. M.⁷

daira.rosales@cima.fcen.uba.ar. Autora correspondiente.

¹ Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN), Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. (DCAO)

² UBA, FCEyN

³ CONICET – UBA. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA).

⁴ CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI).

⁵ Leipzig Institute for Meteorology, University of Leipzig.

⁶ Earth Sciences Department, Barcelona Supercomputing Center (BSC).

⁷ Fundar, Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: CIDs, *storylines* dinámicos, CMIP6.

1) INTRODUCCIÓN

La Cuenca del Plata ha sido señalada por el IPCC como una de las regiones del mundo donde se tiene mayor certeza en que la precipitación aumentará en el futuro como respuesta al calentamiento global (IPCC, Gutiérrez, J.M. y otros 2021). Sin embargo, esta conclusión se basa en los promedios y la incertidumbre de grandes ensambles de proyecciones de modelos globales climáticos. Consideramos que esta metodología no es óptima ni desde el punto de vista teórico, ya que se promedian modelos cuya circulación general responde distinto al calentamiento global; ni desde el punto de vista del usuario de la información, ya que es de difícil interpretación. Alternativamente, se ha desarrollado una nueva metodología, llamada *storylines* dinámicos, que utiliza información de las mismas proyecciones para obtener escenarios plausibles, dependientes de los cambios en la circulación general –cuantificados a partir de forzantes remotos–, de cambio a futuro de variables locales, como la precipitación (Zappa y Shepherd, 2017). Esta metodología se ha aplicado a la Cuenca del Plata, mostrando que el aumento de la precipitación no es el único escenario plausible en respuesta al calentamiento global, sino que también son plausibles respuestas de la circulación general ante las cuales los cambios en precipitación son muy pequeños o incluso negativos (Mindlin y otros, 2023).

Los controladores climáticos que conducen a impactos (CIDs, por sus siglas en inglés), son condiciones físicas del sistema climático (IPCC, Ranasinghe y otros 2021). Los CIDs, y los índices que los cuantifican, deben ser elegidos de manera consciente, y ser de interés para identificar impactos regionales en al menos un ecosistema y/o actor, sin ser meramente índices estadísticos (p.e. percentil 95 para extremo de precipitación), que no necesariamente son relevantes.

En este trabajo nos proponemos utilizar la metodología de *storylines* dinámicos para explorar cambios futuros de CIDs que son relevantes para la Cuenca del Plata: temperatura estacional; precipitación estacional; peligrosidad del fuego; aridez; sequías agro- y ecológicas, entre otros.

2) MATERIALES Y METODOLOGÍA

Utilizamos 30 simulaciones CMIP6, históricas y de proyecciones SSP8.5 durante 1950-1969 y 2080-2099 respectivamente. Empleamos la temperatura a 250 hPa y viento zonal a 50 hPa para cuantificar la circulación general y la temperatura a 2 metros para cuantificar el calentamiento global, necesarios para la metodología de *storylines*. Calculamos los *storylines* a escala estacional, y no anual para mayor robustez (Mindlin et al., 2024). Los forzantes remotos de circulación general se basan en Mindlin y otros (2020), y son el calentamiento de la alta troposfera tropical; e intensidad del vórtice

estratosférico polar, excepto para dic-ene-feb dónde el vórtice es muy débil por lo que utilizamos el retardo en la fecha de su ruptura. Asumimos escalado de patrones (Tebaldi y Arblaster, 2014) para normalizar por el calentamiento global, y aplicamos luego la metodología descrita por Mindlin y otros (2020).

Los CIDs son cuantificados a través de índices. Por ejemplo, la precipitación estacional se cuantifica a través de la precipitación media en dic-ene-feb; y la peligrosidad de fuego a través del índice de peligrosidad del fuego (Van Wagner, 1987), que utiliza las variables precipitación, temperatura a 2 metros, viento y humedad relativa, en frecuencia diaria, en la estación jul-ago-sep, ya que es la época del año en que se observan los valores más altos en la actualidad (no mostrado). La cantidad de simulaciones utilizada para los *storylines* de cada índice depende exclusivamente de la disponibilidad de los datos necesarios para calcularlo.

Los resultados obtenidos representan los escenarios plausibles del cambio en los índices de CIDs, por grado de calentamiento global, dado por el cambio en un desvío estándar de los forzantes remotos.

3) RESULTADOS

En la Figura 1a (1b) se muestra el cambio de ‘precipitación media’ de dic-ene-feb, para el *storyline* correspondiente a un alto (bajo) calentamiento de la troposfera tropical y un bajo (alto) retardo de la ruptura del vórtice. Se observa como el cambio en los forzantes remotos de circulación general induce patrones distintos de precipitación. Por un lado, en el sur de la cuenca, si bien ambos *storylines* muestran aumento de la precipitación, la magnitud en el panel b es el doble que la del panel a. Por otro lado, hacia el norte, la diferencia de los *storylines* es tal que el signo de cambio en la precipitación es opuesto, siendo negativo en el panel a y positivo en el b.

La Figura 2a (b) se presenta el *storyline* correspondiente a un alto (bajo) calentamiento de la troposfera tropical y un alto (bajo) fortalecimiento del vórtice, del cambio del CID ‘índice de peligrosidad del fuego’ en jul-ago-sep, por grado de calentamiento global. Se observa principalmente que, al norte de la cuenca, el índice de peligrosidad de fuego aumentará en mayor magnitud en el *storyline* a que en el b.

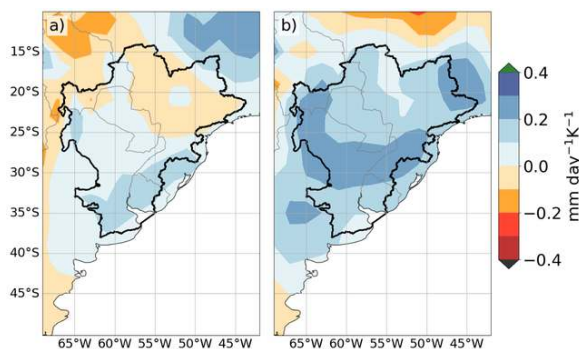


Figura 1. *Storylines* de cambio de precipitación media por grado de calentamiento global en dic-ene-feb.

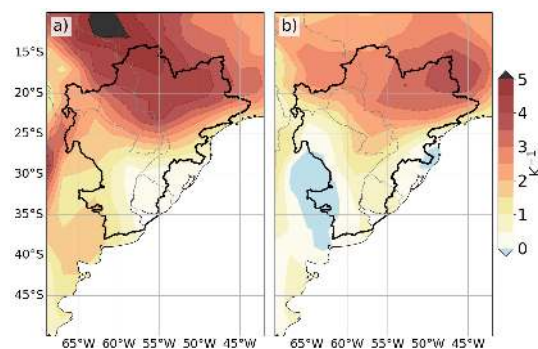


Figura 2. *Storylines* de cambio en el índice de peligrosidad de fuego por grado de calentamiento global en jul-ago-sep.

4) CONCLUSIONES

La metodología de *storylines* dinámicos nos permite tener resultados dependientes de la incertidumbre de la circulación general y el calentamiento global para entender cambios plausibles que pueden suceder a futuro. Gracias a esta metodología podemos distinguir cómo responde el patrón de cambio en los CIDs ante distintos cambios de los forzantes remotos de circulación general. Por ejemplo, al norte de la cuenca, en un escenario de 2°C de calentamiento global, la precipitación en dic-ene-feb puede disminuir 0,2 mm/día en un *storyline*, o aumentar 0,4 mm/día en el otro; mientras que el índice de peligrosidad del fuego en jul-ago-sep aumentará con una magnitud de 9 en un *storyline* y 5 en el

otro. Esta forma de comunicar las proyecciones es novedosa y puede ser especialmente útil para tomadores de decisión y usuarios en general, pudiendo facilitar la comprensión de los efectos del cambio climático en variables locales y su incertidumbre asociada.

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT), Argentina [PICT 2021-I-A-01097]; CONICET, Argentina [PIP-112-2020-0102141CO]; y a la beca de movilidad de la Fundación Montcelimar (Montgat, España; NIF: G61260477).

REFERENCIAS

Gutiérrez, J.M., R.G. Jones, G.T. Narisma y otros 2021: Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1927–2058

Mindlin, J., Shepherd, T.G., Vera, C.S., et al., 2020: Storyline description of Southern Hemisphere midlatitude circulation and precipitation response to greenhouse gas forcing. *Climate Dynamics* 54: 4399–4421.

Mindlin, J., C. S. Vera, T. G. Shepherd, and M. Osman, 2023: Plausible Drying and Wetting Scenarios for Summer in Southeastern South America. *J. Climate*, 36, 7973–7991.

Mindlin, J., Vera, C.S., Shepherd, T.G., Doblas-Reyes, F.J., Gonzalez-Reviriego, N., Osman, M., Terrado, M., 2024: Assessment of plausible changes in Climatic Impact-Drivers relevant for the viticulture sector: a storyline approach with a climate service perspective. *Climate Services* 34: 100480.

Ranasinghe, R., A.C. Ruane, R. Vautard y otros, 2021: Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1767–1926

Tebaldi, C., Arblaster, J., 2014: Pattern scaling: Its strengths and limitations, and an update on the latest model simulations. *Climatic Change* 122(3): 459-471.

Van Wagner, C. E., 1987: Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System, 0-662-15198-4 (vol. 35).

Zappa, G., Shepherd, T.G., 2017: Storylines of Atmospheric Circulation Change for European Regional Climate Impact Assessment. *Journal of Climate* 30: 6561–6577.

SURGIMIENTO DE LA SEÑAL DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS TEMPERATURAS DE SUDAMÉRICA

Dalia V. Panza^{1,2,3}, Leandro B. Díaz^{1,2,3}, Carolina S. Vera^{1,2,3}

dalia.panza@cima.fcen.uba.ar (Dalia V. Panza)

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

² CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³ CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: Tiempo de surgimiento, CMIP6, datos observacionales

1) INTRODUCCIÓN

El cambio climático antropogénico está modificando las propiedades estadísticas del sistema climático global. En este contexto, uno de los enfoques más utilizados para caracterizar el momento en que las condiciones climáticas comienzan a diferir significativamente de un estado de referencia es el concepto de tiempo de surgimiento o emergencia (ToE, por sus siglas en inglés). El ToE se define como el momento en que una señal se vuelve distinguible respecto de la variabilidad interna de un periodo base, indicando así la aparición de un nuevo estado climático (Doblas-Reyes et al. 2021).

Estimar el ToE resulta fundamental para anticipar y mitigar los impactos del cambio climático, ya que permite identificar cuándo las condiciones actuales dejan de ser compatibles con las que históricamente han moldeado los ecosistemas y las sociedades. Si bien se ha documentado que la señal del calentamiento global ha emergido a escala global, su caracterización a escalas regionales y estacionales sigue siendo objeto de estudio, debido a la influencia de la variabilidad natural y a las incertidumbres asociadas a los distintos métodos de detección, fuentes de información y variable analizada.

En este trabajo se calcula y analiza el ToE de la temperatura anual media sobre Sudamérica. Para ello, se emplean tanto datos provenientes de simulaciones numéricas de 10 modelos climáticos acoplados pertenecientes al conjunto CMIP6, como de bases de datos observacionales.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El ToE de la temperatura media anual del aire en superficie se estimó a partir de dos fuentes principales de información: datos observacionales y simulaciones numéricas de modelos climáticos. En cuanto a las simulaciones, se utilizaron 10 modelos del conjunto CMIP6, considerando los experimentos históricos y de la proyección ssp585, abarcando el período 1901–2100. Se seleccionaron aquellos modelos que cuentan con al menos 5 miembros en ambos experimentos, para considerar la incertidumbre asociada a la variabilidad interna. Para los datos observacionales, se emplearon las bases Berkeley Earth (BEST) y la Climate Research Unit (versión 4.09, CRU), disponibles para el período 1901–2024. Todos los datos fueron remuestreados a una resolución espacial de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$.

La detección del ToE se basó en la prueba no paramétrica de Kolmogorov-Smirnov

(KS), la cual permite contrastar si dos muestras provienen de la misma distribución, siguiendo la metodología propuesta por King et al. (2015). Se comparó la distribución del periodo de referencia 1901–1930 con distribuciones correspondientes a ventanas móviles de 20 años, avanzando en pasos de 5 años desde 1931 hasta 2100 para los modelos, o hasta 2024 para las observaciones. El ToE se define como el primer año en el que la diferencia es significativa al nivel del 5% y se mantiene significativa hasta el final del período. En el caso de los modelos, se calculó el ToE individualmente para cada miembro.

3) RESULTADOS

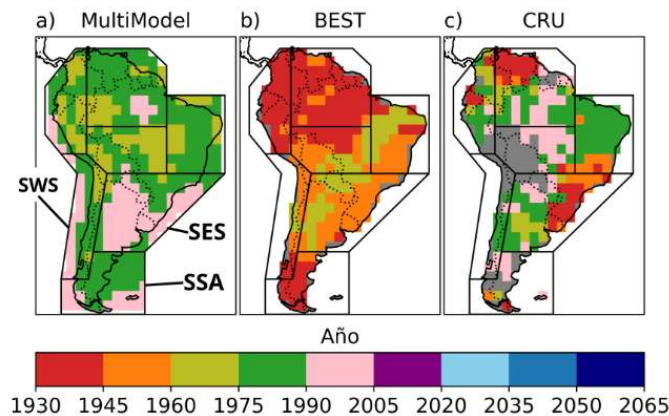


Figura 1: ToE de la señal de cambio climático (año) en la temperatura media anual para (a) mediana multi-modelo de los modelos CMIP6 (b) BEST y (c) CRU. Los polígonos negros delimitan las regiones definidas en el sexto reporte del IPCC. En el panel (a) se indican las regiones SWS, SES y SSA.

La Figura 1 muestra los mapas del ToE de la señal de cambio climático en la temperatura anual sobre Sudamérica para la mediana multi-modelo, BEST y CRU. En el caso de la mediana multi-modelo, el ToE ocurre en gran parte del continente entre 1960 y 1990, salvo en el sudeste de Sudamérica, donde se registran valores más tardíos, entre 1990 y 2005. Los resultados de las bases de datos observacionales difieren significativamente entre sí y con respecto a los de las simulaciones. En BEST, el ToE es detectable en toda Sudamérica antes de 1975, evidenciando un surgimiento más temprano de la señal de cambio climático que la

estimada por los modelos. Por el contrario, en CRU la señal surge entre 1930 y 2005 en el norte y noreste del continente, pero no se detecta durante el período 1931–2024 en gran parte del sur y oeste de Sudamérica. En términos generales, se observan importantes discrepancias entre las tres fuentes de información, aunque puede afirmarse que el ToE es más claro en el norte del continente, mientras que la detección presenta mayor incertidumbre hacia el centro y el sur.

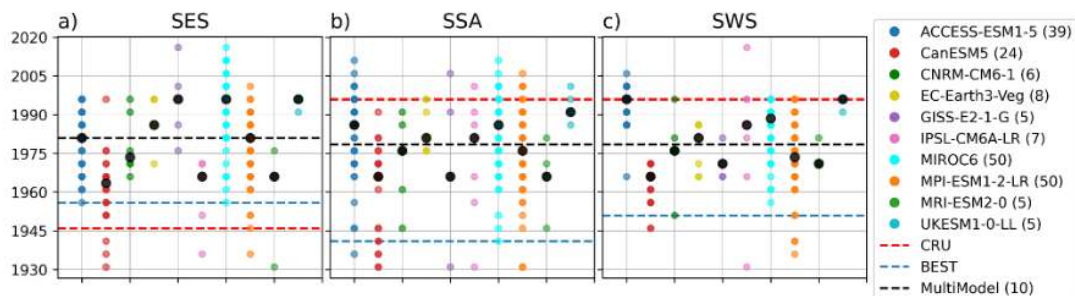


Figura 2: ToE de la señal de cambio climático (año) del promedio regional de temperatura anual para cada simulación de los modelos de CMIP6 en (a) sudeste de Sudamérica (SES), (b) sur de Sudamérica (SSA) y (c) sudoeste de Sudamérica (SWS). Los círculos negros indican la mediana del ToE para cada modelo. Las líneas horizontales discontinuas muestran el ToE para la mediana multi-modelo (negro), para CRU (rojo) y para BEST (azul). En la leyenda, entre paréntesis, se indica la cantidad de miembros de cada modelo.

La Figura 2 muestra el ToE de la señal de cambio climático en la temperatura anual promediada regionalmente en el sudeste de Sudamérica (SES), sur de Sudamérica (SSA) y sudoeste de Sudamérica (SWS), para cada simulación individual de los modelos de CMIP6, la respectiva mediana multi-miembro para cada modelo, la mediana multi-modelo y el ToE según CRU y BEST. En SES y SWS, el ToE mediano de cada modelo se ubica entre 1960 y 2000 aproximadamente, aunque en SES se observa una dispersión mucho mayor entre miembros y modelos que en SWS. En SSA, el ToE mediano se sitúa entre 1960 y 1990, lo que indica una surgencia más temprana respecto a las otras dos regiones, aunque también con una marcada dispersión entre simulaciones. Asimismo, se identifican modelos que presentan sistemáticamente ToEs más tempranos o tardíos. Por ejemplo, ACCESS-ESM1-5, MIROC6 y UKESM1-0-LL muestran ToEs medianos relativamente más tardíos, mientras que CanESM5 presenta surgencias más tempranas en las tres regiones. También se destaca una gran incertidumbre relacionada a los ToEs regionales de las bases de datos observacionales en SSA y SWS.

4) CONCLUSIÓN

La señal del cambio climático en la temperatura anual de Sudamérica es detectable tanto en simulaciones numéricas como en fuentes observacionales. Sin embargo, el ToE muestra una marcada dependencia de la fuente de información utilizada: mientras que las simulaciones y la base de datos BEST evidencian el surgimiento de la señal antes de 1990 en la mayor parte del continente, la base CRU presenta múltiples puntos sin detección de ToE. Las regiones del norte y el extremo sur de Sudamérica muestran los ToE más tempranos, mientras que el sudeste y sudoeste del continente presentan mayor incertidumbre. El análisis regional del ToE a partir de cada simulación individual revela una alta dispersión entre miembros, especialmente en las regiones del sudeste y sudoeste de Sudamérica. Esto resalta la importancia de contar con grandes ensambles que permitan estimar de manera robusta la influencia de la variabilidad interna sobre métricas de detección como el ToE. Si bien para la temperatura anual el surgimiento de la señal de cambio climático es detectable, se vuelve fundamental profundizar el análisis regional desde una perspectiva estacional y en otras variables, como la precipitación, utilizando y comparando distintas metodologías disponibles.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por los proyectos CONICET-PIBAA 28720210100758CO, CONICET-PIP 11220200102038CO, UBACYT 20020220100075BA y PICT-2021-GRF-TI-00498. Se agradece también al Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECT).

REFERENCIAS

- Doblas-Reyes FJ, Sorensen AA, Almazroui M, Dosio A, Gutowski WJ, Haarsma R, Hamdi R, Hewitson B, Kwon W-T, Lamptey BL, Maraun D, Stephenson TS, Takayabu I, Terray L, Turner A, Zuo Z (2021):** Linking global to regional climate change. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Pean C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekci O, Yu R, Zhou B (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 1363–1512. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.012>
- King, A. D., Donat, M. G., Fischer, E. M., Hawkins, E., Alexander, L. V., Karoly, D. J., Dittus, A. J., Lewis, S. C., & Perkins, S. E. (2015):** The timing of anthropogenic emergence in simulated climate extremes. *Environmental Research Letters*, 10(9), 094015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/094015>

DETECCIÓN DE LA FASE ACTIVA DEL SISTEMA MONZÓNICO SUDAMERICANO Y ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN ACUMULADA

Victoria Vahnovan^{1,2}, Lorenzo Ricetti^{3,4}; Santiago I. Hurtado⁴

Autora correspondiente: vvahnovan@fcaglp.unlp.edu.ar

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP)

²Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

³Grupo de investigación en Clima, Variabilidad y Extremos (CLAVE), Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (FCAG-UNLP)

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: Monzón Sudamericano, Ciclo Anual, Wavelet, SAMS, CHIRPS, Brasil.

1) INTRODUCCIÓN

El Sistema Monzónico de Sudamérica (SAMS, por sus siglas en inglés) es un sistema que domina la circulación atmosférica y la distribución de precipitaciones sobre gran parte de la zona tropical y subtropical de América del Sur durante el verano austral. Abarca una amplia región que se extiende desde la Cuenca Amazónica hasta la Cuenca del Plata, y se origina inicialmente por el calentamiento diferencial entre el continente y el océano. Esta circulación monzónica es fundamental para el ciclo hidrológico regional y ejerce una fuerte influencia sobre la agricultura, los recursos hídricos y la ocurrencia de eventos climáticos extremos.

En estudios previos, la detección de la fase activa del SAMS se ha realizado a partir del análisis de distintas variables (como OLR, precipitación, viento y flujo de humedad, entre otras) utilizando diversas metodologías, algunas basadas en el régimen de precipitación y otras basadas en la dinámica de la atmósfera. A pesar de las diferencias en las metodologías, existe un consenso general de que el inicio medio de la temporada de lluvias, es decir el comienzo de la fase activa del SAMS, se encuentra entre mediados de octubre y comienzos de noviembre, mientras que su finalización se da entre marzo y abril, aunque con diferencias regionales (Marengo et al., 2010).

El SAMS está modulado por una combinación de forzantes del sistema climático. Entre los principales se destaca El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), que modula la precipitación en Sudamérica. También juegan un papel importante las oscilaciones intraseasonales, como la Oscilación de Madden-Julian, y las variaciones en la circulación de gran escala, como la posición e intensidad de la Alta de Bolivia. Además, forzantes de escala interdecadal, como la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), pueden modificar la estacionalidad y la intensidad del monzón, condicionando su impacto en distintas regiones del continente (Marengo et al., 2010).

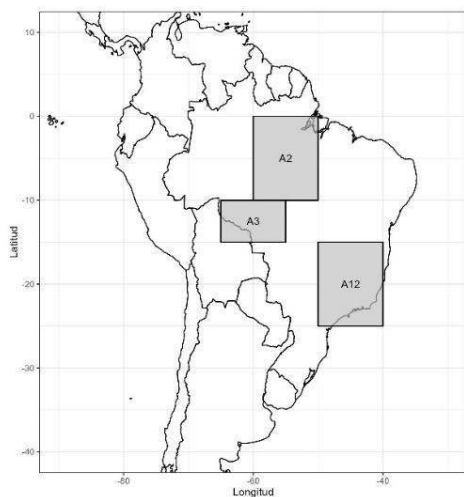
El objetivo de este trabajo es evaluar una metodología objetiva para la detección de las fechas de inicio y finalización de la fase activa del SAMS. Además, se busca comparar la

variabilidad de la precipitación durante dicha fase en tres regiones de Brasil que presentan un marcado régimen monzónico.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos del acumulado pentadico de precipitación del periodo 1981-2022 con una resolución espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ obtenidos de la base de datos The Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS). Las áreas seleccionadas en este trabajo son tres regiones de Brasil que presentan un régimen monzónico bien definido (A2, A3 y A12; Figura 1). La elección se basó siguiendo a Raia y Cavalcanti (2008), quienes señalan que A3 y A12 presentan un ciclo de precipitación estacional muy bien definido, mientras que A2 es una de las áreas que presenta la mayor precipitación anual. Además, A3 es la única que presenta una inversión del viento zonal y ha sido definida como el núcleo del monzón.

Para la detección del inicio y final de la fase activa del SAMS en cada una de las áreas



seleccionadas, se utilizó la metodología propuesta por Ricetti et al. (2024), basada en un análisis de puntos de quiebre sobre un ciclo anual suavizado. De esta manera, se estimó la serie interanual del acumulado de precipitación correspondiente a la fase activa del SAMS para cada una de las regiones. Las tendencias de dichas series se analizaron mediante el modelo de regresión de Theil-Sen, y la significancia estadística de las tendencias detectadas se evaluó mediante un test de correlación. Además, se llevó a cabo un análisis espectral utilizando la potencia media de wavelet testeando con ruido blanco.

Figura 1. Región de estudio. En rectángulos grises se marcan las tres regiones de estudio (A2, A3 y A12)

3) RESULTADOS

La región A3 fue la que mostró el inicio de la fase activa más tempranamente en la pentada 54 y su final en la pentada 23 del siguiente año (Figura 2b). Por su parte, A12 mostró un inicio en la pentada 56 y su finalización en la pentada 22 (Figura 2c), mientras que A2 mostró un inicio más tardío en la pentada 58 y la finalización en la pentada 28 (Figura 2a). De esta manera el inicio de la fase húmeda del SAMS en Brasil se da entre fines de septiembre y mediados de octubre, mientras que el decaimiento entre mediados de abril y mayo. Las tres regiones consideradas presentan un periodo activo similar, alrededor de las 40 pentadas (200 días o 7 meses) siendo A2 la región con el periodo más extenso de 42 pentadas (210 días). Estos resultados son consistentes con trabajos previos, quienes identifican el inicio de la fase activa entre la pentada 58 y la 62 (Marengo et al., 2010).

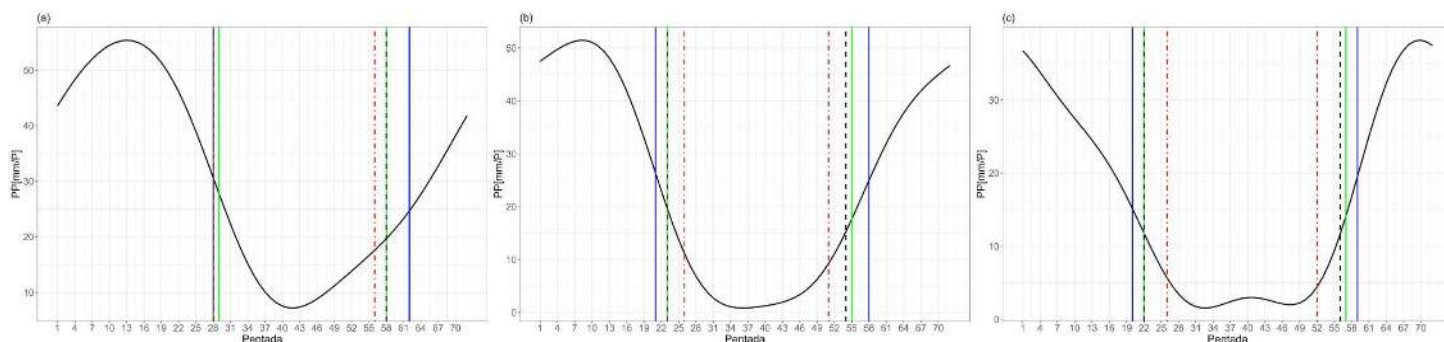


Figura 2: Ciclo suavizado de cada región (A2(a), A3(b), A12(c)) (curva negra). Quiebres identificados por los test de Pettit (línea roja), Buishand-R (línea verde) y SNHT (línea azul). Las líneas verticales negras muestran el promedio de los quiebres encontrados para las fechas de inicio y final.

La serie interanual de precipitación acumulada en la fase activa del SAMS de la región A2 (A12) mostró una tendencia creciente (decreciente) estadísticamente significativa. Por su parte, A3 mostró una leve tendencia creciente, aunque no significativa. El análisis espectral de la serie de A2 arrojó periodicidades significativamente distintas del espectro nulo en torno a los 3 y 4,6 años. De manera similar, el espectro correspondiente a la serie de A3 mostró periodicidades dominantes cercanas a los 3 años. Por su parte, la serie correspondiente a A12 mostró una marcada variabilidad decadal con una periodicidad significativa en torno a los 13,7 años. Estos resultados son consistentes con los forzantes que influyen la variabilidad de la precipitación en la región de estudio, siendo la mayor parte de la variabilidad interanual del SAMS explicada por el ENSO, mientras que también se identificaron modos de variabilidad interdecadal asociados a los cambios de fase de la ODP (Marengo et al., 2010).

4) CONCLUSIONES

La metodología propuesta logró identificar estadísticamente la fase activa del SAMS en las tres regiones consideradas, siendo éstas consistentes con trabajos previos. En general, la duración de la fase activa no varió considerablemente entre regiones, aunque las pentadas de inicio y final variaron espacialmente. En particular, el inicio más temprano se registró en la región núcleo del SAMS, mientras que el decaimiento se dio de sur a norte. Los resultados de este trabajo evidencian la heterogeneidad espacial que existe en la precipitación de Brasil en la fase activa del SAMS, dado que las regiones presentaron comportamientos distintos en su tendencia y periodicidades dominantes.

REFERENCIAS

- Marengo, J. A., Liebmann, B., Grimm, A. M., Misra, V., Silva Dias, P. D., Cavalcanti, I. F. A., ... & Alves, L. M. (2010). Recent developments on the South American monsoon system.
- Raia, A., Cavalcanti, I.F.A., 2008. The life cycle of the south american monsoon system. *Journal of Climate* 21, 6227–6246.
- Ricetti, L., Hurtado, S. I., Agosta Scarel, E. A., & Cesanelli, A. (2024). Variabilidad del caudal del río Neuquén en las fases de su ciclo anual y su relación con índices climáticos. *Meteorología*, 49.

PROPAGACIÓN DE SEQUÍAS EN CINCO CUENCAS DEL CENTRO-SUR DE CHILE

Emilia Figueiras^{1,2}, Mauricio Zambrano-Bigiarini^{3,4}, Pablo C. Spennemann², Mauricio Galleguillos^{4,5}, Mercedes Salvia⁶, Oscar M. Baez Villanueva⁷, Giancarlo Casanova⁵ y Mercedes Peretti¹

efigueiras@agro.uba.ar. Autor/a correspondiente.

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

³Universidad de la Frontera, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Ingeniería Civil, Temuco, Chile.

⁴Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2).

⁵Universidad Adolfo Ibáñez, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Santiago de Chile, Chile.

⁶Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Grupo de Teledetección Cuantitativa, Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, UBA-CONICET).

⁷Hydro-Climate Extremes Lab (H-CEL), Ghent University, Ghent, Bélgica.

Palabras clave: índices de sequía, caudales, ciclo hidrológico.

1) INTRODUCCIÓN

Los distintos tipos de sequía (e.g. meteorológica, agrícola, hidrológica) son etapas progresivas del mismo proceso en su propagación a través del ciclo hidrológico. Esta propagación comienza como un déficit de precipitación, seguido por una disminución en la humedad del suelo, que subsecuentemente impacta el estado de la vegetación y los caudales (Zhang et al., 2022). Pero las relaciones temporales entre la precipitación, humedad del suelo y caudales son sumamente complejas. La propagación de la sequía depende de procesos hidrológicos, como la evaporación, y a su vez de las características geomorfológicas y físicas de las cuencas, como el tipo de cobertura, pendiente y tipos de suelo. Este trabajo tiene como objetivo cuantificar la tasa de propagación de las sequías y las tasas de propagación de intensidad y duración de sequía meteorológica a agrícola e hidrológica en 5 cuencas con distintas características hidroclimáticas y ecológicas ubicadas a través de Chile continental.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El área de estudio del presente trabajo comprende cinco cuencas en la región centro-sur de Chile: Pedernal en Tejada, Sobrante en Piadero (ambas subcuencas de la cuenca del Río Petorca en Longotoma), Mapocho en Los Almendros, Cauquenes en Desembocadura y Trancura antes de Llafenco, las cuales presentan diferentes características (Figura 1a).

Se utilizaron datos mensuales para el período 1990-2020 provenientes de tres fuentes: i) precipitación del CR2MET (0.05°x0.05°, Boisier, 2023), ii) humedad del suelo en la zona de raíces (7-100 cm) del reanálisis ERA5 (0.25°x0.25°) y iii) caudales observados en estaciones fluviométricas ubicadas en el punto de cierre de cada cuenca, del conjunto de datos disponibles en la plataforma CAMELS-CL (Alvarez-Garretón et al., 2018). A partir de estos datos, se calcularon los siguientes índices en escala de acumulación de 1 mes: i) Índice Estandarizado de la Precipitación (SPI), ii) Índice Estandarizado de la Humedad del Suelo (SSMI) e iii) Índice Estandarizado de Caudales (SSI). Se calcularon los índices ajustando la precipitación y la humedad del suelo a una distribución Gamma y log-logística a los caudales,

luego se realizó un promedio para cada cuenca. Se utilizó el umbral de -0.84 para definir periodos de sequía en los índices seleccionados.

Se calcularon tres parámetros para caracterizar la propagación de las sequías. Por un lado, la tasa de propagación R , que representa la proporción de sequías meteorológicas que se propagan a otros tipos de sequía (Zhang et al., 2022), definida como:

$$R = \frac{m}{n} \quad (1)$$

Donde m es el número de sequías agrícolas o hidrológicas y n el número de sequías meteorológicas.

Por otro lado, para evaluar cambios en la intensidad y duración de las sequías durante la propagación, se calcularon los ratios de propagación de intensidad (RI) y duración (RD), que comparan las distribuciones acumuladas de intensidad y duración entre sequía meteorológica y sequía agrícola o hidrológica, mediante el análisis de sus funciones de distribución acumulativa empíricas (Apurv y Cai, 2020) y se obtienen de la siguiente forma:

$$Rx = \prod_{j=1}^{10} \left(\frac{qx2_j}{qx1_j} \right)^{1/10} \quad (2)$$

Donde Rx representa el ratio de propagación para x , que puede ser I para intensidad (RI) o D para duración (RD), $qx1_j$ representa el j -ésimo cuantil de la distribución de frecuencias acumuladas de sequías meteorológicas y $qx2_j$ representa el j -ésimo cuantil de la distribución de frecuencias acumuladas de sequías agrícolas o hidrológicas.

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La propagación de sequías meteorológicas (SPI-1) hacia sequías agrícolas (SSMI-1) e hidrológicas (SSI-1) en las cinco cuencas analizadas se cuantifica en la Tabla I a través de R , RI y RD. La propagación hacia sequía agrícola es un proceso con alta probabilidad de ocurrencia, con tasas (R) que superan el 65% en la mayoría de las cuencas, alcanzando un 80% en Pedernal. La propagación hacia SSMI-1 tiende a amplificar la intensidad respecto a la sequía meteorológica ($RI > 1$ en todas las cuencas) y en mayor medida su duración (RD entre 1,31 y 2,28). La propagación hacia los caudales (SSI-1) es menos frecuente (R entre 0.32 y 0.67) y se atenúa levemente la intensidad ($RI < 1$ en todas las cuencas), pero se amplifica notablemente la duración (RD entre 1,42 y 3,51), como también puede notarse en el ejemplo de la figura 1b para Mapocho.

La respuesta en las diferentes cuencas muestra un claro gradiente. En un extremo, Pedernal y Sobrante, que se caracterizan por su clima semi-árido, se comportan como sistemas de respuesta lenta, presentando bajas tasas de propagación hacia sequías hidrológicas (R de 0,50 y 0,32) pero con eventos de larga duración (RD 3,39 y 3,51). En el extremo opuesto se encuentran Cauquenes y Trancura, con climas más húmedos, presentan respuestas rápidas, con tasas de propagación similares entre el SSMI-1 y el SSI-1 ($R > 0,64$), con una menor amplificación de la duración (RD < 1,55). Esto indica una mayor conexión entre los déficits de precipitación y la respuesta en la humedad del suelo y los caudales. Finalmente, Mapocho, que presenta un clima moderado, exhibe un comportamiento intermedio tanto para sequía agrícola ($R=0,67$, $RD=1,56$) como hidrológica ($R=0,48$, $RD=2,22$). Estos resultados sugieren que las características de cada cuenca modulan la propagación de las sequías a través de los diferentes componentes del sistema hidrológico.

Los resultados de este trabajo serán útiles para el monitoreo de sequías, al evidenciar que los componentes del sistema hidrológico responden en escalas temporales variables, según las características de cada cuenca. La sensibilidad del suelo frente a déficits meteorológicos destaca la importancia de una gestión temprana del riesgo agropecuario, mientras que la inercia de los sistemas hídricos, especialmente en regiones semiáridas, exige una planificación a mediano plazo. En este contexto, el uso de índices en múltiples escalas

temporales permitiría capturar mejor la dinámica diferenciada de cada componente y región, fortaleciendo las estrategias de monitoreo y gestión del riesgo hídrico.

A futuro, sería valioso incorporar índices con distintas escalas temporales, como también analizar diferencias estacionales y considerar el aporte de la nieve, especialmente en cuencas de régimen nival.

	Pedernal			Sobranete			Mapocho			Cauquenes			Trancura		
Índice	R	RI	RD	R	RI	RD	R	RI	RD	R	RI	RD	R	RI	RD
SPI1 vs. SSMI1	0,80	1,07	2,28	0,57	1,09	1,84	0,67	1,10	1,56	0,65	1,07	1,47	0,69	1,06	1,31
SPI1 vs. SSI1	0,50	0,98	3,39	0,32	0,96	3,51	0,48	0,92	2,22	0,67	0,96	1,55	0,64	0,88	1,42

Tabla I. Tasa de propagación (R), Ratio de propagación de Intensidad (RI) y Duración (RD) para cada una de las cinco cuencas analizadas. Los valores se presentan para cada índice de sequía analizado.

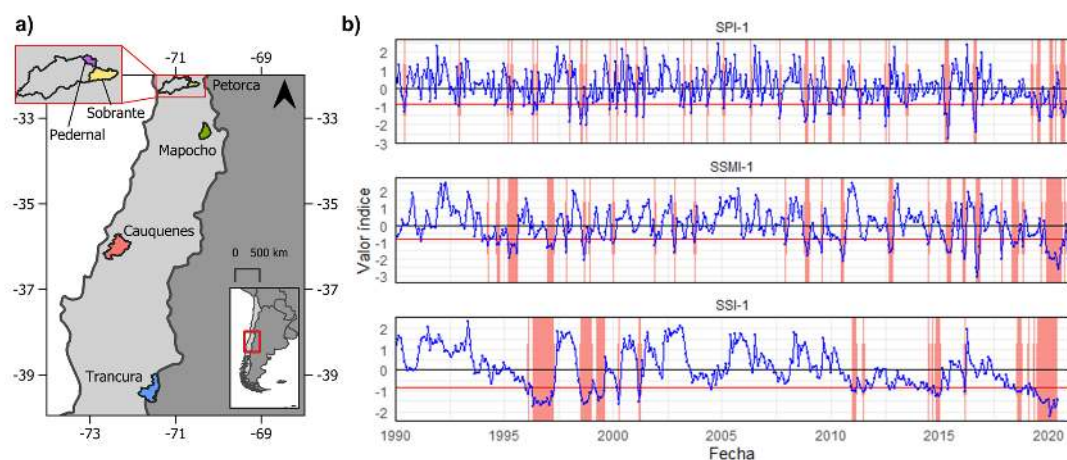


Figura 1. a) Área de estudio. b) Series temporales de SPI, SSMI y SSI en escala de acumulación de 1 mes para la cuenca Mapocho en los Almendros, periodo de referencia: 1990-2020. Las barras horizontales indican eventos de sequía, definidos como valores menores a -0.84.

REFERENCIAS

Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., and Ayala, A., 2018: The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, Hydrol. Earth Syst. Sci., 22, 5817-5846.

Apurv, T. y Cai, X., 2020: Drought Propagation in Contiguous U.S. Watersheds: A Process-Based Understanding of the Role of Climate and Watershed Properties. *Water Resources Research*, 56(9), e2020WR027755.

Boisier, J. P., 2023: CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960-2021 in continental Chile (v2.5) [Data set]. Zenodo.

Zhang, X., Hao, Z., Singh, V. P., Zhang, Y., Feng, S., Xu, Y. y Hao, F., 2022: Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors. *Science of The Total Environment*, 838(2), 156021.

VARIABILIDAD ESTIVAL ENTRE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN ARGENTINA. PROYECCIONES EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Marianela Groppa^{1,2} y María Paula Llano^{1,2}
mgroppa@at.fcen.uba.ar

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

²Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (FCEN - UBA)

Palabras clave: TRASLACIÓN, DEFORMACIÓN, ROTACIÓN, INTERDEPENDENCIA.

1) INTRODUCCIÓN

El sistema climático está gobernado por una compleja interacción de variables, entre las cuales la temperatura y la precipitación desempeñan un rol fundamental. Durante las últimas décadas, ambas han experimentado cambios significativos en sus valores medios y extremos. Muchos de estos cambios son mayores en relación con el aumento del calentamiento global y no tienen precedentes a lo largo de muchos miles de años (IPCC, 2021). Es por ello por lo que existe un considerable interés en estudiar la variabilidad espacio-temporal entre las temperaturas - máxima y mínima - y la precipitación en el actual contexto de cambio climático (Trenberth y Shea, 2005).

El estudio de la interdependencia entre estas se puede analizar empleando funciones de distribución multivariantes, Rodrigo et al. (2014) en España y Ferrari et al. (2018) en Italia consideraron el carácter bivariado de la temperatura y la precipitación del clima de referencia utilizando una elipse de contorno gaussiana con 95% de confianza. El objetivo del presente trabajo es analizar los cambios proyectados en la covariabilidad entre precipitación y temperatura para Argentina durante la estación de verano.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos simulados de temperatura máxima (tx), temperatura mínima (tn) y precipitación (pp) para Argentina, pertenecientes a cinco modelos climáticos globales: GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, UKESM1-0-LL e IPSL-CM6A-LR. Estos fueron obtenidos de la fase 3b del Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP3b; Lange, 2021) basados en los resultados de la sexta fase del Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados (CMIP6). Los datos corresponden al periodo histórico (1985-2014) y al futuro cercano (FC, 2021-2050), bajo los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 y fueron estandarizados usando la media y la desviación típica del periodo histórico para los meses de verano (diciembre-enero-febrero).

Para analizar los cambios en la relación entre las variables se analiza la diferencia periodo futuro menos periodo histórico y la cuantificación de dichos cambios se realiza mediante los parámetros de traslación, rotación y deformación. La traslación consiste en un cambio en los valores medios de las variables y su significancia estadística se determina individualmente para cada variable mediante la prueba t-Student (95% confianza) y conjuntamente mediante la prueba de Hotelling multivariable. La rotación de las elipses está relacionada con el signo del coeficiente de correlación y los posibles cambios en la relación entre las variables, la significancia se analiza mediante la prueba Z (95%). La deformación consiste en cambios en la forma y/o tamaño de las elipses, lo cual está relacionado con los ejes de las mismas y la dispersión de los datos alrededor de ellos, la significancia estadística se analiza mediante la prueba box M y el test de Fisher (95%).

3) RESULTADOS

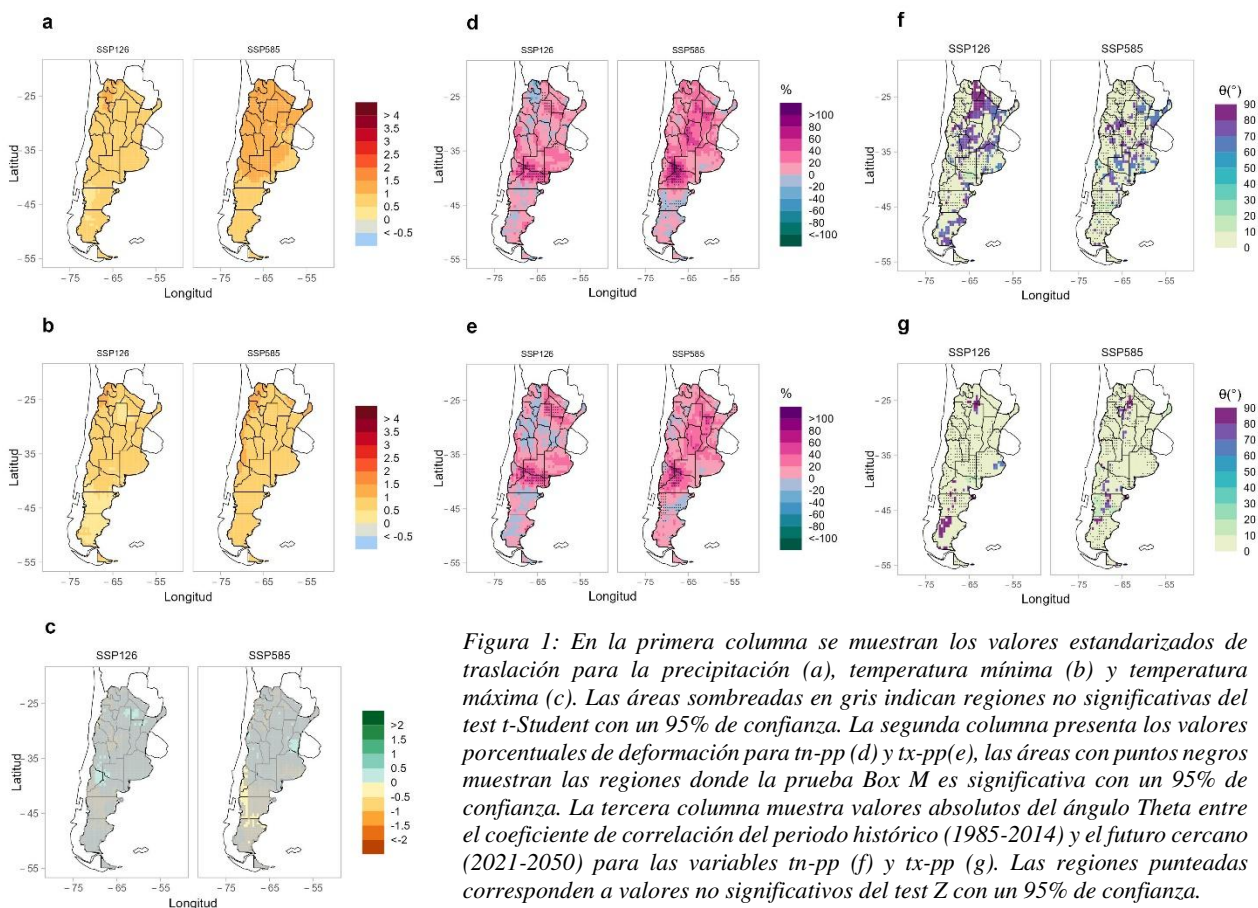


Figura 1: En la primera columna se muestran los valores estandarizados de traslación para la precipitación (a), temperatura mínima (b) y temperatura máxima (c). Las áreas sombreadas en gris indican regiones no significativas del test t-Student con un 95% de confianza. La segunda columna presenta los valores porcentuales de deformación para tn-pp (d) y tx-pp(e), las áreas con puntos negros muestran las regiones donde la prueba Box M es significativa con un 95% de confianza. La tercera columna muestra valores absolutos del ángulo Theta entre el coeficiente de correlación del periodo histórico (1985-2014) y el futuro cercano (2021-2050) para las variables tn-pp (f) y tx-pp (g). Las regiones punteadas corresponden a valores no significativos del test Z con un 95% de confianza.

En la figura 1 se muestran los resultados de los parámetros de traslación, deformación y rotación durante el verano para el ensamble de modelos en el futuro cercano. En todo el país la prueba de Hotelling indica diferencias significativas entre los vectores de valores medios. Las temperaturas, mínima (a) y máxima (b), muestran una traslación positiva y significativa para t-Student en ambos escenarios en todo el territorio. Mientras que, la traslación de la precipitación (c) solo es significativa, en ambos escenarios, en un 10% del territorio. Al observar las magnitudes de los desplazamientos, en el escenario SSP1-2.6 las temperaturas aumentan entre 0.5-1 desviación típica (0.5°C y 1°C). En el caso del escenario SSP5-8.5 la traslación es máxima en la mitad norte del país para la tn, con valores entre 1-1.5 desviaciones típicas (1°C – 1.5°C) y sobre la Patagonia es menor con valores entre 0.5-1 desviación típica (0.5°C – 1°C). La traslación para la tx se encuentra entre 0.5-1 desviación típica (0.5°C – 1°C). La traslación para la precipitación se encuentra entre 0-0.5 desviaciones típicas (+20%) sobre Cuyo y el noreste argentino (NEA) para el escenario SSP1-2.6. Estos valores se mantienen y se extienden hacia el centro del país para el escenario SSP5-8.5, a la vez que se observan sobre la Patagonia cambios significativos y negativos con valores entre 0 y -0.5 desviaciones típicas (-20 %). El parámetro de deformación para el conjunto multivariable tn-pp (d) en el escenario SSP1-2.6 muestra valores positivos en el 84% del territorio, de los cuales solo el 11% son significativos y se encuentran al norte de la región patagónica y el NEA donde el área de deformación positiva es máxima (60%). En el escenario SSP5-8.5 la deformación positiva se observa en un 90% del país, pero continúa siendo significativa solo en un 10%. Los máximos valores se encuentran nuevamente sobre la Patagonia, pero ahora además se extienden hacia la región centro. Para el

conjunto tx-pp (e) se observa algo similar con porcentajes de deformación positiva de 72% y 91% respectivamente para cada escenario. Al analizar el cambio de varianza individual de las variables se observa que el aumento del área para el escenario más optimista está asociado a una mayor variabilidad de la precipitación, mientras que, el escenario basado en combustibles fósiles exhibe un aumento de la variabilidad en ambas variables.

En cuanto al parámetro de rotación, los valores más altos del ángulo Theta (80° - 90°), se observan principalmente en el conjunto multivariable tn-pp (f) sobre la región NEA y centro de Argentina. En el caso del escenario SSP1-2.6, lo que se produce es un cambio en el coeficiente de correlación que pasa de positivo no significativo a negativo y significativo. Mientras que, el SSP5-8.5 muestra valores de Theta menores, entre 50° y 60° , sobre la región NEA, donde la correlación pasa de positiva no significativa a negativa no significativa. En el caso de tx-pp (g) los cambios en el coeficiente de correlación son significativos en un 70% del país para ambos escenarios, sin embargo, en general el ángulo theta no supera los 20° , lo que sugiere que la relación entre las variables mantiene una pendiente similar en ambos periodos.

4) CONCLUSIONES

Este trabajo estudió las proyecciones en la covariabilidad de las temperaturas –máxima y mínima- y la precipitación acumulada para los veranos en Argentina en el futuro cercano. Usando la distribución gaussiana se comparan el periodo histórico 1985-2014 con el futuro cercano 2021-2050. Los resultados encontrados muestran traslaciones (vector de medias) positivas y significativas en todo el país, más pronunciadas en el escenario SSP5-8.5 (1 - 1.5°C en el norte) y para las temperaturas mínimas que para las máximas. En la precipitación el patrón no es tan claro, presenta cambios significativos en un área reducida. La deformación (varianza-covarianza) positiva cubre amplias áreas, aunque solo el 10% es significativa. Se observa un aumento significativo de la variabilidad en la precipitación para el escenario más optimista (SSP1-2.6) y en ambas variables para el escenario más pesimista (SSP5-8.5) sobre la Patagonia y el NEA. El cambio en la rotación (correlación) no es uniforme en todo el territorio. Es para destacar lo que sucede en el norte del país en el escenario SSP-1.26, donde la relación se invierte indicando que en el futuro el aumento de temperatura está asociado a una disminución de la precipitación.

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto PIP-CONICET (2022-2024) n° 112202101 00282CO

Al proyecto UBA (2020-2022) n° 20020190100090BA.

REFERENCIAS

Ferrari, E., Coscarelli, R. y Beniamino, S., 2018: Correlation Analysis of Seasonal Temperature and Precipitation in a Region of Southern Italy. *Geosciences* 8, 160; doi:10.3390.

Lange, S. 2021: ISIMIP3BASD v2.5.0, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4686991>.

Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (editores). 2021: IPCC, Resumen para responsables de políticas. En: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Rodrigo, F.S., 2014: On the covariability of seasonal temperature and precipitation in Spain, 1956-2005. *International Journal of Climatology*, 35(11), 3362-3370.

Trenberth, K.E. y Shea, D.J., 2005: Relationships between precipitation and surface temperature. *Geophys. Res. Lett.* 32: L14703, doi: 10.1029/2005GL022760.

PRIMERA APROXIMACIÓN PARA MODELAR LA LÍNEA DE EQUILIBRIO EN GLACIARES DEL CAMPO DE HIELO PATAGÓNICO SUR A PARTIR DE VARIABLES CLIMÁTICAS

Ignacio Ortiz Diaz¹, Diego Araneo¹, Gabriela Lenzano¹,
irortiz@mendoza-conicet.gob.ar. Autor/a correspondiente.

¹Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) – CCT Mendoza, Argentina

Palabras clave: Isoterma 0°C, precipitación, regresiones.

1) INTRODUCCIÓN

Los glaciares son indicadores climáticos de gran importancia. La línea de equilibrio altitudinal (ELA, por sus siglas en inglés), separa la zona de acumulación (balance positivo) de la zona de ablación (balance negativo). Los glaciares son particularmente sensibles a cualquier cambio que se experimente en el clima, ya sea de escala regional o global (Ohmura & Boettcher, 2022). El Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS) es la masa de hielo continental más grande del hemisferio sur, a excepción de la Antártida, con una superficie total de aproximadamente 12,200 km² (Meier et al., 2018).

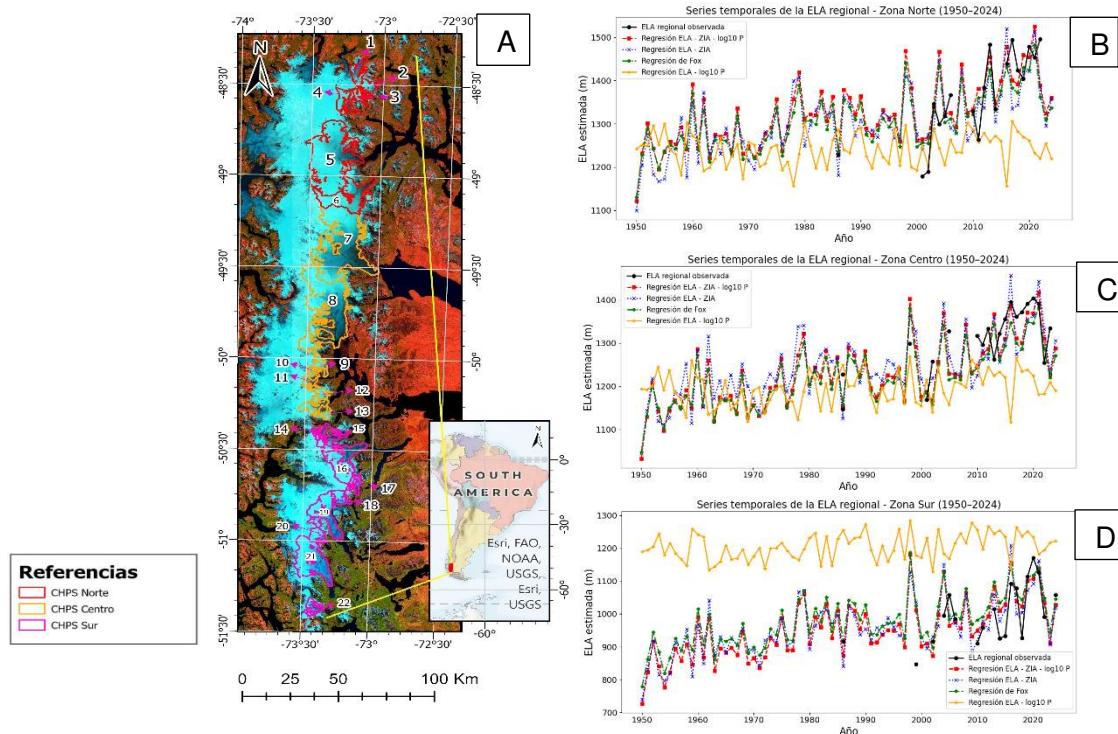


Figura 1. A) Ubicación de la zona de estudio, margen oriental del CHPS. ELA's modeladas y ELA's observadas para las zonas norte (B), centro (C) y sur (D). Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de este estudio es el de encontrar y evaluar relaciones empíricas entre la ELA regional de tres zonas de la margen oriental del CHPS con la altura promedio anual de la isoterma de 0°C y la precipitación acumulada anual, con el fin de modelar el primero en años donde no se disponía de datos *insitu* ni derivados de productos satelitales.

2) METODOLOGÍA

Los datos utilizados para obtener una ELA anual modelada desde mediados del siglo XX fueron: 1). Altura de la Línea de Nieve regional (SLA, por sus siglas en inglés) a partir del promedio de la SLA de

23 glaciares de la margen oriental del CHPS, que equivale a la ELA en la parte final de la temporada de ablación (Meier, 1962), para el período 1986-2023/2024. Los datos son propios de los autores y fuentes bibliográficas (Aniya et al., 1997; Casassa et al., 2014). La zonificación se hizo en base a lo propuesto por Bravo et al., (2021); 2). Altura promedio anual de la isoterma 0°C (ZIA, por sus siglas en inglés), obtenida de la base de datos de reanálisis global de quinta generación del clima ERA5, Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF) para el período 1950-2024 (Hersbach et al., 2023); 3). Precipitación acumulada anual (P): Extraídos de la base de datos ERA5 Land, el cual es un subconjunto de datos del ERA5 detallado previamente, para el período 1950 al 2024 (Muñoz Sabater, 2019). Se establecieron cuatro relaciones empíricas entre las diferentes variables. La ecuación (1) es la relación determinada por Fox & Bloom, (1994). Las ecuaciones (2) y (3) son regresiones lineales simples entre la ELA regional y ZIA, y ELA y el logaritmo de P respectivamente. Por último, la ecuación (4) es una regresión lineal múltiple que combina las tres variables en su totalidad:

$$ELA = c_1 - c_2 * \log_{10} P + ZIA \quad (1)$$

$$ELA = c_{1.1} + c_{2.1} * ZIA \quad (2)$$

$$ELA = c_{1.2} + c_{2.2} * \log_{10} P \quad (3)$$

$$ELA = c_{1.3} * ZIA + c_{2.3} * \log_{10} P + c_{3.2} \quad (4)$$

Dónde c_i son las distintas constantes obtenidas a partir de las regresiones lineales propuestas entre las diferentes variables.

Para evaluar qué proporción de la variabilidad en la ELA observada es explicada por cada modelo, se usó el parámetro R^2 , así como el parámetro Prob(F-Statistic) para determinar el nivel de significancia estadística de las regresiones. Así mismo, se determinó el grado de error de la ELA modelada para cada región, con respecto a la ELA observada, mediante el error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (5)$$

Dónde $\hat{y}_i$ e y_i son los valores modelados y observados de la ELA respectivamente, y n el número de observaciones.

3) RESULTADOS

Regresión	R2	p (prob F-statistic)	RMSE
ELA - ZIA - log10 P	0.859	1.03E-23	68.71
ELA - ZIA	0.831	7.19E-23	75.02
Regresión de Fox	0.171	0.00137	71.1
ELA - log10 P	0.056	0.0756	177.02

Tabla 1. Parámetros estadísticos obtenidos de las regresiones realizadas.

Cómo se observa en la tabla 1, el modelo que mejor se ajustó a la ELA observada fue el de la regresión lineal múltiple, seguido de la regresión lineal entre la ELA y ZIA. Sin embargo, al calcular el RMSE entre la ELA observada y la ELA modelada por las distintas regresiones, es notorio que a excepción de la regresión ELA-log₁₀

P, los demás modelos muestran errores similares. Esto indicaría que en la margen oriental del CHPS, la temperatura, representada por la altura de la isoterma 0°C, estaría jugando un papel importante en la variabilidad de la ELA. Si analizamos por regiones la figura 3 muestra que la región que mejor ajuste tiene es la norte, seguida por la región sur y finalmente por la región central. En todos los casos, indicado en las figuras 1A, 1B y 1C, si bien existe una alta variabilidad temporal, se evidencia un aumento en la ELA en la margen oriental del CHPS, principalmente a partir del inicio del siglo XXI, en consonancia con el retroceso de los glaciares en la región.

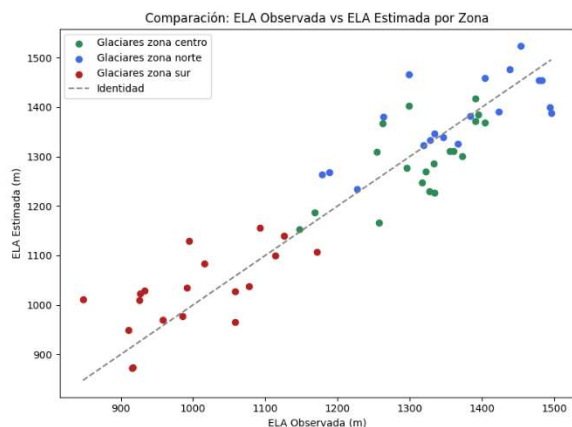


Figura 2. Comparación entre los valores de ELA modelado con la regresión múltiple, respecto a los valores de ELA observados que se usaron para forzar las distintas regresiones.

3) CONCLUSIONES

Se evidencia una relación directa, y estadísticamente significativa entre la altura de isoterma 0 y la altura de la línea de equilibrio; así como un aumento en la ELA desde mediados del siglo XX. Sin embargo, es importante notar que habría que analizar la posibilidad de realizar modelos individuales por zona para solidificar esta hipotética correlación ELA – isoterma, además de considerar otros parámetros, climáticos y propios de los glaciares que estarían condicionando la variabilidad de la ELA en la región.

REFERENCIAS

- Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P., & Casassa, G., 1997: Recent Glacier Variations in the Southern Patagonia Icefield, South America. *Arctic and Alpine Research*, 29(1), 1-12.
- Bravo, C., Bozkurt, D., Ross, A. N., & Quincey, D. J., 2021: Projected increases in surface melt and ice loss for the Northern and Southern Patagonian Icefields. *Scientific Reports*, 11(1), 16847.
- Casassa, G., Rodríguez, J. L., & Loriaux, T., 2014: A New Glacier Inventory for the Southern Patagonia Icefield and Areal Changes 1986–2000. En J. S. Kargel, G. J. Leonard, M. P. Bishop, A. Kääb, & B. H. Raup (Eds.), *Global Land Ice Measurements from Space* (pp. 639-660). Springer Berlin Heidelberg
- Fox, A. N., & Bloom, A. L., (1994): Snowline altitude and climate in the Peruvian Andes (5°-17° S) at present and during the Latest Pleistocene Glacial Maximum. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, 103(7), 867-885.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., and others, 2023: ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), (Accedido el 21-Marzo-2025).
- Meier, M. F. (1962): Proposed definitions for glacier mass budget terms. *Journal of Glaciology*, 4(33), 252-263.
- Meier, W. J.-H., Griesinger, J., Hochreuther, P., & Braun, M. H., 2018: An updated multi-temporal glacier inventory for the Patagonian Andes with changes between the Little Ice Age and 2016. *Frontiers in Earth Science*, 6, 62.
- Muñoz Sabater, J., 2019: ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accedido el 21-Marzo-2025).
- Ohmura, A., & Boettcher, M., 2022: On the shift of glacier equilibrium line altitude (ELA) under the changing climate. *Water*, 14(18), 2821.

FORZANTES DE FUSIÓN SUPERFICIAL SOBRE LA BARRERA DE HIELO LARSEN C DURANTE EL VERANO

Hernán E. Sala¹, Gabriel Silvestri², Ana Laura Berman²

hersala@gmail.com (H. Sala)

¹ Dirección Nacional del Antártico – Instituto Antártico Argentino

² Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (UBA/CONICET; IRL 3351
IFAECI/CNRS)

Palabras clave: Península Antártica, circulación atmosférica polar, barrera de hielo Larsen.

1) INTRODUCCIÓN

Las interacciones que se producen entre el manto de hielo antártico y el sistema climático terrestre involucran una variedad de procesos dinámicos de distinta naturaleza que actúan a diferentes escalas temporales y espaciales. Entre estos procesos se encuentran la fusión superficial (y también basal) de las barreras de hielo, con su consecuente adelgazamiento y eventual colapso. Estos fenómenos pueden iniciarse a partir de la fusión de la cubierta de nieve y hielo que cubre la superficie de los glaciares, también referida como “*snowpack*”. En efecto, cuando la temperatura del aire cercano a la superficie supera un determinado valor crítico se inicia la fusión de la nieve y el hielo que se encuentran en contacto o en estrecha proximidad con una determinada masa de aire. El agua resultante se infiltra a través de poros y grietas intersticiales de distinto calibre presentes en la masa de hielo. Luego, cuando dicha agua vuelve a congelarse no sólo transfiere calor hacia el interior del glaciar sino que además genera un efecto de cuña que tiende a aumentar el tamaño de las grietas en las que quedó depositada. La repetición de estos procesos, año tras año, puede hacer que el efecto de cuña sea suficientemente importante como para contribuir al desarrollo de grietas de grandes dimensiones (*rifts*). La expansión de tales grietas, en definitiva, conduce a la desestabilización de las barreras de hielo y, eventualmente, a su posterior colapso (Skvarca y Sala, 2007). En otros términos, los procesos que provocan el colapso de grandes barreras de hielo antártico pueden verse potenciados por la ocurrencia reiterada, a lo largo del tiempo, de eventos de fusión en el snowpack. Por lo tanto, el estudio de la fusión superficial y de los forzantes atmosféricos que la inducen es fundamental para comprender el comportamiento del manto de hielo antártico en el presente y su proyección futura.

Desde mediados de la década de 1970, a partir de datos obtenidos por radiómetros instalados en satélites, se ha investigado de manera sistemática la distribución espacial y temporal de la cobertura superficial de nieve y de hielo en todo el planeta; en particular, en regiones donde se dispone de muy pocas observaciones obtenidas in situ (como es el caso de la Antártida). Entre las diferentes variables medidas por los mencionados radiómetros se encuentra la temperatura de brillo (*brightness temperature*, Tb) correspondiente a los primeros centímetros, decímetros o metros de la columna del snowpack que cubre la Antártida. Usando algoritmos diseñados por especialistas en radiometría satelital, los datos de Tb permiten detectar la presencia de agua en estado líquido dentro del snowpack, lo cual es indicativo de la ocurrencia de eventos de fusión. Si bien un gran número de investigadores de diversos países enfocan sus estudios en temas de variabilidad climática en Antártida, el análisis de patrones de circulación atmosférica asociados a eventos de fusión superficial con una resolución temporal diaria es un aspecto aún poco desarrollado. Por lo tanto, el objetivo de este breve trabajo consiste en mostrar dos ejemplos de

condiciones atmosféricas en cierto modo contrastantes, que modularon en distinta forma la fusión superficial en la barrera de hielo Larsen C durante la temporada estival.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizan datos diarios de Tb de la Antártida elaborados por el National Snow and Ice Data Center (<https://nsidc.org>). Los datos están organizados y se encuentran disponibles en forma de una grilla espacial de 25 x 25 km. El área de estudio es la barrera de hielo Larsen C (LC), ubicada sobre la costa este de la Península Antártica (Figura 1). El análisis se realiza para el verano austral 2021-2022, tomándolo -con las precauciones necesarias- como relativamente representativo de las condiciones propias de los veranos de la última década en la región. Los días en los que se detecta fusión superficial en cada punto de grilla se identifican siguiendo la metodología mostrada en Torinesi y otros (2003). La circulación atmosférica se analiza con datos de altura geopotencial de 1000 hPa (G1000) extraídos del reanálisis NCEP-NCAR.

3) RESULTADOS

La Figura 2 muestra el área de LC bajo condiciones de fusión superficial en cada día transcurrido desde el 1 de septiembre de 2021 hasta el 30 de abril de 2022. Se observa que en noviembre comienzan episodios de fusión que se generalizan desde los primeros días de diciembre hasta los últimos días de febrero. En otras palabras, los meses de verano constituyen una “estación de fusión”, en la cual gran parte de la superficie de LC se encuentra bajo episodios recurrentes de fusión. Esto sucede porque la temperatura del aire cercano a superficie aumenta induciendo, a su vez, un incremento en la temperatura del snowpack, hasta superar el umbral en el cual se inicia el pasaje al estado líquido. Si bien ésta es la condición general durante el verano, la Figura 2 también muestra que hay días en los que el área bajo fusión puede aumentar o disminuir de manera marcada. Esto es consecuencia de la variabilidad en la temperatura del aire, en respuesta a condiciones particulares de circulación atmosférica sobre la región.

A modo de ejemplo, la Figura 3 muestra los campos de G1000 en dos días particulares. El 3 de febrero de 2022 el área bajo fusión disminuyó marcadamente debido a que un centro de baja presión ubicado al este de la Península Antártica produjo advección de aire frío polar que interrumpió, al menos parcialmente y por un breve periodo, la fusión estival en el área de LC. Por el contrario, el aumento del área bajo fusión el 8 de febrero de 2022 estuvo asociado con un centro de baja presión situado al oeste de la Península Antártica. Tales condiciones favorecieron un considerable flujo meridional desde el norte del Pasaje de Drake o Mar de Hoces hasta la Península Antártica y, en consecuencia, una marcada advección de aire cálido asociada al desarrollo de un río atmosférico incluyendo viento foehn sobre LC (Gorodetskaya y otros, 2023).

Estos resultados sintetizan el aspecto más relevante detectado en el análisis diario de la ocurrencia de eventos de fusión superficial en LC durante el verano austral: un periodo extenso de fusión asociado al aumento típico de temperatura del aire estival y el impacto de sistemas de circulación del aire en escala sinóptica aumentando o disminuyendo la extensión del área sometida a fusión en superficie.

Los resultados para LC mostrados en este breve artículo son un ejemplo de los estudios actualmente en desarrollo por este grupo de trabajo que están permitiendo caracterizar las condiciones atmosféricas bajo las cuales se producen los eventos de fusión superficial en las barreras de hielo del área de Península Antártica. Estas investigaciones son relevantes para

comprender las condiciones observadas en las últimas décadas, pero también constituyen información esencial para mejorar las proyecciones del manto de hielo antártico bajo distintos escenarios.

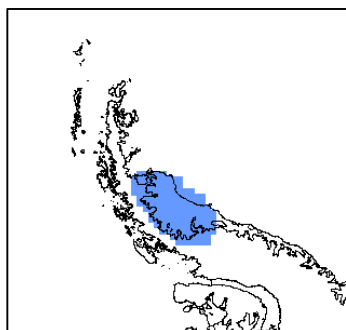


Figura 1: Área de LC (sombreada) considerada en este trabajo.

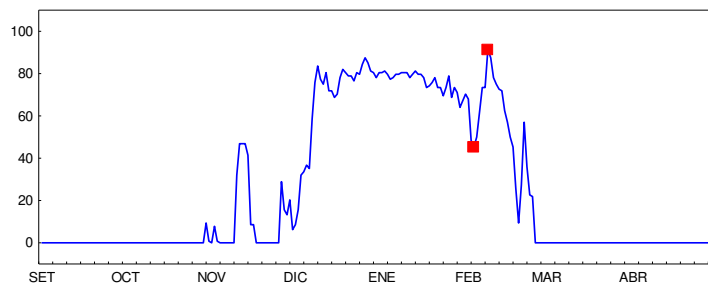


Figura 2: Área de LC bajo fusión superficial en cada día transcurrido desde el 1 de septiembre de 2021 hasta el 30 de abril de 2022. Valores expresados en porcentaje respecto al área total de LC mostrada en Figura 1. En rojo se indican los días 3 y 8 de febrero de 2022 analizados en Figura 3.

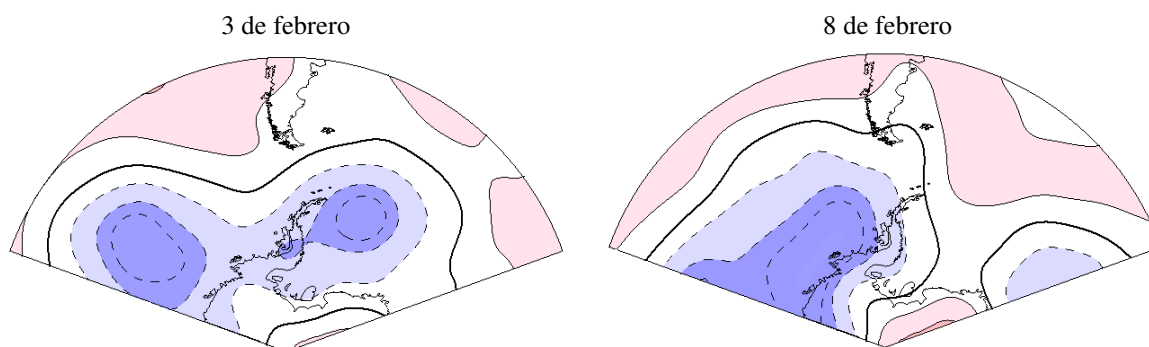


Figura 3: G1000 los días con disminución (3 de febrero de 2022) y aumento (8 de febrero de 2022) del área bajo fusión superficial en LC. Se indican contornos de ± 100 , ± 200 y ± 250 metros (la línea negra gruesa indica el contorno 0.0).

REFERENCIAS

Gorodetskaya, I., Durán-Alarcón, C., González-Herrero, S. y otros, 2023: Record-high Antarctic Peninsula temperatures and surface melt in February 2022: a compound event with an intense atmospheric river. *npj Climate and Atmospheric Science*, doi.org/10.1038/s41612-023-00529-6.

Skvarca, P. y Sala, H. E., 2007: Cambios detectados con imágenes MODIS en la Bahía Larsen B entre 2002 y 2007. En: *Actas del VI° Simposio Argentino y III° Latinoamericano sobre Investigaciones Antárticas, IAA-DNA. Resumen Expandido N° GEORE806*, 4 págs.

Torinesi, O., Fily, M., y Genthon, C., 2003: Variability and trends of summer melt period of Antarctic ice margins since 1980 from microwave sensors, *Journal of Climate*, 16, 1047–1060.

ONDAS DE TORMENTA GENERADAS EN EL OCÉANO PACÍFICO SURORIENTAL Y SU IMPACTO SOBRE LA PLATAFORMA CONTINENTAL ARGENTINA

Matías G. Dinápoli¹, Claudia G. Simionato¹
matias.dinapoli@cima.fcen.uba.ar

¹Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET–UBA

²Instituto Franco-Argentino Para el Estudio del Clima y Sus Impactos (IRL 3351 IFAECI)

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA

Palabras clave: Ondas de Tormenta, Plataforma Continental Argentina, Sinóptica.

1) INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES

Recientemente los trabajos de Alonso et al. (2024) y M. G. Dinápoli et al. (2024) demostraron que en la Plataforma Continental Argentina (PCA) se generan ondas de tormenta (ODT) forzadas regionalmente por sistemas migratorios de presión atmosférica. Durante su propagación, estos sistemas generan vientos con componente a lo largo de la costa (sur/norte) que pueden aumentar o disminuir el nivel del mar mediante transporte de Ekman. A medida que el sistema atmosférico migra hacia el este, la anomalía del nivel del mar forzada se relaja y viaja libremente hacia el norte siguiendo la dinámica de ondas de Kelvin en el Hemisferio Sur. Además de contar con un impacto en la erosión costera, especialmente en Mar del Plata (Bacino et al., 2023), estas anomalías eventualmente alcanzan el estuario del Río de la Plata donde son capaces de causar inundaciones que afectan a las viviendas e infraestructura (Dinápoli et al., 2023; D’Onofrio & Fiore, 1998), o bajantes que perjudican la navegación y a tomas de agua potable en una de las zonas más pobladas de Sudamérica.

Aunque Alonso et al. (2024) y M. G. Dinápoli et al. (2024) describieron exhaustivamente la génesis, dinámica y variabilidad de las ODT en la PCA y en el Río de la Plata, sus modelos se limitaron a esta región, ignorando posibles forzantes remotos. Dado que las ondas de Rossby atmosféricas se propagan hacia el este a lo largo de los jets subtropical ($\sim 30^\circ\text{S}$) y subpolar ($\sim 60^\circ\text{S}$) (Vera et al., 2002), alguna de ellas podrían generar ODTs en el Océano Pacífico Suroriental (costa chilena) que posteriormente pudiera llegar a la PCA propagándose como ondas de Kelvin. De ser así, los modelos de pronóstico que excluyan el Pacífico tendrían un error que es importante cuantificar. En ese sentido, este trabajo estudia la posible ocurrencia de ODTs generadas remotamente en el Pacífico Suroriental y su potencial impacto en la PCA. Para ello se utilizaron 40 años de simulaciones numéricas horarias que incluyen y no incluyen al Pacífico Sudoriental. El modelo numérico utilizado es el Sistema para el Modelado del Mar Argentino (SiMMAr), una adaptación barotrópica del modelo oceanográfico CROCO (<http://www.croco-ocean.org>; Debreu et al., 2012). Para más información de SiMMAr y sus aplicaciones para pronósticos y estudios de procesos se remite al lector a Dinápoli y Simionato (2025) y las referencias citadas allí.

2) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Dado que este trabajo se centró en ODTs, sólo se consideró la respuesta oceánica en la escala sinóptica atmosférica (períodos menores a 10 días). Por ello, todos los procesos en escalas interanual, estacional e intraestacional, así como la tendencia, fueron filtrados de las soluciones numéricas previo al análisis. Se encontró que la PCA es impactada por ODTs

generadas en el Pacífico Suroriental producto de las ondas de Rossby atmosféricas que viajan hacia el este a lo largo del jet subpolar. El mecanismo de generación y evolución de estos procesos serán discutidos a continuación en base a la Figura 1 que muestra el caso más representativo del proceso encontrado. Las ODTs remotas se generan cuando dichos sistemas atmosféricos y las anomalías de nivel del mar asociadas por efecto barómetro invertido alcanzan la costa. Allí la anomalía se transforma en una onda atrapada por la costa, cuya amplitud se refuerza por los vientos costeros asociados al sistema de presión mediante transporte de Ekman. Al migrar el forzante atmosférico hacia el este, la anomalía del nivel del mar avanza hasta llegar al PCA, donde la respuesta oceánica se divide en dos ramas: una que sigue al sistema de presión atmosférica hacia el océano profundo y otra, la ODT, que ingresa a la PCA y se propaga como una onda de Kelvin libre.

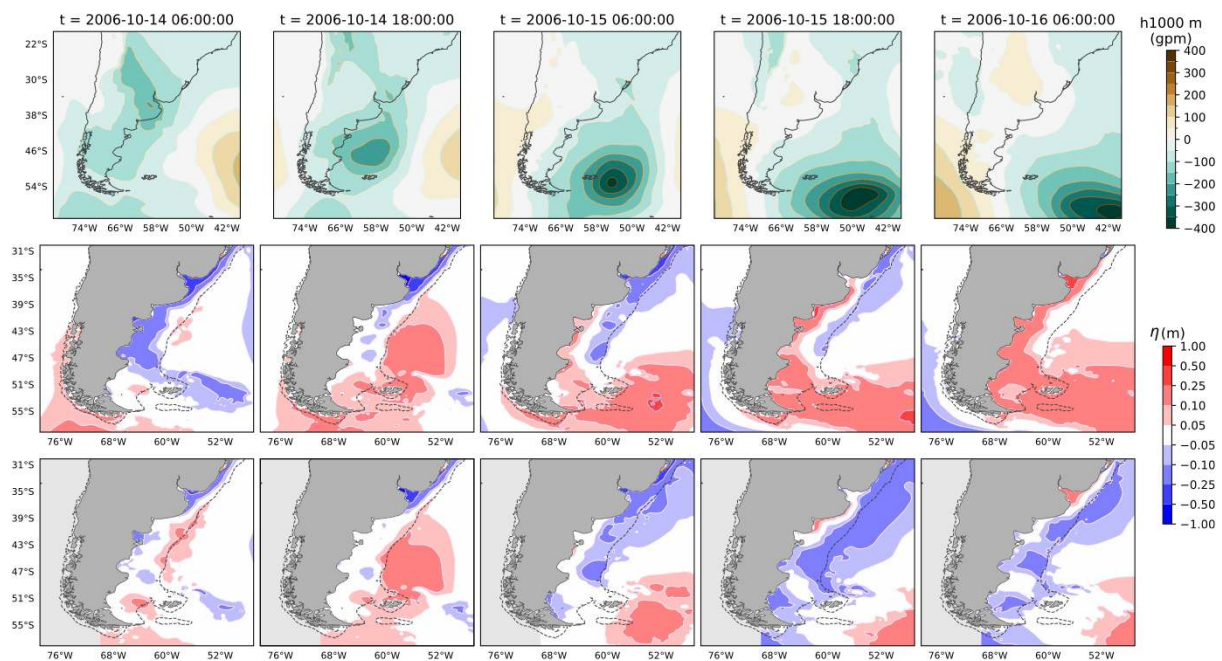


Figura 1. Evolución de geopotencial de 1000 hPa (panel superior), nivel del mar simulado considerando el Océano Pacífico Suroriental (panel central) y el nivel del mar sin considerar el Pacífico (panel inferior). Los campos corresponden a un evento ocurrido en octubre de 2006, los pasos temporales son cada 12 horas.

Estas ODT presentan amplitudes de hasta 0,30 m en la PCA central ($\approx 10\%$ de la anomalía regional forzada por la atmósfera). Su periodicidad es de unos 7,5 días y su actividad (intensidad/frecuencia) presenta un ciclo estacional marcado, con un máximo en invierno, ambas características coherentes con la dinámica de las ondas de Rossby subpolares. La actividad en escalas mayores exhibe una variabilidad interanual (2–7 años), con mayor intensidad en las últimas dos décadas simuladas (especialmente en la banda de 2–4 años). Esta modulación podría asociarse a la variabilidad climática del Hemisferio Sur, donde el SAM regula la posición del jet subpolar y el ENSO modula el *storm track* en latitudes altas. Este tema se abordará en futuros trabajos.

La frecuencia semanal de estas ODTs son una consecuencia natural de la dinámica atmosférica en altas latitudes y la orientación costera de Sudamérica. En contraste, las ODTs locales dependen de la alineación y persistencia de los vientos, por lo que su frecuencia no es regular. Aunque ambos tipos son generalmente independientes, ciertas configuraciones

atmosféricas pueden generar ambos eventos, que pueden superponerse en la PCA, reforzando o atenuando la anomalía final. La incorporación de las ODTs remotas en modelos de pronóstico reduce el error de simulación en $\approx 45\%$, lo que subraya la necesidad de entender la dinámica regional para mejorar los pronósticos. Los resultados no sólo revelan un proceso hasta ahora desconocido, sino que demuestran la necesidad de incluir el Pacífico Suroriental en futuras simulaciones de la PCA para lograr predicciones precisas.

CITAS Y REFERENCIAS

- Alonso, G., Simionato, C. G., Dinápoli, M. G., Saurral, R., y Bodnariuk, N., 2024: Positive storm surges in the Río de la Plata Estuary: Forcings, long-term variability, trends and linkage with Southwestern Atlantic Continental Shelf dynamics. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06402-w>
- Bacino, G., Alonso, G., Billet, C., Dragani, W., Bedmar, J., y Farenga, M., 2023: Assessing the morphological evolution of a breakwater-protected sandy beach by means of UAV surveys at Mar del Plata, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 127, 104379. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104379>
- D'Onofrio, E., y Fiore, M., 1998: Niveles medios que aproximan al geoide en el litoral marítimo argentino. Informe Técnico N° 100/98, Departamento Oceanografía del Servicio de Hidrografía Naval.
- Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P., y Cambon, G., 2012: Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, 49–50, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.03.003>
- Dinápoli, M. G., Ruiz, J. J., Simionato, C. G., y Berden, G., 2023: Improving the short-range forecast of storm surges in the Southwestern Atlantic Continental Shelf using 4DEnSRF data assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1002/qj.4509>
- Dinápoli, M. G., Simionato, C. G., Alonso, G., Bodnariuk, N., y Saurral, R., 2024: Negative storm surges in the Río de la Plata Estuary: Mechanisms, variability, trends and linkage with the Continental Shelf dynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 305, 108844. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108844>
- Dinapoli, M. G., y Simionato, C. G., 2025: On the impact of Southeastern Pacific-generated storm surges on the Southwestern Atlantic Continental Shelf: Inter-oceanic connections through coastally trapped waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 130, e2024JC021685. <https://doi.org/10.1029/2024JC021685>
- Vera, C. S., Vigliarolo, P. K., y Berbery, E. H., 2002: Cold season synoptic-scale waves over subtropical South America. *Monthly Weather Review*, 130(3), 684–699. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<0684:csssw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<0684:csssw>2.0.co;2)

RELACIÓN ENTRE LOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN Y EL NIÑO MODOKI EN SUDAMÉRICA A PARTIR DE LOS MCGs DEL CMIP6

M. Florencia Iacovone^{1,2}, Vanesa C. Pántano^{1,2}, Olga C. Penalba^{1,2}

fiacovone@at.fcen.uba.ar. Autor/a correspondiente.

¹ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO). Universidad de Buenos Aires (UBA).

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET).

Palabras clave: extremos climáticos, ENSO, CMIP6.

1) INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, las investigaciones sobre el impacto de los eventos climáticos extremos de precipitación han aumentado debido a sus efectos en los ecosistemas, la agricultura y la disponibilidad de agua (Sauter, 2020). Con la finalidad de anticiparse a la ocurrencia de estos eventos extremos, en las últimas décadas se realizaron diferentes estudios que permiten identificar los principales forzantes atmosféricos y oceánicos que gobiernan la variabilidad del sistema climático en diferentes escalas espaciales y temporales. Uno de los modos de variabilidad es El Niño Modoki, un patrón particular del fenómeno El Niño - Oscilación del Sur. Las anomalías positivas de precipitación en el sudeste de Sudamérica están asociadas a la fase positiva de El Niño Modoki a finales de la primavera austral (p.e. Silva Brito, 2012). Iacovone et al., (2020) encontraron que, para los modelos climáticos globales (MCGs) del CMIP5, la señal de El Niño Modoki sobre las rachas secas en Sudamérica es más intensa que la correspondiente a las rachas húmedas, durante el trimestre octubre - diciembre.

A partir de lo expuesto, el objetivo de este trabajo es analizar la habilidad de los MCGs del CMIP6 en representar la covariabilidad entre los extremos de precipitación y El Niño Modoki sobre Sudamérica (SA) a escala estacional (octubre - diciembre).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este trabajo se utilizaron datos diarios de precipitación y mensuales de temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés). Los mismos se obtuvieron del reanálisis ERA5 y de las simulaciones de 15 MCGs del CMIP6, para el trimestre octubre-diciembre (OND), del período 1981-2010. Esta investigación se desarrolla en SA, con especial interés en dos subregiones: (1) Norte de SA (NSA: 5°N – 50°W / 8°S – 65°W) y (2) Sudeste de SA (SESA: 25°S–50°W/37°S–62°W). Las subregiones fueron seleccionadas debido a sus características climáticas y el impacto de los extremos de precipitación, ya sea el medio ambiente, la salud de la población, el sector hidrológico y agrícola, entre otros.

Con los datos de precipitación se calcularon los siguientes índices extremos a escala estacional: precipitación total acumulada (PRCPTOT), precipitación total acumulada que supera el percentil 75 (R75pTOT) y máxima cantidad de días consecutivos secos (CDD). Además, con los datos de SST se calculó para cada modelo el índice El Niño Modoki Index (EMI) (Ecuación 1) representativo de El Niño Modoki, basado en Ashok et al., (2007).

$$EMI = |SSTA|_A - 0,5 * (|SSTA|_B + |SSTA|_C) \quad (1)$$

donde SSTA representa las anomalías de la SST promediadas en cada región indicada en la Figura 1.

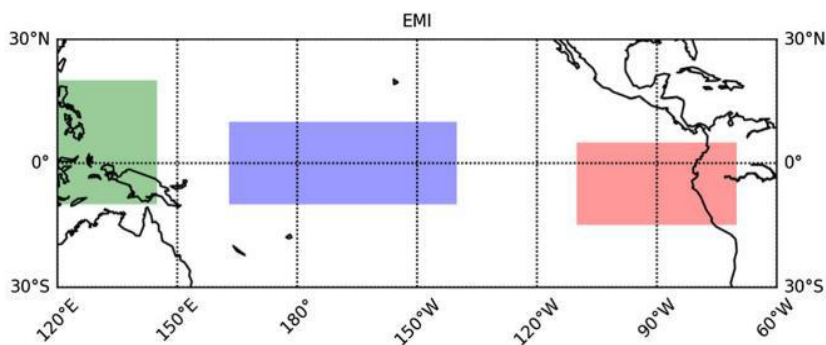


Figura 1: Áreas A (azul), B (roja) y C (verde) utilizadas para calcular las anomalías de SST del índice EMI.

Para realizar una mejor comparación entre modelos, las simulaciones de los MCGs de precipitación se regrillaron a una misma

resolución de 1° latitud x 1° longitud, utilizando el método de interpolación bilineal (Accadia et al., 2003). Luego, una vez obtenidos los índices de precipitación extrema y el EMI, se calculó la correlación de Spearman (Wilks, 2011) a escala estacional entre ellos, y se estudió su significancia a partir del test de Student, a dos colas, con un nivel de confianza del 95%. Para ello se filtró previamente la tendencia lineal de cada índice tanto de precipitación como de circulación, a través de mínimos cuadrados, para evitar las correlaciones espurias. Una vez aplicada esta metodología se realizó el promedio de las correlaciones de los MCGs para obtener el ensamble multimodelo. Por último, se calcularon los composites tanto para los datos de ERA5 como para el ensamble multimodelo.

3) RESULTADOS

La señal del EMI en los índices de precipitación, considerando los datos de ERA5 (Figura 2, panel superior), muestra, en general, valores positivos y significativos de correlación entre EMI-PRCPTOT y EMI-R75pTOT en SESA y en la Patagonia Argentina. Las correlaciones negativas y significativas se observan en el NSA. Esto lo que indica es que la fase positiva del EMI está asociada a mayor precipitación acumulada y de mayor intensidad en la subregión. Por otro lado, la correlación EMI-CDD presenta valores positivos y significativos en NSA. La señal opuesta, con valores negativos y significativos, se muestra en SESA y en el sur de Argentina, sugiriendo períodos secos más largos durante anomalías frías en el Océano Pacífico ecuatorial central.

Al analizar el ensamble multimodelo (Figura 2, panel derecho) se observa que estos resultados son consistentes con los patrones de correlación de ERA5, aunque la señal es más débil, ya que las regiones significativas son despreciables. Sin embargo, si bien la intensidad de la señal del ensamble multimodelo es inferior respecto a lo encontrado para ERA5, es importante resaltar que el ensamble simula adecuadamente los patrones de correlación.

El análisis de los composites (no se muestran) de ERA5 muestra que las anomalías positivas de PRCPTOT y R75pTOT superan los 80mm bajo la fase positiva del EMI en el SESA, y anomalías negativas inferiores a los 60mm si se considera la fase negativa. Respecto a CDD, se observa que hay mayor variabilidad en todo SA. De manera similar a las correlaciones, los composites del ensamble multimodelo, se encuentra que la señal es menos intensa pero sigue presentando el mismo signo de anomalías.

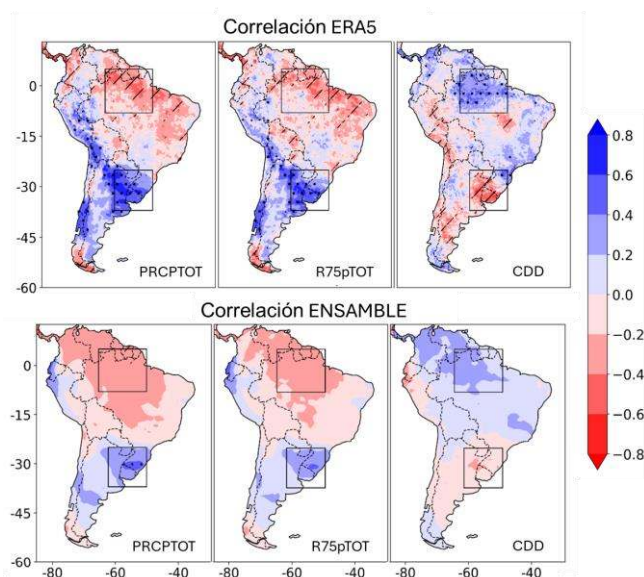


Figura 2: Correlación entre EMI y los extremos de precipitación, para ERA5 (panel superior) y para el ensamble multimodelo (panel inferior).

4) CONCLUSIONES

Con el fin de proporcionar información útil a los servicios climáticos regionales, es importante evaluar la señal de diferentes forzantes climáticos asociados con los eventos extremos climáticos. Este trabajo se focalizó en el análisis de la covariabilidad entre los extremos de precipitación y El Niño Modoki, en el trimestre OND del periodo 1981-2010, a partir de las salidas de los MCGs del CMIP6.

Los resultados obtenidos mostraron que los MCGs simulan la covariabilidad entre los índices de precipitación extrema y el EMI. Es decir, que existe una coherencia con los patrones observados en ERA5. Sin embargo, presentan una señal más débil debido a una menor cantidad de regiones con significancia estadística. Por otro lado, en cuanto a los composites se encontró que, aunque la magnitud de las anomalías es menor, se conserva el mismo patrón de respuesta, indicando que los modelos reproducen correctamente la señal, aunque de forma atenuada.

REFERENCIAS

Accadia, C., Mariani, S., Casaioli, M., Lavagnini, A., y Speranza, A., 2003: Sensitivity of precipitation forecast skill scores to bilinear interpolation and a simple nearest-neighbor average method on high resolution verification grids. *Weather Forecast* 18(5):918–932.

Ashok, K., Behera, S., Rao, S., Weng, H., y Yamagata, T., 2007: El Niño Modoki and its possible teleconnection, *Journal of Geophysical Research*.112, C11007.

Iacovone, M. F., Pántano, V. C., y Penalba, O. C., 2020: Consecutive dry and wet days over South America and their association with ENSO events, in CMIP5 simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(1), 791-804.

Sauter, T., 2020: Revisiting extreme precipitation amounts over southern South America and implications for the Patagonian Icefields. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), 2003-2016.

Silva Brito, A., 2012: El niño y el niño modoki impacts on south american rainfall (Doctoral dissertation, UNSW Sydney).

Wilks, D. S., 2011: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-384719-5.00001-1.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de los proyectos UBA 20020220200111BA y PIP 2021/2023 11220200100333CO, financiado por el CONICET.

ESTUDIO DE PATRONES ATMOSFÉRICOS VINCULADOS A EVENTOS DE OLAS DE CALOR EXTREMAS EN EL NORTE DE ARGENTINA

Juan Ignacio Caragunis^{1,2}, Belén Amancay Martorelli^{1,2,3,4}
jcaragunis@gmail.com. belenmartorelli88@gmail.com.

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)

² Universidad Nacional de los Comechingones (UNLC)

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁴ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

Palabras clave: ola de calor, circulación atmosférica, criterio de Bonner, componentes principales.

RESUMEN

Este estudio analiza los patrones atmosféricos asociados a olas de calor extremas en el norte de Argentina. Se utilizaron datos horarios del reanálisis ERA5 (1977-2020), incluyendo humedad específica (Q850), componentes del viento (U850, V850, V700), OLR, y alturas geopotenciales (Z500, Z925). Para eventos comprendidos entre 1977-2020, destacándose el ocurrido entre 29/10/2009-03/11/2009, se calcularon anomalías diarias y se evaluó el criterio de Bonner para el LLJ. Los resultados muestran anomalías positivas de OLR, una marcada anomalía anticiclónica en Z500 y ciclónica en Z925 sobre la región, junto con advección de humedad desde el norte. El Análisis de Componentes Principales (ACP) reveló que estos patrones son modos de variabilidad recurrentes, con la CP 4 de OLR mostrando anomalías negativas sobre el centro-este de Sudamérica, y la CP 4 de Z500 exhibiendo un patrón dipolar de circulación. Esto subraya su importancia para la predicción de estos eventos extremos.

1) INTRODUCCIÓN

El norte de Argentina ha experimentado un notable incremento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor en las últimas décadas (Rusticucci et al., 2016a), aunque sin una tendencia clara en su duración máxima anual (Marengo et al., 2025). Este fenómeno, ligado al cambio climático global, representa una creciente amenaza. Investigaciones previas han asociado estas olas de calor con anomalías anticiclónicas en la circulación de niveles bajos (Rusticucci et al., 2016b). La regionalización de estos eventos en Sudamérica es crucial para comprender su dinámica (Suli et al., 2023). Por tanto, el monitoreo y la identificación de sus forzantes son esenciales para la gestión de riesgos y la adaptación.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para el presente estudio, se emplearon datos horarios del reanálisis ERA5, con una alta resolución espacial de $0.25 \times 0.25^\circ$, abarcando el periodo 1977-2020. Las variables seleccionadas incluyeron la humedad específica a 850 hPa (Q850), las componentes zonal (U850) y meridional (V850) del viento a 850 hPa, la componente meridional del viento a 700 hPa (V700), la radiación de onda larga saliente (OLR), y las alturas geopotenciales en 500 hPa (Z500) y 925 hPa (Z925). La metodología implicó el cálculo de las climatologías diarias (periodo 1991-2020) a partir de los datos horarios. Seguidamente, se determinaron las anomalías diarias para las variables Q850, U850, V850, V700, Z500, Z925 y OLR, específicamente para los días de la ola de calor del caso de estudio (29/10/2009 - 03/11/2009).

Para evaluar la presencia de la corriente en chorro de capas bajas (Low Level Jet, LLJ), se monitoreó la variabilidad temporal del posicionamiento latitudinal y longitudinal del criterio de Bonner cada 6 horas, excluyendo las regiones que no cumplieran dicha condición. Adicionalmente, se aplicó el Análisis de Componentes Principales (ACP) en modo T a las variables originales Q850, Z500, Z925 y OLR. Esto permitió cuantificar la varianza acumulada por cada componente y obtener las series temporales de correlación. El análisis se centró en las dos primeras componentes principales de cada variable, derivadas de sus campos diarios durante los días considerados en el estudio.

3) RESULTADOS

La Figura 1 ilustra las anomalías atmosféricas clave para el 30 de octubre de 2009. Se observan anomalías positivas de OLR (Figura 1a), indicando inhibición convectiva, y una marcada anomalía anticiclónica en Z500 (Figura 1b) sobre el norte de Argentina, mientras que en Z925 (Figura 1c) se aprecia una anomalía ciclónica en la misma región. La advección de humedad desde el norte (Figura 1d) complementa estas condiciones sinópticas de subsidencia y transporte de aire cálido.

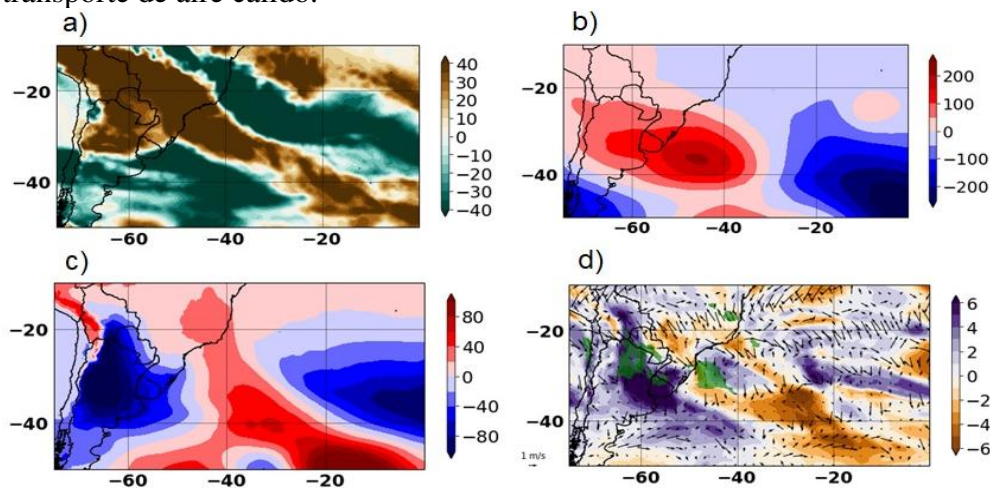


Figura 1. Campos de anomalías para el día 30/10/2009 para las variables a) OLR, b) altura geopotencial en 500 hPa, c) altura geopotencial en 925 hPa, d) humedad específica y vector viento horizontal en 850 hPa.

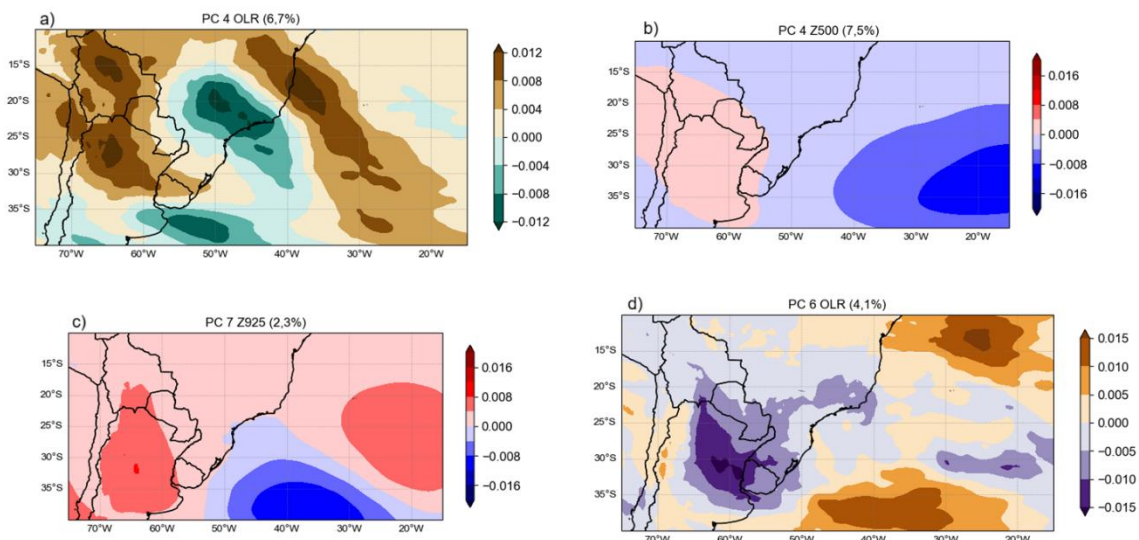


Figura 2. Patrones espaciales de las componentes principales asociadas a los campos descriptos en la Figura 1.

La Figura 2 desglosa estos patrones dominantes de variabilidad mediante ACP, mostrando que la CP 4 de OLR (Figura 2a, 4.7% de varianza) presenta anomalías negativas sobre el centro-este de Sudamérica, sugiriendo convección activa. La CP 4 de Z500 (Figura 2b, 7.5% de varianza) revela un dipolo de circulación en niveles medios, con anomalías positivas continentales. La CP 7 de Z925 (Figura 2c, 2.3% de varianza) y la CP 6 de OLR (Figura 2d, 4.1% de varianza) también exhiben patrones espacialmente coherentes con las condiciones observadas, indicando la naturaleza recurrente de estos forzantes.

4) CONCLUSIONES

El evento de ola de calor del 30 de octubre de 2009 en la región de estudio se asoció a una configuración sinóptica compleja y bien definida, caracterizada por anomalías positivas de OLR (indicando inhibición de la convección), la presencia de un anticiclón en niveles medios (Z500) sobre el continente, y un ciclón en niveles bajos (Z925) sobre la región. Este patrón evidencia una intensa subsidencia atmosférica, fundamental para el calentamiento por compresión y la estabilidad. La situación se vio exacerbada por una notable advección de humedad desde el norte, probablemente facilitada por un LLJ, que contribuyó a mantener las elevadas temperaturas. El análisis de componentes principales revela que estos patrones sinópticos no son aislados, sino que corresponden a modos de variabilidad recurrentes y dominantes en la atmósfera regional. La coherencia entre las anomalías observadas durante el evento y estos patrones subyacentes sugiere que la ola de calor se desarrolló bajo forzantes atmosféricos bien establecidos y predecibles, lo que subraya la importancia de comprender su dinámica para la mejora de los sistemas de pronóstico y alerta temprana de eventos extremos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Solange Suli por la provisión de los datos de los eventos de olas de calor para la realización del trabajo.

REFERENCIAS

Marengo, J. A., Calim Costa, M., Cunha, A. P., Espinoza, J. C., Jimenez, J. C., Libonati, R., Miranda, V., Trigo, I. F., Sierra, J. P., Geirinhas, J. L., Ramos, A. M., Skansi, M., Molina-Carpio, J. y Salinas, R., 2025: Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979–2023 in central South America. *Frontiers in Climate*, 7.

Rusticucci, M. M., Kyselý, J., Almeida, G. y Lhotka, O, 2016a: Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3-4), 679-693.

Rusticucci, M., Barrucand, M. y Collazo, S., 2016b. Heat waves in Argentina: Definition, analysis and trends. *International Journal of Climatology*, 36(4), 1851-1863.

Suli, S., Barriopedro P., García-Herrera, R. y Rusticucci, M.M., 2023: Regionalisation of heat waves in southern South America. *Weather and Climate Extremes*, 40, 100569.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA RADIACIÓN UV EN ARGENTINA: SU VÍNCULO CON LA NUBOSIDAD Y CON LOS FORZANTES CLIMÁTICOS DE GRAN ESCALA

Serena I. Sanchez^{1,2}, Josefina Blázquez^{1,2}, Vanesa Pántano^{1,2,3}

sisanchez@fcaglp.unlp.edu.ar

¹Grupo de Investigación en Clima, Variabilidad y Extremos (CLAVE). Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG), UNLP

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), FCEN-UBA

Palabras clave: Radiación ultravioleta eritémica, TEMIS, índices de circulación.

1) INTRODUCCIÓN

La radiación ultravioleta (UV) tiene efectos tanto beneficiosos como perjudiciales sobre la salud humana. En dosis moderadas, es esencial para la síntesis de vitamina D, pero una exposición excesiva conlleva un aumento del riesgo de enfermedades cutáneas, como el cáncer de piel, cuya incidencia ha crecido desde la década de 1970 (OMS, 2002). El impacto biológico de esta radiación se cuantifica mediante espectros de acción específicos, como el eritémico (McKinlay y Diffey, 1987), que permite calcular la dosis eritémica acumulada en un período de tiempo (DUVN, J/m²).

Diversos factores modulan la cantidad de radiación UV que alcanza la superficie: el ángulo cenital solar, el contenido de ozono, la nubosidad, los aerosoles, la altitud, la latitud, la época del año y el albedo superficial. Las nubes, en particular, tienen un efecto altamente variable. Si bien suelen reducir la irradiancia entre un 20% y un 70% en cielos cubiertos (Wolfram y otros, 2017), también pueden incrementarla hasta en un 30% bajo ciertas condiciones, fenómeno conocido como “efecto de realce” (Calbó y otros, 2005).

Si bien hay numerosos estudios en la literatura que relacionan los principales forzantes de gran escala con la variación de la precipitación y la nubosidad en el sur de Sudamérica (Silvestri y Vera, 2003; Mantua y Hare, 2002; Cai y otros, 2020), no se han encontrado estudios que vinculen dichos forzantes con la radiación UV en la región. Por esta razón, este trabajo tiene como objetivo analizar dicha relación, partiendo de la hipótesis de que la nubosidad está relacionada con los modos de variabilidad de la atmósfera que influyen en el clima del sur de Sudamérica y que, a su vez, la radiación UV se ve afectada por la nubosidad.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos diarios de radiación DUVN del servicio satelital *Tropospheric Emission Monitoring Internet Service* (TEMIS), para cinco localidades: La Quiaca, Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata. Para evaluar la relación con la nubosidad, se utilizaron datos del reanálisis ERA5 con una resolución espacial de 0.25°×0.25°, complementados con observaciones satelitales del sensor *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES), cuya resolución espacial es de 1°×1°, y datos de superficie proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Los índices climáticos se obtuvieron del *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, <https://psl.noaa.gov>) y la *Universidade Federal de Itajubá* (UNIFEI, <https://meteorologia.unifei.edu.br/teleconexoes/indice?id=saodi>). El análisis se realizó entre los años 2005 y 2023.

Se estudió la variabilidad de la radiación UV a través del valor medio de DUVN en verano (diciembre-enero-febrero, DEF), otoño (marzo-abril-mayo, MAM) y primavera

(septiembre-octubre-noviembre, SON), estaciones en las que los niveles elevados de radiación suponen un mayor riesgo para la salud. Las correlaciones se estimaron mediante coeficientes de Pearson (para nubosidad) y Spearman (para índices climáticos) (Wilks, 2011). Las correlaciones con los índices climáticos se analizaron tanto de forma directa como con desfases temporales de uno a tres meses ("correlaciones lagueadas"), a fin de explorar posibles efectos diferidos de los forzantes climáticos sobre la variabilidad de la DUVN.

3) RESULTADOS

Con el objetivo de estudiar la relación entre la nubosidad y la DUVN, se calcularon los coeficientes de correlación y determinación para las cinco localidades durante los trimestres DEF, MAM y SON. A modo ilustrativo, se presentan en la Figura 1 los resultados de ERA5 correspondientes a Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata. En verano, se identificaron correlaciones negativas entre la nubosidad (alta y baja) y la DUVN, lo que indica un efecto atenuante de ambos tipos de nubes, siendo más significativo en el caso de la nubosidad baja. En cambio, durante otoño y primavera, en Salta se observaron correlaciones positivas, aunque con bajos valores del coeficiente de determinación, lo que sugiere un posible aumento de la DUVN asociado a una mayor cobertura nubosa. Por su parte, en las estaciones del centro del país (Córdoba, La Plata y Mar del Plata), las correlaciones fueron predominantemente negativas para ambos tipos de nubosidad, lo que sugiere que en dichas localidades la nubosidad también podría actuar como atenuante de la DUVN en otoño y primavera. Los análisis realizados con los datos de CERES y del SMN presentaron resultados similares (no se muestran): en las localidades del centro se observaron correlaciones negativas entre la nubosidad y la DUVN en las tres estaciones analizadas, mientras que en Salta se registraron correlaciones positivas durante otoño y primavera.

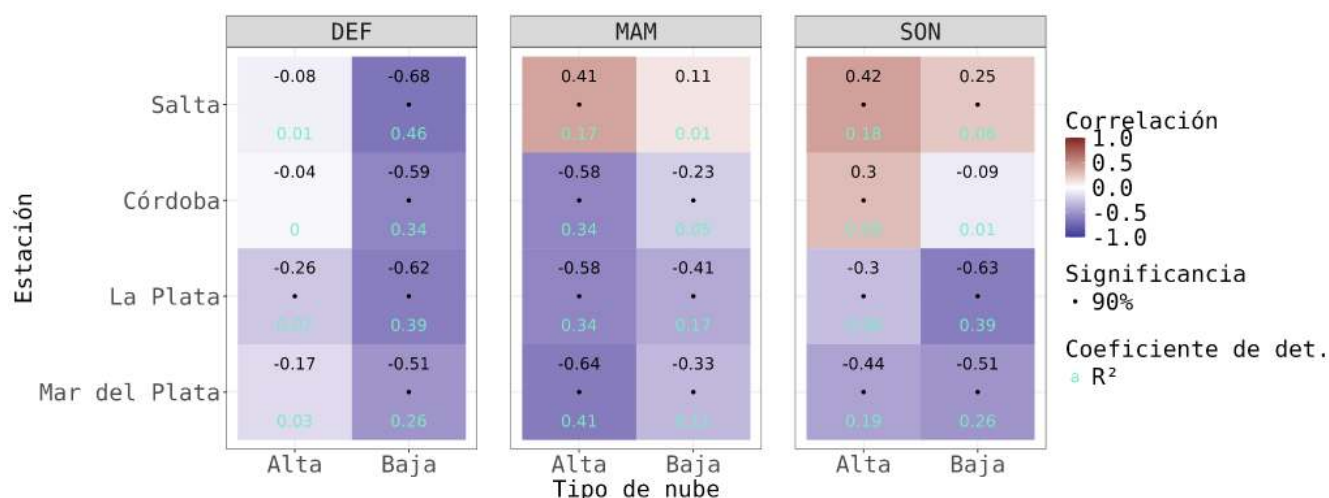


Figura 1: Correlación de Pearson (negro) y coeficiente de determinación (verde) entre la DUVN y la fracción de cobertura de nubes altas y bajas en La Quiaca, Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata en el período 2005-2023, (a) DEF, (b) MAM y (c) SON. Correlaciones significativas (90%) con punto negro.

En relación con los forzantes climáticos, la Figura 2 presenta, a modo de ejemplo, los valores de correlación entre diversos índices climáticos y el valor medio estacional de la DUVN para las localidades de Salta y La Plata durante el trimestre MAM, destacándose numéricamente aquellas correlaciones estadísticamente significativas. Los índices PDO y ENSO mostraron correlaciones negativas, lo que sugiere, en el caso de la PDO, que las fases positivas (negativas) se asocian con menores (mayores) niveles de radiación UV en superficie. En el caso del ENSO, los mayores niveles de radiación UV están relacionados a la fase fría (La Niña), mientras que los menores se relacionan con la fase cálida (El Niño).

Por su parte, el SAM presentó una correlación lagueada positiva, lo que indicaría que su fase positiva, caracterizada por mayores presiones en latitudes medias, podría estar asociada a un incremento de la radiación UV en superficie. En contraste, los índices vinculados al Océano Índico, al Atlántico y la QBO no mostraron correlaciones significativas para estas dos localidades durante el trimestre considerado.

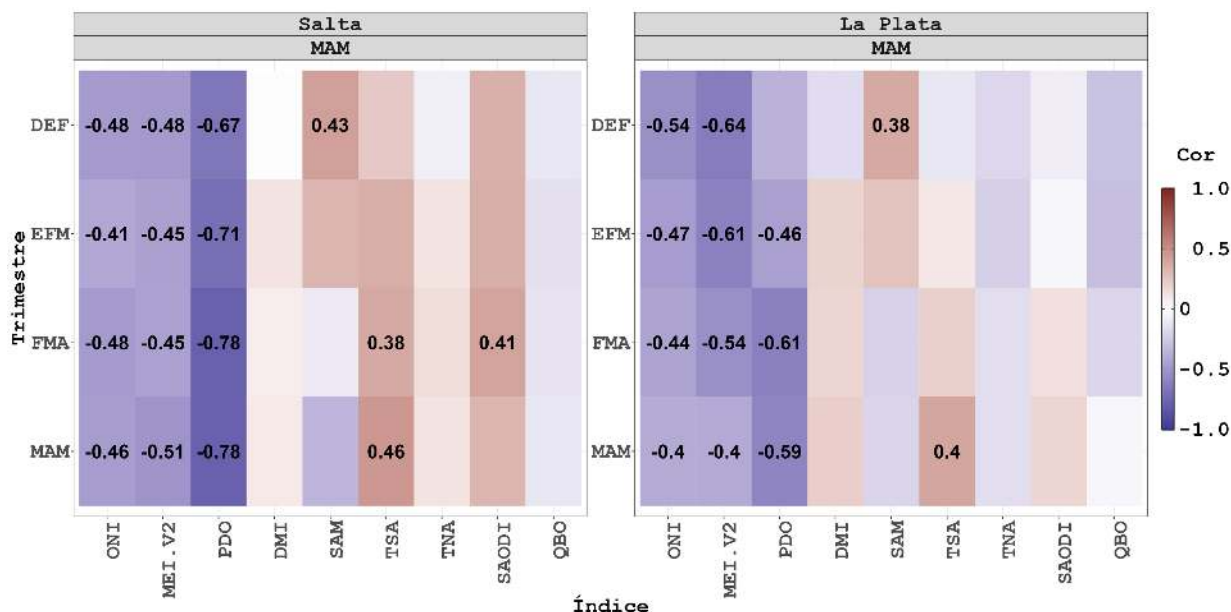


Figura 2: Correlación de Spearman entre los índices climáticos y la DUVN, directas y lagueadas (1 a 3 meses), para los trimestres DEF, MAM y SON. Correlaciones significativas (90%) con valor numérico.

4) CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que la variabilidad interanual de la radiación UV en algunas localidades de Argentina podría estar parcialmente modulada por la nubosidad y, por ende, por ciertos forzantes climáticos de gran escala, tales como el ENSO, la PDO y el SAM, donde la magnitud y el signo de estas relaciones varían según la región y la estación del año.

REFERENCIAS

- McKinlay, A.F. y Diffey, B.L. (1987):** A Reference Action Spectrum for Ultraviolet Induced Erythema in Human Skin. In: Passchier, W.F. and Bosnjakovic, B.F.M., Eds., Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Cai, W., McPhaden, M.J., Grimm, A.M. y otros (2020):** Climate impacts of the el niño–southern oscillation on south america. Nature Reviews Earth & Environment, 1(4):215–231.
- Calbó, J., Pages, D., y González, J.-A. (2005):** Empirical studies of cloud effects on uv radiation: A review. Reviews of Geophysics, 43(2).
- Mantua, N. J. y Hare, S. R. (2002):** The pacific decadal oscillation. Journal of oceanography, 58:35–44.
- Organización Mundial de la Salud -OMS- y otros (2002):** Global solar uv index: a practical guide. Technical report, World Health Organization.
- Silvestri, G. E. y Vera, C. S. (2003):** Antarctic oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern south america. Geophysical Research Letters, 30(21).
- Wilks, D. S. (2011):** Statistical methods in the atmospheric sciences, volumen 100. Academic press.
- Wolfram, E. A., Orte, F., Salvador, J., Quiroga, J., D'Elia, R., Antón, M., Alados Arboledas, L., y Quel, E. (2017):** Study of uv cloud modification factors in southern patagonia. En AIP Conference Proceedings, volumen 1810. AIP Publishing.

PATRONES SINÓPTICOS PREVALENTES EN NOCHES CALUROSAS DE VERANO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUENOS AIRES Y SU RELACIÓN CON LA ISLA DE CALOR URBANA

Ernesto Petino Zappala¹, Marcos Saucedo^{1,2}

epetino@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO)

Palabras clave: isla de calor urbana, noches calurosas, circulación sinóptica, Área Metropolitana de Buenos Aires

1) INTRODUCCIÓN

La isla de calor urbana (ICU) es uno de los fenómenos más notables de modificación ambiental no intencional causada por el ser humano, producto de cambios en los materiales de superficie y la geometría urbana. Su intensidad máxima suele registrarse durante la noche (Oke, 1982). En verano, la sinergia entre la ICU y las olas de calor podría exacerbar los impactos en la salud, como el aumento de la mortalidad. Algunos estudios han subrayado que las olas de calor podrían intensificar la ICU, aunque los resultados son contradictorios.

La ICU presenta una gran variabilidad espacial, tanto entre ciudades como al interior de una misma urbe. Su intensidad depende de factores meteorológicos como cielos despejados, estabilidad atmosférica y vientos débiles (Oke, 1982). Por esta razón, los patrones de circulación sinóptica pueden condicionar su comportamiento observado.

En el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), la ICU ha sido documentada desde la década de 1950. Algunos estudios sugieren una disminución en su intensidad, posiblemente asociada a cambios en los patrones sinópticos regionales, que favorecen una mayor nubosidad y vientos del este (Camillioni y Barrucand, 2012). Durante los veranos de 2011 a 2020, se observó que la ICU nocturna presenta menor intensidad en noches cálidas que en noches normales o frescas, aunque sigue siendo significativa (Petino Zappala, 2025).

Este trabajo tiene como objetivo: (1) identificar los patrones sinópticos predominantes durante noches cálidas de verano en Buenos Aires, y (2) analizar la intensidad media y la evolución horaria de la ICU asociada a cada patrón.

2) METODOLOGÍA

El estudio abarca las noches de los meses estivales (diciembre, enero, febrero) del período 2011-2020. La intensidad de la isla de calor urbana (ICU) en el AMBA se estimó como la diferencia de temperatura instantánea entre el Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA, referencia urbana) y la estación Ezeiza Aero (referencia rural), ambas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se definieron como noches cálidas aquellas con temperatura en OCBA a las 6 UTC en el tercil superior ($\geq 23.6^{\circ}\text{C}$) del período analizado, considerando el período nocturno entre 0 y 9 UTC. La elección de este horario se debió a que es el momento aproximado en que la ICU en AMBA alcanza su máximo (Camillioni y Barrucand, 2012).

Para el análisis sinóptico, se utilizaron datos de ERA5 a las 0 UTC, incluyendo viento zonal, viento meridional y temperatura potencial equivalente (θ_e) en 850 hPa, sobre el dominio 25° - 45°S y 65° - 45°O (resolución $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$). Los datos se normalizaron respecto

al promedio y desvío estándar de los veranos 2011-2020 por variable y punto de grilla. Para identificar patrones de circulación, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) que retuvo las componentes responsables del 80% de la varianza temporal, reduciendo así la dimensionalidad. Posteriormente, se utilizó el algoritmo k-means sobre estas componentes, seleccionando el número óptimo de clusters mediante el estadístico de Davies-Bouldin, que minimiza la dispersión intra-cluster y maximiza la separación inter-cluster.

3) RESULTADOS

Se obtuvieron cinco patrones sinópticos asociados a noches calurosas en el AMBA. Los campos medios se observan en la Figura 1, mientras que el número de casos asociados a cada uno y la descripción de los campos medios se puede ver en la Tabla I.

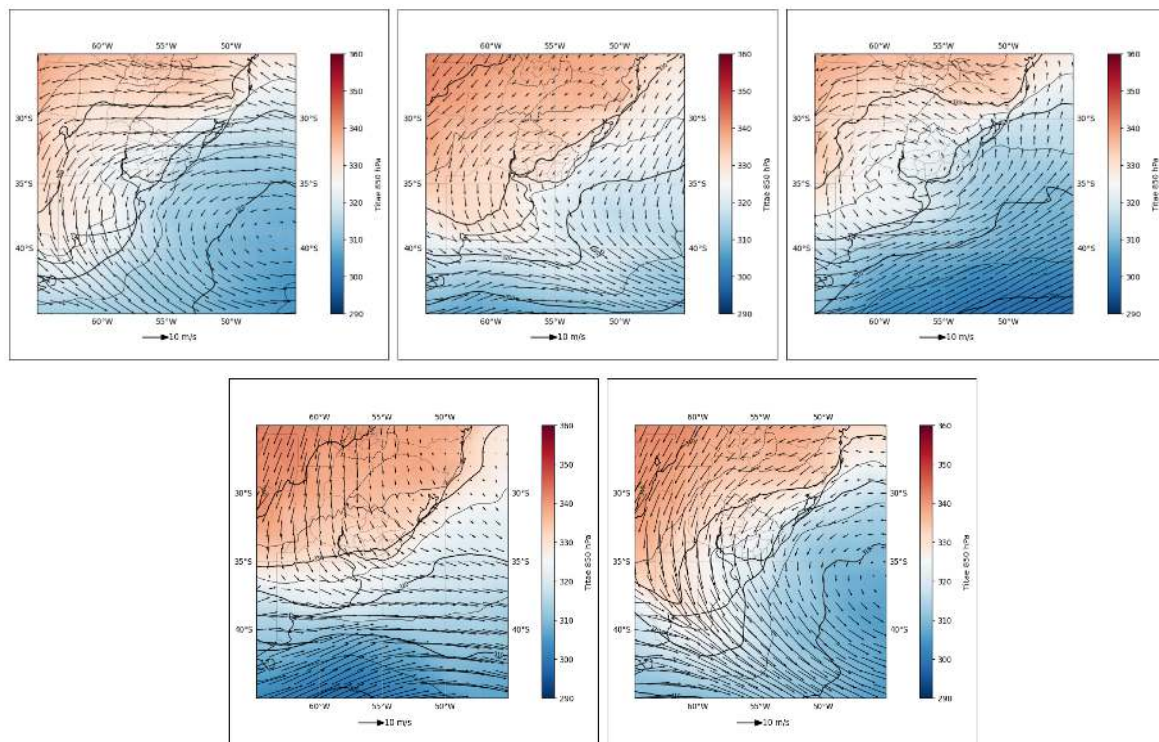


Figura 1: Patrones sinópticos asociados a noches calurosas en OCBA. Viento vectorial medio (flechas), temperatura media (sombreado). Clusters 1-3 arriba, clusters 4-5 abajo.

Cluster	Casos	Descripción del campo medio en 850 hPa
1	74	Anticiclón atlántico intenso, viento 5-10 m/s en AMBA sin advección cálida con $\Theta_e < 325$ K
2	67	Anticiclón atlántico retirado, vientos débiles sobre AMBA con $\Theta_e > 325$ K
3	64	Anticiclón ubicado sobre AMBA con vientos muy débiles y $\Theta_e < 325$ K
4	58	Frente estacionario al sur de AMBA, advección cálida débil y $\Theta_e \approx 330$ K
5	42	Frente frío al SO de AMBA, viento > 10 m/s con advección cálida intensa y $\Theta_e \approx 325$ K

Tabla I: Cantidad de casos asociados a cada cluster y descripción de los patrones sinópticos medios

La marcha horaria media de la ICU para cada cluster puede observarse en la Figura 2.

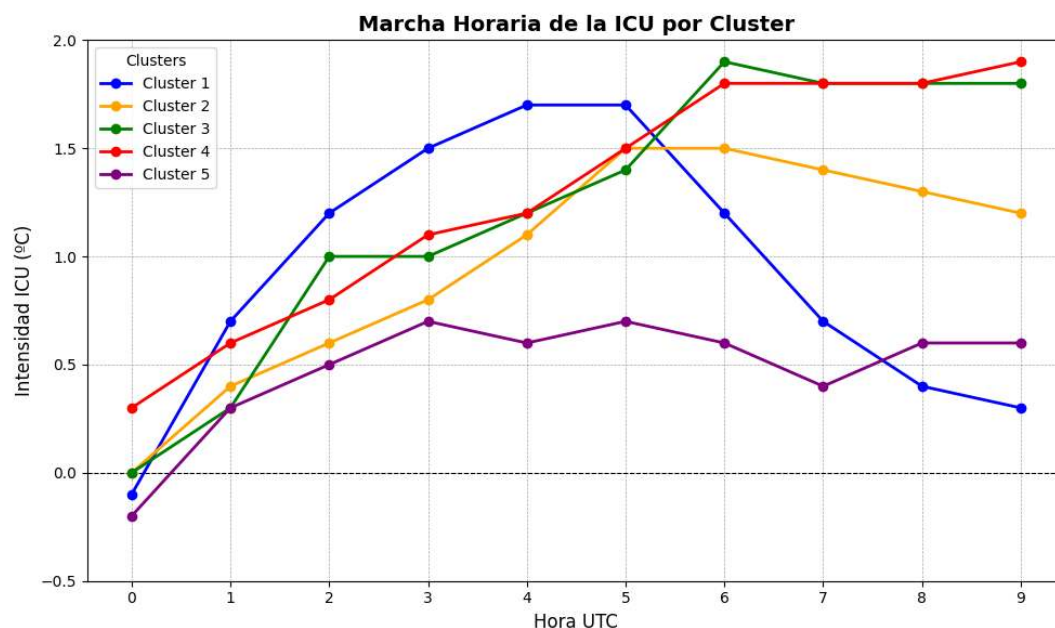


Figura 2: Marcha horaria media entre las 0 y las 9 UTC para los clusters encontrados

Se observan diferencias significativas en la evolución horaria media de la Isla de Calor Urbana (ICU) entre los distintos clusters identificados.

- Clusters 2 al 4 (caracterizados por vientos débiles en 850 hPa, Figura 1, y en superficie —no mostrado—) presentan un desarrollo continuo de la ICU entre las 0 y las 6 UTC, alcanzando valores medios de 1,5 a 2 °C, seguido de un leve decremento o una estabilización a partir de esa hora.
- Cluster 5 (asociado a vientos intensos en 850 hPa y advección cálida) muestra un desarrollo débil hasta las 3 UTC, manteniéndose estable hasta el final de la noche (9 UTC), con valores medios inferiores a 0,7 °C.
- Cluster 1 (bajo condiciones de bloqueo anticiclónico atlántico y vientos moderados, menos intensos que en el cluster 5) registra un incremento notable de la ICU entre las 0 y las 5 UTC (alcanzando un máximo de 1,7 °C), seguido de una erosión progresiva hasta su casi desaparición al amanecer.

A las 6 UTC, todos los clusters presentan una ICU significativamente mayor que cero ($p < 0,05$ en el cluster 5; $p < 0,01$ en los clusters 1–4), según pruebas t de Student. Además, un análisis de ANOVA revela diferencias significativas entre los clusters ($p < 0,05$). Mediante un *post-hoc* de Tukey, se confirma que la ICU media en los clusters 2, 3 y 4 es significativamente mayor que en el cluster 5 ($p < 0,05$).

4) REFERENCIAS

Camillioni, I. y Barrucand, M., 2012: Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina urban heat island. *Theor Appl Climatol* 107: 47-58.

Oke, T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 108: 1-24.

Petino Zappala, E., 2025: Comportamiento de la isla de calor urbana en noches calurosas de verano en el Área Metropolitana de Buenos Aires. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera. Universidad de Buenos Aires.

IDENTIFICACIÓN DE AACPS EN ARGENTINA Y CORRELACIÓN CON TIEMPO SEVERO

Mariela Ayelen Palavecino¹, Karimar Ledesma-Maldonado²
apalavecino@smn.gob.ar. Autora correspondiente.

¹Servicio Meteorológico Nacional, Argentina (SMN)

²Northern Illinois University, Illinois, USA

Palabras claves: Plumas de Cirros por Encima del Yunque, imágenes satelitales, pronóstico de mesoescala, tiempo severo.

1) INTRODUCCIÓN

Múltiples estudios han demostrado que la identificación de las Plumas de Cirros por Encima del Yunque (AACPs, por sus siglas en inglés) es esencial ya que las tormentas que generan AACPs tienen una probabilidad significativamente mayor de producir fenómenos severos, los cuales se pueden detectar hasta 31 minutos antes de que sean reportados en la superficie (McCann, 1983; Bedka, et. al, 2018).

En Sudamérica, la región que comprende Uruguay, el sur de Brasil, parte del sur de Paraguay, así como la Llanura Pampeana y el Litoral en Argentina, es conocida como "Pasillo de los tornados" (Balbi et al., 2018) y se considera el segundo lugar del mundo con mayor actividad tornádica. La limitada cobertura de la red de radares en la región, especialmente en áreas propensas a tornados, subraya la necesidad de integrar nuevas metodologías de análisis, como el uso de imágenes satelitales. Los AACPs se caracterizan por cirros estrechos que se elevan varios kilómetros sobre el yunque principal de una tormenta eléctrica, cerca del tope emergente, extendiéndose hacia la estratosfera inferior. Para identificar con precisión la presencia de AACPs, se utilizan imágenes satelitales infrarrojas y del canal visible 2.

El objetivo de esta investigación es incorporar una herramienta adicional para los pronósticos de mesoescala y de corto plazo, asociados a tiempo severo al identificar múltiples AACPs ocurridos en un evento de convección profunda durante diciembre de 2023 en Argentina, analizando su relación con fenómenos severos y las condiciones sinópticas asociadas.

2) METODOLOGÍA

En todos los casos que se analizaron entre el periodo del 15 al 16 de diciembre de 2023, se detectaron múltiples eventos de AACPs. En este trabajo se presenta el evento que ocurrió durante el 16 de diciembre de 2023 debido a su intensidad y a los daños reportados por el mismo.

Para el análisis, se utilizaron imágenes satelitales del infrarrojo (Banda 13 - 10,30 μm) y visible (Banda 02 - 0,64 μm) obtenidas del archivo del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina y de la página ClimaSurGBA. El análisis sinóptico se llevó a cabo empleando datos de viento, temperatura, agua precipitable en toda la columna y anomalías de los vientos a diferentes niveles, utilizando el modelo de reanálisis del GFS de NCEP/NCAR provistos por el PSL (Physical Sciences Laboratory) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) para las 12 UTC del 16 de diciembre. Además, se estimaron diagramas Skew-T cercanos en tiempo y espacio al evento, utilizando el modelo GFS.

3) RESULTADOS

Los AACPs presentan diferentes formas y en todos los casos, se observa el enfriamiento del

aire dando lugar a patrones de temperatura característicos en forma de "U" o "V", además de facilitar la generación de ondas de gravedad que rompen cerca de la tropopausa y forman un brinco hidráulico interno en el lado sotavento de la convección profunda (Bedka, et. al, 2018; O'Neill et al., 2021). La Figura 1 presenta algunos de los AACPs detectados durante el 16 de diciembre en imágenes de infrarrojo. En estos casos, se observa el overshooting top y el ACCP adyacente como una pluma en una gama de amarillos y naranjas, asociada a una región de temperaturas más cálidas, que se encuentra rodeada por un patrón en forma de "U" o "V" con temperaturas más frías. La disposición de los ACCPs es noroeste-sudeste, influenciados por los vientos en altura, mientras que los niveles bajos y medios de la atmósfera juegan un papel crucial en la dirección de propagación de las tormentas. Cabe destacar que la paleta de colores empleada en las imágenes satelitales es fundamental para la identificación de los AACPs, ya que su gama puede facilitar o dificultar su detección.

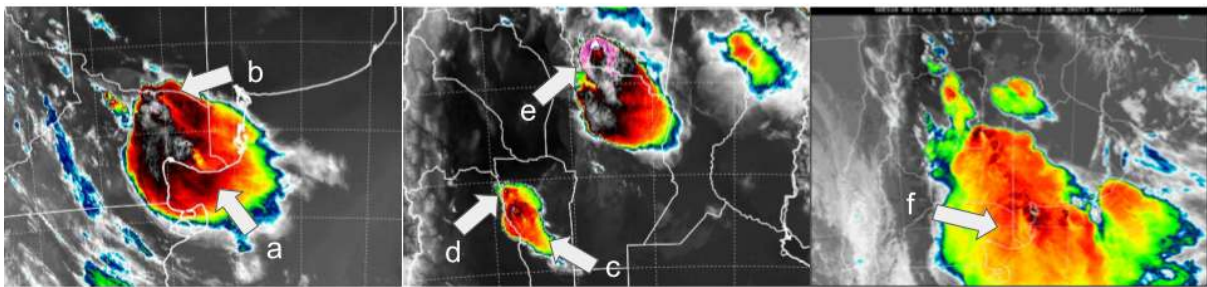


Figura 1. Imágenes del infrarrojo del canal 13 de GOES-16 para el 16 de diciembre de 2023: a las 01.40 UTC en cercanías de (a) Primera Angostura y (b) Choele Choel, Rio Negro; (c y d) La Calera, San Luis; (e) Villa San Martin, Santiago del Estero; (f) cercanías de Bahía Blanca, Buenos Aires a las 22 UTC.

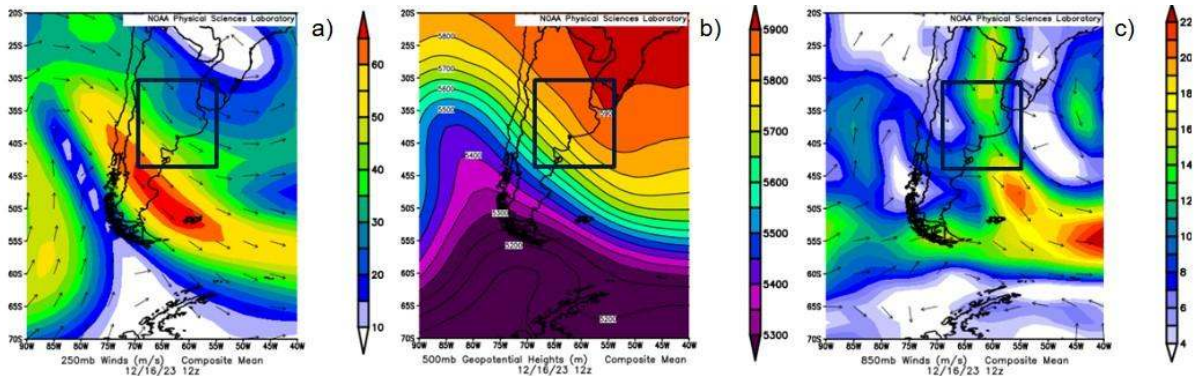


Figura 2. Reanálisis NCEP/NCAR para el 16 de diciembre de 2023 a las 12 UTC: vientos [m/s] en 250 hPa (a) y en 850 hPa (c); y altura geopotencial [m] de 500 hPa (b). El cuadro negro corresponde al área donde se observaron los AACPs.

Las condiciones sinópticas (Figura 2a) muestran, en niveles altos, la presencia de la corriente en chorro polar con vientos del noroeste que superan los 100 nudos (kt) sobre la región patagónica argentina, junto con anomalías positivas. En 500 hPa (Figura 2b), se observa una vaguada de inclinación positiva (hacia el oeste) sobre el Océano Pacífico y un eje de cuña que se extiende desde Uruguay hacia el sur. Sobre la región central de Argentina se insinúa la presencia de una onda corta en el campo de geopotencial (en 35°S-75°W, aproximadamente), con desplazamiento hacia el sudeste. En 850 hPa (Figura 2c) la corriente en chorro de capas bajas de América del Sur (SALLJ, por sus siglas en inglés) se ubica entre 20°-40°S y 60°-65°W, favoreciendo el transporte de humedad con vientos del norte de hasta 50 kt, y anomalías superiores a lo normal hasta el noreste de la Patagonia. Por último, en el campo de

presión a nivel medio del mar, la Baja Térmica del Noroeste Argentino se ubica en su posición habitual y un frente frío avanza desde la Patagonia central hacia el noreste (no mostrado). El análisis de este y otros eventos (no mostrados) junto con los reportes de tiempo severo (especialmente la caída de granizo), muestran que los AACPs cumplen con ciertas características: vientos superiores a 58 kt en niveles altos, generalmente vinculados a la corriente en chorro polar o subtropical; y la presencia de una vaguada de onda larga en niveles medios, cercana a la región. Por otro lado, no se encontró una señal clara sobre la cantidad de agua precipitable necesaria para el desarrollo de AACPs.

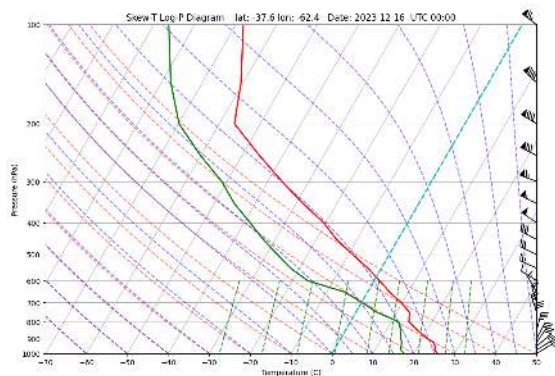


Figura 3. Diagrama skew-T estimado para el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC en Pigüé, Buenos Aires.

La Figura 3 muestra el diagrama de skew-T estimado horas antes del inicio de la convección en Pigüé, Buenos Aires. Se observa una advección vertical cálida, con vientos del sector norte de hasta 40 kt en niveles bajos. También se observa un cambio de dirección del viento con la altura (cortante vertical), condición clave para la formación de AACPs. La tropopausa se ubica por arriba de 200 hPa, en un entorno tropical donde, según Murillo et. al (2022) es probable encontrar AACPs “fríos”, con plumas más frías de lo normal.

4) CONCLUSIONES

En conclusión, esta investigación destaca la importancia de identificar AACPs como herramienta adicional para mejorar la precisión de los pronósticos de mesoescala y de tiempo severo en Argentina. Los resultados indican que los AACPs son influenciados cuando vientos superiores a 58 kt en la troposfera alta (200-300 hPa), interactúan con los toques emergentes de las tormentas, generando patrones de temperatura característicos en forma de "U" o "V" vistos en imágenes de satélite infrarrojo. También se destaca la importancia de la presencia de una cortante vertical de viento para el desarrollo de los mismos. Estos resultados son consistentes con estudios anteriores que muestran que los vientos de niveles bajos y medios de la atmósfera juegan un papel crucial en la dirección de propagación de las tormentas.

REFERENCIAS SELECCIONADAS

- Balbi, M., Barbieri, P., 2018:** Enfoque científico del riesgo-evaluación del potencial de tornados en Argentina.
- Bedka, K., Murillo, E. M., Homeyer, C. R., Scarino, Mersiovsky, H., 2018:** The Above-Anvil Cirrus Plume: An Important Severe Weather Indicator in Visible and Infrared Satellite Imagery.
- McCann, D. W., 1983:** The enhanced-V: A satellite observable severe storm signature. Mon. Wea. Rev., 111, 887–894.
- O'Neill, M., Orf, L., Heymsfield, G. M., Halbert, K., 2021:** Hydraulic Jump dynamics above supercell thunderstorms.
- Murillo, E. M., Homeyer, C. R., 2022:** What Determines Above-Anvil Cirrus Plume Infrared Temperature?.

CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DE TÉRMICAS EN LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA MEDIANTE OBSERVACIONES EN PLANEADOR Y SIMULACIONES LES

Alejandro Pooli^{1,2}, Lucia Curto^{1,3}, María I. Gassmann^{1,3}

alejandropooli@gmail.com

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

²Servicio Meteorológico Nacional

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras clave: vuelo en planeadores, PALM, empuje

1. INTRODUCCIÓN

Las térmicas son estructuras convectivas esenciales para el transporte vertical de calor y humedad en la Capa Límite Atmosférica (CLA), y también son el principal mecanismo de ascenso de los planeadores (aeronaves sin motor). Las térmicas se originan a partir de la convergencia de plumas térmicas desarrolladas en la Capa de Superficie, formando estructuras más organizadas, ya en la Capa Mezclada (Stull, 2012).

Actualmente no se cuenta con estudios detallados sobre el ciclo de vida de las térmicas en la atmósfera basados en mediciones de campo, ya que las mediciones que se realizan son cuasi-puntuales. A su vez, el modelado de la CLA en los últimos años ha tomado impulso con modelos de código abierto y procesos computacionales optimizados (Pooli, 2025). En este trabajo se combinan observaciones obtenidas desde planeadores con simulaciones numéricas en el modelo LES PALM, para caracterizar detalladamente la estructura y evolución de las térmicas en condiciones de buen tiempo en la llanura pampeana argentina.

2. METODOLOGÍA

Se desarrolló el dispositivo “Mirlo”, basado en Arduino y sensores Bosch BME280, capaz de registrar presión, temperatura y humedad en vuelo. El equipo fue instalado en planeadores de clubes de vuelo a vela, recolectando datos durante un vuelo en planeador, realizado el día 28/10/2021 en San Andrés de Giles, Provincia de Buenos Aires. Los datos fueron validados mediante comparación con radiosondeos Vaisala. A partir de ellos se calcularon variables termodinámicas como temperatura potencial virtual (θ_v) y humedad específica (q), y se distinguieron los tramos correspondientes a ascensos (vuelo dentro de térmicas) de aquellos asociados a descensos (vuelo en el entorno), mediante el análisis de series temporales de altura.

Además, se realizó una simulación numérica con el modelo LES PALM (Maronga et al., 2015) para estudiar la organización espacial y el ciclo de vida de las térmicas. En la configuración de la corrida se establecieron los perfiles de temperatura y humedad iniciales

similares a los del vuelo, un perfil de viento geostrófico nulo, un dominio de 9 x 6 km y 2400 m de altura, con tamaño de grilla de 30 x 30 x 30 m. No se permitió la formación de nubosidad debido a la inclusión del modelo de radiación “Clear-Sky”. El tiempo de simulación fue de 2 h.

3. RESULTADOS

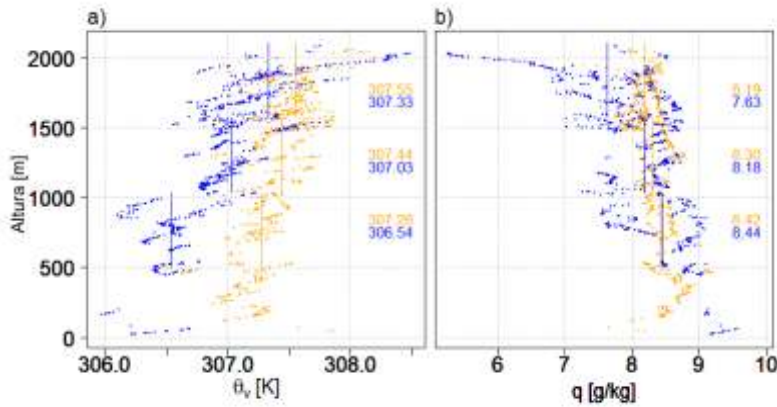


Figura 1: Perfiles verticales de (a) θ_v (K) y (b) q (g kg⁻¹) para los datos obtenidos en vuelo. Se indican movimientos verticales de ascenso (naranja) y descenso (azul). Para la parte baja, media y alta de la CLA se muestran θ_v media (a) y q media (b) en forma de líneas verticales, con el color correspondiente al movimiento vertical (ascensos o descensos), y en el margen derecho se muestran en número los valores en orden de altura.

Las observaciones realizadas en el vuelo (Fig. 1) muestran que, en niveles bajos de la CLA, las térmicas son más cálidas y húmedas que su entorno. En niveles medios y altos conservan el exceso de humedad, pero su temperatura relativa disminuye. Este cambio implica una transición del empuje positivo al negativo, aunque la inercia les permite continuar el ascenso. Las parcelas de aire que logran penetrar en la parte inferior de la Atmósfera Libre encuentran empuje negativo y son forzadas a descender, generando el arrastre de aire más cálido y seco hacia la Capa Mezclada a través del proceso de entremezcla. Este mecanismo puede identificarse en los datos correspondientes a los niveles más altos del registro, donde se observan los valores máximos de θ_v y mínimos de q , asociados a movimientos descendentes.

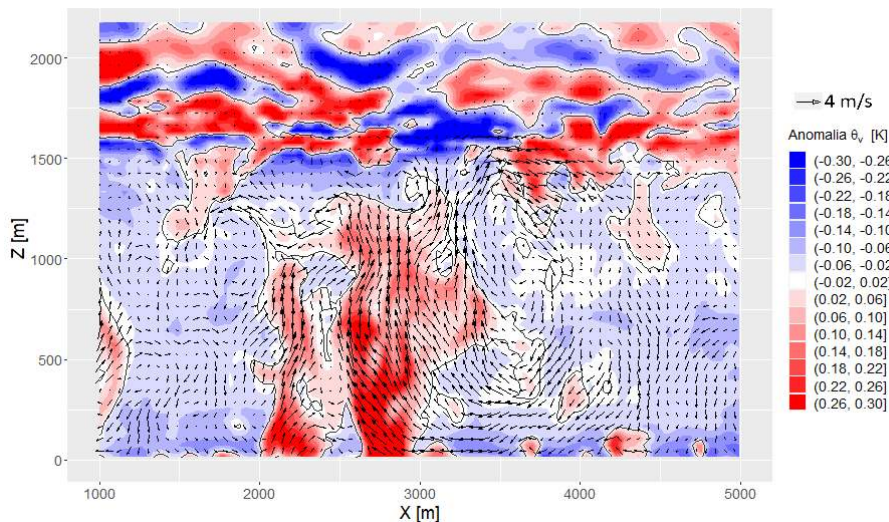


Figura 2: Corte vertical de anomalía de θ_v (K) para la simulación del modelo PALM sin viento. En todos los casos el contorno negro indica el valor nulo para la variable analizada. Los vectores indican la dirección e intensidad del viento.

La simulación con PALM (Fig. 2) reprodujo de forma similar los patrones observados. Además, se encontró que en condiciones de calma, se observaron estructuras hexagonales organizadas horizontalmente; con viento, las térmicas se alinearon en calles convectivas. Una simulación de alta frecuencia

permitió identificar etapas del ciclo de vida de las térmicas: génesis, desarrollo, overshooting/entremezcla y disipación.

4. CONCLUSIONES

Los planeadores demostraron ser plataformas eficientes para el estudio in situ de la dinámica de las térmicas en la CLA. La implementación del sistema de medición “Mirlo” permitió obtener registros confiables de variables termodinámicas clave, como temperatura, humedad y presión, con una resolución temporal adecuada para el análisis de procesos de la escala de los grandes torbellinos.

Las observaciones aéreas, combinadas con simulaciones LES en el modelo PALM, ofrecieron una descripción detallada de la estructura vertical y evolución de las térmicas, así como del mecanismo de entremezcla en la Zona de Entremezcla. Se verificó el cambio del empuje de positivo a negativo con la altura, la persistencia del exceso de humedad en las térmicas, y la influencia de la inercia en su capacidad de penetrar en la Atmósfera Libre.

Además, las simulaciones numéricas permitieron identificar patrones de organización espacial de la convección, como celdas hexagonales y calles convectivas, en función de la intensidad de viento. Esto no sólo valida el modelo utilizado, sino que también mejora la comprensión de los factores que condicionan el desarrollo y la morfología de las térmicas.

Los resultados obtenidos son valiosos tanto para la meteorología operacional como para el diseño de estrategias de vuelo a vela. Asimismo, abren la puerta a futuras investigaciones que combinen técnicas observacionales y de modelado para estudiar fenómenos que ocurren en la CLA bajo condiciones controladas y reproducibles.

REFERENCIAS

Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F., y otros. 2015. The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: Model formulation, recent developments, and future perspectives. *Geoscientific Model Development*, 8(8), 2515–2551.

Organización Meteorológica Mundial (OMM), y Organización Científica y Técnica Internacional del Vuelo a Vela (OSTIV). 2009. Weather forecasting for soaring flight (WMO-No. 1038), TN 203.

Pooli, A. 2025. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera “Caracterización y modelado de térmicas en la capa límite atmosférica con datos obtenidos de vuelos en planeador”. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, p.65.

Stull, R. B. 2012. An introduction to boundary layer meteorology (Vol. 13). Springer Science y Business Media.

CAMBIOS PROYECTADOS EN LAS CARACTERÍSTICAS DE EVENTOS HÚMEDOS EN EL SUR DE SUDAMÉRICA

*María Eugenia Pérez de Mendiola^{1,2}, Josefina Blázquez^{1,2}, Silvina Solman^{3,4,5}

* mpmendiola@fcaglp.unlp.edu.ar

¹Grupo de Investigación en Clima Variabilidad y Extremos (CLAVE). Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG), UNLP.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³CONICET – UBA, Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)

⁴CNRS – IRD – CONICET – UBA, Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI)

⁵Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), FCEN-UBA

Palabras clave: CMIP6, SPEI, Umbrales de calentamiento.

1) INTRODUCCIÓN

El sur de Sudamérica (SSA) es una vasta región con diversos regímenes de precipitación, lo que influye significativamente en sectores económicos clave como la agricultura, la ganadería, la industria y la producción de energía hidroeléctrica. Por ejemplo, la Cuenca del Plata abastece aproximadamente el 55 % de la demanda energética de Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay. La disponibilidad de agua y las variaciones en los patrones de precipitación desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento de estas actividades, afectando directamente el balance hidrológico y la producción energética.

El análisis de condiciones húmedas es un enfoque común en el análisis climatológico e hidrológico. En una investigación reciente, Pérez de Mendiola et al. (2024) caracterizaron las condiciones húmedas en el sur de Sudamérica, definidas mediante el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010). Su estudio caracterizó los eventos húmedos en función de su intensidad, duración y extensión espacial en distintas regiones definidas en SSA (Figura 1).

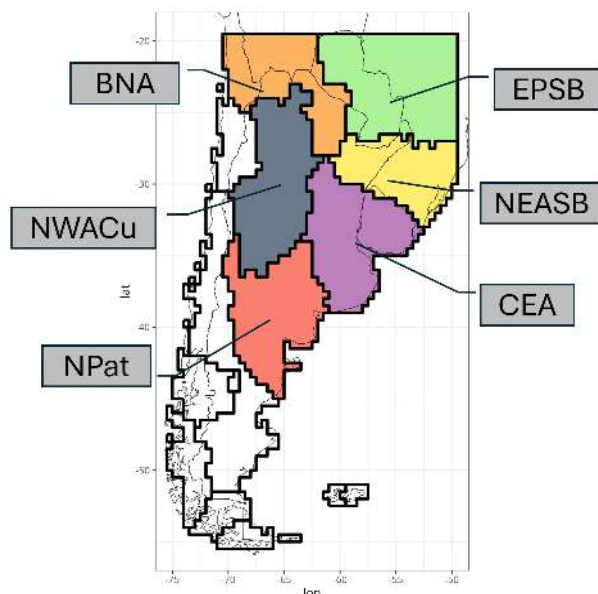


Figura 1: Regiones homogéneas para la ocurrencia de eventos húmedos. Las áreas sombreadas corresponden a regiones seleccionadas donde se centra el análisis. La región BNA está sombreada en naranja, la EPSB en verde, la NPat en rojo, la NWACu en gris, la CEA en morado y la NEASB en amarillo. Adaptado de Pérez de Mendiola et al. (2024).

Actualmente existe un consenso respecto al aumento en la frecuencia de eventos extremos de temperatura y precipitación, especialmente en la región sudeste de Sudamérica (IPCC, 2023).

Dado que la economía de la zona depende en gran medida de actividades vinculadas al recurso hídrico, es esencial disponer de información que permita comprender la evolución futura de estos cambios.

Además, es importante señalar que un incremento en la precipitación no implica necesariamente condiciones más húmedas de manera generalizada, ya que el aumento de la temperatura podría intensificar la evapotranspiración, lo que reduce la disponibilidad efectiva de agua. Por ello, este estudio propone analizar la variabilidad de los eventos húmedos considerando este efecto mediante el índice SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010) que, a diferencia de otros índices que solo consideran la cantidad de lluvia, tiene en cuenta la evapotranspiración potencial.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para este estudio, se seleccionaron 11 modelos de CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) en base al análisis de Brunner et al. (2020), quienes clasificaron los modelos según su desempeño y grado de independencia. Se utilizaron datos correspondientes al período histórico (1979-2014) y a los escenarios de emisiones SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el período 2015-2100.

Todos los modelos fueron ajustados a una retícula común de resolución $1^\circ \times 1^\circ$. A partir de estos datos, se calculó el SPEI en escalas temporales de 3 y 12 meses (SPEI3 y SPEI12, respectivamente). Se consideró una condición húmeda cuando $\text{SPEI3} > 1$ y $\text{SPEI12} > 0$ de manera simultánea en un punto de la retícula.

Para determinar la extensión y la intensidad de los eventos húmedos, se incorporaron criterios de continuidad espacial y temporal, siguiendo la metodología propuesta por Pérez de Mendiola et al. (2024). El análisis se realizó sobre las seis regiones homogéneas identificadas en dicho estudio (Figura 1).

Finalmente, se evaluaron los cambios proyectados para los umbrales de calentamiento de 2°C y 3°C en comparación con el período histórico en términos de la duración, intensidad y extensión espacial de los eventos húmedos.

3) RESULTADOS

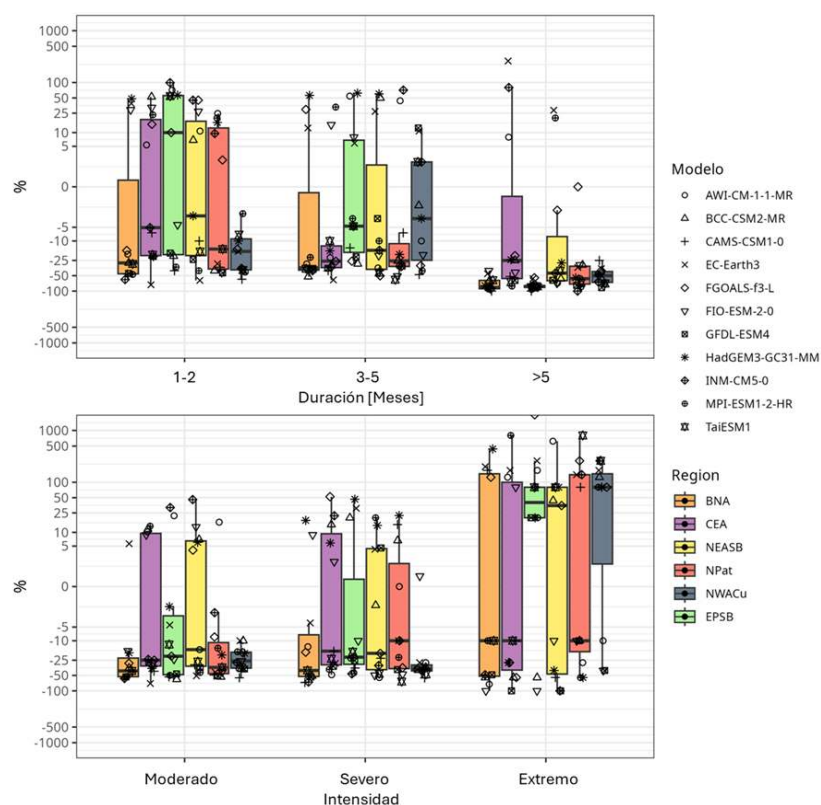


Figura 2: Cambio porcentual en la cantidad de eventos húmedos por año para el umbral de calentamiento de 3° en el escenario SSP5-8.5 con respecto al periodo histórico para distintas categorías de duración (arriba) e intensidad (abajo) de los eventos húmedos en cada región (barras de colores).

La Figura 2 muestra el cambio proyectado en la intensidad y duración de los eventos húmedos bajo un umbral de calentamiento de 3°C, según el escenario SSP5-8.5. En términos generales, la mayoría de los modelos, tomando como referencia la mediana de los boxplots de la Figura 2, predicen una reducción en la cantidad de eventos, reflejada en la disminución de la mayoría de las categorías analizadas. En particular, existe un alto consenso en la proyección de una menor frecuencia de eventos de larga duración (más de cinco meses) en todas las regiones, especialmente en la Patagonia y las regiones del oeste. Para los eventos de menor duración, aunque la mayoría de los modelos indican una disminución, el consenso es menor y algunos modelos sugieren un aumento. En particular, los eventos cortos de entre 1 y 2 meses muestran un incremento en la mayoría de los modelos para la región de EPSB.

Respecto a las intensidades, los eventos moderados tienden a disminuir en la mayoría de los modelos, con un alto consenso en las regiones de BNA, EPSB, NPat y NWACu. Se observa una disminución similar en los eventos severos, aunque con menor consenso, siendo BNA y NWACu las regiones con mayor acuerdo. Para la categoría de eventos extremos, la dispersión entre modelos es aún mayor, excepto en la región de EPSB, donde se registra un alto consenso en el aumento de su frecuencia. Con menor acuerdo, pero en la misma dirección, NWACu y NEASB también muestran una tendencia creciente en la ocurrencia de eventos húmedos extremos. Por otro lado, en BNA, CEA y NPat, la mayoría de los modelos proyectan una disminución en este tipo de eventos.

Para el umbral de 2° y para el escenario SSP2-4.5 los resultados son similares, coincidiendo el signo en la mayoría de los casos con los resultados de la Figura 2, aunque existe en general una mayor dispersión entre modelos (no se muestra).

Finalmente, se observa una reducción generalizada en el área afectada por los eventos húmedos en todas las regiones, con una mayor incidencia en las zonas del norte (no se muestra).

4) CONCLUSIONES

Las proyecciones indican una disminución general de las condiciones húmedas en el futuro, caracterizada por eventos menos frecuentes, de menor duración y con una extensión espacial reducida. Sin embargo, en algunas regiones, se prevé un aumento en la intensidad de estos eventos, lo que podría generar condiciones más extremas.

REFERENCIAS

Brunner, L., Pendergrass, A. G., Lehner, F., Merrifield, A. L., Lorenz, R. y Knutti, R. 2020: Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence. *Earth System Dynamics Discussions*, 2020, 1-23.

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Pérez de Mendiola, M. E., Blázquez, J. y Solman, S. A. 2024: Characterization of wet and dry periods over southern South America. *Climate Dynamics*, 62(6), 5701-5715.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. y López-Moreno, J. I. 2010: A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.

EFICIENCIA DE LOS TRANSPORTES TURBULENTOS EN UNA PASTURA DEL BIOMA PAMPA

Lucia Curto^{1,2}, Michel Stefanello³, Debora Roberti³, María I. Gassmann^{1,2}

lculto@at.fcen.uba.ar

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Universidad Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Física

Palabras clave: capa límite atmosférica, estabilidad atmosférica, flujos turbulentos.

1) INTRODUCCIÓN

En la Capa Límite Atmosférica (CLA) se dan los principales intercambios turbulentos entre la atmósfera y la superficie, en especial en la Capa de Superficie, su porción inferior. Los intercambios turbulentos están determinados en gran medida por las características de las superficie que puede ser, por ejemplo, una superficie vegetal. Esa turbulencia se organiza en estructuras tipo torbellinos o eddies denominadas “estructuras coherentes” (CS, por sus siglas en inglés), de manera que los transportes no son azarosos. A través de sus movimientos verticales asociados, ellas logran aportar eficientemente cantidad de movimiento y escalares, como pueden ser temperatura, humedad y CO₂ (Li y Bou-Zeid, 2011).

Otro factor determinante en los intercambios turbulentos es la estabilidad atmosférica. La condición de estabilidad en la CLA moldea el tipo de CS que se desarrolla. En condiciones más bien neutrales se desarrollan las CS de tipo “hairpin vortices”, de mayor extensión horizontal que vertical (Curto et al., 2022). En condiciones más inestables se desarrollan las “plumas térmicas”, y en condiciones dominadas por la estabilidad la turbulencia se ve inhibida, y no hay organización de las CS (Zeitune, 2024). De esta manera, en condiciones neutrales se dan transportes turbulentos en conjunto, en condiciones estables la eficiencia de dichos transportes es muy baja, y en condiciones estables se vuelven más efectivos los transportes de propiedades escalares.

El flujo de temperatura y humedad afecta al estado de la vegetación. A su vez, el CO₂ y la humedad son gases de efecto invernadero. En el sur de Brasil, así como en la región central de Argentina se desarrolla el bioma pampa, con un sector agrícola-ganadero muy productivo, y que es responsable de gran parte de las emisiones de CO₂ (Hiraishi et al., 2014). Resulta entonces relevante estudiar el rol de los cultivos como fuente o sumidero de distintas propiedades, y el transporte turbulento en la CLA, especialmente en zonas rurales productivas.

En este trabajo se estudia la eficiencia de los transportes turbulentos de cantidad de movimiento ($u'w'$), temperatura ($w'T'$), humedad ($w'q'$) y dióxido de carbono ($w'c'$) para distintas condiciones de estabilidad. Para ello se utilizan mediciones micrometeorológicas realizadas sobre una pastura en el bioma pampa, en el sur de Brasil, en distintos momentos del año.

2) METODOLOGÍA

Se utilizaron datos de flujo turbulento, con su respectivo control de calidad (Curto, 2025). Los datos fueron obtenidos con una torre micrometeorológica emplazada en la Universidad Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil (29° 43' 27.502" S; 53° 45' 36.097" O). El sensor utilizado fue un anemómetro sónico (IRGASON-Campbell Scientific), emplazado a 3 m de altura, tomando datos con una frecuencia de 10 Hz (Roberti et al., 2012). Los flujos turbulentos fueron calculados en promedios de media hora, y luego se calcularon las eficiencias de los transportes turbulentos, obtenidas como: $r_{wx} = \overline{w'x'}/(\sigma_w \sigma_x)$, siendo $\overline{w'x'}$ el flujo turbulento de una variable x , y σ_w y σ_x los desvíos estándar de las variables velocidad vertical y la variable x . La eficiencia entonces es de los flujos turbulentos de cantidad de movimiento ($\overline{u'w'}$) temperatura ($\overline{w'T'}$), humedad ($\overline{w'q'}$) y CO₂ ($\overline{w'c'}$). Los valores negativos de los flujos representan sumideros para la atmósfera, mientras que aquellos con valores positivos representan fuentes. Se consideraron los datos de los meses de enero y julio de 2022, para estudiar las diferencias entre un verano y un invierno.

Los flujos se estudiaron por separado según la estabilidad de la atmósfera, determinada por el parámetro de estabilidad dado por la Longitud de Monin-Obukhov (z/L). La estabilidad se clasificó en condiciones fuertemente inestable ($z/L \leq -0.5$; FI), inestable ($-0.5 < z/L \leq -0.005$; I), neutral ($-0.005 < z/L \leq 0.005$; N), estable ($0.5 < z/L \leq 0.5$; E) y fuertemente estable ($0.5 < z/L$; FE) (Curto et al., 2022).

3) RESULTADOS

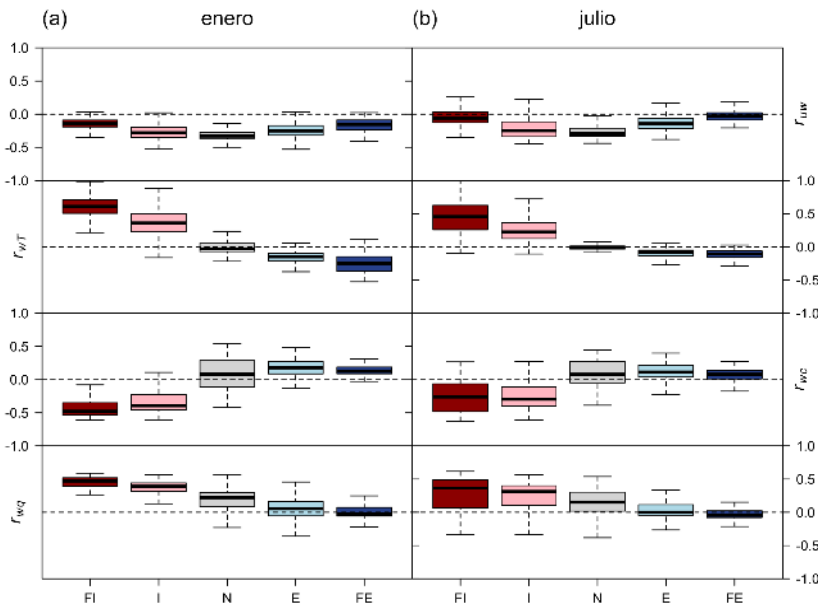


Figura 1: Eficiencia de los transportes turbulentos de cantidad de movimiento (r_{uw}), temperatura (r_{wT}), humedad (r_{wq}) y CO₂ (r_{wc}), para los meses de enero (a) y julio (b) de 2022, según las distintas condiciones de estabilidad: fuertemente inestable (FI), inestable (I), neutral (N), estable (E) y fuertemente estable (FE).

La eficiencia de transporte de cantidad de movimiento es negativa debido a que la superficie actúa como sumidero (Figura 1 a y b). La eficiencia de temperatura tiene un cambio de signo según la estabilidad, asociado a la condiciones FI e I, que se dan principalmente de día (positivas), y E y FE, de noche (negativas). La eficiencia de transporte de CO₂ es contraria al

comportamiento de la temperatura, debido a que de día las plantas fotosintetizan, y la superficie es sumidero de CO₂. De noche la eficiencia es positiva, asociada a la respiración del ecosistema. La eficiencia de humedad es mayormente positiva, indicando que la superficie vegetal está actuando mayormente con fuente de humedad.

En condiciones N la eficiencia de transporte de cantidad de movimiento es mayor (en valor absoluto), y disminuye hacia I y E. A medida que aumenta la inestabilidad, aumenta la eficiencia del transporte turbulento de temperatura, humedad y CO₂. En condiciones N los valores son nulos. En condiciones FE la turbulencia se ve fuertemente inhibida, y los transportes son muy poco eficientes (Figura 1 a y b).

Las situaciones inestables en enero presentan mayor eficiencia de los flujos de temperatura, humedad y CO₂ en condiciones I y FI (Figura 1 a) que las de invierno (Figura 1 b). Las situaciones estables (E y FE) en invierno (Figura 1 b) presentan aún menor eficiencia que en verano (Figura 1 a) para esos flujos. Para cantidad de movimiento las diferencias entre los meses para las distintas condiciones de estabilidad no son tan notables.

4) CONCLUSIONES

La superficie moduló el flujo turbulento de las distintas propiedades actuando como fuente o sumidero. El flujo de temperatura siguió el ciclo diurno, así como el de CO₂, modulado por la fotosíntesis/respiración del ecosistema. La disponibilidad de humedad indica que la superficie vegetal está actuando mayoritariamente como fuente. La estabilidad atmosférica fue el principal modulador de las diferencias en el comportamiento y tipo de CS de la turbulencia. En condiciones más inestables predominan las “plumas térmicas”, favoreciendo la eficiencia de los transportes turbulentos de escalares, en especial en el mes más cálido. En condiciones más neutrales dominan los “hairpin vortices”, reduciendo la eficiencia de los transportes escalares, pero aumentando la de cantidad de movimiento. En condiciones estables la turbulencia se ve inhibida, no se organizan las estructuras coherentes, y los transportes son muy poco eficientes. Estas condiciones resultan más intensas en los meses de invierno.

REFERENCIAS

- Curto, L., Gassmann, M. I., Covi, M., Tonti, N. E., 2022:** Study of turbulence behavior above two different crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 322, 109012. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.109012
- Curto, L., 2025:** Turbulent quality control. DOI 10.5281/zenodo.15114312
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., Troxler, T., 2014:** 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland.
- Li, D., Bou-Zeid, E., 2011:** Coherent structures and the dissimilarity of turbulent transport of momentum and scalars in the unstable atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 140, 2, 243-262. DOI: 10.1007/s10546-011-9613-5
- Roberti, D.R., Acevedo, O.C., Moraes, O.L., 2012:** A Brazilian network of carbon flux stations. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 93, 203– 203.
- Zeitune, M. 2024.** Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera “Transporte de CO₂ por las estructuras coherentes de la turbulencia en un cultivo en la provincia de Buenos Aires”. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, p.57.

MECANISMOS PRECURSORES DEL EVENTO EXTREMO OCURRIDO EN BAHÍA BLANCA EN MARZO DE 2025

Daiana Martínez^{1,2,3}, Victoria Oruezabal^{1,2,3}, Silvina Solman^{1,2,3}
daiana.martinez@cima.fcen.uba.ar

1. *Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Buenos Aires, Argentina.*
2. *CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.*
3. *CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.*

Palabras clave: detección, entorno sinóptico, tormenta severa

1) INTRODUCCIÓN

El 7 de marzo de 2025 en la ciudad de Bahía Blanca se produjo un evento de precipitación extrema donde se registró un acumulado de precipitación de 290 mm en sólo 12 horas (Servicio Meteorológico Nacional, 2025). Este evento extremo provocó graves inundaciones repentinas, pérdidas de vidas humanas, como así también importantes daños en la infraestructura de la ciudad (Osman y otros, 2025). Considerando que la ocurrencia del evento extremo de precipitación estuvo asociado a la ocurrencia de un sistema convectivo, en este trabajo se propone identificar los mecanismos dinámicos que generaron el evento severo ocurrido en Bahía Blanca en marzo del 2025. La pregunta que se pretende responder es cuáles fueron las razones por las cuales este evento haya alcanzado un grado de severidad tan importante. Para responder esta pregunta se aplican dos técnicas de detección de eventos severos y de precipitación extrema basados en la identificación del entorno sinóptico y termodinámico asociado.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para realizar el análisis se utilizaron dos fuentes de datos. Por un lado, para el estudio de la circulación sinóptica y el entorno termodinámico se utilizaron datos del reanálisis ERA5 (Hersbach y otros, 2020), con una resolución de 0.25° horizontal con una resolución temporal horaria para estudiar el entorno termodinámico y una resolución temporal diaria para estudiar la circulación. Por otra parte, para el análisis de la precipitación se analizaron las mediciones diarias de pluviómetro del SMN (Servicio Meteorológico Nacional). A su vez, para contar con una resolución temporal mayor de la precipitación se utilizó información de la base de datos precipitación de MSWEP (Beck, H. E. y otros, 2019) que cuenta con información tri-horaria con una resolución horizontal de 0.1° (aproximadamente 11 km).

La identificación de los mecanismos sinópticos y termodinámicos que generaron el evento severo se realizó a partir del análisis de campos horarios y diarios de diversas variables atmosféricas en diversos niveles de presión, como así también de series temporales horarias de las condiciones de los días previos al día del evento.

Se aplicó un modelo de análogos (Martínez y Solman 2025), basado en la ocurrencia de patrones sinópticos asociados a eventos de precipitación extrema en el sudeste de Sudamérica. Este modelo permite identificar la ocurrencia de eventos extremos de precipitación a partir de la ocurrencia de determinadas condiciones anómalas de circulación.

El modelo de análogos se basa en dos criterios de detección: por un lado, que el coeficiente de correlación entre los campos de anomalías diarias estandarizadas (basadas en la climatología mensual del periodo 1979-2013) y los patrones sinópticos (detectados a partir de la metodología detallada en Martínez y Solman 2025) sea superior a un umbral, y por otro, que exista coherencia entre el signo de las anomalías de las variables meteorológicas diarias y el signo de las anomalías de los patrones en determinados puntos de retícula. El modelo de análogos considera las anomalías de las siguientes variables: la componente meridional del viento en 850 hPa ($v'850$), la altura geopotencial en 850 hPa ($z'850$) y en 500 hPa ($z'500$), la intensidad del viento en 200 hPa ($int'V200$) y la temperatura potencial equivalente en 850 hPa ($titaae'850$).

Para complementar la información del método de análogos se utilizó un método mediante el cual se analiza el entorno termodinámico para determinar los factores que generaron la tormenta severa. El desarrollo del método se detalla en Oruezabal y Solman (2025), esencialmente se basa en analizar la actividad del MUCAPE, la cortante (shear) entre la superficie y los 500hPa y la convergencia de humedad verticalmente integrada (VIMFD) alrededor de los 100 km del evento y ver si alguno de los puntos de retícula cumple con la ecuación (1).

$$- 1.6 \log_{10}(MUCAPE) - 1.84 \log_{10}(VIMFD * 10e4) - 3.2 \log_{10}(shear) < -9 \quad (1)$$

El cumplimiento de esta condición indica que el entorno en cuestión es favorable para el desarrollo de una tormenta severa. El índice indicado a partir de la ecuación (1) se denomina SSASE (Subtropical South American Severe Index).

3) RESULTADOS

El día 7 de marzo de 2025 el SMN registró 290 mm acumulados de precipitación en la estación Bahía Blanca. Desde las 3 h hasta las 9 h se registraron 210 mm, seguido por otros 80 mm entre las 9 h y 15 h del mismo día. Así mismo se registraron valores elevados de precipitación en estaciones aledañas en los días anteriores. Según la misma institución el récord de precipitación máxima del mes de marzo era de 108 mm, aproximadamente $\frac{1}{3}$ del evento a analizar.

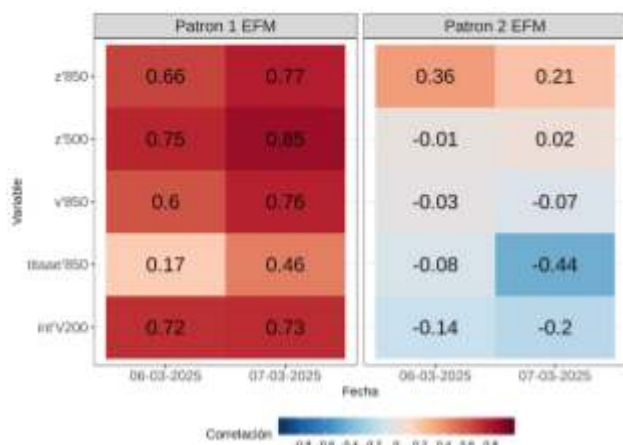


Figura 1: coeficientes de correlación espacial entre el primer patrón (izquierda) y segundo patrón principal (derecha) de EFM y la anomalía de $z'850$, $z'500$, $v'850$, $titaae'850$ y $int'V200$

Analizando los campos de presión de niveles medios y bajos (no mostrados), se puede apreciar que desde el día 4 de marzo se localiza, sobre el Océano Atlántico, un anticiclón de gran extensión horizontal que se intensifica hasta el día del evento, favoreciendo un intenso viento del norte. El ingreso del viento del norte viene asociado con una fuerte advección de calor y humedad, produciendo un fuerte incremento del contenido de vapor de agua precipitable y de la temperatura en la región. Esto último, aumenta la inestabilidad atmosférica, dando lugar a un evento intenso.

La aplicación del método de análogos para los días 6 y 7 de marzo determinó que existirían

condiciones favorables para la ocurrencia de eventos extremos de precipitación. La Figura 1 muestra los coeficientes de correlación espacial entre cada patrón principal de la temporada de enero a marzo (EFM), detallados en el trabajo Martínez y Solman 2025, y los campos diarios de anomalías estandarizadas de cada variable que compone el modelo de análogos para los días 6 y 7 de marzo del 2025. Se observa que los coeficientes asociados al patrón 1, mostraron valores positivos y mayores a 0.5 (excepto para titaae'850) para los dos días analizados. Sin embargo, para el patrón 2 los coeficientes tuvieron valores negativos o menores a 0.4 para todas las variables y para los dos días. Este resultado muestra que el análisis de la implementación del modelo de análogos permite identificar las condiciones favorables para el desarrollo del evento extremo del 7 de marzo asociadas a las condiciones sinópticas del patrón 1 de EFM (no mostrado).

Asimismo, se aplicó el índice SSASE para los días 6 y 7 de marzo y se pudo determinar que las condiciones del entorno fueron favorables para un evento severo en las horas anteriores al evento (Figura 2). En las horas anteriores, debido al ingreso de aire cálido y húmedo del norte, aumentó el contenido de humedad y la convergencia de la misma. Además, esto aumentó la inestabilidad aumentando el CAPE. Todos estos ingredientes son fundamentales para que el índice detecte una tormenta severa.

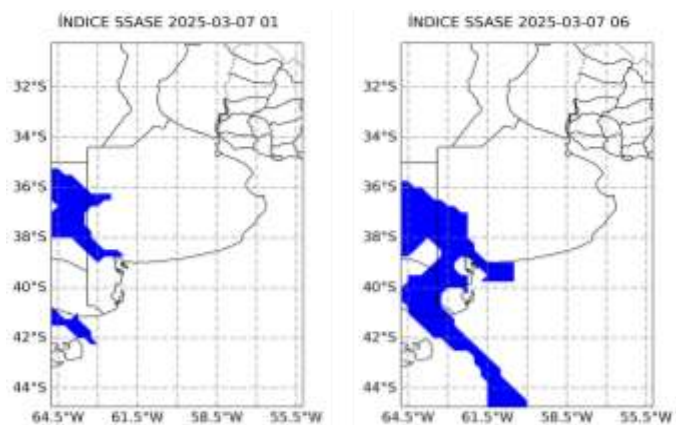


Figura 2: Regiones donde el índice SASSE encuentra entornos favorables para un evento severo para el día 7 de marzo a las 1 hora (izquierda) y 06 hora (derecha)

4) CONCLUSIONES

A partir del análisis realizado, se pudo detectar que la presencia e intensificación de un sistema de alta presión posicionado en el Océano Atlántico propició el ingreso de viento del sector norte, asociado a una fuerte advección de calor y vapor de agua. El aumento del contenido de humedad y convergencia explicarían los mecanismos precursores del evento severo ocurrido en Bahía Blanca el 7 de marzo del 2025. Asimismo, los métodos de detección de eventos resultaron eficaces a la hora de detectar este tipo de fenómenos.

REFERENCIAS

- Beck, H. E. y otros, 2019.** MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: methodology and quantitative assessment Bulletin of the American Meteorological Society 100(3), 473–500,
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, y otros, 2020** The ERA5 global reanalysis. Q J R Meteorol Soc.; 146:1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Martínez D., y Solman S., 2025:** Detecting the occurrence of extreme precipitation events in Southeastern South America from synoptic-scale patterns. Climate Dynamics. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5219584/v1>
- Rasmussen KL., Houze RA Jr., 2016:** Convective initiation near the Andes in subtropical South America. Monthly Weather Review, 144, 2351–2374.
- Servicio Meteorológico Nacional, 2025:** Informe Especial de Evento Meteorológico 04 - 08 de marzo de 2025. https://www.smn.gob.ar/sites/default/files/Informe_Bahia%20Blanca_SMN_marzo_2025.pdf
- Oruezabal V., y Solman S., 2025:** Development of a severe storm index based on environmental conditions for Subtropical South America. Earth System and Environment.
- Osman M y otros, 2025:** Heavy rain in March 2025 Argentina floods mostly strengthened by human-driven climate change
- Zipser EJ y otros, 2006:** Where are the most intense thunderstorms on Earth? Bull. Amer. Meteor. Soc., 87, 1057–1071

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD CONJUNTA DE LAS DESCARGAS ANUALES DE RÍOS DE LOS ANDES CENTRALES MEDIANTE CORRELACIONES CANÓNICAS

Federico Gomez, Diego Araneo
fegomez@mendoza-conicet.gob.ar

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CONICET CCT
Mendoza, Argentina

Palabras clave: Circulación sinóptica, Patrones de variabilidad, Ríos andinos.

INTRODUCCIÓN

Los Andes Centrales constituyen una barrera orográfica que alberga las formaciones montañosas más elevadas del hemisferio sur. Las cumbres de los Andes Centrales dan lugar a la formación de una serie de cursos fluviales que se originan principalmente por el deshielo del manto nivoso acumulado durante los meses invernales en zonas altas, así como por la escorrentía de precipitaciones líquidas.

Araneo (2006) utilizó análisis de componentes principales (ACP) para examinar la variabilidad de las series anuales derivadas de datos de caudal de 74 ríos andinos. El autor identificó en los dos primeros modos de variabilidad a los ríos ubicados entre el río Neuquén y el río Chubut; y entre el río Neuquén y el río San Juan respectivamente. Este hallazgo sugiere la existencia de una correlación entre los ríos incluidos en sendos grupos de cursos fluviales.

En este sentido, se procedió al análisis de la variabilidad de los ríos incluidos en estos dos grupos mediante la implementación de una metodología basada en el Análisis de Correlaciones Canónicas (ACC). Esta técnica estadística posibilita la identificación de asociaciones entre dos conjuntos de variables a través de matrices de correlación cruzada, con el propósito de maximizar dicha relación (Hotelling, 1936). A efectos de este trabajo se emplea esta técnica estadística siguiendo los lineamientos establecidos por Lattin et al. (2003). El ACC ha sido empleado en trabajos previos para establecer relaciones entre anomalías de precipitación en el centro y norte de Argentina con valores de temperatura superficial del mar en los océanos Atlántico y Pacífico (Barros y Silvestri, 2002; Müller y García, 2006). En el presente trabajo, se implementó una técnica de ACC con el objetivo de identificar los patrones de variabilidad conjunta de la descarga anual de los ríos cordilleranos de los Andes Centrales, en consonancia con la circulación asociada a nivel hemisférico y regional.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El ACC se implementó mediante el emparejamiento de dos grupos de series anuales de variables: atmosféricas y fluviales. Se incluyeron series de descarga anual para los ríos San Juan, Mendoza, Atuel, Colorado, Neuquén y Chubut construidas a partir de datos diarios hidrométricos proporcionados por el Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH). El periodo sujeto a estudio abarcó los años comprendidos entre 1956 y 2019 y se definió un año hidrológico homogéneo desde mayo hasta abril. En el caso de los datos atmosféricos, se emplearon las variables geopotencial (z) en los niveles de 500 y 1000 hPa y agua precipitable (pw) extraídas de los reanálisis de ERA5. Los datos diarios de reanálisis se agruparon en promedios anuales considerando los meses de invierno (mayo-septiembre) para cada punto de retícula (resolución $0,5^\circ \times 0,5^\circ$) en el área delimitada por los paralelos $20^\circ S$ y $60^\circ S$ junto a los meridianos $45^\circ O$ y $100^\circ O$. Previo al empleo de ambos conjuntos de datos en el ACC, los mismos fueron sometidos a procesos de estandarización. En consecuencia, la técnica estadística desempeñará su función mediante la búsqueda de modos de variabilidad, compuestos de una serie de factores de carga asociados a las descargas anuales de cada uno de los ríos junto con un mapa de anomalías asociadas de geopotencial en el nivel y dominio seleccionados.

3) RESULTADOS

El ACC arrojó seis pares de variedades canónicas (VC). Cada una de estas variedades contó con una serie de 6720 valores de factores de carga (*loadings*) de cada punto de retícula para geopotencial en 500 y 1000 hPa (z_{500} y z_{1000}) y contenido de agua precipitable en la atmósfera (pw), y otra de 6 valores, asociados a los factores de carga de la descarga anual de los ríos en estudio. Estos factores de carga representaron correlaciones entre las variables originales, sugiriendo una relación directa entre dichos valores y las variables del reanálisis para cada punto de retícula y río en estudio.

VC1 y VC2 concentran la mayor parte de la variabilidad total asociada a la descarga de los ríos. Los resultados obtenidos en VC1 indicaron valores negativos y mayormente homogéneos en la serie de factores de carga de los seis ríos analizados en este estudio, lo que sugiere una situación de déficit (superávit) generalizado de descarga anual. La serie de factores de carga para VC1 asociados a las variables de ERA5 permitieron analizar posibles patrones atmosféricos asociados a dicha variedad canónica y las anomalías presentadas para la descarga anual de los ríos.

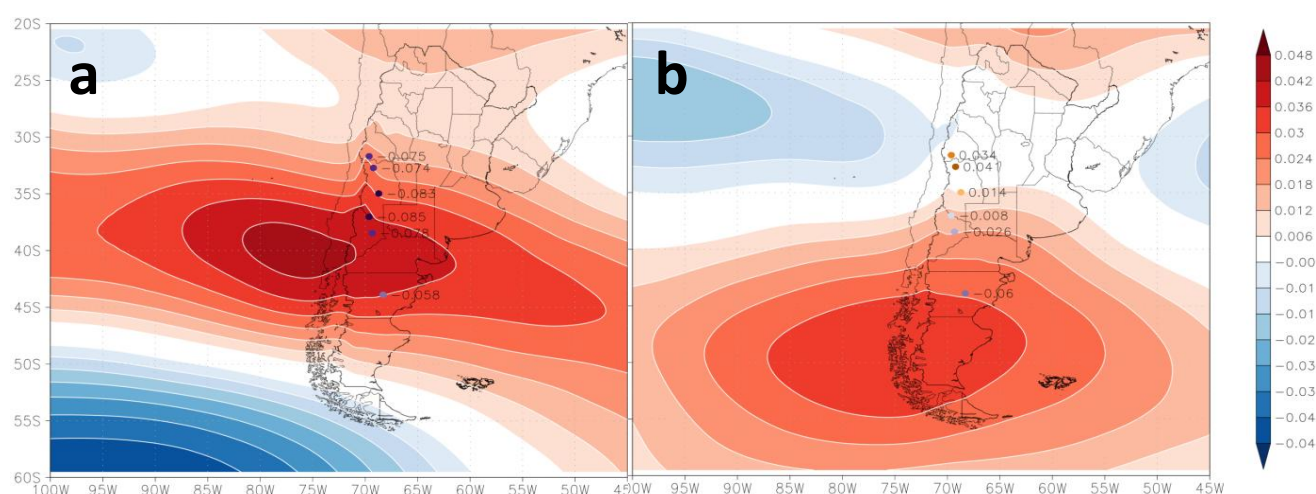


Fig. 1 Campos de *loadings* para VC1 (a) y VC2 (b) correspondientes a geopotencial en 500 hPa para los meses entre mayo y septiembre durante el periodo 1956-2019. En puntos, se localizan las estaciones hidrométricas junto con su correspondiente valor de factor de carga.

Los campos de *loadings* de la VC1 para geopotencial en 500 hPa (Fig. 1a) y 1000 hPa muestran una configuración compatible con anomalías positivas generalizadas en el centro y norte de Argentina. La situación de déficit (superávit) de caudales resulta compatible con la presencia de sistemas de alta (baja) presión en la región de los Andes Centrales, lo cual sugiere una carencia (aumento) de tránsitos de sistemas de baja presión desde el Océano Pacífico que pueden inducir precipitaciones. El campo de factores de carga para agua precipitable (Fig. 2a) exhibe valores negativos en todo el centro y norte de Argentina, con un énfasis en la zona de los Andes Centrales, en consonancia con las anomalías positivas de presión descriptas. La cuenca del río Chubut presentó desvíos negativos de pw de menor magnitud, lo cual concuerda con los factores de carga de descarga anual.

La VC2 exhibe un patrón de disminución (aumento) gradual hacia el sur de descarga anual de los ríos. Esto representa un escenario de anomalías positivas (negativas) en los caudales de los ríos San Juan, Mendoza y Atuel, mientras que los ríos Colorado, Neuquén y Chubut experimentarán déficits (superávits) en su descarga anual, fenómeno que se intensificará hacia el sur.

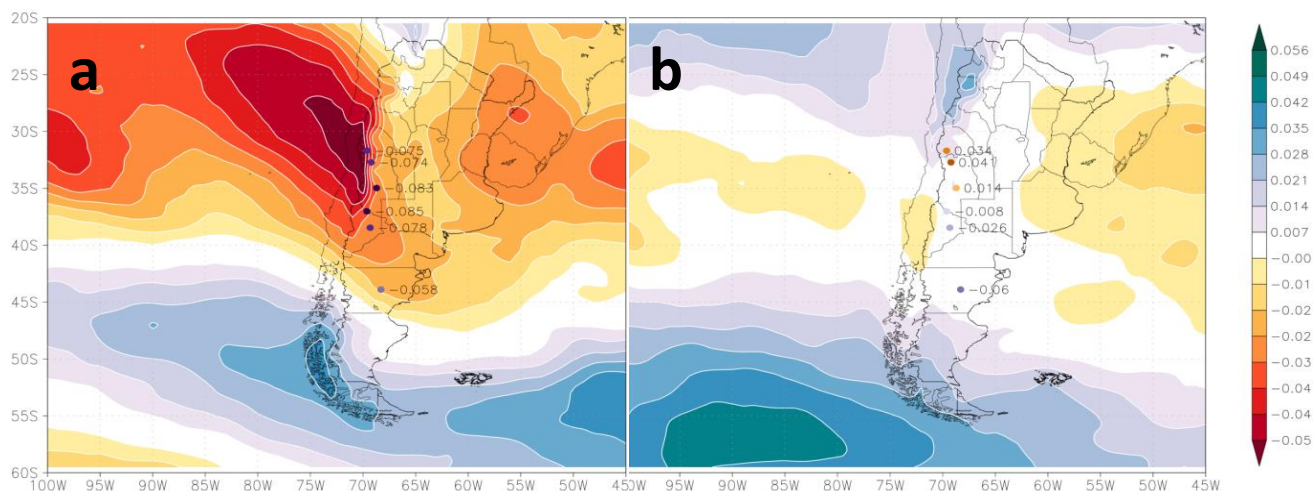


Fig. 2 Campos de loadings para VC1 (a) y VC2 (b) correspondientes a agua precipitable para los meses entre mayo y septiembre durante el periodo 1956-2019. En puntos, se localizan las estaciones hidrométricas junto con su correspondiente valor de factor de carga.

Los campos de geopotencial en 500 hPa (Fig. 1b) y 1000 hPa se caracterizaron por la presencia de una región de *loadings* positivos en la Patagonia, lo cual es compatible con una predominancia de sistemas de alta (baja) presión durante los meses invernales. El gradiente de presión estimado en la región de las cuencas de los ríos Chubut, Neuquén y Colorado ejerce una influencia en la dinámica atmosférica, propiciando vientos desde el este (oeste) que obstaculizan (favorecen) la formación de precipitaciones orográficas y el tránsito de sistemas de baja presión desde el oeste. En lo que respecta a los ríos restantes (San Juan, Mendoza y Atuel), estos presentan una configuración que estimula (inhibe) precipitaciones, que consistió en un sistema de baja (alta) presión entrante desde el Pacífico.

El campo de factores de carga de la VC2 para pw (Fig. 2b) reveló valores menos pronunciados en comparación con los hallados para la VC1. Las estaciones hidrométricas asociadas a los mayores *loadings* positivos (San Juan y Mendoza) se ven influenciadas por leves anomalías positivas en el contenido de humedad en la atmósfera, mientras que aquellas con los valores más negativos (Neuquén y Chubut) se hallaron bajo la influencia de ligeras anomalías negativas en el contenido de agua precipitable.

Referencias

Araneo, D., 2006: Caracterización de la circulación atmosférica y la temperatura superficial del mar asociadas a extremos de caudal de ríos andinos y su variabilidad en baja frecuencia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Barros, V.; Silvestri, G., 2002: The Relation between Sea Surface Temperature at the Subtropical South-Central Pacific and Precipitation in Southeastern South America, *Journal of Climate* 15, 251-267.

Hotelling, H., 1938: Relations between two sets of variates, *Biometrika*, Vol. 28, No. 3/4 (Dec., 1936), pp. 321-377

Lattin, J., Carroll, J., Green, P., 2003: *Analyzing Multivariate Data*. p. 313-345

Müller, O., García, N., 2006: Análisis de la predicción de precipitaciones mediante correlaciones canónicas en el NE de Argentina, *Revista Geofísica* 62, 61-78.

SSASE: Un Índice Regional para Evaluar los Entornos de Tormentas Severas en Sudamérica Subtropical y su Representación en Modelos Regionales

Victoria A. Oruezabal^{1,2,3,*}, Silvina A. Solman^{1,2,3}

***Autora Correspondiente:** victoria.oruezabal@cima.fcen.uba.ar

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Buenos Aires, Argentina.

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

Palabras Clave: Condiciones del entorno; Modelos Regionales; Sudamérica Subtropical; Tormentas Severas

1. Introducción

Sudamérica subtropical es una de las regiones más afectadas por tormentas severas (granizo, tornados y vientos fuertes no tornádicos), tanto en frecuencia como en intensidad (Zipser et al. 2006). Este tipo de fenómenos puede generar impactos significativos. En Argentina, por ejemplo, donde la viticultura es clave en la economía mendocina, el granizo puede causar pérdidas de hasta un 22 % de las ganancias anuales (Van den Bosch 2022). En este contexto, los modelos climáticos regionales se presentan como herramientas clave para el estudio de estos fenómenos, ya que permiten representar con mayor resolución espacial los procesos que controlan el desarrollo de tormentas severas, especialmente en regiones complejas como Sudamérica subtropical.

Dada la escala horizontal reducida de estos eventos y la escasez de reportes confiables, especialmente en el hemisferio sur, las estadísticas robustas sobre tormentas severas son limitadas. Como alternativa, diversos estudios (Brooks, Lee y Craven 2003, Prein y Holland 2018) han desarrollado índices de condiciones favorables para tormentas severas, en su mayoría aplicados al hemisferio norte. La falta de herramientas adaptadas al sur global motiva el desarrollo de un índice regional robusto. El objetivo central es evaluar si los modelos regionales pueden captar los patrones climáticos de los entornos favorables a tormentas severas, con vistas a proyectar sus cambios en escenarios futuros.

2. Metodología

Desarrollamos (Oruezabal y Solman 2025) un índice regional denominado SSASE (Subtropical South American Severe Environment Index) con el objetivo de identificar entornos potencialmente favorables para el desarrollo de tormentas severas, representativos de Sudamérica subtropical:

$$-1,6 \log_{10}(\text{MUCAPE}) - 1,84 \log_{10}(\text{VIMFD} \times -10^4) - 3,2 \log_{10}(\text{shear}) < -9 \quad (1)$$

Donde MUCAPE es la energía convectiva disponible máxima del perfil, VIMFD es la convergencia del flujo de humedad integrado verticalmente y “shear” es la cortante del viento entre superficie y 500 hPa. Las variables se incorporan al modelo de forma logarítmica, dado que esta transformación mejora la separación entre eventos severos y no severos.

La inclusión de VIMFD es especialmente relevante para captar mejor las condiciones nocturnas sobre el este de Argentina, donde la convergencia de humedad es determinante para la organización de sistemas convectivos. En Oruezabal y Solman 2025 se realizó la calibración y validación con el reanálisis ERA 5 con resolución temporal de 3 horas, mostrando resultados promisorios para capturar la ocurrencia de eventos severos.

Este estudio se centra en evaluar si SSASE puede ser utilizado como una herramienta diagnóstica eficaz aplicado a modelos climáticos regionales. Para ello, se computó el índice utilizando las salidas del modelo

climático regional (MCR) RegCM4.7, anidado en tres modelos globales del experimento CORDEX-CORE (MPI, HadGEM y NorESM1) considerando el período histórico 1979–2005 y las 4 horas principales del día (00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 UTC). Esto nos permite investigar si el MCR logra representar adecuadamente la climatología de entornos severos observada en ERA5, evaluando la distribución espacial, los ciclos diurno y estacional, y la variabilidad interanual de ocurrencia de eventos severos en la región subtropical de Sudamérica. Además, este análisis constituye una base fundamental para futuros estudios sobre cambios proyectados en ambientes propensos a tormentas severas bajo escenarios de cambio climático, utilizando modelos regionales como herramienta de diagnóstico.

3. Resultados

3.1. Climatología

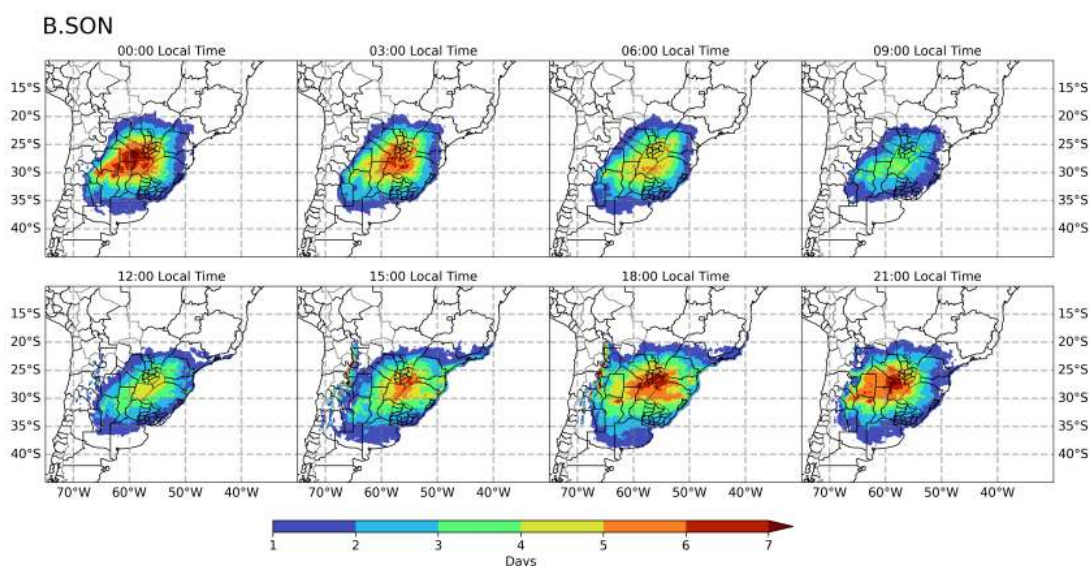


Figura 1: Número de eventos anuales de entornos severos basados en el índice SSASE durante las 8 horas principales para el período 1991–2020, mostrado para primavera.

En la figura 1 se presentan la cantidad de eventos severos capturados a partir del índice SSASE calibrado con ERA 5, para primavera y verano, estaciones de máxima actividad. En ambos casos, el centro-norte de Argentina emerge como la región preferencial para el desarrollo de estos entornos severos, en consonancia con otros estudios (Cecil y Blankenship 2012)

Durante la primavera, los máximos se ubican en el noreste argentino y ocurren mayormente en horario nocturno (00:00 hora local) (da Rocha et al. 2024). En verano, los máximos se desplazan hacia el oeste y ocurren principalmente durante la tarde-noche.

Este resultado destaca la capacidad del índice SSASE para representar adecuadamente el ciclo diurno de ocurrencia de eventos severos en la región, algo que otros índices, dominados por CAPE, no logran representar de manera satisfactoria. La inclusión de VIMFD, cuya máxima intensidad ocurre en horas nocturnas, permite capturar este comportamiento, aportando una mejora sustancial frente a otros enfoques basados únicamente en la inestabilidad.

3.2. Modelos Regionales

Se analizaron los entornos generados por RegCM4.7 anidado en tres modelos globales (MPI, HadGEM, NorESM1) del experimento CORDEX-CORE para Sudamérica. A partir de estas simulaciones se construyó una climatología de frecuencia de eventos severos basada en el índice SSASE.

NorESM1:SON

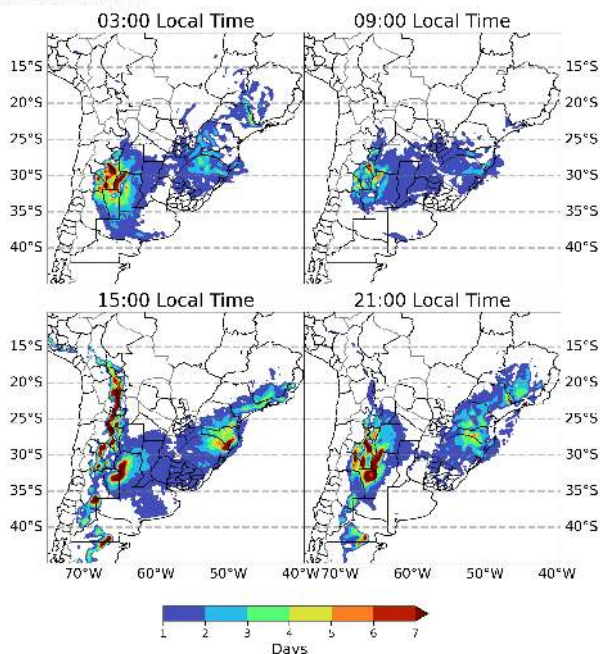


Figura 2: Número de eventos anuales de entornos severos basados en el índice SSASE basado en la simulaciones del REGCM4.7, anidado en NorESM1 durante las 4 horas principales para el período 1970–2005, mostrado para primavera(SON)

Si bien la distribución espacial general es coherente con lo ya obtenido, con máxima actividad en el centro-norte de Argentina durante primavera y verano, los modelos regionales tienden a subestimar la cantidad de eventos severos y muestran una extensión geográfica más limitada, sin alcanzar regiones como Santiago del Estero. Así como se encuentra limitado a la hora de representar el ciclo diurno.

Estas diferencias se explican principalmente por una subestimación de CAPE y VIMFD en los modelos regionales respecto a ERA5. El análisis termodinámico revela que todos los modelos presentan temperaturas mayores en niveles bajos, pero también bajo contenido de humedad en estos mismos niveles. Esta combinación reduce la inestabilidad disponible y la magnitud de la convergencia de la humedad. La magnitud de estos sesgos varía entre modelos: es más acentuada en la simulación anidada en el MCG MPI y menos pronunciada en la de NorESM1(Figura 2), que muestra una mejor correspondencia con ERA5.

4. Conclusiones

A pesar de estas discrepancias, el índice SSASE se presenta así como una herramienta útil para diagnosticar y comparar la representación de estos entornos en modelos regionales, tanto en contextos presentes como para proyecciones futuras de cambio climático.

Referencias

- Brooks, Harold, Lee, James y Craven, Jeffrey (2003). «The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data». En: *Atmospheric Research* 67-68, págs. 73-94. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00045-0.
- Cecil, Daniel J. y Blankenship, Clay B. (2012). «Toward a Global Climatology of Severe Hailstorms as Estimated by Satellite Passive Microwave Imagers». En: *Journal of Climate* 25.2, págs. 687-703. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00130.1. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/25/2/jcli-d-11-00130.1.xml>.
- da Rocha, Rosmeri Porfírio et al. (2024). «Precipitation Diurnal Cycle Assessment in Convection-Permitting Simulations in Southeastern South America». En: *Earth Systems and Environment* 8, pág. 100135. DOI: 10.1007/s41748-023-00482-8.
- Oruezabal, Victoria A. y Solman, Silvina A. (2025). «Development of a severe storm index based on environmental conditions for Subtropical South America». En: *Earth System and Environment*.
- Prein, Andreas y Holland, Greg (2018). «Global estimates of damaging hail hazard». En: *Weather and Climate Extremes* 22. DOI: 10.1016/j.wace.2018.10.004.
- Van den Bosch, María Eugenia (2022). «EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS PÉRDIDAS POR GRANIZO EN LOS OASIS DE LA PROVINCIA DE MENDOZA E IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS». En: *Revista De Investigación En Modelos Financieros* 1, págs. 63-77.
- Zipser, Edward et al. (2006). «Where Are the Most Intense Thunderstorms on Earth?». En: *Bulletin of The American Meteorological Society - BULL AMER METEOROL SOC* 87. DOI: 10.1175/BAMS-87-8-1057.

CARACTERIZACIÓN SINÓPTICA DE EVENTOS EXTREMOS DURANTE LA CAMPAÑA ANTÁRTICA TSCAN

Alejandro A. Godoy^{1,2}, Paola Rodriguez Imazio^{1,3}, Denise Auzmendia¹, Agustina Zapiola¹, Noemi Troche¹

agodoy@smn.gob.ar. Autor/a correspondiente.

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP)

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras clave: Ríos Atmosféricos, Bajas Polares, Nubes super frías.

1) INTRODUCCIÓN

La campaña de medición del proyecto de Turbulencia y Nubes Superfrías en la Antártida (TSCAN) tiene como objetivo caracterizar la dinámica de las nubes superfrías (NS) y su relación con la turbulencia, combinando datos in situ de mediciones con globos de parámetros atmosféricos y perfiles de Contenido de Agua Líquida Sobrenfriada (SLWC, por sus siglas en inglés) con observaciones remotas de instrumentos terrestres en la región de la Península Antártica. Los detalles de la campaña se pueden encontrar en la Nota Técnica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Imazio y otros (2025). Durante la campaña se realizaron briefings de pronóstico diariamente y un briefing semanal. En los mismos participaban el equipo de pronóstico de T-SCAN e integrantes del Centro Meteorológico Antártico Marambio (CMAM). Durante los briefings se identifican patrones de circulación atmosféricos, tales como Ríos Atmosféricos Antárticos (RAA) o Bajas Polares (BPs). Estos sistemas meteorológicos presentan un patrón nuboso con potencial de SLWC, como se documenta en trabajos como Gorodetskaya y otros (2014) y Listowski y otros (2020). Se planifican el lanzamiento de 30 radiosondas Väisälä con sondas Anasphere SLWC durante 30 días consecutivos, entre enero y febrero de 2025. Los lanzamientos se realizaron desde la estación Marambio, al norte de la Península Antártica. En este trabajo se presenta la caracterización de los eventos meteorológicos más significativos durante la campaña y los desafíos del pronóstico del tiempo en la región Antártica.

2) RESULTADOS

Durante la primera semana de mediciones (12 al 18 de enero 2025) se desarrolla un RAA que se desplaza desde latitudes medias hacia el norte de la Península Antártica con un patrón similar al encontrado por Gorodetskaya y otros (2014). En el evento el flujo meridional, asociado a la conducente cálida del ciclón, favorece el ingreso de humedad en el norte de la Península Antártica. Mientras que, al día siguiente, se registran vientos intensos asociados al pasaje de un sistema ciclónico (Figura 1). Luego, se observa un continuo pasaje de ciclones extratropicales de escala sinóptica, con sus centros principales en el Mar de Bellinhausen. Asimismo, se observan BPs de mesoescala embebidas en el flujo ciclónico, que favorecieron condiciones de inestabilidad, cielos cubiertos con nevadas y lloviznas debido al ingreso de aire húmedo desde el Mar de Weddell. Durante la segunda semana de mediciones (19 al 25 de enero) se caracteriza por condiciones excepcionalmente estables y cálidas. Esto se debe al establecimiento de un patrón de bloqueo en el Mar de Belinhausen que favoreció condiciones de cielos despejados y temperaturas máximas que superaron los 14°C. Hacia el final de la semana predominan eventos de niebla, sin registro de precipitaciones. Por otro lado, se observa en los datos de los radiosondeos realizados (no se muestra), que la altura de la tropopausa alcanza alturas por encima de la media climatológica (Imazio y otros, 2025). Esto coincide con una capa troposférica inusualmente cálida. Durante la tercera semana de mediciones (26 de

enero al 1 de febrero) se observa el ingreso de un RAA que favorece el ingreso de humedad, y se registran nevadas significativas y un descenso de la temperatura. El RAA, es parte de un sistema ciclónico extratropical que se extiende hasta niveles medios de la troposfera, que promueve vientos intensos en la región de Marambio y el norte de la Península Antártica. En la cuarta semana de mediciones (2 al 8 de febrero) una perturbación de altura ubicada en latitudes medias fuerza una ciclogénesis en el Pasaje de Drake que mantiene varios días de vientos intensos en la base Marambio, mientras el sistema se desplaza hacia el Mar de Weddell. Además, se desarrollan BPs en el Mar de Bellinhausen y el norte de la Península Antártica. Las mismas están inmersas en una masa de aire de origen polar y se observan nevadas y nieblas. En los últimos 10 días de la campaña (9 al 18 de febrero) se realizan pocas mediciones debido a que se registran varios días con vientos intensos y condiciones más estables. Se observa el ingreso de una masa de aire de origen polar, que presenta un flujo persistente del sur que inhibe el ingreso de aire húmedo de latitudes más bajas.

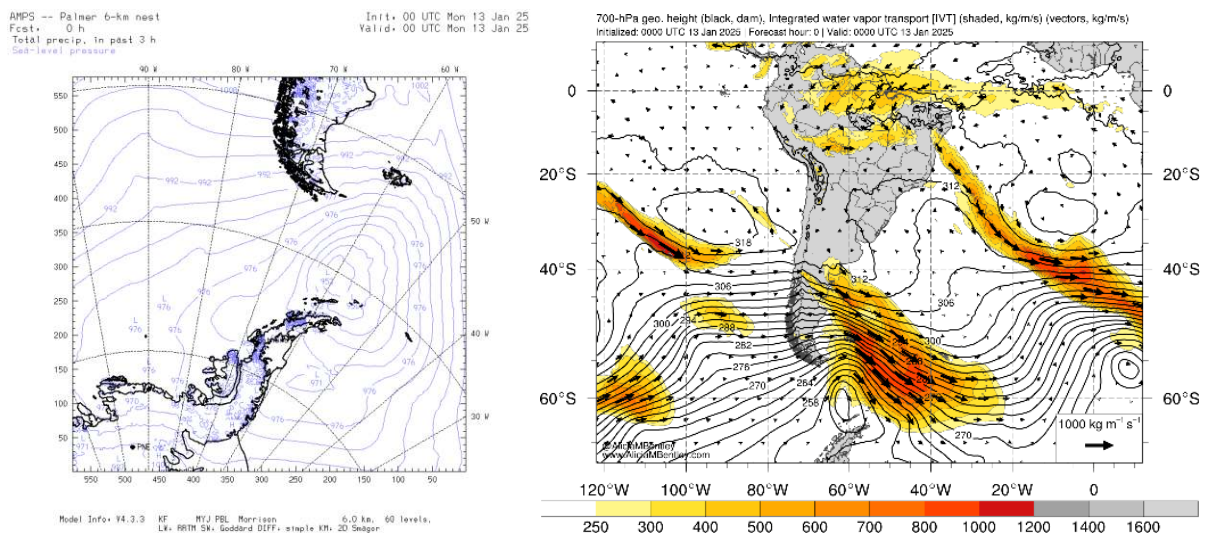


Figura 1: 13 de enero 00Z. A la izquierda campo de presión al nivel del mar (hPa) del análisis del AMPS-WRF (<https://www2.mmm.ucar.edu/rt/amps/>). A la derecha el campo del Transporte de Vapor de agua Integrado (IVT, sombreado y vectores) y la Altura Geopotencial en el nivel de 700 hPa (cont.) del análisis del modelo GFS en el mismo horario (<https://atmos.albany.edu>).

3) DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Durante la realización de los pronósticos para identificar potenciales eventos meteorológicos de interés, se encontraron varios desafíos. Por un lado, la dificultad de los modelos numéricos en representar con exactitud la posición e intensidad de los sistemas, y por otro su velocidad de desplazamiento y ciclo de vida. Esto modifica de forma sustancial las condiciones del tiempo previstas, incluso con pocas horas de anticipación. En ese sentido, los pronosticadores utilizan otras herramientas como imágenes satelitales para complementar el pronóstico a corto plazo. Un ejemplo de una situación pronosticada se muestra en la Figura 2 para el modelo AMPS-WRF, en su versión determinística. Allí se observa un sistema de baja presión ubicado en el Pasaje de Drake donde se preveía que estuviera asociado a un RAA. Sin embargo, el sistema fue mucho menos intenso que lo pronosticado, como también su posición, lo que modificó el campo de viento pronosticado.

En este sentido, es necesario aumentar la cantidad de observaciones que asimilan los modelos globales y regionales, que influyen de forma sustancial en la calidad de los pronósticos. Un ejemplo son las observaciones de altura, que durante la campaña se transmitieron a la red global de observaciones. Por otro lado, se está analizando para los eventos de la campaña los procesos turbulentos en la capa límite, la topografía y otros fenómenos de interés como la visibilidad reinante y techo de nubes. A partir del análisis presentado en este trabajo, se encuentra en curso

una caracterización de las condiciones favorables para el desarrollo de turbulencia en presencia y ausencia de nubes. En particular, y en conjunto con los datos de los sensores SLWC y los perfiles verticales de los sondeos, se encuentra en desarrollo un método de detección de turbulencia troposférica, mediante correcciones al perfil de humedad relativa.

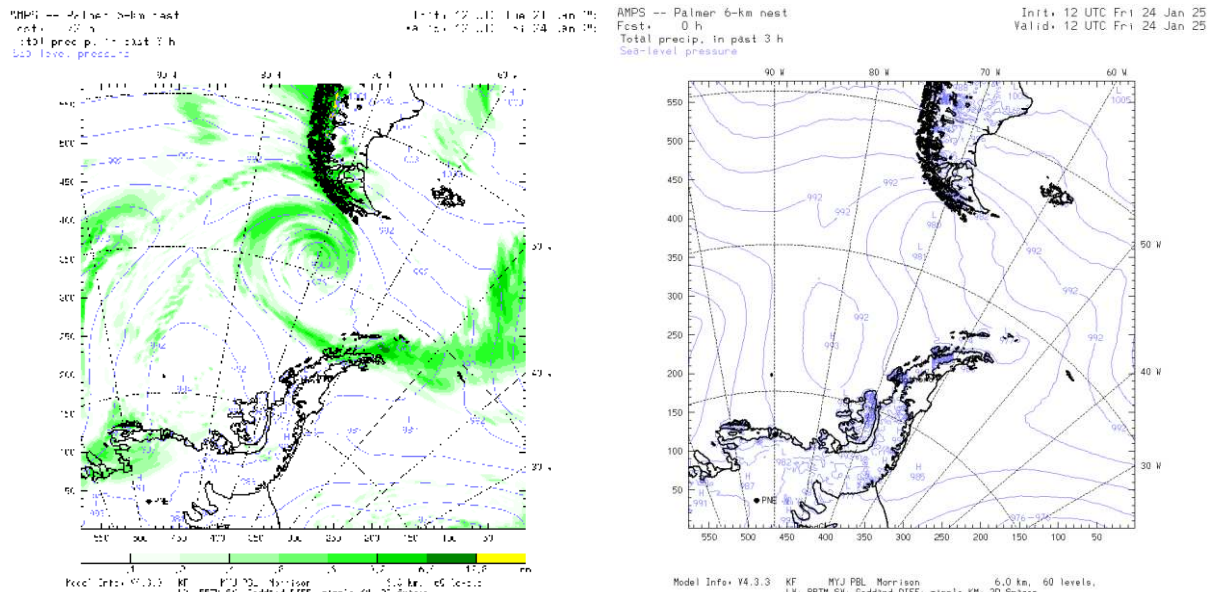


Figura 2: Pronóstico de la Presión al Nivel del Mar del AMPS-WRF. A la izquierda Pronóstico inicializado 72 hs antes. A la derecha el análisis del 24 de enero 2025 a las 12Z.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer la participación y particular dedicación del equipo de pronóstico y del equipo técnico asociados a la campaña T-SCAN, sin los cuales las mediciones no hubieran sido posibles. También agradecemos el trabajo de Proyectos Antárticos, y al COCOANTAR por la logística.

REFERENCIAS

- Gorodetskaya, I. V., M. Tsukernik, K. Claes, M. F. Ralph, W. D. Neff y Van Lipzig N. P. M., 2014: The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in East Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 6199–6206, doi:10.1002/2014GL060881.
- Listowski, C., Rojo, M., Claud, C., Delanoë, J., Rysman, J.-F., & Cazenave, Q., et al, (2020): New insights into the vertical structure of clouds in polar lows, using radar-lidar satellite observations, *Geophys. Res. Lett.*, 47. <https://doi.org/10.1029/2020GL088785>.
- Rodriguez Imazio P., Godoy A. A., Gambarte G., Quarín F., Auzmendiá D., Zapiola A., Troche N., 2025: Campaña de medición de Turbulencia y nubes super frías en la Antártida (TSCAN). Reporte técnico SMN.

ESTIMACIÓN DE FLUJOS DE CO₂ EN EL CENTRO DE ARGENTINA: ANÁLISIS DE UNA DÉCADA CON WRF-VPRM

Rodrigo Andrés Merino^{1,2}, Maria Isabel Gassmann^{1,2}
rmerino@at.fcen.uba.ar. Autor/a correspondiente.

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN - UBA)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras clave: Intercambio Neto de Ecosistema, Covarianzas Turbulentas, Imágenes Satelitales MODIS, Modelado Numérico de la Atmósfera

1) INTRODUCCIÓN

En un contexto global marcado por el cambio climático, comprender el ciclo del carbono atmosférico y su interacción con los ecosistemas es fundamental. La fotosíntesis de la vegetación y la respiración de los ecosistemas regulan los flujos de CO₂ entre la superficie terrestre y la atmósfera, procesos influenciados por la disponibilidad de energía y humedad (Falge y otros, 2002). En este sentido, Sudamérica desempeña un papel clave en el ciclo global del carbono, actuando como un importante sumidero de CO₂. Sin embargo, la expansión agrícola y la deforestación han modificado significativamente estos ecosistemas, afectando la dinámica del carbono en la región.

La cuantificación de los intercambios de carbono suele realizarse mediante torres de covarianzas turbulentas, pero la escasez de estos sitios en el hemisferio sur, especialmente en Sudamérica, limita la representatividad de los datos (Pastorello y otros, 2020). Alternativas como imágenes satelitales y modelos bioclimáticos dependen en gran medida de calibraciones basadas en datos del hemisferio norte, lo que introduce incertidumbre en la representación de los ecosistemas sudamericanos (Byrne y otros, 2022).

En este contexto, el modelo VPRM (Vegetation Photosynthesis and Respiration Model) ofrece una solución al integrar datos satelitales con información meteorológica para estimar el intercambio neto de CO₂ (Net Ecosystem Exchange o NEE) (Mahadevan y otros, 2007). Su acoplamiento con el modelo regional WRF ha permitido mejorar la representación de los flujos de carbono a escala regional. En este trabajo se utiliza WRF-VPRM para analizar la variabilidad diaria, mensual y anual del NEE en la región central de Argentina durante la década 2010-2019.

2) MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de covarianzas turbulentas de cinco sitios del centro de Argentina fueron analizados para caracterizar distintos entornos agrícolas y naturales. Los sitios incluyen cultivos de soja, trigo y maíz, así como pastizales naturales y marismas saladas. Se aplicaron técnicas estándar de control de calidad y relleno de datos a las series temporales de NEE. Además, se utilizaron imágenes satelitales MODIS para calcular índices como el EVI2 y el LSWI, los cuales permiten monitorear la cobertura vegetal y la disponibilidad de agua. Estos datos se utilizaron para la calibración del modelo VPRM, que estima los intercambios de carbono entre la vegetación y la atmósfera mediante parámetros ajustados para los ecosistemas locales.

Para evaluar estos flujos a escala regional, se implementó el modelo WRF-VPRM con una resolución espacial de 8 km x 8 km y condiciones iniciales del reanálisis ERA5. Se realizaron simulaciones diarias entre 2010 y 2019, incorporando información de vegetación del conjunto de datos SYNMAP. Los resultados permitieron obtener estimaciones horarias de NEE, producción primaria bruta (GPP) y respiración de ecosistema (Reco), las cuales se integraron para analizar la variabilidad mensual y anual de los intercambios de CO₂ en la región de estudio.

3) RESULTADOS

El modelo calibrado localmente fue utilizado para estimar el NEE en dos estaciones (CC-Ag y CC-G). En general, VPRM representa bien la variabilidad mensual, aunque muestra discrepancias significativas en meses de primavera, donde falla en captar la absorción de CO₂ por cultivos de invierno (Figura 1). En pastizales, el modelo tiende a sobreestimar NEE en invierno, simulando un ecosistema emisor en lugar de un sumidero.

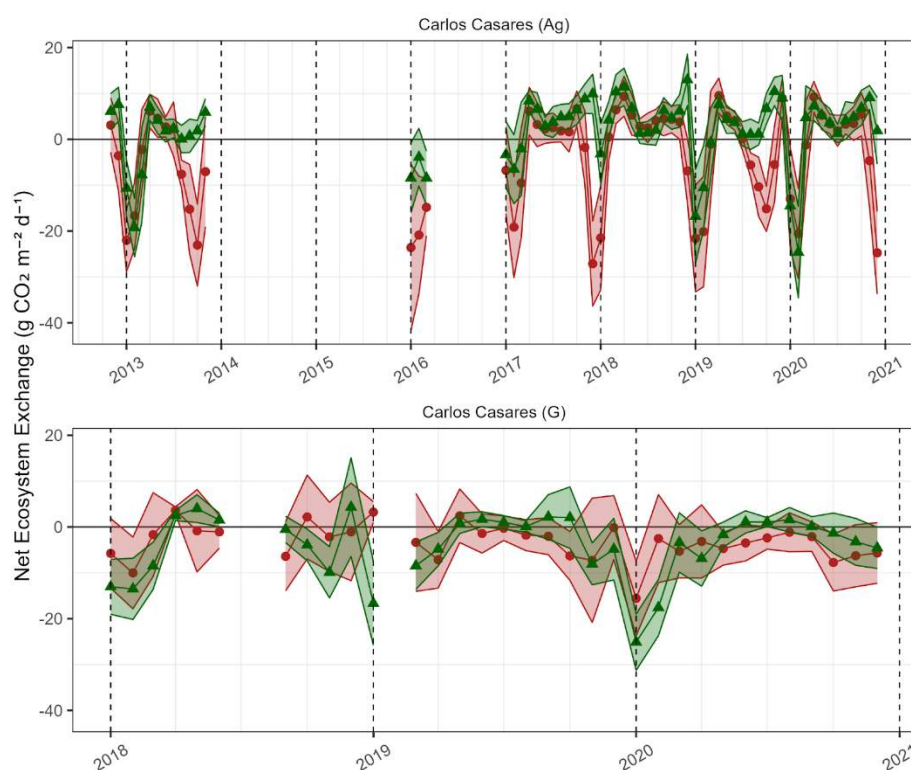


Figura 1 - Promedio mensual del NEE observado (puntos rojos) y del NEE modelado por VPRM (triángulos verdes), junto con sus desviaciones estándar para las estaciones CC-Ag y CC-G.

Durante el período 2010-2019, las simulaciones del modelo WRF-VPRM permitieron estimar el NEE en distintas regiones de Argentina. Las áreas del centro del país y cercanas a la cordillera de los Andes presentan valores positivos de NEE, indicando emisión neta de CO₂ a la atmósfera (Figura 2). Por el contrario, las zonas del este, como Buenos Aires, Uruguay, Misiones y las Yungas, muestran valores negativos, lo que representa una asimilación de CO₂. En promedio, el área de estudio actuó como un sumidero neto de carbono, con un NEE diario medio de -0.5 g CO₂ m⁻² d⁻¹. Las mayores tasas de GPP se registraron en las regiones selváticas, favorecidas por la humedad disponible durante todo el año. En contraste, Reco fue más intenso en las regiones del centro-norte, caracterizadas por temperaturas más altas. Existe un marcado

gradiente este-oeste en el comportamiento del CO₂, vinculado principalmente a la disponibilidad de agua y a la temperatura. Estos factores condicionan tanto la absorción como la emisión de carbono en los distintos ecosistemas del país.

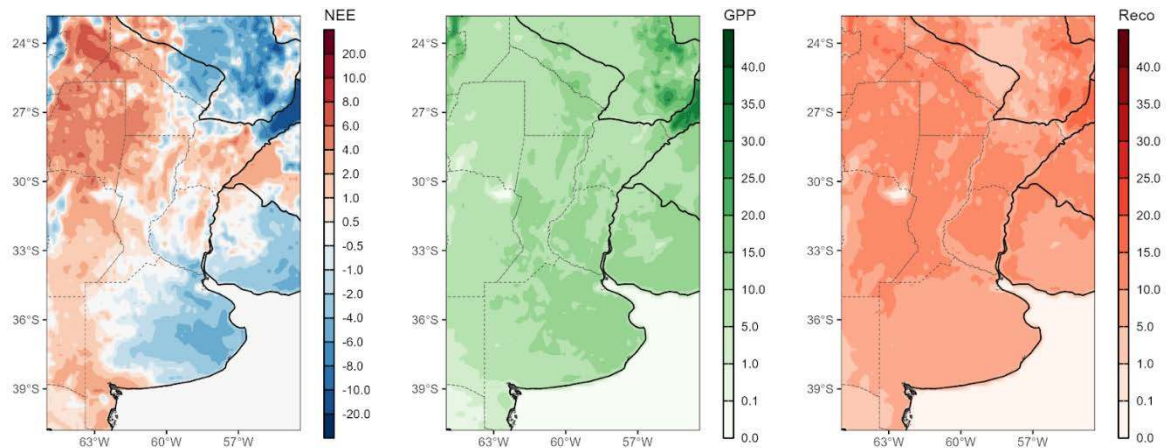


Figura 2 - Promedio diario de NEE, GPP y Reco ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) para el período 2010-2019.

4) DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los modelos meteorológicos regionales, como WRF-VPRM, han mejorado la evaluación del balance de CO₂ al ofrecer mayor resolución en la representación de procesos atmosféricos. Sin embargo, su calibración se basa en datos limitados, lo que genera incertidumbre en la validación, especialmente por la falta de torres de flujo en Sudamérica. Aun con estas limitaciones, WRF-VPRM ha representado con precisión la variabilidad del NEE en sitios agrícolas, coincidiendo con estudios que identifican el este de Argentina como un sumidero de CO₂ y el oeste como una fuente. La variabilidad del NEE está influenciada por la temperatura y la humedad del suelo, factores clave en la regulación del GPP y la respiración de ecosistema.

El cambio climático proyecta aumentos de temperatura y modificaciones en las precipitaciones, lo que podría alterar la dinámica del CO₂ en la región. Dado que los modelos globales ofrecen resultados divergentes, es esencial mejorar la representación de la biosfera y ampliar estudios basados en observaciones locales.

REFERENCIAS

- Byrne, B., Baker, D. F., Basu, S., Bertolacci, M., Bowman, K. W., Carroll, D., ... y Zeng, N., 2022. National CO₂ budgets (2015–2020) inferred from atmospheric CO₂ observations in support of the global stocktake. *Earth System Science Data Discussions*, 2022, 1-59.
- Falge, E., Baldocchi, D., Tenhunen, J., Aubinet, M., Bakwin, P., Berbigier, P., ... y Wofsy, S., 2002: Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1-4), 53-74.
- Mahadevan, P., Wofsy, S. C., Matross, D. M., Xiao, X., Dunn, A. L., Lin, J. C., ... y Gottlieb, E. W., 2008. A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO₂ exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM). *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2).
- Pastorello, G., Trotta, C., Canfora, E., Chu, H., Christianson, D., Cheah, Y. W., ... y Law, B., 2020. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Scientific data*, 7(1), 225.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RELACIÓN ENTRE LAS OLAS DE CALOR EN ARGENTINA DURANTE EL VERANO CON EL FENÓMENO DE EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) Y LA OSCILACIÓN ANTÁRTICA (OAA)

José Luis Stella¹
jls@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: ola de calor, enos, oscilación antártica

1) INTRODUCCIÓN

Las olas de calor se encuadran dentro de los fenómenos meteorológicos extremos más relevantes que amplifican el riesgo en cuestiones de salud, economía, sequías, incendios, calidad de agua, escasez de energía y pérdidas agrícolas, causando daños importantes a comunidades de todo el mundo. Las olas de calor afectan a gran parte de Argentina y su climatología muestra que las mismas son más frecuentes sobre la franja central del país, entre 30°S y 40°S, y región del Litoral (Herrera, 2024).

El objetivo de este trabajo es analizar la relación de la ocurrencia de olas de calor en Argentina en el trimestre de verano (diciembre-enero-febrero) con las distintas fases del fenómeno ENOS como forzante estacional, y la posible influencia de la OAA como forzante sub-estacional.

2) DATOS Y METODOLOGÍAS

Se utilizaron los datos de olas de calor para 70 estaciones meteorológicas convencionales del SMN en el período diciembre 1978 a febrero 2024. Para determinar la fase del fenómeno ENOS (WMO, 2014) se consideró la categorización según el índice trimestral ONI⁽¹⁾. Para categorizar la fase de la OAA (Thompson y Wallace, 2000) se tomaron los datos diarios del índice utilizado por NOAA⁽²⁾. Se suavizó la serie calculando un promedio móvil de 7 días, luego se calcularon los terciles para el trimestre de verano en el período 1978-2020 para determinar los umbrales para la fase positiva y negativa. Luego se consideró una persistencia de al menos 3 días consecutivos en la misma fase para obtener los períodos y cantidad de días con fase positiva y negativa. En este primer análisis más general, para tipificar la fase de la OAA, se consideró la prevalencia de días con fase positiva o negativa de cada verano.

El punto de partida de este análisis fue agrupar los días con ola de calor para cada localidad según las distintas fases del ENOS en los 46 veranos de referencia (*16 La Niña; 15 El Niño; 15 Neutro*). Para visualizar en mapas estos resultados se utilizó el porcentaje de días. La segunda parte de este trabajo consistió en determinar la posible influencia de la OAA en la ocurrencia de olas de calor dependiendo de la fase activa del ENOS.

3) RESULTADOS

Olas de Calor y ENOS: El análisis estadístico para este forzante mostró que bajo condiciones La Niña se observó un mayor porcentaje de días con ola de calor en gran parte del país, como así también en la mayoría de las localidades fue la fase más favorecida (*Figura 1*). En los veranos “El Niño” el mayor porcentaje de días con ola de calor se vieron favorecidos parcialmente en la región del NOA, norte de Cuyo, centro de Córdoba, norte de Misiones y

parte del centro de Buenos Aires. Es de resaltar que para los veranos “Neutros” las olas de calor tienden a ser menos frecuentes en la mayor parte del país. Este patrón es concordante con las composiciones promedio de las anomalías de temperatura para el verano según cada fase⁽¹⁾.

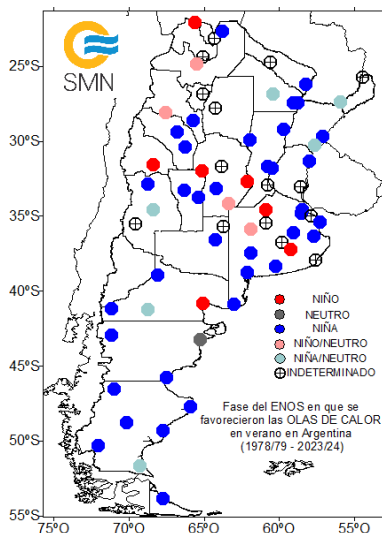


Figura 1: Fase/s del ENOS en que se vieron favorecidas las olas de calor durante el verano en Argentina en el período 1978/79 – 2023/24

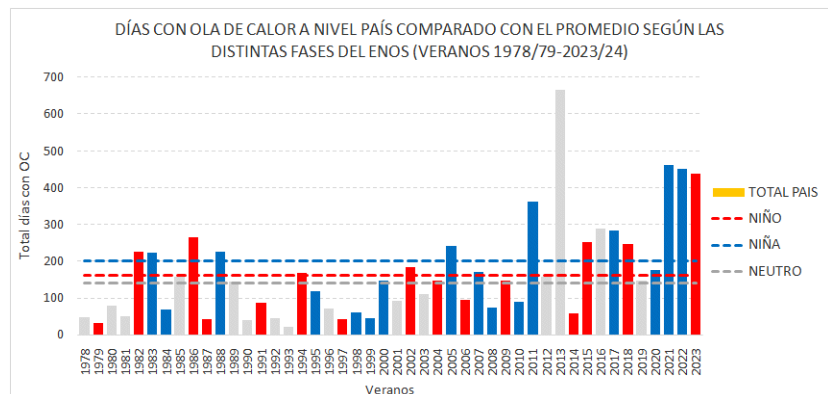


Figura 2: Serie de días con Ola de Calor a nivel país para el trimestre de verano diferenciando la fase del ENOS y comparando con el promedio global para cada fase.

Al analizar la serie de días con ola de calor a nivel país (Figura 2) se puede apreciar que, en promedio, fueron más frecuentes en veranos La Niña, seguido por veranos El Niño y menos frecuentes en veranos Neutro. Es de destacar también que se observó un incremento de olas de calor a partir del verano 2011/12 independiente de la fase del ENOS y que la máxima ocurrencia de días con ola de calor a nivel país tuvo lugar durante el verano 2013/14 con el ENOS en fase neutral.

Influencia de la OAA: Analizando por separado los días con ola de calor a nivel país en veranos Niño, Niña y Neutro se trató de determinar qué fase de la OAA fue la predominante. Teniendo en cuenta la diferencia de días con OAA+ y OAA- se pudo observar que:

- En **veranos El Niño** la serie muestra que en los primeros veranos prevalece la fase negativa de la OAA y en los últimos la positiva (Figura 3). El total de días con OAA+ (473) y OAA- (449) en los veranos Niño fueron similares.
- En **veranos La Niña** la serie muestra que en 12 de estos 16 veranos predominó la fase positiva de la OAA (Figura 4). El Total de días con OAA+ (687) fue significativamente mayor al total de días con OAA- (266).
- En **veranos Neutro**, en la primera parte de la serie, no se observó una fase predominante de la OAA. Pero en los últimos veranos la fase que predominó fue la negativa (Figura 5). En este caso el total de días con OAA- (436) resultó ser levemente superior a los días con OAA+ (363).
- La serie de días con **fase positiva de la OAA** mostró un **aumento** a lo largo de los veranos, mientras que los días con **fase negativa de la OAA** tendieron a **disminuir** (Figura 6).

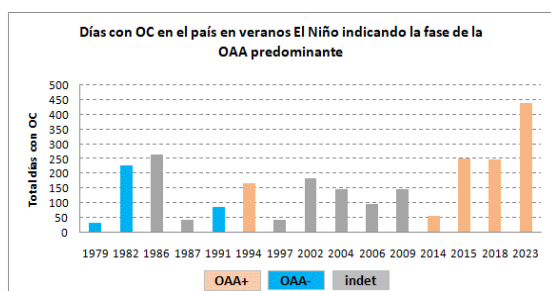


Figura 3: Días con ola de calor en veranos El Niño indicando la fase predominante de la OAA.

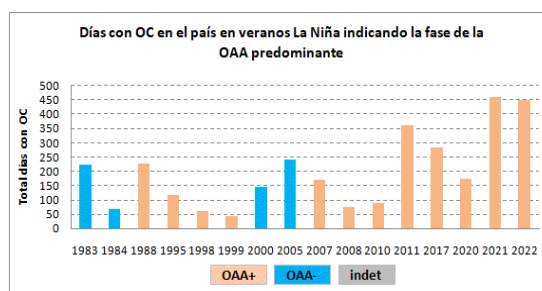


Figura 4: Días con ola de calor en veranos La Niña indicando la fase predominante de la OAA.

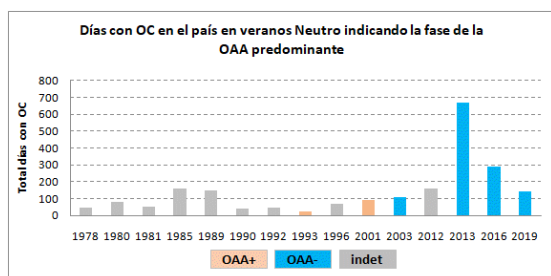


Figura 5: Días con ola de calor en veranos Neutro indicando la fase predominante de la OAA.

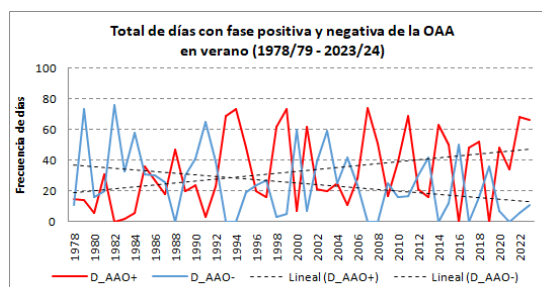


Figura 6: Serie temporal de días con fase positiva y negativa de la OAA en verano (1978/79 - 2023/24)

4) CONCLUSIONES

La frecuencia de olas de calor en Argentina ha aumentado en los últimos años, independientemente de la fase activa del ENOS. Sin embargo en un contexto climatológico histórico se identificó que la fase de La Niña es la que tiende a favorecer más la ocurrencia de olas de calor en verano en la mayor parte del país. La influencia de la Oscilación Antártica en su fase positiva fue más predominante bajo condiciones La Niña. Sin embargo se halló que en los últimos veranos bajo condiciones El Niño La fase positiva de la OAA también fue predominante. Por otro lado en los veranos neutros se observó que en los últimos casos la fase predominante de la OAA fue la negativa. Debido a la tendencia que se viene observando de las olas de calor en los últimos años es necesario seguir analizando la evolución y posibles cambios en la influencia de los diferentes forzantes en las diferentes escalas.

REFERENCIAS

Herrera, N. 2024: Climatología de las Olas de Calor en Argentina en el período 1961/62-2022/23. Nota Técnica SMN 2024-165

WMO pub No. 1145, 2014: El Niño/Southern Oscillation, ISBN 978-92-63-11145-6.

Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. J. Climate, 13, 1000-1016.

(1)https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

(2)https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao/ao.shtml

(3)https://www.smn.gob.ar/como_nos_afecta

ANÁLISIS DEL CAMBIO EN LA DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ESTACIONAL EN LA PLATA OBSERVATORIO

Andrés Cesanelli¹, Lorenzo Ricetti^{2,3}

acesanelli@fcaglp.unlp.edu.ar

1 Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEOF), Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (FCAG-UNLP)

2 Grupo de investigación en Clima, Variabilidad y Extremos (CLAVE), Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (FCAG-UNLP)

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

Palabras clave: lluvias, acumulado, frecuencia

1) INTRODUCCIÓN

La precipitación resulta de primaria importancia en el comportamiento del ciclo hidrológico en la llanura pampeana argentina, controlando alternancias de sequías e inundaciones, con grandes impactos económicos para la región. Particularmente, en la ciudad de La Plata juega, junto con la temperatura, un rol clave en el desarrollo frutihortícola que caracteriza al cinturón periurbano. Además, dada la topografía y el crecimiento urbano de la zona, los eventos extremos de precipitación han provocado inundaciones con drásticas consecuencias en la población. Es por ello que el estudio de sus variaciones contribuiría en la mejor toma de decisiones en el contexto de cambio climático actual.

El presente trabajo se inscribe en una serie de estudios que pretenden caracterizar la precipitación de La Plata tomando datos de la estación meteorológica La Plata Observatorio (LPO), perteneciente a la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata. Ésta se ubica en el predio de la unidad académica en el bosque de la ciudad, y posee un inmenso valor histórico en tanto lleva más de un siglo de registro ininterrumpido (Morbidelli et al., 2025). En un estudio previo realizamos un análisis exploratorio de las series de precipitación acumulada anual y estacional, encontrando un comportamiento homogéneo y estacionario en todo el periodo de estudio para las series de acumulados de otoño, invierno y primavera, y quiebres en las series de verano y anual (Cesanelli y Ricetti, 2024). Estas últimas coinciden en evidenciar un quiebre en 1976, ampliamente estudiado en la región, hacia mayores valores de precipitación.

En esta oportunidad nos proponemos profundizar el conocimiento de cómo se distribuye la precipitación estacionalmente y qué cambios hubo a lo largo de la última centuria. Para ello analizaremos la distribución de los acumulados estacionales y de la frecuencia de la precipitación diaria, considerando los períodos climáticos correspondientes al comienzo y al final de la serie temporal disponible. De este modo evaluaremos el comportamiento de las precipitaciones en dos climatologías que fueron relevadas como diferentes en el trabajo anterior.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos de precipitación diaria de la estación meteorológica LPO (34° 55' S, 57° 57' O) correspondientes al periodo 1909-2010. Para evaluar los cambios en las distribuciones de precipitación se consideraron dos climas separados por un periodo de 40 años: el clima que denominaremos *pasado* (1910-1940) y el que denominaremos *presente* (1980-2010). Se estimaron las funciones de densidad de probabilidad empírica de la frecuencia de días de

precipitación (días con precipitación mayor a 0.1 mm) y del acumulado estacional del verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON). Para evaluar los cambios entre las distribuciones del clima pasado y presente se empleó el test de Kolmogorov-Smirnov de dos muestras, cuya hipótesis nula establece que ambas muestras provienen de la misma distribución poblacional.

3) RESULTADOS

En la Figura 1 se ilustran los valores de densidad de probabilidad obtenidos para el acumulado estacional de precipitación y para la frecuencia de días de precipitación, superponiendo los resultados para el clima pasado y el presente. Asimismo se presentan los *p-values* del test de Kolmogorov-Smirnov, los cuales evidencian que sólo en el verano las distribuciones de clima pasado y presente son significativamente diferentes con una confianza del 95%. Este resultado es consistente con lo hallado en Cesanelli y Ricetti (2024), quienes hallaron puntos de quiebre en el período entre climas (particularmente en 1976).

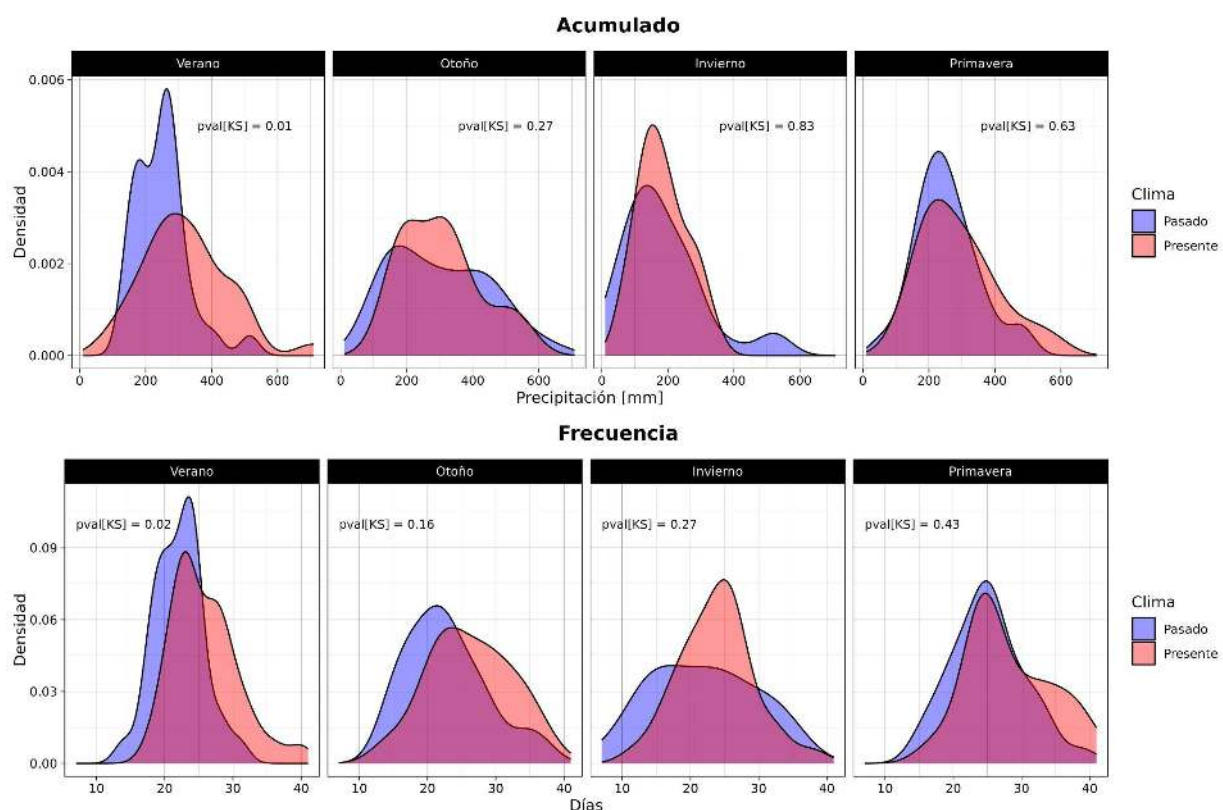


Figura 1: Funciones de densidad de probabilidad empírica del acumulado estacional de precipitación (paneles superiores) y de la frecuencia de días de precipitación (paneles inferiores) para la estación La Plata Observatorio. Se considera clima pasado al período 1910-1940 y clima presente al período 1980-2010. En cada gráfico se indica el p-value del test de Kolmogorov-Smirnov.

Del análisis de las formas de las distribuciones por estación se observa que en el verano las modas en precipitación acumulada no difieren sustancialmente entre climas (en torno a los 300 mm) siendo fuertemente bimodal en el pasado. No obstante, las diferencias que expresan los resultados del test de Kolmogorov-Smirnov se explican principalmente por la mayor probabilidad de ocurrencia de eventos extremos (por encima de 400 mm) en el clima presente. Un comportamiento análogo se encuentra en las distribuciones de frecuencia diaria, donde ambas muestran una moda cercana a los 23 días con precipitación, pero con diferencias estadísticamente significativas. En este caso, las mayores discrepancias se

observan en los valores para frecuencias mayores a 25 días de precipitación por estación, donde la probabilidad es considerablemente mayor en el clima presente, evidenciando una cola derecha más pesada en la distribución.

En la estación de otoño, la distribución de la precipitación acumulada en el clima pasado presenta una marcada bimodalidad, con máximos en torno a los 200 mm y 400 mm, lo que indica una mayor dispersión de la probabilidad entre esos valores. En cambio, la distribución del clima presente muestra una única moda más concentrada en torno a los 300 mm. En cuanto a la frecuencia de días con precipitación, se registra un leve aumento de la moda en el clima presente, así como una mayor probabilidad de superar los 25 días con lluvia por estación. Estos resultados reflejan una tendencia hacia una distribución más concentrada en los valores medios de acumulado y un aumento en la persistencia de los eventos de precipitación bajo condiciones climáticas actuales.

Para el invierno las distribuciones de precipitación acumulada no presentan diferencias sustanciales entre climas en la mayor parte del rango observado. Sin embargo, se identifican discrepancias en las colas de las distribuciones, donde —contrario a lo esperado— la probabilidad de registrar acumulados invernales entre 400 y 600 mm es mayor en el clima pasado. No obstante, estas diferencias no resultan suficientes para que el test de Kolmogorov-Smirnov indique una diferencia significativa entre distribuciones. En cuanto a la frecuencia de días con precipitación, las distribuciones tampoco mostraron diferencias estadísticamente significativas, aunque se detectaron contrastes marcados en la forma de las distribuciones. En particular, la distribución del clima presente es ligeramente leptocúrtica, mientras que la del clima pasado presenta una forma platicúrtica, sugiriendo una menor concentración en torno a la media.

Finalmente, en primavera las distribuciones resultan notablemente similares, con modas coincidentes y sólo leves variaciones en las probabilidades asociadas a los valores centrales. Sin embargo, se observa una mayor presencia de eventos extremos en el clima presente, evidenciada por colas más pesadas en ambas distribuciones. En particular, se incrementa la probabilidad de registrar acumulados superiores a 400 mm y frecuencias estacionales por encima de los 30 días, lo que sugiere un aumento en la ocurrencia de eventos de alta intensidad o persistencia.

4) CONCLUSIONES

El análisis de las distribuciones de acumulados estacionales y de frecuencias de precipitaciones en LPO pone en evidencia un cambio significativo en la distribución de cómo ocurren las lluvias principalmente en verano. Se observa que el cambio en el acumulado es conducido por un aumento en la frecuencia de días de precipitación. En las otras tres estaciones no se encontraron cambios estadísticamente significativos en las distribuciones, aunque sí se observan cambios en la forma de las distribuciones. En particular, en las temporadas de transición (otoño y primavera) se registró una mayor probabilidad de ocurrencia tanto en el acumulado como en frecuencia en el clima presente. En cambio, en invierno, el comportamiento observado fue el opuesto.

REFERENCIAS

Cesanelli A. y Ricetti, L., 2024: Análisis exploratorio de la variabilidad en baja frecuencia de la precipitación anual y estacional en La Plata Observatorio”. *Geoacta* (ISSN 1852-7744). Vol 46(1) - Volumen especial XXX Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. 67–71, CABA.

Morbideilli R., (...), Cesanelli A., Richetti. L. y otros, 2025: A reassessment of the history of the temporal resolution of rainfall data at the global scale. *Journal of Hydrology* (ISSN 0022-1694). Vol. 654, 13284.

RELACIÓN ENTRE LOS CICLONES EXTRATROPICALES Y LA ACTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL SUR DE SUDAMÉRICA

Florencia I. Solari^{1,2,*}, Josefina Blázquez^{1,2}, M. Gabriela Nicora^{3,4,5}

* fsolari@fcaglp.unlp.edu.ar

¹Grupo de Investigación en Clima, Variabilidad y Extremos (CLAVE), Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG), Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Centro en Láseres y Aplicaciones (CEILAP), CITEDEF y UNIDEF (MINDEF-CONICET)

⁴Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI), (CNRS-IRD-CONICET-UBA)

⁵Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG), Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

Palabras clave: ERA5, WGLC, climatología sinóptica.

1) INTRODUCCIÓN

Los ciclones (y anticiclones) son la característica dominante en las cartas de superficie en latitudes medias, siendo esenciales para analizar las características climáticas en regiones extratropicales (Wernli, 2006). En Australia, los ciclones con actividad eléctrica en el mismo lugar ocurren en un 7% de los días pero son responsables del 28% de los días con precipitación (Pepler *et al*, 2020). Considerando la escasez de estudios sobre actividad eléctrica producida por sistemas sinópticos de latitudes medias, y la importancia de los ciclones y los rayos en la región, el objetivo de este trabajo es analizar la relación entre la actividad eléctrica y los ciclones extratropicales en el sur de Sudamérica.

2) METODOLOGÍA

La región de estudio se extiende desde 110°W a 30°W y desde 15°S hasta 65°S. El periodo de estudio es 2010-2021, y se encuentra determinado por la disponibilidad de datos de descargas eléctricas.

La actividad eléctrica se caracterizó a partir de la base de datos de la *World Wide Lightning Location Network* (WWLLN) *Global Lightning Climatology* (WGLC) (Kaplan & Lau, 2021), la cual tiene datos grillados diarios con una resolución horizontal de 0,5° * 0,5°.

Los ciclones se caracterizaron a partir de variables meteorológicas del reanálisis ERA5 (Hersbach *et al*, 2023), el cual tiene una resolución espacial de 0,25° * 0,25°. Aunque la resolución temporal nativa es horaria, se convirtió en diaria para que coincida con la WGLC.

Para identificar los ciclones se diseñó un algoritmo similar al de Wernli *et al* (2006), en el cual se identifican las regiones cerradas que contienen mínimos de geopotencial o presión en su interior. En este caso, en lugar de contornos cerrados cada 2 hPa en la presión de superficie, se realizó un proceso iterativo, con paso de 30 m, identificando todos los puntos pertenecientes a una misma región continua y cerrada con geopotencial en 1000 hPa menor al valor de referencia.

Para descartar regiones de baja presión que no se correspondan con ciclones extratropicales (bajas asociadas a efectos del terreno, bajas térmicas, y regiones pequeñas fuera de la escala sinóptica) se agregan dos condiciones: cada región cerrada debe alcanzar una vorticidad de al menos $-8 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ en algún punto interior y, a su vez, la “profundidad” del sistema (diferencia entre el valor máximo y el mínimo dentro de la región) debe ser de al menos 15 m. Todos los

cálculos se realizan para puntos donde la elevación del terreno es menor a 1500 m.

3) RESULTADOS

Los ciclones extratropicales son más frecuentes sobre los océanos que sobre el continente, en todas las estaciones (no mostrado). En primavera y otoño, las mayores frecuencias (alrededor del 7% de los días de la estación) se dan sobre el Océano Atlántico, entre 35°S y 45°S, mientras que las frecuencias más altas en el continente (cerca del 2%) ocurren en el sur de la Patagonia y el este del continente (Buenos Aires, Uruguay, sur de Brasil).

En verano, los ciclones son más frecuentes (8%) en el Atlántico Sur, alrededor de 60°S; en el continente, la mayor frecuencia (~2%) ocurre en Patagonia. Por último, a diferencia de las otras estaciones, en invierno los ciclones son igualmente frecuentes en el Océano Pacífico que en el Atlántico, alcanzando frecuencias de ocurrencia del 8% sobre regiones al sur de 40°S.

A continuación, se analiza, para cada estación, el porcentaje de días con actividad eléctrica asociada a ciclones sobre el total de días con actividad eléctrica, mostrado en la Figura 1. Sobre el continente, salvo en el sur de la Patagonia, la actividad eléctrica no puede ser explicada por los ciclones extratropicales. En cambio, en el Atlántico entre 25°S y 45°S, hasta el 30% de los días con actividad eléctrica están asociados con ciclones. En el Pacífico, este porcentaje llega a duplicarse; sin embargo, la actividad eléctrica sobre el Pacífico es muy poco frecuente (*e.g.*, Solari *et al.*, 2025*).

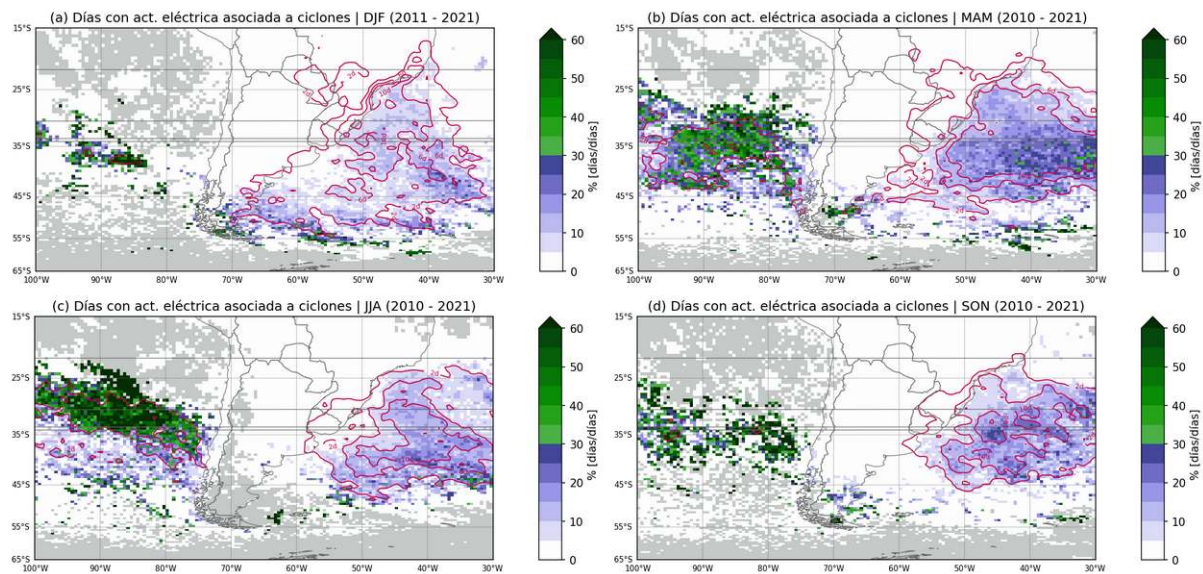


Figura 1. Días totales en el período con actividad eléctrica asociada a ciclones (contorno) y porcentaje sobre el total de días con actividad eléctrica para (a) verano, (b) otoño, (c) invierno, y (d) primavera.

Luego se analiza el porcentaje de ciclones extratropicales que presentan actividad eléctrica asociada localmente (es decir, sobre el mismo punto de grilla y en el mismo tiempo) sobre el total de días con ciclones (no mostrado), encontrándose que este valor alcanza hasta un 40% sobre el Atlántico. En cambio, cuando se considera el porcentaje de ciclones con actividad eléctrica en alguna parte del sistema, estos valores van desde 60% en 50°S, aumentando hacia el norte, hasta superar el 90%. Es decir, la mayoría de los ciclones sobre el Atlántico -y también sobre el Pacífico y el este de Sudamérica- presentan actividad eléctrica en alguna parte del sistema.

La Figura 2 muestra, para el período completo, la distribución de áreas de los ciclones con actividad eléctrica, tanto del sistema completo como de la región con descargas. Cerca de dos

tercios de los ciclones tienen un área de 500 puntos de grilla o menor (aprox. $< 240.000 \text{ km}^2$), y la cantidad de casos decae suavemente para áreas mayores. En cambio, la región con actividad eléctrica de estos mismos sistemas ocupa un área menor a 250 puntos de grilla ($\sim 120.000 \text{ km}^2$). Realizando el cociente entre estas dos áreas para cada sistema (Figura 2b), se observa que en la mayor parte de los casos, el área con actividad eléctrica representa menos del 5% del área total del sistema. A mayores proporciones, la frecuencia de casos disminuye, siendo que casi no se observan sistemas en los que la región con actividad eléctrica represente más del 40% del área total del mismo. Este comportamiento se repite en cada estación por separado (no mostrado).

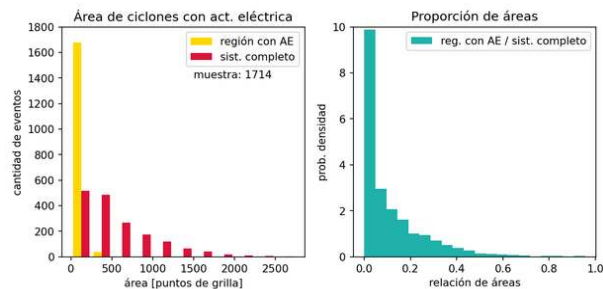


Figura 2. Izquierda: histograma de áreas (en cantidad de puntos de grilla) de ciclones extratropicales (rojo) y la región de los mismos asociada a actividad eléctrica (amarillo). Derecha: distribución de la proporción entre la región con actividad eléctrica del ciclón y el área total del sistema.

4) CONCLUSIONES

La mayoría de los ciclones en latitudes medias presentan actividad eléctrica. Sin embargo, el área donde ocurren descargas es mucho más pequeña que el sistema total, ocupando menos del 5% de los puntos de grilla en la mayoría de los casos, y menos del 40% en casi la totalidad de los eventos.

Aunque no son muy frecuentes en el Océano Pacífico, estos sistemas pueden explicar gran parte de los días con actividad eléctrica en la región (que es poco estudiada debido a su escasa frecuencia de descargas). Sobre el Océano Atlántico, estos sistemas alcanzan frecuencias del 10%, pero pueden explicar hasta el 30% de los días con actividad eléctrica.

En Patagonia Sur, los ciclones extratropicales pueden explicar hasta el 40% de la actividad eléctrica, mientras que en el resto del continente no resultan particularmente relevantes.

REFERENCIAS

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N., 2023: ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
- Kaplan, J. O., Lau, K. H.-K., 2021: The WGLC global gridded lightning climatology and time series. *Earth System Science Data*, vol. 13, no 7, p. 3219-3237.
- Pepler, A. S., Dowdy, A. J., Van Rensch, P., Rudeva, I., Catto, J. L., Hope, P., 2020: The contributions of fronts, lows and thunderstorms to southern Australian rainfall. *Climate Dynamics*, 2020, vol. 55, p. 1489-1505.
- Solari, F. I., Nicora, M. G., Blazquez, J., 2025: Relationship between frontal systems and lightning over southern South America. *Atmospheric Research*. Enviado febrero 2025, en revisión.
- Wernli, H., Schwierz, C., 2006: Surface cyclones in the ERA-40 dataset (1958–2001). Part I: Novel identification method and global climatology. *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 63, no 10, p. 2486-2507.

VALIDACIÓN DEL MODELO CLIMÁTICO *COMMUNITY ATMOSPHERE MODEL* PARA SU APLICACIÓN EN EL ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD FUTURA DE LAS ONDAS DE TORMENTA EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL ARGENTINA EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Sofía C. Muñoz^{1,2,3}, Matias G. Dinápoli^{1,2,3}, Claudia G. Simionato^{1,2,3}, Pedro DiNezio⁴
sofiacamila20000@gmail.com

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA

²Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET-UBA

³Instituto Franco-Argentino Para el Estudio del Clima y Sus Impactos (IRL 3351 IFAECI)

⁴Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado Boulder

Palabras clave: Ondas de Tormenta, Plataforma Continental Argentina, Cambio Climático

1) INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES

La Plataforma Continental Argentina (PCA) es especialmente sensible a las configuraciones atmosféricas, dando lugar a distintas respuestas del océano al forzante meteorológico; la generación de ondas de tormenta (ODT) es una de las más significativas (Alonso et al., 2024; Dinápoli et al., 2024; Dinápoli y Simionato, 2025). Estas pueden provocar descensos o ascensos anómalos del nivel del mar en escalas de tiempo de horas a días, lo cuales pueden generar desde importantes inundaciones en el estuario del Río de la Plata (D'Onofrio et al., 1998; Dinápoli et al., 2020) a erosiones costeras significativas en la costa bonaerense (Bachino et al., 2023).

En un contexto de cambio climático es de vital importancia contar con información de los potenciales cambios que pueden tener las ODT a mediano y largo plazo, ya que es un insumo indispensable para el diseño de estrategias de adaptación y para la toma de decisiones. Los recientes trabajos de Alonso et al. (2024), Dinápoli et al. (2024) y Dinápoli y Simionato (2025) demostraron que la respuesta oceánica sobre la PCA al forzamiento atmosférico de escala sinóptica puede sintetizarse en tres modos de oscilación asociados a configuraciones características de pasaje de ondas de Rossby atmosféricas sobre Sudamérica y/o ciclogénesis del Litoral. Por ello, el estudio de potenciales cambios de regímenes de ODT puede enfocarse en la caracterización de los cambios en estos modos de variabilidad atmosférica. Para entender y evaluar estos cambios es necesario contar con simulaciones numéricas de la variabilidad atmosférica bajo diferentes escenarios futuros, vinculados a diferentes niveles de emisión de gases de invernadero. Sin embargo, no cualquier simulación climática resulta adecuada para este tipo de estudio, ya que la representación de la variabilidad sinóptica está fuertemente condicionada por la resolución espacial del modelo. En particular, se requiere una resolución del orden de 50 km o mayor para poder simular correctamente la intensidad de la variabilidad atmosférica, dado que esta depende de una adecuada representación de los procesos de mesoescala. En este sentido, el modelo atmosférico CAM (Community Atmosphere Model), componente del modelo acoplado global CESM (Modelado del Sistema

Terrestre Comunitario), con una resolución horizontal de $0,25^\circ$, cobra una importante relevancia (Neale et al., 2012).

En este trabajo se evalúa la capacidad del modelo climatológico CAM de ser útil para representar la señal barotrópica forzada por el atmósfera en la PCA en el escenario presente; particularmente, se hace foco en su capacidad en reproducir las características climáticas de las ODT positivas que afectan la PCA. Para ello se analizan soluciones de relativa alta resolución provistas por el Sistema para el Modelado del Mar Argentino (SiMMAR) desarrollado por el grupo Proceso y Modelado de la Plataforma Continental Argentina y el Estuario del Río de la Plata del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, el cual fue extensivamente validado y aplicado en distintos estudios científicos regionales (Dinápoli y Simionato, 2025, y referencias allí).

2) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En primer lugar se analizó la representatividad de las señales de medias forzadas por la atmósfera. Para ellos se compararon soluciones horarias provenientes de SiMMAR forzado sólomente con el reanálisis atmosférico CFSR (de ahora en adelante denominadas Control) que cubre el periodo 1980-2020 y campos del modelo CAM (de ahora en más S20) que cubre el periodo 1950-2000. La comparación se realizó para el intervalo 1980-2000, cuando se tiene información en ambos modelos atmosféricos. Los resultados indicaron que S20 es capaz de representar el campo

medio, la varianza y el ciclo estacional del nivel del mar forzado por la atmósfera. Además se encontró que S20 es capaz de representar adecuadamente la respuesta interanual tanto espacial como espectralmente. Las diferencias entre simulaciones indican que S20 genera una anomalía como mucho un 10% más energética, lo que indica una respuesta oceánica robusta al forzamiento atmosférico con el modelo climatológico.

Una vez corroborada la capacidad del CAM para representar se dinámica general del nivel del mar forzado por la atmósfera, se procedió a la validación de la representación estadística de las ODT. La detección de ODT se realizó en base a la señal en el Puerto de Buenos Aires ya que: (i) el registro es afectado por las tres variantes de la ODT, y (ii) se cuenta con una serie temporal de observaciones directas del nivel del mar suficientemente larga (1930-2024)

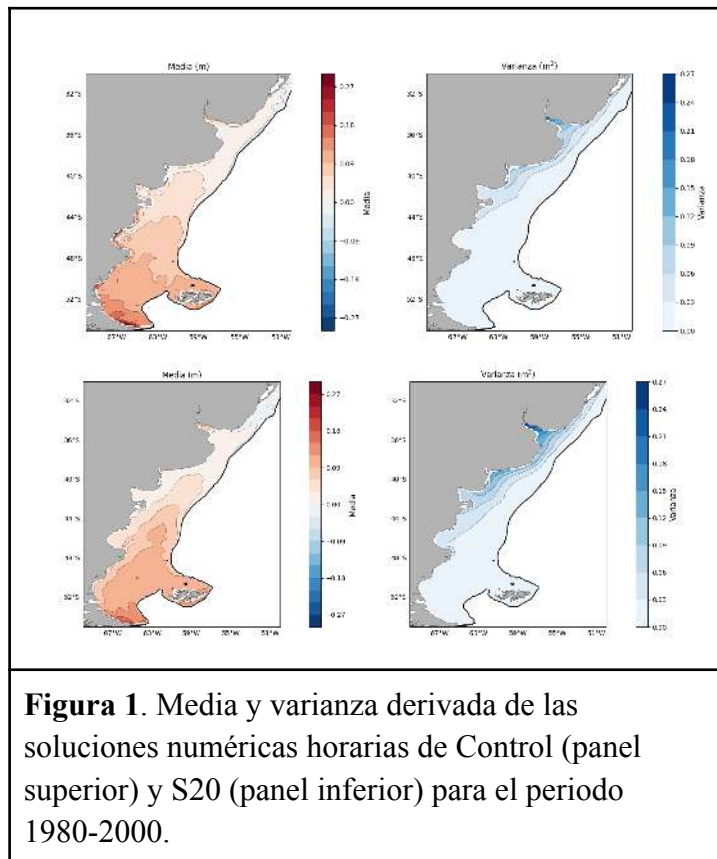


Figura 1. Media y varianza derivada de las soluciones numéricas horarias de Control (panel superior) y S20 (panel inferior) para el periodo 1980-2000.

para comparar la estadística derivada de CAM más allá del periodo en común con las soluciones de Control. Para ello, se utilizó el periodo 1965-2000, dado que los datos entre 1963 y 1965 fueron descartados por inconsistencias en el registro.

En base al trabajo de Alonso et. al (2024) se consideró como ODT a todo evento en el registro que supera el percentil 75. El análisis de las soluciones de CAM arrojó 673 casos para el periodo 1965-2000, con un promedio de 19 casos por año, lo cual se compara correctamente con las observaciones que indican 609 eventos y un promedio de 17 casos por año para el mismo periodo. Para el caso particular de los casos extremos (eventos por encima del percentil 95) se obtuvieron 129 (4 eventos por año) para CAM y 117 (3 eventos por año) para las observaciones, siendo la diferencia explicada por el extra de energía que impone CAM ya observada en el campo medio y su varianza (Figura 1). En cuanto a las estructuras de las ODT, el modelo forzado con CAM es capaz de reproducir las estructuras con leves diferencias en la amplitud consistente con los resultados anteriores.

Por lo tanto, se concluye que el modelo CAM es adecuado para representar estadísticamente la dinámica de la señal forzada por la atmósfera en la PCA y, por lo tanto, los escenarios futuros asociados a este modelo pueden ser utilizados para el estudio de los potenciales cambios de las ODTs en la PCA en un contexto de cambio climático.

3)REFERENCIAS

Alonso, G., Simionato, C. G., Dinápoli, M. G., Saurral, R., y Bodnariuk, N., 2024: Positive storm surges in the Río de la Plata Estuary: Forcings, long-term variability, trends and linkage with Southwestern Atlantic Continental Shelf dynamics. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06402-w>

Bacino, G., Alonso, G., Billet, C., Dragani, W., Bedmar, J., y Farenga, M., 2023: Assessing the morphological evolution of a breakwater-protected sandy beach by means of UAV surveys at Mar del Plata, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 127, 104379. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104379>

D'Onofrio, E., y Fiore, M., 1998: Niveles medios que aproximan al geoide en el litoral marítimo argentino. Informe Técnico N° 100/98, Departamento Oceanografía del Servicio de Hidrografía Naval.

Dinápoli, M. G., Simionato, C. G., Alonso, G., Bodnariuk, N., y Saurral, R., 2024: Negative storm surges in the Río de la Plata Estuary: Mechanisms, variability, trends and linkage with the Continental Shelf dynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 305, 108844. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108844>

Dinapoli, M. G., y Simionato, C. G., 2025: On the impact of Southeastern Pacific-generated storm surges on the Southwestern Atlantic Continental Shelf: Inter-oceanic connections through coastally trapped waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 130, e2024JC021685. <https://doi.org/10.1029/2024JC021685>

POSIBLES CAMBIOS EN EL RÉGIMEN DE ONDAS DE TORMENTA EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL ARGENTINA

Sofia C. Muñoz^{1,2,3}, Matias G. Dinápoli^{1,2,3}, Claudia G. Simionato^{1,2,3}, Pedro DiNezio⁴

sofiacamila20000@gmail.com

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA

²Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET–UBA

³Instituto Franco-Argentino Para el Estudio del Clima y Sus Impactos (IRL 3351 IFAECI)

⁴ Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado Boulder

Palabras clave: Ondas de Tormenta, Cambio Climático, Plataforma Continental Argentina

1) INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES

La Plataforma Continental Argentina (PCA) es una de las regiones más extensas y dinámicas del Atlántico Sur. Tanto observaciones como simulaciones numéricas han demostrado que la PCA presenta una energética dinámica barotrópica (Dinápoli y Simionato, 2025 y referencias citadas allí). En particular, la PCA es especialmente sensible a ciertas configuraciones atmosféricas que dan lugar a distintas respuestas del océano al forzante meteorológico. La generación de ondas de tormenta (ODT) es una de las más significativas (Alonso et al., 2024; Dinápoli et al., 2024; Dinápoli y Simionato, 2025). Estas pueden provocar descensos o ascensos anómalos del nivel del mar en escalas de tiempo de horas a días, que pueden generar desde importantes inundaciones en las costas, perjudicar las tomas de agua potable (D’Onofrio et al., 1998; Dinápoli et al., 2020) e incluso generar erosiones costeras significativas en la costa bonaerense (Bachino et al., 2023).

En un contexto de cambio climático es importante contar con información de los potenciales cambios que pueden tener las ODT a mediano y largo plazo, ya que es un insumo de utilidad para el diseño de estrategias de adaptación y para la toma de decisiones. Para entender y evaluar estos cambios es necesario contar con simulaciones numéricas del forzante atmosférico bajo diferentes escenarios futuros, vinculados a diferentes niveles de emisión de gases de invernadero. Pero no cualquier simulación es igualmente aplicable en un estudio de esta índole ya que, al depender de la adecuada representación de la mesoescala atmosférica, se requieren modelos de alta resolución. En este sentido, el modelo atmosférico CAM (Community Atmosphere Model), componente del modelo acoplado global CESM (Modelado del Sistema Terrestre Comunitario) con una resolución horizontal de 0,25°, cobra relevancia. Un trabajo conjunto presentado en este Área Temática ha demostrado que CAM es adecuado para representar estadísticamente la dinámica de la señal forzada por la atmósfera en escala sinóptica en la PCA y que, por lo tanto, los escenarios futuros asociados a este modelo pueden ser utilizados para el estudio de los potenciales cambios de las ODTs en la PCA en un contexto de cambio climático. En ese sentido, este estudio presenta un análisis de los cambios de regímenes de ODT obtenidos a partir de comparación de las soluciones numéricas obtenidas con el Sistema para el Modelado del Mar Argentino (SiMMAR, Dinápoli

y Simionato, 2025) en los periodos 1950-1999 (de ahora en más SXX) y una simulación para el periodo 2001-2050 (SXXI).

2) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para identificar eventos extremos de ODT, se aplicó un criterio derivado del propuesto por Alonso et al. (2024) para el Puerto de Buenos Aires ya que la región es afectada por las tres variantes de la ODT: se considera como ODT a toda anomalía forzada por la atmósfera con una amplitud mayor al percentil 75 derivado del registro y con una duración mayor a 3 h. En este análisis el umbral resultó en 1,25 m. El análisis de la distribución de estos eventos mostró que una frecuencia total de ocurrencia de 949 casos para SXX y 983 para SXXI, con 181 casos extremos (eventos con amplitudes mayores al percentil 95) para el SXX y 223 para SXXI. Por lo tanto, el modelo CAM sugiere que ocurriría un aumento de las ODT extremas en la PCA.

La Figura 1 muestra la diferencia (en cm) del promedio de los casos representativos de cada uno de los tres modos de ODT en la PCA derivados con ambos modelos (i.e., SXXI-SXX). Se observa que en el caso del modo 1 (panel izquierdo) existe una disminución en la amplitud de las ODT en el centro de la PCA y un aumento en el Estuario del Río de la Plata. Para el caso del modo 2 (panel central) se genera una anomalía negativa en el centro de la PCA. Finalmente, se observa una disminución general de la amplitud de la ODT para el modo 3 (panel derecho). Es importante mencionar que la amplitud de los modos depende de la persistencia del viento, el modo 2 es generado por la Ciclogénesis del Litoral, mientras que los modos 1 y 3 son más moderados y generados por ondas de Rossby atmosféricas con vientos asociados paralelos a la costa de la PCA (norte/sur) (Alonso et al., 2024). Por lo tanto se puede concluir que las ondas de Rossby atmosféricas están cambiando la latitud y/o velocidad de fase de manera que las ODT generadas en el centro de la PCA son menos intensas o incluso ODT negativas; además, este cambio produce un incremento en la amplitud de las ODT asociadas al modo 1, lo que explicaría el aumento en la cantidad de casos extremos.

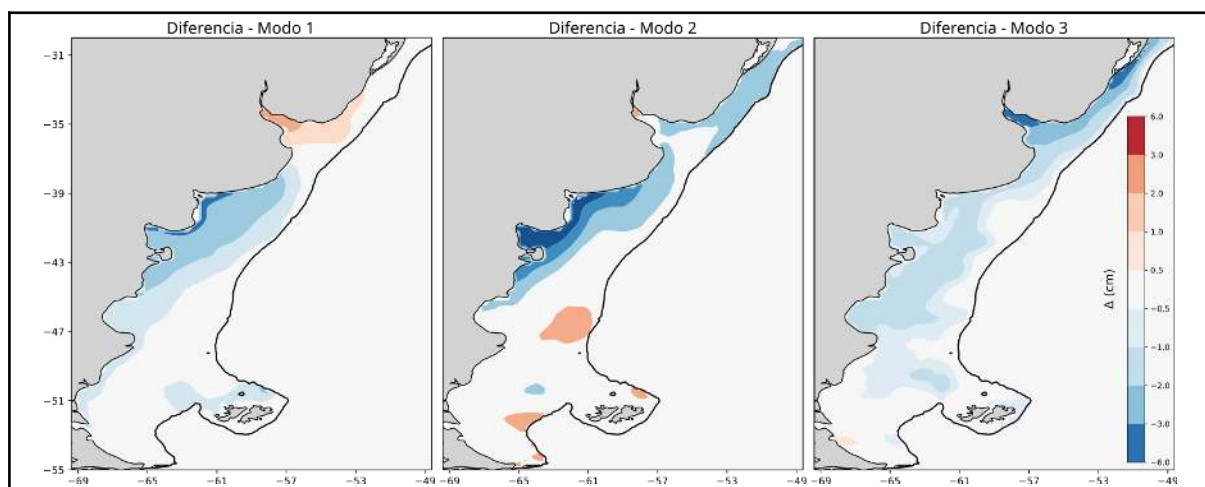


Figura 1. Diferencia (Δ , en cm) del promedio de los casos representativos de cada uno de los tres modos de ODT en la PCA derivados con ambos modelos: $\Delta = \text{SXXI} - \text{SXX}$.

Los resultados obtenidos sugieren la importancia de realizar un mayor número de simulaciones bajo este y otros escenarios de cambio climático para evaluar la robustez de la señal derivada. Se prevé continuar esta investigación en esa dirección.

3) REFERENCIAS

Alonso, G., Simionato, C. G., Dinápoli, M. G., Saurral, R., y Bodnariuk, N., 2024: Positive storm surges in the Río de la Plata Estuary: Forcings, long-term variability, trends and linkage with Southwestern Atlantic Continental Shelf dynamics. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06402-w>

Bacino, G., Alonso, G., Billet, C., Dragani, W., Bedmar, J., y Farenga, M., 2023: Assessing the morphological evolution of a breakwater-protected sandy beach by means of UAV surveys at Mar del Plata, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 127, 104379. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104379>

D'Onofrio, E., y Fiore, M., 1998: Niveles medios que aproximan al geoide en el litoral marítimo argentino. Informe Técnico N° 100/98, Departamento Oceanografía del Servicio de Hidrografía Naval.

Dinápoli, M. G., Simionato, C. G., Alonso, G., Bodnariuk, N., y Saurral, R., 2024: Negative storm surges in the Río de la Plata Estuary: Mechanisms, variability, trends and linkage with the Continental Shelf dynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 305, 108844. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108844>

Dinapoli, M. G., y Simionato, C. G., 2025: On the impact of Southeastern Pacific-generated storm surges on the Southwestern Atlantic Continental Shelf: Interoceanic connections through coastally trapped waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 130, e2024JC021685. <https://doi.org/10.1029/2024JC021685>

EFICIENCIA DE LOS TRANSPORTES TURBULENTOS DE CO₂ Y HUMEDAD EN UNA PASTURA DE LA PAMPA HÚMEDA

Natalia Tonti¹, Lucia Curto^{1,2}, Nahuel Bautista^{1,2}, Antonella Burek¹, Rodrigo Merino^{1,2},
Mauro Covi¹, María I. Gassmann^{1,2}
ntonti@at.fcen.uba.ar

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras clave: capa límite atmosférica, estabilidad atmosférica, flujos turbulentos, pasturas.

1) INTRODUCCIÓN

La Capa Límite Atmosférica (CLA) es la porción de atmósfera más cercana a la superficie que responde a los forzantes de la misma. Es una capa que se caracteriza por su estado turbulento, que en la atmósfera se genera por la interacción entre el aire y la superficie. A diferencia de la percepción general la turbulencia no es totalmente azarosa, sino que puede organizarse en torbellinos o eddies denominados “estructuras coherentes” (CS, por sus siglas en inglés). Estas estructuras logran aportar significativamente, y de forma eficiente, al transporte de cantidad de movimiento, calor y masa a través de movimientos verticales turbulentos (Li y Bou-Zeid, 2011). Las CS presentan distintas topologías de acuerdo a las condiciones de estabilidad atmosférica. En condiciones neutrales prevalecen las CS tipo “hairpin vortices”, con disposición más bien extendida en la horizontal, que transportan en conjunto principalmente cantidad de movimiento y escalares (Curto et al., 2022). En condiciones inestables se desarrollan las “plumas térmicas”, eficientes en el transporte turbulento de calor y otros escalares. En condiciones estables la turbulencia se ve inhibida, disminuyendo con ella, las CS asociadas, por lo que el transporte turbulento se vuelve poco eficiente (Zeitune, 2024).

Los flujos de dióxido de carbono (CO₂) y de humedad específica (q) entre la biósfera y la atmósfera ocurren principalmente a través de mecanismos turbulentos dentro de la CLA. El CO₂ es un gas de efecto invernadero que desempeña un papel significativo en la acumulación de calor dentro de la atmósfera terrestre. El vapor de agua es también un gas de efecto invernadero, y crucial en el ciclo del agua, aportado a través de los flujos de humedad desde la superficie. En la Argentina el sector agrícola-ganadero es responsable de gran parte de las emisiones de CO₂ (Hiraishi et al., 2014). Resulta entonces relevante estudiar el rol de los cultivos como fuente o sumidero de CO₂ y de humedad, especialmente en zonas rurales productivas.

En este trabajo se presenta un análisis de los flujos turbulentos de CO₂ y de humedad transportados por CS sobre un cultivo de alfalfa. Se analizan mediciones micrometeorológicas y se caracterizan las eficiencias de los transportes turbulentos en distintas condiciones de estabilidad para distintos momentos del año.

2) METODOLOGÍA

Se utilizaron datos de flujo turbulento obtenidos con la metodología de las covarianzas turbulentas (Mauder y Foken, 2015), calculados en promedios de media hora. Se analizaron las eficiencias de los transportes turbulentos, obtenidas como: $r_{wx} = \overline{w'x'} / (\sigma_w \sigma_x)$, siendo $\overline{w'x'}$ el

flujo turbulento de una variable x , y σ_w y σ_x los desvíos estándar de las variables velocidad vertical y la variable x . La variable x representa a la temperatura (T), la humedad específica (q) o la concentración de CO_2 (c). Se calcularon las eficiencias de los transportes turbulentos de temperatura ($\overline{w'T'}$), de humedad ($\overline{w'q'}$) y de CO_2 ($\overline{w'c'}$). Los valores negativos de los flujos representan sumideros para la atmósfera, mientras que aquellos con valores positivos representan fuentes. Se seleccionaron los datos de dos meses como casos de estudio. Se consideraron los datos de un mes de verano (noviembre de 2024) y uno de invierno (junio de 2024). También se cuenta con datos de humedad de suelo medidos con frecuencia mensual, correspondientes a los primeros 30 cm de profundidad del suelo.

Los flujos se estudiaron por separado según la estabilidad de la atmósfera, determinada por el parámetro de estabilidad (z/L), donde L es la longitud de Obukhov. La estabilidad se clasificó en condiciones fuertemente inestables ($z/L \leq -0.5$; FI), inestables ($-0.5 < z/L \leq -0.005$; I), neutrales ($-0.005 < z/L \leq 0.005$; N), estables ($0.5 < z/L \leq 0.5$; E) y fuertemente estables ($0.5 < z/L$; FI) (Curto et al., 2022).

3) RESULTADOS

Las condiciones FI solamente se dan en noviembre, asociado a un mes más cálido (de la primavera tardía). Si bien son pocas (se dan solo 6 veces), en junio no se alcanzan dichas condiciones de estabilidad. A su vez, condiciones FE no se registraron, probablemente debido a que no satisfacen los controles de calidad de los datos (Figura 1).

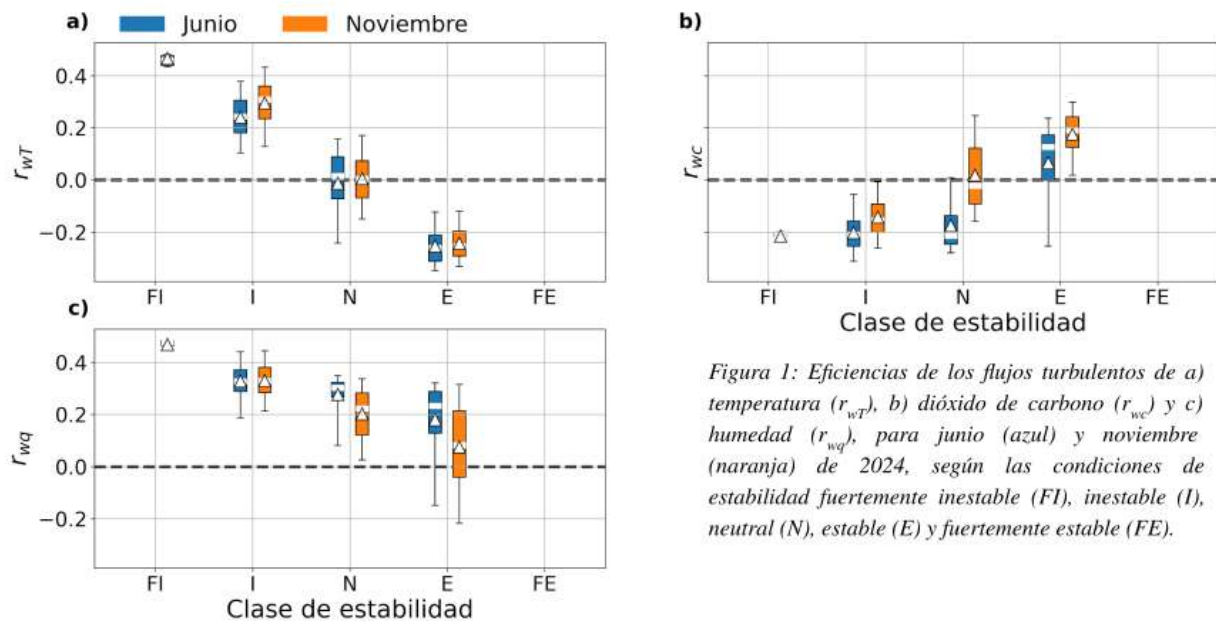


Figura 1: Eficiencias de los flujos turbulentos de a) temperatura (r_{wT}), b) dióxido de carbono (r_{wC}) y c) humedad (r_{wq}), para junio (azul) y noviembre (naranja) de 2024, según las condiciones de estabilidad fuertemente inestable (FI), inestable (I), neutral (N), estable (E) y fuertemente estable (FE).

A medida que aumenta la inestabilidad, aumenta la eficiencia del transporte turbulento de temperatura y CO_2 . En condiciones N los valores del transporte son nulos. En condiciones E invierten el signo, y vuelven a mostrar valores distintos de cero. Los flujos de temperatura son positivos en condiciones FI e I debido a que se corresponden a condiciones mayormente diurnas, con la superficie actuando como fuente de calor. Las condiciones E representan condiciones mayoritariamente nocturnas, con sumidero de flujo de temperatura. Las eficiencias de flujo de temperatura resultan mayores en noviembre en condiciones I y FI, mientras que son mayores en valor absoluto en junio para condiciones E.

La eficiencia de flujo de CO₂ en condiciones diurnas es negativa debido a que la superficie vegetal actúa como sumidero, asociada a la fotosíntesis. De noche la superficie es fuente de CO₂ por la respiración, y la eficiencia positiva. Los comportamientos son contrarios para las eficiencias de flujos de CO₂ respecto de los de temperatura en valor absoluto.

Las eficiencias de transporte de humedad presentan un comportamiento un poco distintos a los otros flujos. Siempre resultan positivos, siendo la superficie una fuente de humedad. Los casos de flujo negativo son escasos, y se dan en condiciones E, especialmente en el mes de invierno (junio). Las eficiencias de transporte resultan más intensas en todas las condiciones de estabilidad en el mes de junio, respecto del mes de noviembre. Durante el invierno el suelo estuvo más húmedo, siendo su contenido de agua de 461 mm, mientras que en noviembre ese valor fue de 268 mm. La mayor disponibilidad de humedad del suelo influyó los flujos turbulentos de humedad observados en la atmósfera, generando una mayor eficiencia de transporte.

4) CONCLUSIONES

La estabilidad atmosférica fue el principal modulador de las diferencias en el comportamiento y tipo de CS de la turbulencia. En condiciones más inestables predominan las “plumas térmicas”, favoreciendo la eficiencia de los transportes turbulentos, en especial en el mes más cálido. En condiciones más neutrales dominan los “hairpin vortices”, reduciendo la eficiencia de los transportes. En condiciones estables la turbulencia se ve inhibida, no se organizan las estructuras coherentes, y los transportes son menos eficientes. A su vez los transportes de las distintas propiedades responden a los forzantes de superficie, con influencia de la superficie vegetada, que genera una fuente de humedad continua, y un sumidero de CO₂ en condiciones diurnas.

REFERENCIAS

Curto, L., Gassmann, M. I., Covi, M., Tonti, N. E., 2022: Study of turbulence behavior above two different crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 322, 109012. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.109012

Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., Troxler, T., 2014: 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland.

Li, D., Bou-Zeid, E., 2011: Coherent structures and the dissimilarity of turbulent transport of momentum and scalars in the unstable atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 140, 2, 243-262. DOI: 10.1007/s10546-011-9613-5

Mauder, M., Foken, T. 2015. Eddy-Covariance Software TK3. In *Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3 (update)* (p. 67). University of Bayreuth. DOI: 10.5281/zenodo.20349. Accedido el 18-05-2025

Zeitune, M. 2024. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera “Transporte de CO₂ por las estructuras coherentes de la turbulencia en un cultivo en la provincia de Buenos Aires”. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, p.57.

ANÁLISIS DE SEQUÍAS AGRÍCOLAS REPENTINAS UTILIZANDO DATOS SATELITALES DE ESA-CCI

Lumila Masaro^{1,2}, Miguel A. Lovino^{1,2}, Gabriela V. Müller^{1,2}

lmasar@unl.edu.ar. Autor/a correspondiente.

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

²Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (CEVARCAM), Fac. de Ing. y Cs. Hídricas (FICH-UNL)

Palabras claves: sequías repentinas, datos satelitales, humedad de suelo

1. INTRODUCCIÓN

La economía del sudeste de Sudamérica (SESA) depende fuertemente de la agricultura de secano, lo que la hace particularmente vulnerable a sequías severas. En Argentina y Brasil, eventos de sequía severa han reducido drásticamente los rendimientos de cultivos, especialmente cuando ocurren durante etapas críticas de crecimiento, ocasionando pérdidas económicas sustanciales.

Las sequías repentinas (de rápida intensificación), conocidas como *flash droughts*, se ven favorecidas por déficits extremos de precipitación, temperaturas elevadas y evapotranspiración anómala (Otkin et al. 2018). Estas sequías de rápido desarrollo han ido aumentando en frecuencia e intensidad como consecuencia del cambio climático, particularmente en zonas de cultivo (Christian et al. 2023). SESA ha sido reconocida como una zona propensa a la ocurrencia de sequías agrícolas repentinas (SARs, Lovino et al. 2024), sin embargo, los estudios dedicados a estos eventos en la región aún son escasos (e.g., Kucheruc et al. 2024; Lovino et al. 2025). Considerando el incipiente conocimiento sobre la dinámica de las SARs, y dada su relevancia en el SESA en la producción agrícola, resulta crucial avanzar en su caracterización y en la comprensión de sus impactos asociados. Así, el objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de productos satelitales, particularmente ESA-CCI-RZSM, para identificar SARs en la región y sus impactos en la vegetación mediante indicadores de base satelitales.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. Región de estudio. La región de interés se encuentra comprendida entre las latitudes 17-40°S y longitudes 37-65°W, abarcando el sur de Brasil, sudeste de Bolivia, el centro-norte de Argentina, Paraguay y Uruguay. El SESA se destaca por su rol clave en la producción mundial de alimentos, principalmente maíz y soja, la cual se ha incrementado significativamente desde 1990 como consecuencia de grandes avances tecnológicos, expansión de tierras de cultivo y mejoras en las prácticas agronómicas.

2.2. Producto ESA-CCI: humedad de suelo. Para la identificación de SARs se utilizaron datos de humedad del suelo derivados de observaciones satelitales de ESA-CCI (European Space Agency - Climate Change Initiative) (ESA-CCI-RZSM v09.1, Pasik et al. 2023). Dicho conjunto de datos representa el contenido volumétrico de agua hasta una profundidad de suelo de 1 metro, con resolución espacial de 0.25x0.25° y temporal diario desde 1979 hasta 2023. Dado que los sensores detectan cambios de emisividad sólo en los primeros centímetros de suelo, se utiliza un filtro exponencial que simula la transferencia de humedad desde la superficie hacia el perfil de suelo, permitiendo reconstruir series temporales en profundidad (Pasik et al. 2023).

2.3. Productos MODIS: LSWI y GPP. Para evaluar el impacto de las SARs en la productividad y el estrés hídrico en la vegetación mediante observaciones satelitales se analizaron anomalías estandarizadas de la Productividad Primaria Bruta (GPP, por sus siglas en inglés) y el Índice de Agua de Superficie Terrestre (LSWI, por sus siglas en inglés), derivados de productos del sensor TERRA del Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) MOD17A2H.006 y MOD09A1.061 respectivamente, con resolución espacial de 500 metros y composición temporal de 8 días. El procesamiento se restringe al período 2001-2023 y se aplican filtros de calidad general y espectral para enmascarar píxeles poco confiables. GPP corresponde a un producto preprocesado y distribuido de forma preprocesada, mientras que LSWI se calcula a partir de bandas de reflectancia en superficie, mediante la expresión:

$$LSWI = \rho_{858} - \rho_{1640} / \rho_{858} + \rho_{1640} \quad (1)$$

donde ρ_{858} y ρ_{1640} es el porcentaje de radiación reflejada en la banda del infrarrojo cercano y en la banda del infrarrojo de onda corta, respectivamente. Las anomalías estandarizadas se obtuvieron a partir del cálculo de la media y la desviación estándar climatológica para cada período de ocho días.

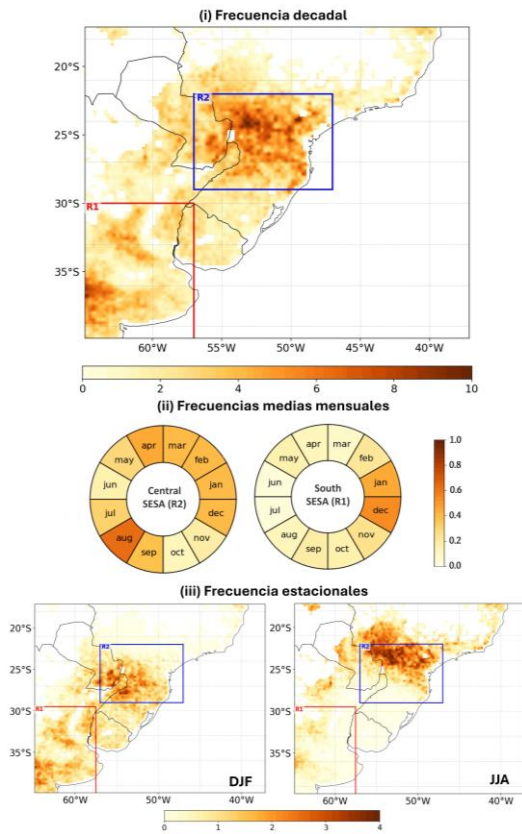


Figura 1: (i) Distribución de frecuencia media decadal [evento/década]; (ii) Frecuencia media mensual decadal de los eventos de SAR en las regiones R1- South SESA y R2- Central SESA; (iii) Frecuencia decadal para las estaciones con mayores frecuencias mensuales.

bos países. La distribución espacial de eventos en la estación de verano abarca ampliamente a ambas regiones, con frecuencias medias de 3 eventos decadales, mientras que la ocurrencia de eventos en durante el invierno se concentra en el norte de R2, alcanzando frecuencias medias de hasta 4 eventos por década.

3.2. Evolución de una SAR en 2005-2006 y sus impactos. Se analiza la evolución de un evento de SAR ocurrido entre noviembre 2005 y mayo 2006 en el centro-este de SESA (Lovino et al. 2025) representando el decaimiento de humedad de suelo mediante anomalías estandarizadas y percentiles de ESA-CCI-RZSM (Filas 1 y 2, Fig. 2). Se observa una marcada caída en estos valores en la región donde se localiza el evento (Fila 1, Fig. 2), sin embargo, el rápido descenso de la humedad de suelo que originó el evento de SAR se ve suavizado a lo largo del tiempo como consecuencia del filtrado exponencial aplicado en ESA-CCI-RZSM, lo que dificulta la detección del evento mediante diferentes metodologías como la de Yuan et al (2023) y la de Lovino et al. (2024).

Las anomalías estandarizadas de indicadores con base satelital (Filas 3 y 4, Fig. 2) muestran un patrón espacial coincidente con las variaciones de humedad de suelo a lo largo del tiempo. LSWI es un índice sensible a los cambios de contenido de humedad foliar, lo que permite detectar estrés hídrico en la vegetación (Christian et al 2022). GPP es un indicativo de la tasa de asimilación de carbono por parte de la planta, lo que lo convierte en una medida directa de la actividad fotosintética de la misma y sus cambios en la productividad (Jing et al.2025). Ambos indicadores muestran el impacto de la sequía, con un estrés hídrico pronunciado en enero de 2006 que impactó la productividad de los cultivos en Uruguay, el centro-este de Argentina, sur de Paraguay y Brasil (Filas 3 y 4, segundo panel). En los meses siguientes se observa la intensificación del evento (marzo y mayo), con mayor déficit hídrico (anomalías negativas intensas de LWSI) y disminución de la productividad (anomalías negativas intensas de GPP) en el límite entre Argentina, Brasil y Uruguay, con marcadas anomalías de RZSM y valores de percentiles que caen por debajo de los 20.

2.4. Metodología para detección de SAR. Las SARs se identificaron aplicando la metodología de Yuan et al. (2023), basada en percentiles de humedad de suelo. Los valores diarios de humedad de suelo se agregan en medias de cinco días (pentadas) y luego se transforma la serie en percentiles utilizando la climatología 1979-2023. Una SAR se identifica cuando la humedad de suelo decae desde valores superiores al percentil 40 hasta por debajo del percentil 20, con una tasa de disminución mayor o igual a 5 percentiles por pentada. El evento finaliza cuando la humedad del suelo se recupera, superando el percentil 20, y su duración total debe ser mayor o igual a 4 pentadas, lo que equivale a 20 días.

3. RESULTADOS

3.1. Características de las SARs detectadas con ESA-CCI-RZSM. La Figura 1 expone los principales resultados obtenidos al aplicar la metodología de percentiles con los datos de ESA-CCI-RZSM, destacándose dos regiones de mayores frecuencias de SRAs: R1 en el sur de SESA y R2 en el centro de SESA, alcanzando la segunda frecuencias de 6 a 10 eventos por década (Fig. 1 a). Para la región sur de SESA, las SRAs son más propensas a ocurrir en los meses de diciembre y enero (Fig. 1b), coincidente con los períodos críticos de soja y maíz para Argentina (Sgroi et al., 2021). En cuanto al centro de SESA, coincidente en su mayoría con el sur de Brasil y Paraguay, se observa una elevada frecuencia de eventos en agosto, mes asociado con la cosecha del segundo cultivo de maíz en Brasil y con la siembra de éste en Paraguay (Lovino et al., 2025). En tanto para los meses de diciembre a abril, aunque menos frecuentes que agosto, se asocian al ciclo completo de plantación, crecimiento y cosecha de maíz y soja en ambos países.

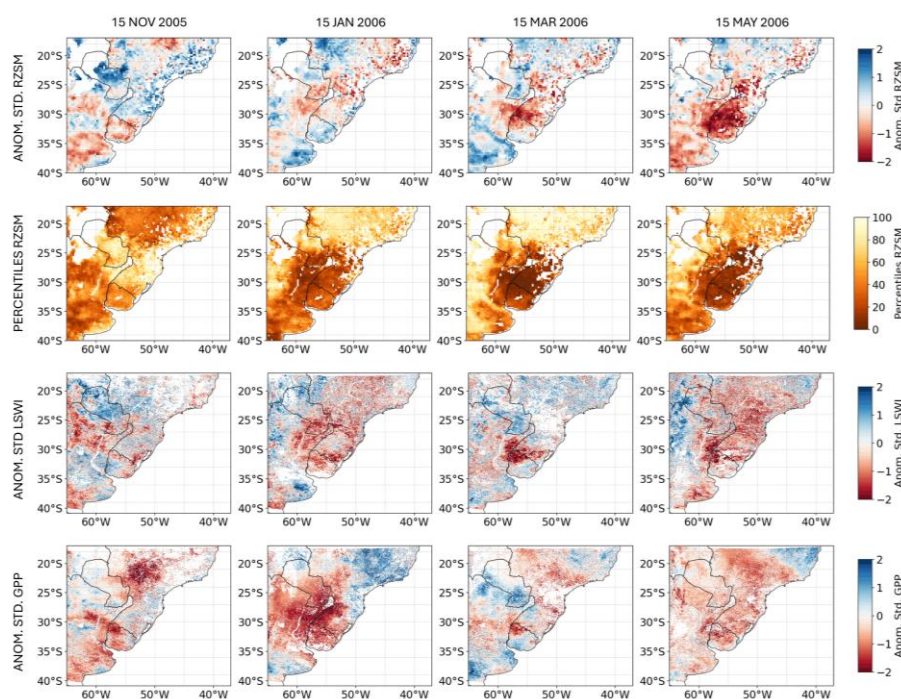


Figura 2: Evolución espaciotemporal de un evento de SAR desarrollado entre noviembre de 2005 y mayo de 2006 sobre el centro-este de SESA. Fila 1: anomalías estandarizadas de humedad del suelo radicular de ESA-CCI-RZSM; Fila 2: percentiles de la misma variable; Fila 3: anomalías estandarizadas del LSWI; y Fila 4: anomalías estandarizadas de GPP. Las fechas indicadas en la parte superior de cada columna corresponden a días representativos contenidos dentro de las ventanas temporales de los productos utilizados: pentadas para RZSM y composiciones de 8 días para los productos satelitales MODIS (LSWI y GPP)

4. CONCLUSIONES

El trabajo explora la utilidad del conjunto de datos de ESA-CCI-RZSMv09.1 para la identificación de SARs. El producto revela resultados de las características de las SARs consistentes con otros métodos (Lovino et al., 2025), aunque con disparidad en las regiones críticas. Estas disparidades ya han sido documentadas en otras regiones del mundo al utilizar diversos conjuntos de datos o definiciones (Mukherjee y Mishra, 2022). El conjunto de datos propone una alternativa muy prometedora para monitoreo de estos eventos en la región, principalmente por su aplicabilidad en la zona de raíces. No obstante, posee ciertas limitantes como la discontinuidad de datos, tanto espacial como temporal, que impide el análisis en diversas regiones o interrumpen la continuidad de las series de humedad de suelo. Además,

que la aplicación de un filtro exponencial para extrapolar la humedad de suelo superficial hacia mayores profundidades tiende a suavizar las variaciones rápidas del contenido de humedad en la zona radicular. Los resultados muestran que el conjunto de datos detectó satisfactoriamente la evolución del evento de SAR 2005-2006 y sus impactos en la vegetación durante el período de persistencia de la sequía, aunque no la caída repentina de la humedad que da origen a la sequía repentina.

REFERENCIAS

- Christian J. I., Basara J. B. et al. 2022:** Flash drought identification from satellite-based land surface water index. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 26 100770
- Christian J. I., Martin E. R. et al. 2023:** Global projections of flash drought show increased risk in a warming climate *Commun. Earth Environ.* 4 165
- Jing, Y., Wang S., et al. 2025:** Gross primary productivity is more sensitive to accelerated flash droughts. *Com. Earth Env.* 6, 34
- Kucheruk L. L., Spennemann P. C., Naumann G. y Rivera J. C., 2024:** Climatología de sequías de rápido desarrollo en la Pampa húmeda Argentina *Meteorológica* 49 025
- Lovino, M. A., Pierrestegui M. J., Masaro L., et al. 2025:** Agricultural flash droughts and their impact on crop yields in southeastern South America. *Environ. Res. Lett.* 20 054058
- Lovino M. A., Pierrestegui M. J., et al. 2024:** The prevalent life cycle of agricultural flash droughts *npj Clim. Atmos. Sci.* 7 73
- Mukherjee S and Mishra A K 2022:** Global flash drought analysis: uncertainties from indicators and datasets *Earth's Future* 10 e2022EF002660
- Otkin J A, Svoboda M., Hunt E. D. et al. 2018:** Flash droughts: a review and assessment of the challenges imposed by rapid onset droughts in the United States *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 99 911–9
- Pasik, A., Gruber A., Preimesberger W. et al. 2023:** Uncertainty estimation for a new exponential-filter-based long-term root-zone soil moisture dataset from Copernicus Climate Change Service (C3S) surface observations, *Geosci. Model Dev.*, 16, 4957–4976
- Sgroi L. C., Lovino M. A., Berbery E. H. y Müller G. V. 2021:** Characteristics of droughts in Argentina's core crop region *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25 2475–90
- Yuan X. et al. 2023:** A global transition to flash droughts under climate change. *Science* 380, 187

Eventos Extremos de Precipitação no Brasil em diferentes fases da Oscilação de Madden e Julian

Simone E T Ferraz, Nathalie T. Boiaski
simonetfe@gmail.com

Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas.
Programa de Pós Graduação em Meteorologia

Palavras chave: Precipitação, Brasil, Oscilação de Madden e Julian.

1) INTRODUÇÃO

O Brasil tem grande parte de sua economia dependente dos recursos naturais (ou seja, agricultura, recursos hídricos, biodiversidade, energias renováveis, áreas costeiras, saúde, megacidades, etc.). Mudanças significativas na precipitação esperada (sejam enchentes, secas ou má distribuição da mesma, sem uma prévia previsão), podem impor ameaça significativa ao desenvolvimento sustentável do país. Eventos extremos de precipitação de boa parte das regiões Sudeste e Centro-Oeste estão diretamente relacionados a Oscilação de Madden e Julian (OMJ). Estes eventos extremos têm grandes impactos sócio – econômicos; enchentes são frequentemente observadas causando grandes transtornos, principalmente em áreas urbanas que não são adequadamente planejadas para absorver grandes quantidades de chuva. Nas regiões rurais, grandes cheias também têm grande impacto na agricultura. Nesse sentido, identificar as diferenças de cada evento extremo, em cada fase da OMJ e quais são os padrões atmosféricos associados, pode auxiliar na representação do comportamento sazonal/intrassazonal da Zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS), e ser utilizados como um estimador da intensidade da precipitação no período chuvoso.

2) DADOS E METODOLOGIA

A Precipitação utilizada será a interpolada em uma grade com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, proposta por Xavier et al., 2015. Datas de ocorrência de eventos ZCAS conforme Rosso et al, 2018. As datas de ZCAS utilizadas (Rosso et al, 2018), servirão para separar os eventos de precipitação relacionadas a ocorrência da ZCAS dos que não são, mas que também apresentam influência da OMJ. Baseado nestas datas, serão verificados em que fase da OMJ ocorre o máximo dia de precipitação. Para determinar a fase da OMJ será utilizado o índice de monitoramento da OMJ definido por Wheeler e Hendon, 2004. Os períodos de ocorrência dos eventos serão preferencialmente entre os meses de outubro a março, que é o período de atuação do Sistema de Monções da América do Sul.

3) RESULTADOS

A distribuição das fases da OMJ durante o verão no período de análise (exceto em datas em que ocorreram ZCAS) se distribuem homogeneamente nas oito fases. Na figura 1 é possível observar, no entanto, que durante as fases 1 e 7 que a porcentagem de eventos ZCAS é maior do que quando não há ZCAS ativa. E nas fases 3, 4 e 5 há mais dias com OMJ ativa do que a porcentagem de eventos ZCAS nestas fases. No entanto, nestas fases a OMJ a convecção tropical se encontra entre 90°E e 150°E , e podemos supor que nesta posição ela gere trens de onda que chegam a América do Sul, gerando precipitação.

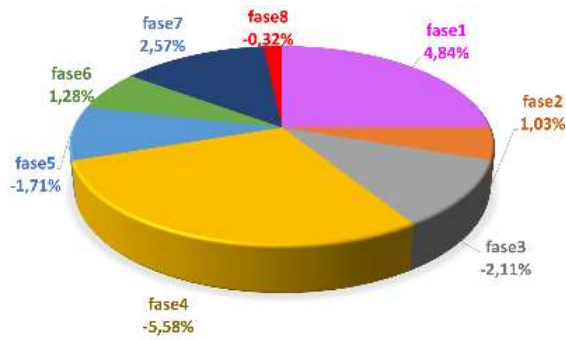


Figura 1: Razão entre a porcentagem de ocorrência de ZCAS em cada fase da OMJ pela porcentagem de distribuição das fases da OMJ durante o verão (1992-2022).

Nas figuras 2 e 3 é possível observar a diferença na distribuição de anomalia de precipitação média quando consideramos apenas as datas com ZCAS (a esquerda) ou os outros dias de verão sem ZCAS (a direita). Nas datas com ZCAS a precipitação tem acumulados semelhantes nas 8 fases da OMJ no sudeste e centro-oeste do país, no entanto, nas fases 1 e 8 a precipitação se estende para o Norte e nordeste (exceto litoral). O que era de se esperar, pois são as fases da OMJ que estão mais ativas sobre a América do Sul (AS).

Nas fases 4, 5 e 6, na qual a porcentagem de dias com ZCAS é menor do que a de dias sem ZCAS é possível observar claramente o sinal do modo PSA (Mo and Paegle, 2001), com mais precipitação na região da ZCAS e anomalias negativas no resto do país. Quando a ZCAS não está ativa, nas fases 1 e 8, há anomalias fracas de precipitação sem uma região preferencial. Na fase 3 o sinal do padrão PSA é observado, mas com falta anomalias negativas de precipitação no sudeste e centro-oeste do Brasil. Na fase 4 ainda é observado chuva no Sul e extremos norte do país. Nas fases 5 e 6, fraca anomalia positiva é observada no Sul e na fase 7 retorna a chuva no país.

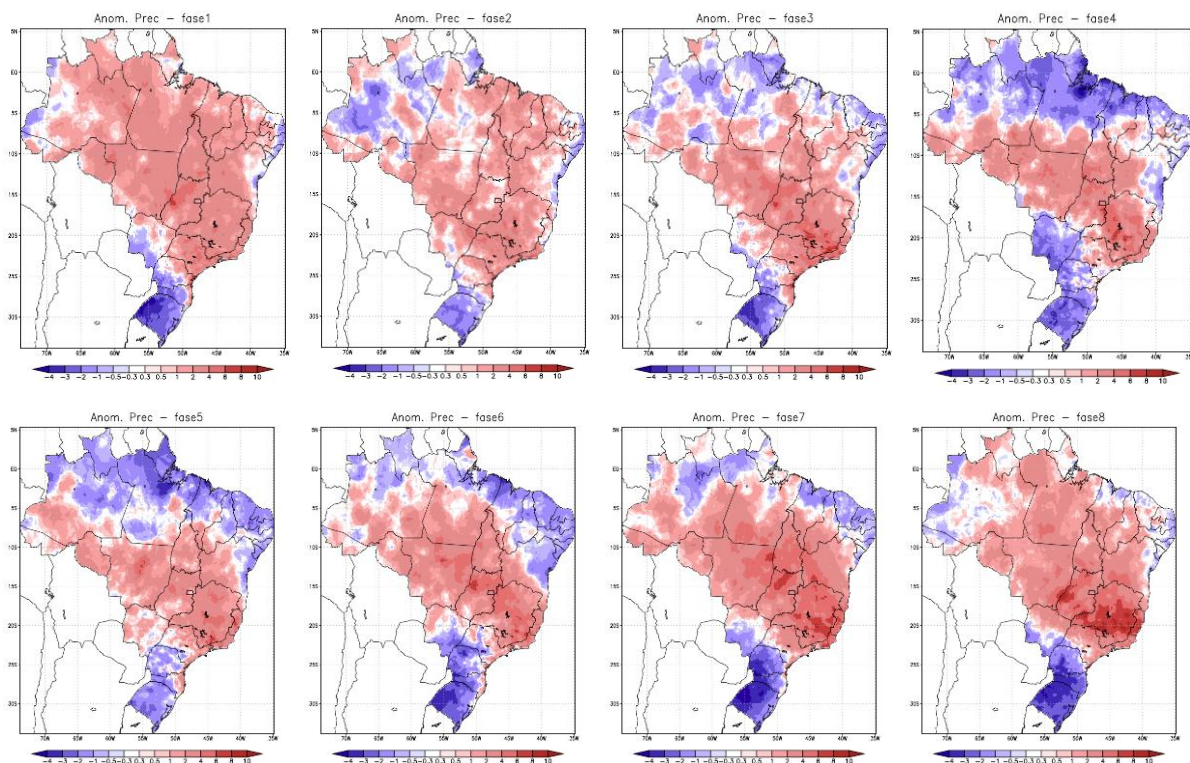


Figura 2: Anomalias da Precipitação média em eventos ZCAS que ocorreram em cada uma das 8 fases e painel da esquerda.

Tanto na fase 1 quanto na 2 a anomalia de função corrente, geopotencial, vetor vento e vento zonal não apresenta um padrão de onda bem definido em altos níveis principalmente na

fase 2. Já nas fases 4 e 5, onde o padrão PSA fica bem nítido nas anomalias de precipitação, o mesmo ocorre com as variáveis atmosféricas. A redução na frequência de episódios de ZCAS sobre a região Sudeste é associada com a migração da Alta subtropical do Atlântico Sul para oeste, que pode levar a condições anormalmente quentes e secas nessas regiões Reis (2022). Nas fases 6 e 8, um trem de ondas se configura, mas em latitudes mais baixas que no caso do PSA (figuras não mostradas).

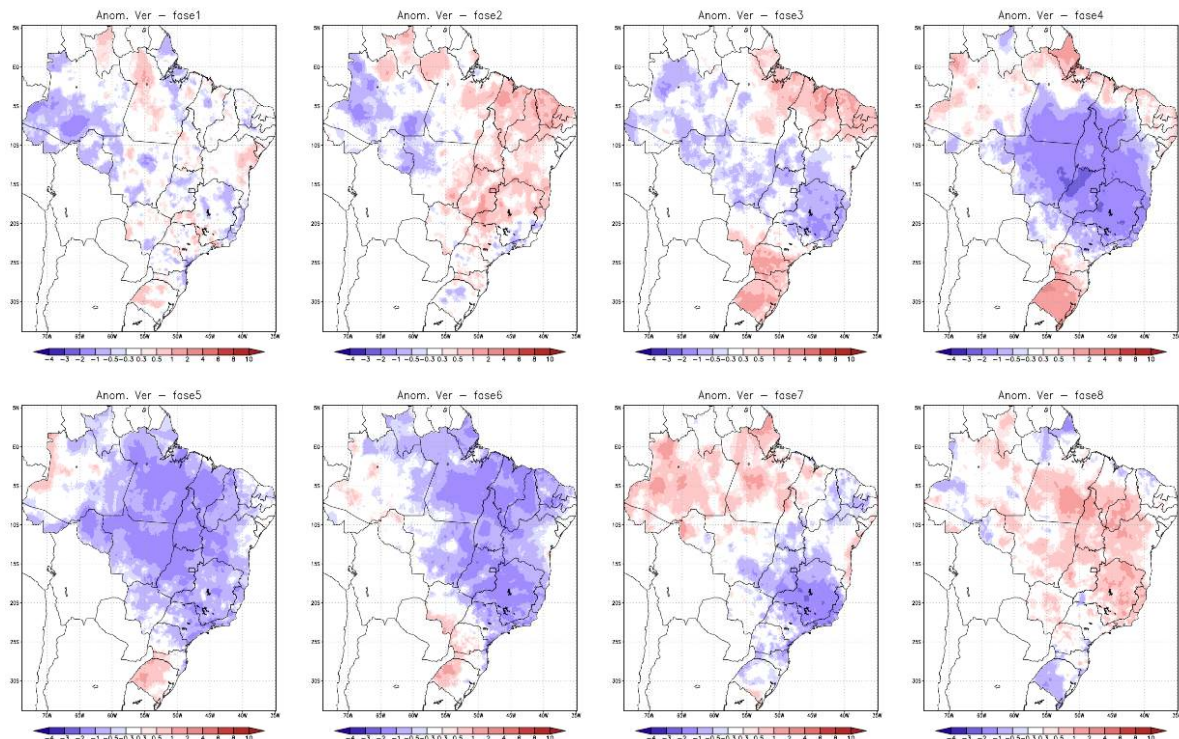


Figura 3: Anomalia de Precipitação Média em cada uma das 8 fases (excluindo as datas em que houveram ZCAS).

Conclusões

Nas fases 4 e 5, a precipitação apresenta a configuração de gangorra, típica do PSA e as variáveis atmosféricas também representam este padrão, com os centros de PSA sobre o continente nas posições típicas. Nas fases 1 e 8 a precipitação é mais intensa não só na região da ZCAS, mas também em boa parte do Norte do Brasil e as variáveis atmosféricas mostram um padrão de ondas mais ao sul do que no PSA. Estes resultados sugerem que nas fases que a OMJ não é propícia a precipitação na região da ZCAS, é o padrão PSA com uma variabilidade mais rápida que a 60-90 possa influenciar esta precipitação.

Referências

- Xavier, AC; King, CW; Scanlon, BR Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). International Journal of Climatology, v. 36, p. 2644–2659, 2015.
- Rosso, FV; Boiaski, NT; Ferraz, SET; Robles, TC. Influence of the Antarctic Oscillation on the South Atlantic Convergence Zone. Atmosphere, v9, p431, 2018.
- Wheeler, MC e Hendon, HH An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index: Development of an Index for Monitoring and Prediction, Monthly Weather Review, v132-8, p1917-1932, 2004.
- Mo, KC; Paegle, JN The Pacific South American modes and their downstream effects. International Journal of Climatology, v. 21, n. 10, p. 1211–1229, 2001.

CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO DE EVENTOS COMPUESTOS SECOS Y CÁLIDOS EN LOS ANDES DEL SUR DEL PERÚ (1981–2018)

Shearmely Florez¹, Adrian Huerta², Blancas, A.N.I.¹
shearmely9512@gmail.com.

¹ Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú

² University of Bern, Switzerland

Palabras clave: ENSO, DHMI (Índice de Magnitud Seco-Caliente), Eventos Extremos.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el análisis de eventos climáticos extremos simultáneos ha adquirido creciente relevancia en la investigación meteorológica, especialmente en el contexto de un clima global cambiante. Entre ellos, los eventos compuestos cálidos y secos (Compound Dry and Hot Events, CDHE) destacan por su capacidad de amplificar impactos cuando ocurren de manera conjunta, afectando la seguridad hídrica, la agricultura y los ecosistemas vulnerables (Feng et al., 2020).

En regiones andinas del sur del Perú, donde la precipitación presenta una alta estacionalidad concentrada en el verano austral, estos eventos pueden tener implicancias críticas sobre las dinámicas socioambientales (Espinoza et al., 2013). El presente estudio busca caracterizar los CDHE ocurridos durante la estación lluviosa (enero–marzo) en el periodo 1981–2018, explorando su frecuencia, intensidad y distribución espacial, así como su posible asociación con fases del fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO). Esta aproximación pretende aportar evidencia técnica robusta que contribuya al fortalecimiento de los sistemas de vigilancia y alerta frente a extremos compuestos en escenarios de creciente variabilidad climática (Garreaud et al., 2009).

2. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló en el sur del Perú, abarcando zonas representativas de las regiones de Cusco, Puno, Arequipa, Moquegua y Tacna. La región se caracteriza por una elevada heterogeneidad espacial y una alta sensibilidad a forzantes climáticos interanuales (Imfeld et al., 2019). Para facilitar el análisis espacial, el área de estudio fue segmentada en cuatro sectores geográficos.

Se utilizaron registros diarios de temperatura máxima (Tx) y precipitación (PP) provenientes de 12 estaciones meteorológicas convencionales del SENAMHI con al menos 30 años de información continua y control de calidad. Estos datos fueron complementados con productos de alta resolución espacial: PISCO v2.1 (precipitación) y PISCOt v1.1 (temperatura), los cuales permitieron caracterizar espacialmente los eventos en zonas con

cobertura instrumental limitada (Bevacqua et al., 2021).

La identificación de eventos compuestos cálidos y secos (CDHE) se realizó mediante el enfoque de percentiles: se consideraron como eventos aquellos días del trimestre enero–febrero–marzo en los que la temperatura máxima superó el percentil 90 (T_{90}) y la precipitación fue inferior al percentil 20 (P_{20}), ambos calculados a partir del período base 1981–2010 (Feng et al., 2020). Los eventos se agruparon por estación y sector geográfico para analizar su comportamiento espacial y temporal.

Se calcularon indicadores de frecuencia (eventos por temporada), duración (días consecutivos), severidad (según clasificación de Feng et al., 2020) y magnitud (índice DHMI). Las tendencias temporales se analizaron mediante el test de Mann–Kendall, y se empleó el Oceanic Niño Index (ONI) para clasificar los años en función de la fase ENSO. Esta clasificación permitió evaluar posibles asociaciones entre el patrón oceánico–atmosférico y la ocurrencia de CDHE en cada sector (Sulca et al., 2018).

3. RESULTADOS

El análisis de datos diarios de temperatura máxima ($T_{\text{máx}} \geq T_{90}$) y precipitación ($P_d \leq P_{20}$), calculados sobre 1981–2010 y procedentes de 12 estaciones SENAMHI y productos PISCO, revela que entre 1981–2018 todos los sectores climáticos (Noroeste, Centro–Oeste, Centro y Este) muestran incrementos claros en frecuencia y duración de los CDHE durante enero–marzo.

En el Este, la frecuencia media creció de 2,8 a 5,3 eventos/temporada (pendiente $+0,15$ eventos/año, $p < 0,05$) y la duración pasó de 2,1 a 3,4 días; los sectores Centro (1,9→3,2 eventos; 1,8→2,9 días), Centro–Oeste (1,6→2,7 eventos; 1,6→2,5 días) y Noroeste (1,2→2,0 eventos; 1,4→2,2 días) presentan tendencias similares, aunque menos marcadas. La clasificación de severidad (Feng et al., 2020) muestra que los días “alta” (C4) y “extrema” (C5) son cada vez más frecuentes (ej. en el Este, C4 de 30 %→45 %), y el índice DHMI anual se eleva en todos los sectores (ej. Este: 22→48 u.), indicando eventos más intensos.

Durante fases de La Niña ($\text{ONI} \leq -0,5$ °C), frecuencia y magnitud de CDHE aumentan en Este y Centro; en El Niño ($\text{ONI} \geq +0,5$ °C) disminuye la frecuencia, pero los días que ocurren exhiben anomalías térmicas más pronunciadas. Espacialmente, los CDHE más graves se concentran entre 3 800–4 200 m s.n.m. en el Este, con picos de severidad en Centro–Oeste durante La Niña, lo que evidencia heterogeneidad altitudinal y regional de estos extremos.

4. CONCLUSIONES

- Aumento multisectorial de CDHE: Desde 1981, todos los sectores climáticos de los Andes del Sur del Perú experimentan un incremento significativo en la frecuencia (+0,10–0,15 eventos/año) y duración (+0,02 días/año) de CDHE, confirmando que la región enfrenta una intensificación del déficit hídrico y el exceso térmico simultáneos.
- Mayor severidad y magnitud acumulada: El crecimiento en el porcentaje de días clasificados como “alta” y “extrema” y la elevación del DHMI anual (de 22→48 u. en el Este; 15→35 en el Centro; 12→28 en Centro–Oeste; 9→20 en el Noroeste) indican que los CDHE no solo son más frecuentes, sino significativamente más intensos. Esta combinación agrava el déficit hídrico al reducir la humedad del suelo y amplificar las anomalías térmicas diarias.
- Influencia moduladora de ENSO: La Niña ($ONI \leq -0,5$ °C) refuerza tanto frecuencia como magnitud de CDHE en sectores Este y Centro, mientras que El Niño ($ONI \geq +0,5$ °C) tiende a reducir la cantidad de eventos, pero eleva la severidad térmica en los días que sí ocurren. La correlación negativa entre ONI y frecuencia de CDHE ($r = -0,4$) resalta la importancia de las teleconexiones para la previsión estacional de riesgos compuestos.
- Heterogeneidad espacial y altitudinal: El sector Este se posiciona como el más vulnerable, con la mayor densidad de CDHE y los valores más altos de DHMI concentrados entre 3 800–4 200 m s.n.m. Centro–Oeste y Noroeste, aunque presentan menor frecuencia absoluta, muestran picos de severidad en fases de La Niña.

REFERENCIAS

- Espinoza, J.C., Justin, P., Vuille, M., Cáceres, B., Curless, B., 2013. The precipitation regimes in the high Andes of Peru and Bolivia: regional patterns, variability, and trends. *Climate Dynamics*, 41, 1719–1743.
- Feng, S., Hao, Z., Zhang, X., et al., 2020. Compound dry and hot events: characteristics, mechanisms and impacts. *Journal of Climate*, 33, 12345–12360.
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Clement, A.C., 2009. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 194, 5–22.
- Imfeld, C., Espinoza, J.C., Justin, P., et al., 2019. Trends in precipitation and temperature in the Andean highlands of Peru, 1964–2015. *International Journal of Climatology*, 39, 4217–4230.

EVOLUCIÓN Y DISPONIBILIDAD DE HORAS-FRÍO EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES

Lara Raffetti Ballerini^{1,2}, Natalia B. Rodeiro^{1,2}, Luca G. Focaia Bauhoffer^{1,2}, Adrián H. Irurzun²

lara.raffetti@gmail.com

¹Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN-UBA)

²Jardín Botánico Carlos Thays (JBCT)

Palabras clave: Horas frío, Índice de Disminución Anual, Calentamiento urbano.

1) INTRODUCCIÓN

El requerimiento de frío, también conocido como acumulación de frío, es un factor decisivo en el ciclo vegetativo de las especies frutales caducifolias. Durante ese enfriamiento ocurre la dormición, que se caracteriza por la supresión temporal del crecimiento visible de cualquier estructura de una planta que contenga meristemo (Lang, 1996). La fase de brotación o inicio del ciclo reproductivo durante la primavera de las especies arbóreas que componen el arbolado urbano de la Ciudad de Buenos Aires (CABA) y la colección del Jardín Botánico Carlos Thays es afectada por las características climáticas del invierno precedente.

Su valoración cuantitativa se generaliza a partir del trabajo realizado por Nightingale y Blake (1934), quienes determinaron el umbral de 7°C como la temperatura mínima de crecimiento para especies caducifolias a través del cómputo de las horas frío (HF).

El objetivo del presente trabajo fue calcular las HF en las estaciones Observatorio Central Buenos Aires (OCBA) y Aeroparque (AEP) durante el período 1999-2024 con el fin de caracterizar la evolución en el clima invernal urbano. En un contexto de cambio climático, también se buscó tener en cuenta el efecto de la isla urbana de calor en el crecimiento de las especies arbóreas de la ciudad. A fin de comparar con trabajos precedentes, se analizó también el Índice de Disminución Anual (IDA) definido por Murphy y otros (1999).

2) METODOLOGÍA

Se calculó la cantidad de HF en las estaciones meteorológicas OCBA y AEP para el período 1999-2024 a partir de datos horarios provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), teniendo en cuenta los casos en los que la temperatura del aire era menor a 7°C.

Se determinó las HF anuales y mensuales y a continuación, con el fin de analizar el efecto del calentamiento urbano sobre la cantidad de HF y facilitar la comparación entre estaciones, se calculó el IDA mensual según la siguiente ecuación:

$$IDA (\%) = \left(\frac{T_r}{\bar{x}} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde T_r representa la tendencia de la recta de ajuste de las series HF mensuales y $\bar{x}$ el promedio de los datos de HF para cada mes. La tendencia de la recta de ajuste de las series se calculó por medio de la regresión lineal por cuadrados mínimos.

Para la realización de estos cálculos se utilizó la información generada por la Calculadora de Índices Climáticos de la Base Cano del Jardín Botánico Carlos Thays de la Ciudad de Buenos Aires.

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cantidad anual de HF acumuladas para el período 1999-2024 en OCBA y AEP se muestran en la Figura 1. En este período se visualiza una variabilidad con dos máximos notables en los años 2000 y 2007 en ambas estaciones, y otro máximo local más pronunciado en OCBA respecto de AEP en 2002. Entre 2009 y 2013, las variables se mantienen aproximadamente constantes, disminuyendo abruptamente a partir del 2014. En ese sentido, Irurzun (2022) destaca esa clara disminución de las HF a lo largo de la última década que se aprecia en la Figura. Sin embargo, al extender el estudio al presente se observa un fuerte aumento de las variables en el año 2024.

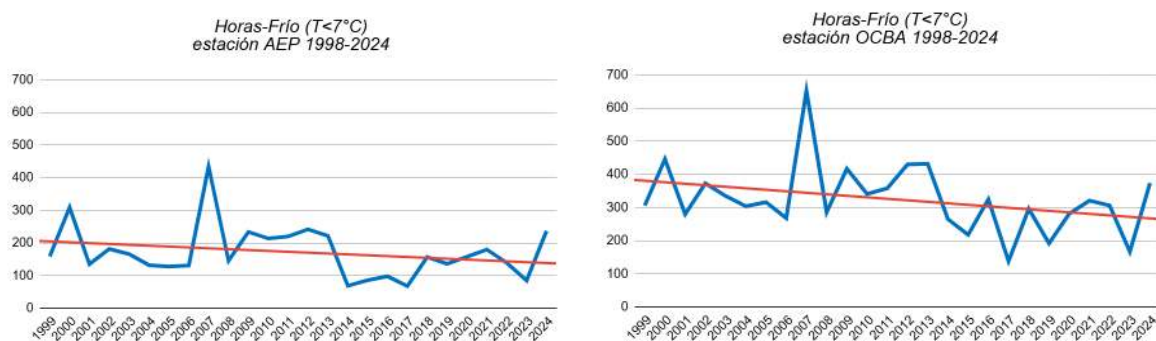


Figura N° 1: Horas-frío (HF) y su tendencia anual para las estaciones Aeroparque Aero (AEP) (izquierda) y Observatorio Central Buenos Aires (OCBA) (derecha) – Período 1999-2024.

Respecto de valores históricos de HF calculados por Murphy y otros (1999) para el período 1911-1998, se observa una significativa disminución anual de la HF que alcanza a un 46% en la estación OCBA (562 versus 303 HF actuales) y un 34% en la estación AEP (233 versus 154 HF actuales).

Además, se calcularon las tendencias mensuales y se encontró que para ambas estaciones los meses de abril, mayo, y julio a octubre presentan tendencias negativas en la serie de las HF desde 1999 a la actualidad. Dicha señal indica que persiste una gradual disminución de las HF anuales y mensuales, ya identificada por Murphy (Murphy y otros, 1999) para períodos anteriores (1911-1998). El mes de junio sin embargo presenta una leve tendencia positiva que no alcanza a compensar la disminución anual de las HF.

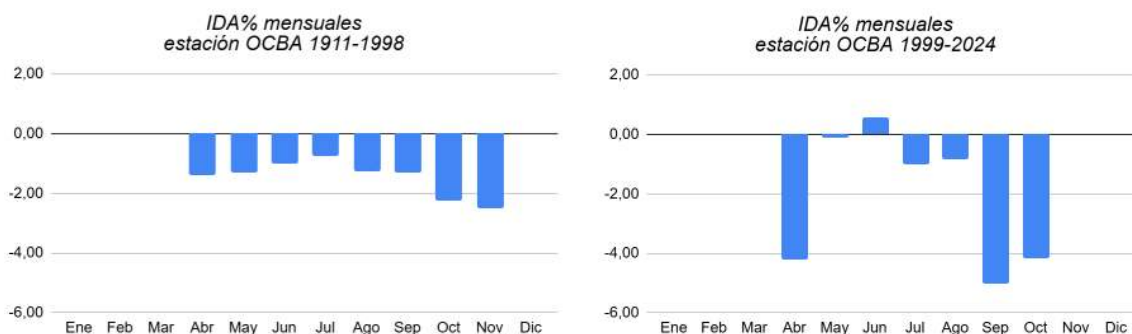


Figura N° 2: IDA mensuales para la estación Observatorio Central Buenos Aires (OCBA) para el período 1911 - 1998 (izquierda) - Extraída de Murphy y otros (1999) - y el período 1999-2024 (derecha).

A fin de comparar con el trabajo precedente, se analiza el IDA mensual, únicamente para la estación de OCBA, en el período estudiado por Murphy y otros (1999) y el período actual (Figura 2). Se destaca que en este último, a diferencia del período anterior, el mes de

noviembre no ha sido incluido debido a la falta de ocurrencias de HF significativas.

Se observa que actualmente se alcanzan valores de disminuciones anuales 50% mayores respecto al período de 1911-1998 para los meses de abril, septiembre y octubre. Por otro lado, se advierte una positividad para el mes de junio debida al aporte de la disponibilidad de horas frío registradas para dicho mes desde el año 2007 en adelante.

Para ambos periodos, los meses del otoño y, especialmente, los de la primavera, son los más afectados por el calentamiento de la ciudad, traducido en una mayor reducción porcentual de HF por año. Sin embargo, es importante notar que desde 1999 a la actualidad, no solo hay una mayor disminución de HF por año, si no que además se comprime su ocurrencia anual hacia el invierno dado que ya no se registran HF en noviembre y la disminución anual de HF durante los meses de abril, septiembre y octubre es significativa y relevante respecto del período 1911-1998.

4) CONCLUSIONES

A partir de los resultados y los análisis realizados, para el período estudiado se destaca una disminución significativa de las HF en las estaciones de OCBA y AEP.

Las disponibilidades de frío se reducen de manera importante durante los meses correspondientes a las estaciones de otoño y primavera por el efecto del aumento de las temperaturas con respecto al invierno. En ese sentido, al analizar lo que sucede para la estación OCBA desde 1999 a la actualidad, se evidencia un aumento en la disminución de HF por año y una concentración de su ocurrencia en invierno, a diferencia del período 1911–1998 donde otoño y primavera presentaban mayores ocurrencias de HF .

La caracterización y monitoreo continuo de variables agroclimáticas resultan fundamentales tanto para la planificación de espacios verdes como para la implementación de estrategias de mitigación y adaptación frente al cambio climático, asegurando así la funcionalidad y supervivencia de las especies vegetales en entornos urbanos.

AGRADECIMIENTOS

Se destaca el apoyo de la Asociación Amigos del Jardín Botánico de Buenos Aires para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Irurzun A. H., 2022: Variación y disponibilidad de horas-frío y grados-día de enfriamiento invernal en la Ciudad de Buenos Aires. XIV Congreso Argentino de Meteorología (CONGREMET XIV). Buenos Aires, Argentina.

Lang, G. A., 1996: Plant Dormancy: Physiology, Biochemistry and Molecular Biology. CAB International. Wallingford. Oxon, Reino Unido, 386.

Murphy G. M., Herrera, J. A. y Hurtado, R., 1999: Variación temporal y espacial de la disponibilidad de enfriamiento invernal en la ciudad de Buenos Aires y en el conurbano bonaerense. Revista de la Facultad de Agronomía de la U.B.A., 3, 219-227.

Nightingale, G. T. y Blake, M. A., 1934: Effect of temperature on the growth and metabolism of Elberta peach trees with notes on the growth responses of other varieties. New Jersey Agricultural Experiment Station Bulletin, 567, 19-20.

Olas de Calor Marinas: patrones en la Plataforma Continental Argentina con énfasis en la región norte

Moira Luz Clara^{1,2}, Bárbara Prario³, Reinaldo A. Maenza¹, Santiago Basaños^{1,2}
mluzclara@inidep.edu.ar. Autor/a correspondiente.

¹Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP)

²Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Servicio de Hidrografía Naval (SHN), Ministerio de Defensa

Palabras clave: Temperatura Superficial del Mar, MHW, Variabilidad.

1) INTRODUCCIÓN

Las olas de calor marinas (MHWs, por sus siglas en inglés) se definen como eventos discretos en los que la temperatura superficial del mar excede el percentil 90 de la climatología local durante un período de 5 días consecutivos o más (Hobday y otros, 2016). Su creciente frecuencia e intensidad las convierten en un foco de atención prioritario en la investigación oceanográfica. A escala global, las MHWs representan anomalías térmicas positivas significativas con la capacidad de generar profundos impactos en los ecosistemas marinos. Estos cambios ambientales súbitos imponen una fuerte presión adaptativa a las especies o las obligan a modificar su distribución. En este contexto, diversas investigaciones han reportado un incremento sostenido en la duración, intensidad y frecuencia de las MHWs a nivel planetario (Oliver y otros, 2018; Frölicher y Laufkötter, 2018). Aunque las MHWs suelen vincularse con altas temperaturas del aire y afectan principalmente la capa superficial del océano (Sen Gupta y otros, 2020), investigaciones recientes han mostrado que también pueden formarse MHWs en niveles subsuperficiales, incluso sin que se observen señales claras en la superficie (Sun y otros, 2023). La precisa cuantificación de las MHWs es crucial para comprender sus efectos; no obstante, a nivel local y regional son pocos los trabajos realizados al momento. Manta y otros (2018) encontraron una relación entre las MHWs intensas con las condiciones atmosféricas locales (alta temperatura del aire y viento de baja intensidad) ejemplificando con un evento particular ocurrido en 2017 frente a la costa uruguaya. Artana y otros (2024) caracterizaron las MHWs en la región del Atlántico Sudoccidental hasta los 45° S, encontrando relación, mediante un análisis estadístico de cluster, con el fenómeno del ENSO en nuestra región de estudio.

2) DATOS Y MÉTODOS

Para caracterizar las MHWs en este estudio, se consideraron como métricas principales la duración promedio, la intensidad máxima alcanzada y el número total de eventos registrados. Esta investigación se centró en la región de la Plataforma Continental del Océano Atlántico Sudoccidental (PCASO) abarcando el período de 1982 a 2024. Se utilizaron datos diarios de temperatura superficial del mar (TSM) provenientes del reanálisis NOAA Reynolds (OISST, Reynolds y otros, 2007). Las MHWs fueron identificadas en toda el área de estudio y los datos OISST se validaron empleando dos series temporales de temperatura *in situ*: una de la estación EOC (38,03° S; 57,52° O) y otra de la estación EPEA (38,47° S; 57,68° O).

Posteriormente, se analizaron las tendencias de estas métricas en la región norte del PCASO, región denominada Plataforma Continental Argentina Norte (PCAN).

2) RESULTADOS

La Figura 1 presenta las métricas de las MHWs en la región de estudio durante el período 1982-2024. En la Figura 1a se observa el total de eventos; la región de la PCASO promedió entre 80 y 90 eventos, registrándose más de 100 eventos en la zona interna del Río de la Plata (RdP), el frente de la Plataforma Media (FPM), el área de confluencia Brasil-Malvinas (B-M) (especialmente al norte de los 42° S), y el Banco Burdwood cerca de los 53° S.

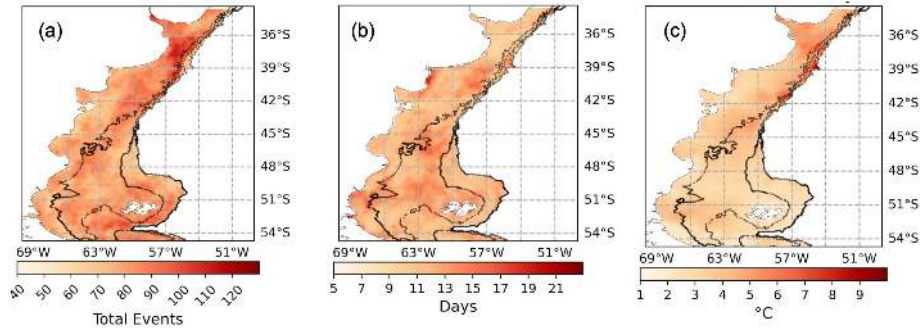


Figura 1: a) Cantidad Total de eventos, b) Duración Media y c) Intensidad Máxima de MHWs.

La Figura 1b describe la duración promedio de estas MHWs. Los eventos más prolongados (~20 días) ocurrieron en la zona de El Rincón, al sur de 39° S. Se observaron duraciones prolongadas a lo largo del FPM entre 40-41° S; en la plataforma entre 44 y 47° S, y a lo largo del paralelo de 50° S. El resto de la PCASO presenta eventos inferiores a 11 días. Es importante destacar que las áreas con el mayor número de eventos (RdP y la región ~53° S) no coinciden necesariamente con las que exhiben la mayor duración. El patrón espacial de la intensidad máxima promedio de MHWs (Figura 1c) proporciona más detalles. El RdP y el área de B-M (a lo largo de la isobata de 100 m, entre 37-42° S) muestran las MHWs más intensas, con máximos entre 7 °C y 10 °C por encima del promedio climatológico. En la zona sur, los valores máximos se acercan a los 3 °C.

Para analizar la evolución temporal de las MHWs en la región de la plataforma norte, se calcularon sus tendencias. Se observó un patrón positivo en la región de la PCAN tanto en la frecuencia media anual, la duración y la intensidad máxima de los eventos MHWs. La Figura 2 muestra en su panel superior la cantidad anual de eventos de MHW, mostrando gran variabilidad interanual, particularmente al inicio de la serie y a partir de 2012. La mayor cantidad de MHWs se observó en 2015 y 2017, alcanzando un promedio de ~7 eventos por año. En cuanto a la duración media (panel central), los valores máximos que superaron los 12 días se registraron en los años 1982, 1987 y 1998, así

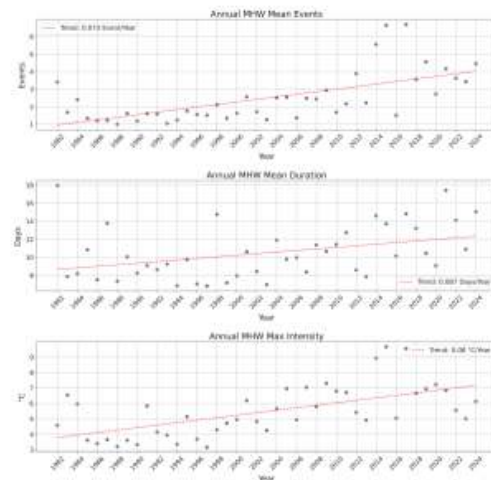


Figura 2: (superior) Cantidad anual de eventos, (central) Duración Media Anual, (inferior) Intensidad Media de MHWs.

como, en general, a partir de 2011, con las duraciones medias más prolongadas en 1982 y 2021 (18 y 17 días, respectivamente). La intensidad máxima anual (panel inferior) mostró una tendencia creciente a lo largo del período de estudio, con un valor de 0,8 °C por año. Las mayores intensidades se registraron en 2014, 2015 y 2017 (9 °C, 10 °C y 10 °C, valores medios respectivamente).

3) CONCLUSIONES

Este estudio presenta una primera descripción de las tendencias de las MHWs en la PCASO, indicando tendencias significativamente positivas en el sector norte de la plataforma, lo que subraya la necesidad de continuar y expandir este tipo de análisis en la región. Esto permitiría una mejor detección de cambios en los patrones y una asociación más precisa con sus posibles forzantes climáticos y oceanográficos.

REFERENCIAS

- Artana C., Rodriguez R. R., Fevrier J., y Coll M., 2024:** Characteristics and drivers of marine heatwaves in the western South Atlantic. *Commun Earth Environ* 5, 555. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01726-8>
- Frölicher TL. y Laufkötter C. 2018:** Emerging risks from marine heat waves. *Nature Communications*, 9 (1), 650, doi:10.1038/s41467-018-03163-6.
- Hobday AJ, Alexander LV, Perkins SE, Smale DA, Straub SC, Oliver EC, y otros, 2016:** A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227-238.
- Manta, G., de Mello, S., Trinchin, R., Badagian, J., y Barreiro, M. 2018:** The 2017 record marine heatwave in the Southwestern Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, 45, 12,449–12,456. <https://doi.org/10.1029/2018GL081070>
- Oliver, E. C., Donat, M. G., Burrows, M. T., Moore, P. J., Smale, D. A., Alexander, L. V., y otros. 2018:** Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nature Communications*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9>
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, y M. G. Schlax, 2007:** Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*, 20, 5473–5496, doi:10.1175/JCLI-D-14-00293.1
- Sen Gupta, A., Thomsen, M., Benthuisen, J. A., Hobday, A. J., Oliver, E., Alexander, L. V., y Smale, D. A. 2020:** Drivers and impacts of the most extreme marine heatwave events. *Scientific reports*, 10(1), 19359.
- Sun, D., Jing, Z., Li, F., y Wu, L. 2023:** Characterizing global marine heatwaves under a spatio-temporal framework. *Progress in Oceanography*, 211, 102947.

PATRONES DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA EN SUDAMÉRICA SUBTROPICAL: CICLO ANUAL, TRANSICIONES Y ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN ASOCIADAS

Franco D. Medina^{1,2}, Matías E. Olmo³, Maria L. Bettolli^{4,5}
fdmedina@herrera.unt.edu.ar. Autor/a correspondiente.

¹Dpto. de Física, FACET-Universidad Nacional de Tucumán, Argentina

²INFINOA (CONICET-UNT), Tucumán, Argentina

³Barcelona Supercomputing Center, Barcelona, España

⁴CONICET, Argentina

⁵Dpto. de Cs. de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN-Universidad de Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: tipos de circulación, lluvia, k-means.

1) INTRODUCCIÓN

La variabilidad espacial y temporal de la precipitación en Sudamérica Subtropical (SSA), entre los 10 y 40°S (Figura 1a), ha sido ampliamente estudiada. Sin embargo, su caracterización desde los patrones de circulación sinóptica (CPs) no ha sido abordada en detalle para esta región. Por ello, identificar los CPs dominantes es clave para comprender los cambios en la precipitación en distintas escalas temporales. Existen trabajos que analizan los CPs en regiones al norte (Espinoza et al., 2021) y al sur (Olmo y Bettolli, 2021) de SSA, pero no hay estudios centrados específicamente en esta área. Por otro lado, los estudios previos han identificado los CPs mediante clasificaciones aplicadas por separado en cada estación del año, con el objetivo de capturar características estacionales específicas de la circulación. Sin embargo, este enfoque puede dificultar la comparación de CPs entre estaciones. En este contexto, en este trabajo se presenta un algoritmo de aprendizaje automático que clasifica campos diarios de vientos en 850 hPa en CPs dominantes. El objetivo es identificar los CPs sobre SSA, capturando la variabilidad temporal diaria y de mayor plazo, asegurando definiciones consistentes de los CPs a lo largo del ciclo anual.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para realizar este trabajo se utilizaron campos diarios de las componentes meridional y zonal del viento en 850 hPa en la región de Sudamérica Subtropical (Figura 1 a). Estos datos fueron obtenidos del reanálisis ERA5 (Hersbach et al. 2023) para el período 1979-2023. Asimismo, se utilizaron datos diarios de precipitación provenientes de la base CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation en el mismo período.

Con el fin de identificar los patrones dominantes de viento en la región, se aplicó un algoritmo de agrupamiento que consiste en: (i) la estandarización de las componentes zonal y meridional del viento, (ii) la reducción de la dimensionalidad mediante Funciones Ortogonales Empíricas (EOF), y (iii) la aplicación del algoritmo de agrupamiento k-means. El número óptimo de CPs se determinó utilizando el índice de Silhouette, el cual evalúa la calidad del agrupamiento, indicando qué tan similares son los campos de circulación asignados a un mismo CP en comparación con los campos asignados a los otros CPs. No se aplicaron filtros temporales dado que se busca capturar todas las escalas de variabilidad temporal, desde la diaria a las de mayor plazo.

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron 7 CPs que capturan las principales componentes de la circulación en SSA (Figura 7b) y su ciclo anual (Figura 7c). Además, estos CPs permiten regionalizar las anomalías de precipitación (Figura 7b).

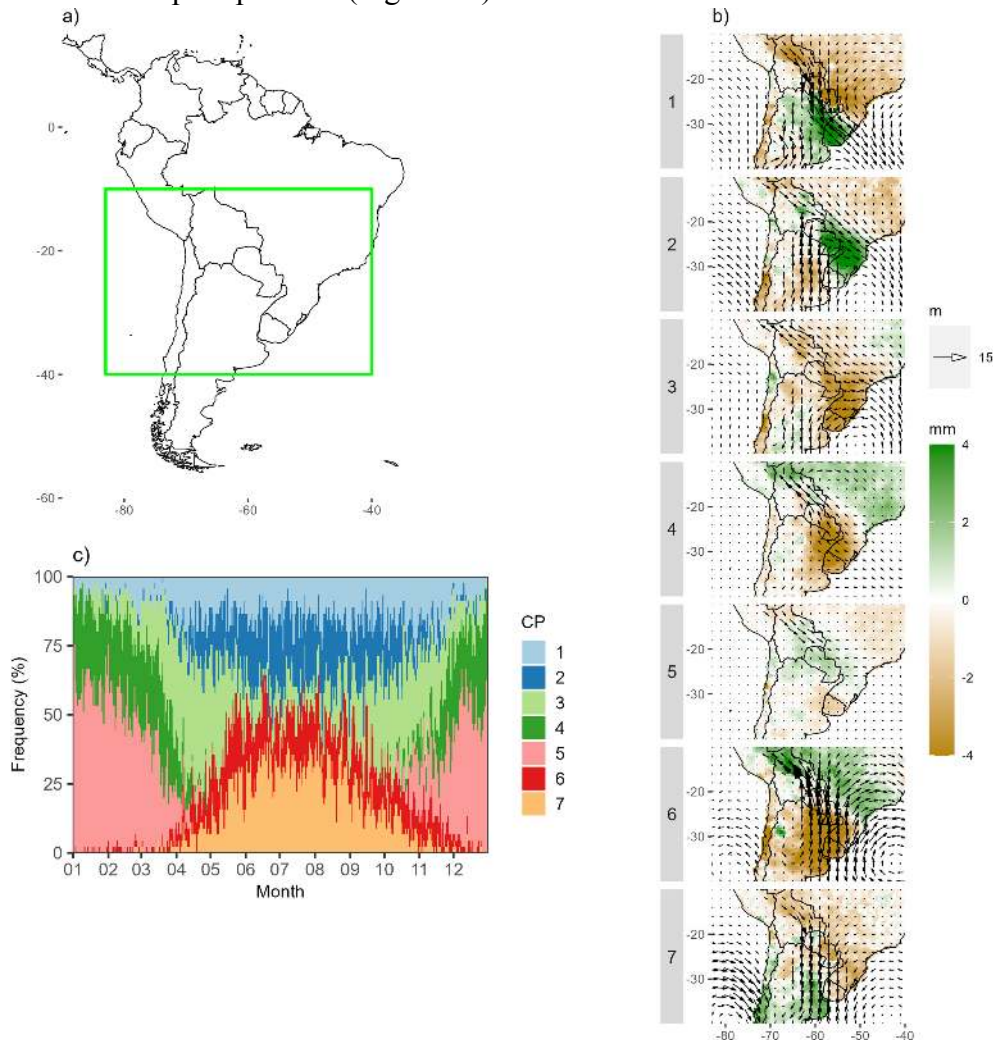


Figura 1. a) ubicación de SSA (recuadro verde). b) CPs representados mediante la anomalía diaria de viento en 850 hPa (vectores) y su anomalía de precipitación diaria asociada (color). c) Ciclo anual de la frecuencia relativa de los CPs (colores).

Las características de los CPs pueden resumirse de la siguiente manera:

- CP1 está presente en todas las estaciones del año. Consiste en una perturbación sobre Argentina y Uruguay, promoviendo precipitaciones en esta región. Este CP puede asociarse a los eventos de la corriente en chorro en capas bajas (no mostrado).
- CP2 y CP6 ocurren en todas las estaciones, excepto en verano, y muestran una perturbación y precipitaciones desplazadas hacia el norte de la posición observada en el CP1.
- CP3 es característico de las estaciones de transición. Presenta una circulación anómala centrada sobre el Atlántico cerca de Argentina, favoreciendo condiciones más húmedas en el centro-oeste de Argentina y el este de Brasil.
- CP7 también muestra una circulación anómala sobre el Atlántico, aunque desplazada hacia el este respecto al caso de CP3, y una circulación ciclónica sobre el Pacífico cerca de Chile.

Es típico del invierno y promueve condiciones más húmedas en Chile y el centro de Argentina.

- CP4 es típico del verano. Muestra una circulación anómala que promueve vientos con componente sur en la región continental tropical, intensificados al este de los Andes. Esta situación favorece condiciones más húmedas en el norte de SSA y más secas en el sureste.
- CP5 también ocurre en verano y muestra una circulación inversa a la de CP4, aunque menos marcada. Favorece condiciones levemente más húmedas entre los 15 y 30°S.

Además de la ocurrencia estacional de los CPs, se estudió su probabilidad de transición de un CP a otro (Figura 2). Se destaca que todos exhiben cierta persistencia (probabilidad de transición con sí mismos). Por otro lado, se ve claramente que los CPs que ocurren en la secuencia CP1-CP2-CP6, podrían estar asociado al desplazamiento de un frente frío desde el sur de SSA (CP1) hacia bajas latitudes (CP6) (Figura 1b). Otra transición probable es desde CP6 a CP3, el cual consiste de anomalías de viento anticiclónicas en el Atlántico frente a Argentina, lo cual promueve condiciones más secas en gran parte de SSA. Por otra parte, también se observa que el CP7 promueve el flujo desde el norte sobre el sur de SSA, es un precursor de los CP1 y CP2.

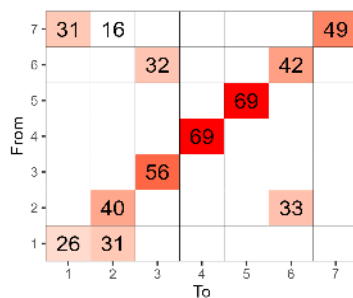


Figura 2. Probabilidad de transición de los CPs (%). Eje vertical: CP inicial, eje horizontal: CP que ocurre luego del CP inicial. Solo se muestran los valores significativos al 95% siguiendo un procedimiento de remuestreo con 1000 iteraciones.

4) CONCLUSIONES

Mediante el uso de campos diarios de viento en 850 hPa se identificaron 7 CPs que representan el ciclo anual de la circulación diaria en SSA y que permiten regionalizar las anomalías de precipitación. Además, se detectaron algunas secuencias preferenciales en la evolución de la circulación en la región. En una etapa posterior, se analizarán los cambios en la frecuencia de los CPs, así como el rol que cumplen los distintos modos de variabilidad climática sobre los mismos. Los resultados de este trabajo proveen un marco de referencia para una evaluación basada en procesos (determinados por los CPs) del desempeño de los modelos climáticos en SSA.

REFERENCIAS

Espinoza, J. C., Arias, P., Moron, et al., 2021: Recent changes in the atmospheric circulation patterns during the dry-to-wet transition season in south tropical South America (1979–2020): Impacts on precipitation and fire season. *Journal of Climate*, 34, 9025–9042.

Hersbach H, et al., 2023: ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).

Olmo, M.E. y Bettolli, M.L., 2021: Extreme daily precipitation in southern South America: statistical characterization and circulation types using observational datasets and regional climate models. *Clim Dyn* 57, 895–916.

DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DE CAMBIO CLIMÁTICO CON ÉNFASIS EN LA MICROCUENCA LA IGUANÁ, MEDELLÍN, COLOMBIA.

Carolina Florian Vergara¹, Hernán D. Salas¹, Harlem Acevedo Agudelo¹

carolinaflorian1140601@correo.itm.edu.co Autor/a correspondiente.

¹Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas, Departamento de Ciencias Ambientales y de la Construcción, Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Medellín, Colombia.

Palabras clave: CMIP6, Precipitación, Cambio Climático.

1) INTRODUCCIÓN

El cambio climático, impulsado por actividades humanas, está intensificando fenómenos meteorológicos extremos a nivel global, aumentando los riesgos climáticos regionales y locales (IPCC, 2023; Travis et al., 2018). En Colombia, ciudades como Medellín, evidencian aumentos de temperatura en los últimos 40 años (Gallego Ramírez et al., 2017). El crecimiento y la expansión incontrolada de Medellín han tenido profundas repercusiones ambientales. En particular, la microcuenca de La Iguaná se caracteriza por ser uno de los sistemas hidrográficos de gran importancia dentro del Valle de Aburrá, sin embargo, esta se ha convertido en un botadero clandestino, afectando la calidad del agua debido a la deposición de materiales de demolición y residuos. Las viviendas asentadas a menos de 15 metros del cauce y las prácticas ambientales inadecuadas generan alta vulnerabilidad a desastres naturales como avenidas torrenciales y deslizamientos (Carvajal- Flórez E, 2009). Según Ayala-García y Ospino-Ramos (2023), en Antioquia los eventos más frecuentes han sido las inundaciones, los deslizamientos y los vendavales, representando un 49%, 31% y 17%, respectivamente, de los cuales, un 10% ocurrieron en Medellín. La combinación de estos factores, sumada a la crisis climática actual, podría incrementar significativamente el riesgo de la comunidad ante amenazas naturales.

El IPCC reafirma que, en la zona noroeste de Suramérica, donde se encuentra Colombia, se presentarán incrementos en la temperatura promedio y la precipitación anual. Como consecuencia de esto, se espera un aumento de las inundaciones pluviales y fluviales debido a la pérdida de volumen de los glaciares, así como a la disminución de la nieve y el hielo. Sin embargo, aunque la contribución de Colombia al calentamiento global es de apenas un 0.6%, sus efectos impactan a las comunidades más vulnerables del país (Ayazo-Toscano et al., 2021). Si bien, las tendencias de temperatura en la región de América Latina y el Caribe son generalizadas, los impactos son diferenciados en subregiones, sectores y ecosistemas, por lo tanto, se requieren acciones orientadas a la adaptación y mitigación con el fin de evitar pérdidas e impactos más drásticos (IPCC, 2021, 2023).

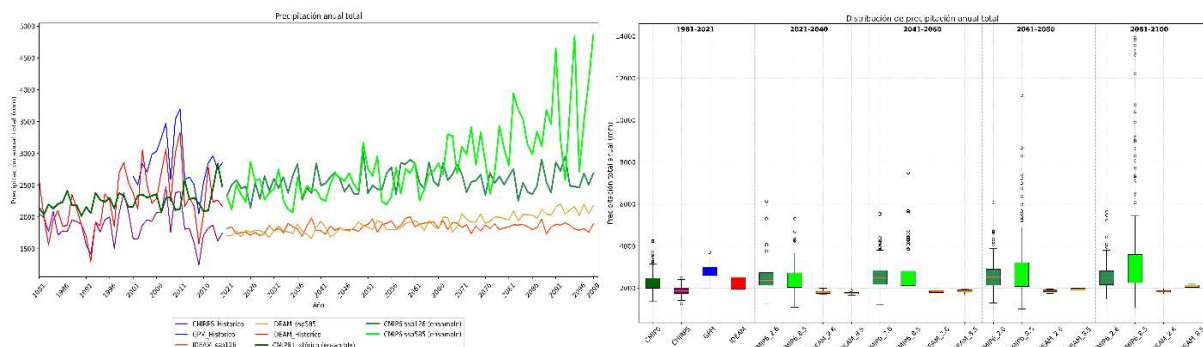
En este contexto, los Modelos Climáticos Globales (MCG) se han convertido en una herramienta clave para analizar los efectos del aumento de los gases de efecto invernadero, radiación, aerosoles y demás forzamientos antropogénicos. Estos modelos han permitido investigar y representar la dinámica climática global y a su vez simular el comportamiento en los cambios de patrones en diferentes variables del sistema climático (Arias et al., 2021). Los resultados obtenidos de los MCG son relevantes para analizar el aumento, tanto en frecuencia como en magnitud, de inundaciones y olas de calor en áreas urbanas, los cuales ponen en riesgo la salud, el bienestar de sus habitantes y los ecosistemas, comprometiendo a su vez la infraestructura urbana. Por lo anterior, es fundamental evaluar la información generada por los MCG para analizar su pertinencia en cuanto a la toma de decisiones locales y el diseño de estrategias de adaptación efectivas en cuencas urbanas vulnerables como La Iguaná.

2) Metodología

Para este estudio se utilizó la información generada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de Colombia en el marco de los escenarios de cambio climático generados en la Cuarta Comunicación Nacional. En particular, se utilizaron datos diarios de precipitación a una resolución espacial de 10x10 kilómetros, dicho estudio utilizó 25 modelos

climáticos globales (MCG) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6), evaluando MCG para el periodo histórico 1981-2020 con relación a las observaciones de estaciones hidroclimáticas localizadas en el territorio Colombiano (Francisco et al., 2024) . Adicionalmente, se compara el periodo histórico con el conjunto de datos de CHIRPS y GPM para el periodo histórico 1981-2020 y 2001-2020 respectivamente. Además, se evalúan dos Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): SSP1-2.6 y SSP5-8.5 del CMIP6 del insumo base del Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) disponible en la plataforma Copernicus Climate Data Store para el periodo futuro 2021-2099 con respecto a los escenarios presentados por IDEAM. El análisis comparativo se realizó a partir de análisis gráfico de series de tiempo, diagramas de cajas y diagramas de Taylor con el fin de evaluar la correspondencia entre los datos de los MCG del luego de utilizar el método EQM para la corrección de sesgo y las observaciones.

3) Resultados



En el periodo histórico, se observa que los MCG tienden a sobreestimar la precipitación anual en comparación con las fuentes observadas, especialmente frente a CHIRPS y GPM. Aunque existe cierta coincidencia en los rangos intercuartílicos, la variabilidad en los modelos (mayor dispersión y presencia de valores atípicos) sugiere una incertidumbre considerable en la representación de la precipitación en la región de estudio. Además, se observa una clara discrepancia entre CHIRPS y GPM, los datos oficiales del IDEAM y las simulaciones del CMIP6, lo cual evidencia incertidumbre en la representatividad local de la precipitación. En particular, GPM muestra valores máximos más marcados en años recientes, mientras que IDEAM presenta una serie con menor variabilidad. El ensamble de los modelos CMIP6 para el escenario SSP5-8.5 indica una tendencia creciente más pronunciada en la precipitación anual, especialmente a partir de 2060, en comparación con SSP1-2.6. En contraste, las proyecciones del IDEAM para ambos escenarios se mantienen más estables, sin una tendencia creciente clara.

4) Conclusiones

La comparación entre los datos observacionales y las proyecciones de los MCG muestra una amplia dispersión en los valores de precipitación futura, particularmente para el escenario SSP5-8.5, como se evidencia tanto en los rangos atípicos de los diagramas de cajas como en la alta variabilidad en la serie temporal, lo cual sugiere un aumento en la incertidumbre relacionada con el escenario más drástico (SSP5-8.5).

Aunque los MCG brindan una base importante para el análisis climático a gran escala, su aplicación en contextos regionales y locales requiere una evaluación cuidadosa respecto a su capacidad para reproducir los patrones hidroclimáticos. Por ello, la información de los MCG resulta fundamental como insumo inicial para el diagnóstico climático, pero debe complementarse con análisis locales de mayor resolución y conocimiento contextual, especialmente al momento de diseñar estrategias de adaptación en cuencas urbanas como la de la quebrada La Iguaná.

5) Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del “Government of Canada’s New Frontiers in Research Fund (NFRF), attributed to the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Social Sciences and Humanities Research Council of Canada (SSHRC), [NFRFI-2023-00561]”, Carolina Florian Vergara también agradece el apoyo del programa Jóvenes Investigadores e Innovadores, en el marco de la convocatoria 2025000305 del ITM 2025.

6) Referencias

- Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D., Alejandro Martínez, J., Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D., & Martínez, J. A. (2021). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements La climatología colombiana en modelos CMIP5/CMIP6: Sesgos persistentes y mejoras “Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements” ARTICLE INFO. *Revista Facultad de Ingeniería*, 100, 75–96. <https://doi.org/10.17533/udea.redin>
- Ayala-García, J., & Ospino-Ramos, K. (2023). *Desastres naturales en Colombia: un análisis regional*.
- Ayazo-Toscano, R., Hernández-Palma, A., Lucia, O., Manrique, H., & Becerra, M. T. (2021). *PORTAFOLIO DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA (SbN) COMO MECANISMO DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ÁREAS RURALES DE COLOMBIA*.
- Carvajal- Flórez E. (2009). *Impacto Ambiental y Social del Vertimiento de Residuos Sólidos y Escombros Sobre la Calidad del Río Medellín y Algunos de sus Afluentes*.
- Francisco, G., Urrego, P., Elena, F., Mina, M., Susana, M., González, M., Leal, M. C., Tatiana, L., Avendaño, R., Echeverry, G., Directora, P., Jorge, T. C., Jiménez, G., Asesor De Dirección, S., Patiño, E., Subdirectora De Estudios, C., Ingrid, A., Sierra, T., Subdirectora De Meteorología, G., ... Pachecho, A. (2024). *Escenarios De Cambio Climático De La Cuarta Comunicación Nacional De Colombia*. www.shutterstock.com
- Gallego Ramírez, L. M., Gallego Quiceno, D. E., Arboleda López, A. P., Garcés Giraldo, L. F., & Sepúlveda Aguirre, J. A. (2017). La influencia de la psicología ambiental en el contexto de la educación en Colombia: el caso del centro de Medellín. *Producción + Limpia*, 12(1), 124–132. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n1a13>
- IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 3–32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- IPCC. (2023). *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland*. (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Travis, W. R., Smith, J. B., & Yohe, G. W. (2018). Moving toward 1.5°C of warming: implications for climate adaptation strategies. In *Current Opinion in Environmental Sustainability* (Vol. 31, pp. 146–152). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.03.003>

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS CRITERIOS PARA LA DETECCIÓN DE BAJAS POLARES SOBRE LA PENÍNSULA ANTÁRTICA

Belen Choquehuanca^{1,2,3}, Alejandro Godoy^{4,5}, Ramiro Saurral^{1,2,3,6}

belen.choquehuanca@cima.fcen.uba.ar

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

²CONICET– Universidad de Buenos Aires, Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)

³Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI)– IRL 3351– CNRS-CONICET-IRD-UBA

⁴Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP)

⁵Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

⁶Barcelona Supercomputing Center (BSC), Barcelona, España

Palabras clave: Bajas Polares, Sensibilidad, Península Antártica.

1) INTRODUCCIÓN

Las Bajas Polares (BPs) son ciclones marítimos de mesoescala que se forman en masas de aire polar de latitudes altas, cerca del borde de hielo marino. Se caracterizan por su corta duración (menor a 36 hs) y estar asociados a vientos fuertes, nevadas intensas y condiciones de escasa visibilidad que representan un riesgo para las operaciones aéreas y marítimas polares (Rasmussen y Turner, 2003). Si bien en el hemisferio norte se han documentado climatologías detalladas, en el hemisferio sur hay un número limitado de estudios por lo que persisten vacíos importantes de conocimiento (Moreno-Ibañez y otros 2021). Recientemente el trabajo de Stoll (2022) ha contribuido a establecer criterios objetivos para la identificación de BPs, aunque estos criterios aún deben ser validados y adaptados a regiones específicas como la Península Antártica. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es analizar la sensibilidad de los umbrales propuestos por Stoll (2022) para la detección de BPs, evaluando su aplicabilidad a las condiciones locales de la Península Antártica. En particular, se examina un caso de estudio que cumplió los principales umbrales propuestos por Stoll (2022) para evaluar cómo se comportan dichos umbrales en un entorno regional.

2) METODOLOGÍA

Se utilizó el reanálisis ERA5 (Hersbach y otros, 2020) con una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ para el año 2020 y para la región comprendida entre 135°O – 20°O y 80°S – 40°S (Fig.1a). Se aplicó el algoritmo de seguimiento de ciclones (Polar Mesoscale Cyclone, PMC) desarrollado por Watanabe y otros (2016) y adaptado por Stoll y otros (2021). Dicho algoritmo detecta mínimos locales de vorticidad relativa en 850 hPa inferiores a $-15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ y los vincula cada 3 horas si ocurren a menos de 150 km del punto de propagación estimado, calculado a partir del viento medio entre 700 y 100 hPa en un radio de 200 km. Luego, se aplicaron los cuatro criterios de clasificación de BPs establecidos por Stoll (2022):

- Criterio de intensidad : $\xi_{850\text{hPa}} < -20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
- Criterio de mesoescala: diámetro del vórtice $< 430 \text{ km}$
- Criterio del frente polar: $\theta_{\text{trop}} < 300.8 \text{ K}$
- Criterio de inestabilidad estática potencial: $\theta_{500\text{hPa}} - \theta_{\text{SST}} < 11.0 \text{ K}$

El análisis de sensibilidad consistió en modificar individualmente cada uno de estos umbrales, manteniendo fijos los restantes, y cuantificar el efecto sobre la frecuencia de BPs detectadas estacionalmente.

3) RESULTADOS:

Los resultados mostraron una mayor frecuencia de BPs en los mares de Amundsen y Bellingshausen, especialmente durante invierno y primavera, mientras que el mar de Weddell presentó menor actividad, probablemente debido a una mayor extensión de hielo marino o diferencias en la dinámica local. El análisis de sensibilidad reveló que los criterios de intensidad (ξ_{850} hPa) y estabilidad estática ($\theta_{500} - \theta_{SST}$) son los más sensibles, con umbrales más estrictos que reducen significativamente la detección de BPs (Fig. 1b, f,e,i). Por otro lado, el criterio de mesoescala mostró una sensibilidad moderada, mientras que el criterio de frente polar exhibió una sensibilidad más baja. Estas diferencias sugieren que los umbrales, particularmente los relacionados con intensidad y estabilidad estática, podrían requerir ajustes regionales para reflejar mejor las condiciones locales. Finalmente, se llevó a cabo el análisis de un caso de BP desarrollado entre 12-13 de octubre del 2020 al oeste de la Península Antártica (Fig. 2). Dado que los umbrales de inestabilidad estática e intensidad fueron unos de los más sensibles en el análisis estacional, analizamos si este sistema típico de octubre también estaría afectado por un umbral más estricto. El sistema presentó una estructura nubosa bien definida en forma de coma y un núcleo de vorticidad intensa ($\xi_{850} = -30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; Fig. 2 filas superior e intermedia). Es interesante observar que si el umbral de $\theta_{500} - \theta_{SST}$ (Fig. 2 filas inferior) se redujera a 10 K, este evento podría no haber sido detectado, a pesar de cumplir todos los demás criterios. Este caso de estudio ilustra cómo una baja polar puede cumplir todos los criterios clásicos, pero quedar cerca de los límites para umbrales como la inestabilidad estática. Esto resalta la necesidad de ajustar los valores umbrales según la región para evitar falsos negativos en la detección de BPs.

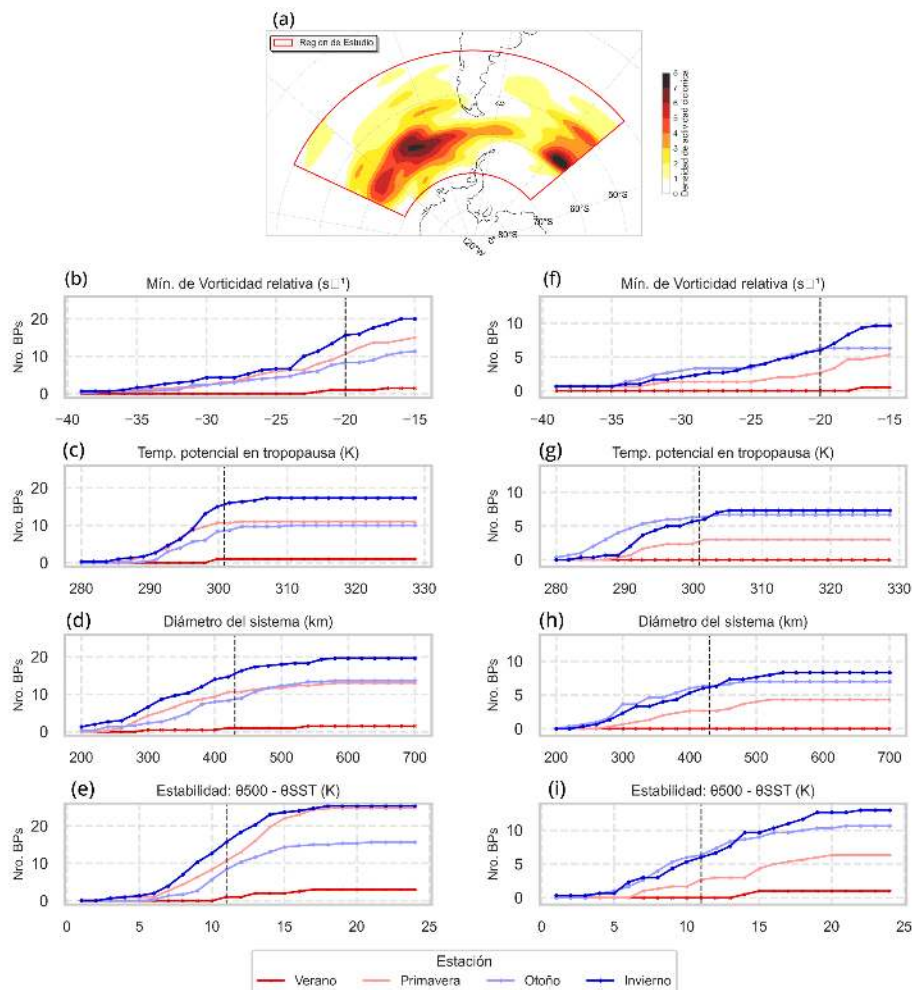


Figura 1. Panel a): Distribución de la densidad ciclónica de BPs en la región de estudio, calculada utilizando los umbrales propuestos por Stoll et al. (2022). Paneles b) a i): Análisis de sensibilidad de las variables más críticas para la detección de BPs en dos subregiones: Mar de Amundsen-Bellingshausen (paneles b a e) y Mar de Weddell (paneles f a i).

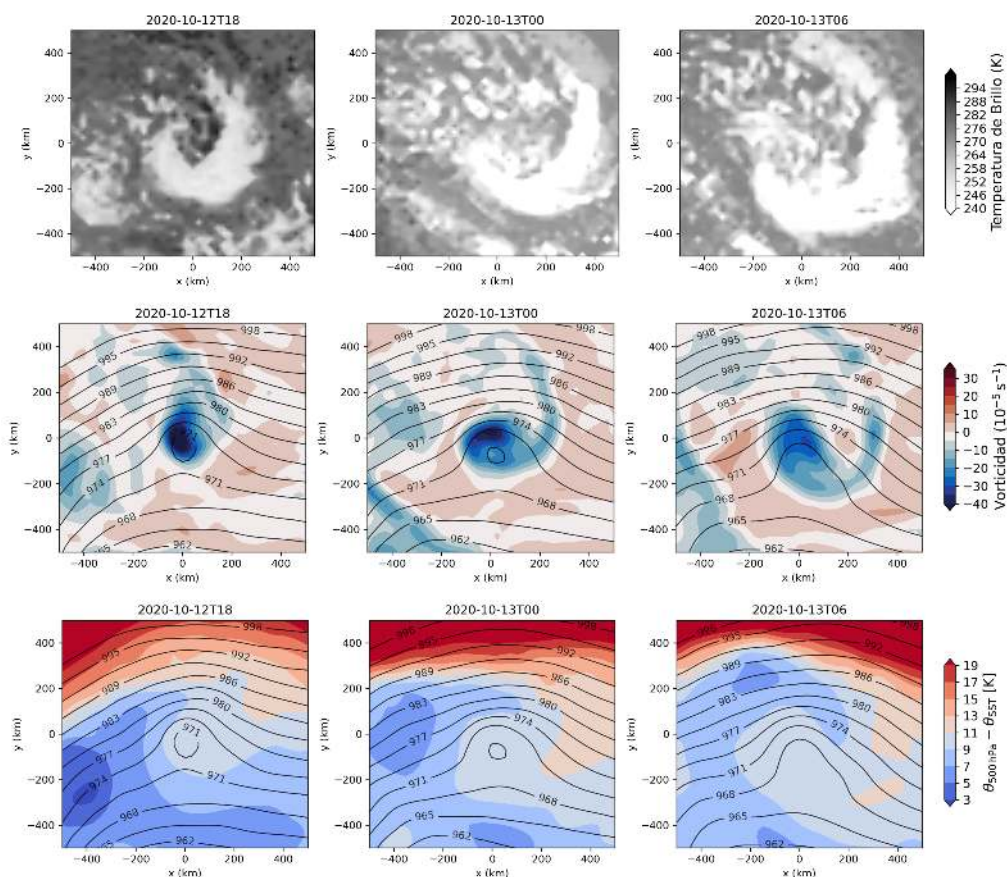


Figura 2. Caso de BP entre el 12 y el 13 de octubre de 2020. Se muestran: 1) temperatura de brillo (K) en la fila superior; 2) vorticidad relativa en 850 hPa (sombreado) en la fila intermedia; 3) flujo de calor sensible (sombreado) en la fila inferior y la presión a nivel del mar (líneas negras).

REFERENCIAS:

- Moreno-Ibáñez, M., Laprise, R. y Gachon, P., 2021:** Recent advances in polar low research: current knowledge, challenges and future perspectives. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **73**, 1–31. <https://doi.org/10.1080/16000870.2021.1890412>
- Rasmussen, E.A. y Turner, J., 2003:** *Polar lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions*, Cambridge University Press, ISBN 978-0521183918.
- Stoll, P.J., 2022:** A global climatology of polar lows investigated for local differences and wind-shear environments. *Weather and Climate Dynamics*, **3**, 483–504. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-483-2022>
- Stoll, P.J., Spengler, T., Terpstra, A. y Graversen, R.G., 2021:** Polar lows – moist-baroclinic cyclones developing in four different vertical wind shear environments. *Weather and Climate Dynamics*, **2**, 19–36. <https://doi.org/10.5194/wcd-2-19-2021>
- Watanabe, S.I., Niino, H. y Yanase, W., 2016:** Climatology of Polar Mesocyclones over the Sea of Japan Using a New Objective Tracking Method. *Monthly Weather Review*, **144**, 2503–2515. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0349.1>

RESPUESTA DE DIFERENTES VARIEDADES DE VID (*Vitis vinifera* L.) A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL ESTE DE MENDOZA

Martín Cavagnaro¹, Diego Araneo², Francisco González Antivilo²

mcavagnaro@fca.uncu.edu.ar Autor/a correspondiente.

¹Facultad de Ciencias Agrarias (UNCuyo)

²Centro Científico Tecnológico Mendoza (CONICET)

Palabras clave: variabilidad interanual, brotación, temperatura

1) INTRODUCCIÓN

La dormancia de la vid es un fenómeno fenológico crucial para la viña, que incluye la endodormancia y la ecodormancia. Este periodo prepara el desarrollo de las yemas latentes en primavera para el desborre. Las yemas latentes portan los primordios de los futuros brotes primarios y los primordios de las inflorescencias, y por ende los futuros racimos (García de Cortázar-Etauri, 2009).

La brotación es una etapa fenológica decisiva para la vid, marcando el inicio del ciclo de crecimiento. Su fecha tiene un impacto significativo en todo el ciclo y es fundamental para la gestión del viñedo. Es crítica para el establecimiento de viñedos en regiones susceptibles a heladas primaverales. En el contexto de cambio climático, predecir la fecha de brotación tiene un valor predictivo real como indicador de precocidad y adaptabilidad de las variedades.

El objetivo del presente trabajo es comprender la respuesta de diferentes variedades a la variabilidad climática interanual para poder entender las modulaciones que diferentes variables meteorológicas tienen en la fecha de brotación.

2) METODOLOGÍA

Se calcula la fecha media de brotación (días julianos) a partir de una base de datos de fecha de brotación de nueve (9) variedades tintas y blancas de vid de un viñedo comercial situado en El Mercado, Santa Rosa (Mendoza), período 1980 - 2019. Se calculan valores promedio para el período de dormición del cultivo (abril a septiembre): promedios quincenales de temperaturas máxima, media y mínima, integral térmica con base 10°C (ITB10) del 1 de abril a 30 de septiembre, frecuencia de heladas, eventos de viento zonda y duración de eventos de viento zonda. El cálculo de la ITB10 se realiza con la siguiente fórmula:

$$ITB10 = \sum_{abr}^{sep} (Tmd - 10^{\circ}C)$$

Donde Tmd es la temperatura media diaria.

El análisis estadístico descriptivo se realiza mediante un biplot en el que se incluyen las variables meteorológicas y las fechas de brotación de cada una de las variedades. Asimismo, se calculan correlaciones parciales para ver la respuesta de cada variedad con las variables.

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fecha de brotación está guiada por cambios pequeños y sucesivos a través de toda la estación de dormición. Según se observa en la Figura 1, no hay influencia de sucesión de eventos zonda ni de su duración. Tal como establecen Deis et al. (2015), existe en esta región una relación inversa marcada con la Tmin. Lo mismo ocurre con ITB10 y Tmed. Algunas variedades parecen responder a la Frecuencia de heladas.

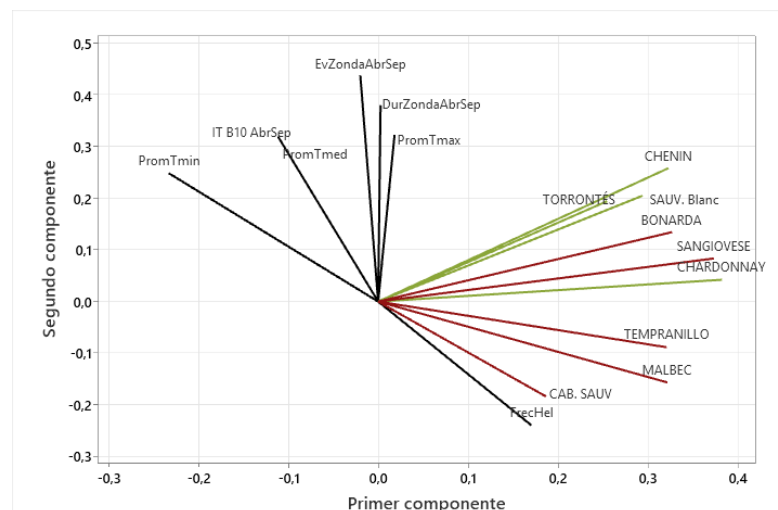


Figura 1: Biplot con fechas de brotación y variables meteorológicas.

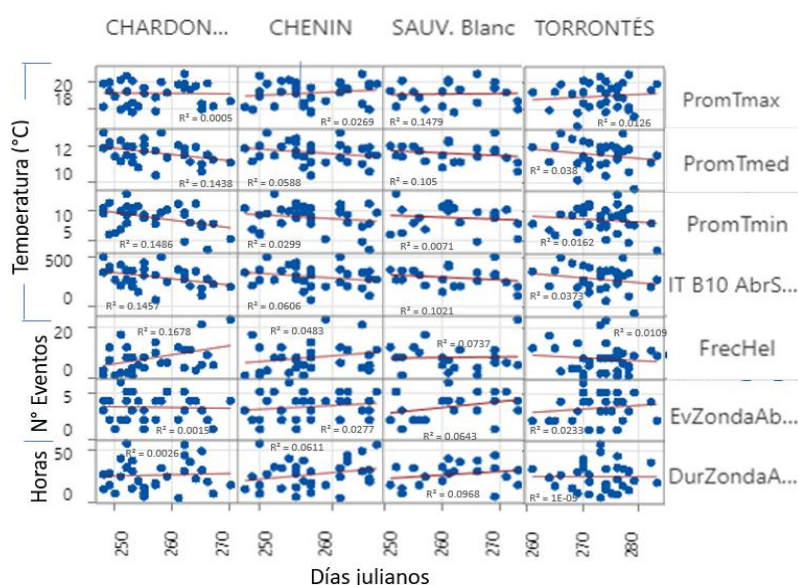


Figura 2: Correlaciones parciales de fechas medias de brotación de variedades blancas y variables meteorológicas.

La Tmed quincenal y ITB10, tienen una fuerte relación inversa con las fechas de brotación de todas las variedades. Las frecuencias de eventos de heladas, eventos de zonda y duración de zonda tienen algún grado de correlación con variedades blancas.

Se realiza agrupamiento por color de baya. En ese caso podemos observar algunas respuestas. En las variedades blancas (Fig 2), Chardonnay y Sauvignon Blanc tienen correlaciones inversas con la Tmin ($r=-0,53$ y $r=-0,31$) y directa con la frecuencia de heladas ($r=0,44$ y $r=0,13$).

La relación inversa de fecha de brotación con Chardonnay fue también observada por Cavagnaro y Canziani (2011), aquí también con correlación negativa con Tmed, mientras que Sauvignon Blanc se destaca por su correlación directa con la frecuencia y duración de los eventos de viento zonda. Por su parte Chenin y Torrontés sólo muestran correlaciones

positivas con Tmax y la duración de los eventos de viento zonda.

Para variedades tintas (Fig.3), Bonarda, Sangiovese y Tempranillo muestran correlación inversa con la Tmed e ITB10, y mayor correlación inversa de Cabernet Sauvignon, Malbec,

Pinot Negro, Sangiovesse y Tempranillo con Tmin ($r=-0,47$, $r=-0,76$ y $r=-0,40$, $r=-0,28$, $r=-0,37$ respectivamente).

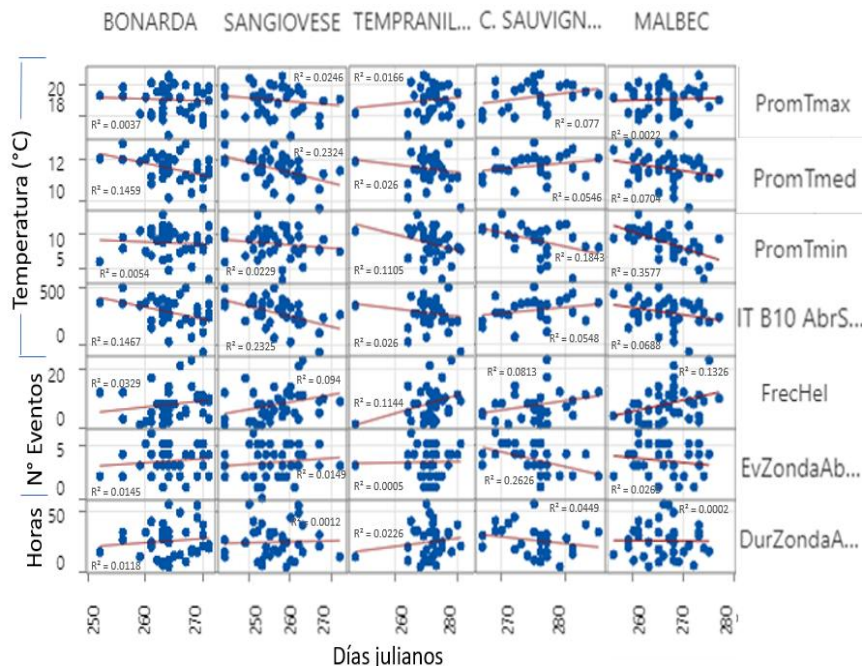


Figura 3: Correlaciones parciales de fechas medias de brotación de variedades tintas y variables meteorológicas.

Las respuestas con correlaciones positivas a la frecuencia de heladas se dan en todas las variedades, aunque mayormente en Malbec, Cabernet. No se observa influencia de frec. y dur. de eventos de zonda, aunque es habitual que el viento zonda exponga a las plantas a heladas tardías, aportando el estímulo térmico necesario para brotar, una vez completado el requerimiento de frío.

4) CONCLUSIONES

Hay respuestas diferenciales por variedad, pero no parecen estar relacionadas con el color de la baya. Es notorio observar que hay variedades más sensibles que otras a cambios ambientales en la etapa de dormición que abarca el período de otoño-invierno. Es posible que haya una correlación entre repuesta a Tmin y frecuencia de heladas en variedades de brotación temprana, en las cuales se observa: a mayores valores de promedio de Tmin quincenal se anticipa la brotación (correlación inversa) y a mayor Fhel, la brotación es más tardía.

REFERENCIAS

Cavagnaro, M. A., Canziani, P. O., 2011: Variabilidad térmica y duración del ciclo fenológico de la variedad Chardonnay (*Vitis vinifera* L.) en el este de Mendoza, Argentina. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia (17.: 2011: Guarapari, ES). Anais: Riscos climáticos e os cenários agrícolas futuros [recurso eletrônico]. Guarapari, ES: SB Agro, 2011. 5 p.: il

Deis, L., de Rosas. M.I., Malovini, E., Cavagnaro, M., Cavagnaro, J.B., 2015: Climate change impact in Mendoza. Climate variation on the last 50 years. A view to grapevine physiology. Rev. FCA UNCUIYO. 2015. 47(1): 67-92. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.

García de Cortázar-Atauri, I., Brisson, N. y Gaudillere, J.P., 2009: Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). Int J Biometeorol **53**, 317–326. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0217-4>

SUPERBOLTS EN LOS ANDES CENTRALES: DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL Y FACTORES ASOCIADOS

María Florencia Barle^{2,3,5}, María Gabriela Nicora^{1,3,5}, Eldo E. Ávila^{3,4}
mbarle@fcaglp.unlp.edu.ar

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata, UNLP.

²Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Regional La Plata.

³UNIDEF, MINDEF, CONICET, DEILAP, División Atmósfera, Villa Martelli.

⁴FAMAF, Universidad Nacional de Córdoba, IFEG-CONICET, Córdoba.

⁵Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET.

Palabras clave: Actividad eléctrica, tormentas, energía.

1)INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO DE ESTUDIO

Estudios recientes han analizado un tipo particular de descarga eléctrica extremadamente energética denominada Superbolt, cuya energía supera en tres órdenes de magnitud ($> 10^6$ Joules) a la de las descargas promedio que se producen en el planeta, las cuales rondan los 1.000 J. Holzworth et al. (2019) reportaron alrededor de 8.000 Superbolts entre más de 10^9 descargas registradas globalmente entre 2010 y 2018. A nivel mundial, los Superbolts se registran preferentemente sobre océanos y durante el invierno boreal. Sin embargo, uno de los principales focos de ocurrencia se localiza sobre el noroeste argentino y norte de Chile, extendiéndose hacia la región de los Andes centrales, donde su estacionalidad difiere marcadamente, concentrándose entre los meses de noviembre y febrero. Es importante destacar que la distribución espacial de los Superbolts, no es coincidente con las regiones donde se producen los máximos de actividad eléctrica en el planeta (Albretch et al., 2016)

El objetivo de este trabajo es analizar los factores que podrían explicar la alta densidad de Superbolts en una amplia región de Sudamérica, ubicada entre los 10°S y 35°S de latitud y los 60°O y 80°O de longitud, que abarca el norte de Chile y Argentina, Bolivia, y sectores de Perú y Brasil (Figura 1). En particular, se explora la posible relación entre estos eventos extremos y dos factores: la Corriente en Chorro de Capas Bajas de América del Sur (CCCB, también conocida como SALLJ, por sus siglas en inglés) y la actividad solar.

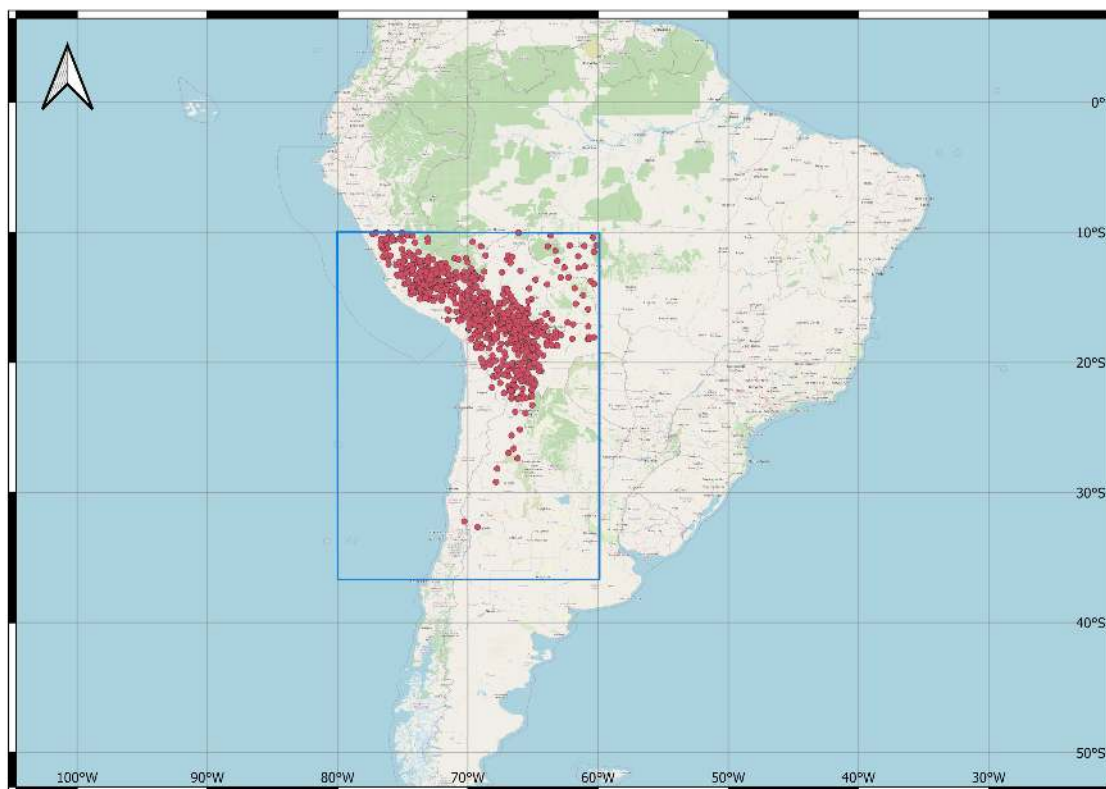


Figura 1: Zona de estudio (rectángulo azul), descargas de tipo Superbolt (círculos rosados).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron 14 años de datos (2010–2023) de la red global World Wide Lightning Location Network (WWLLN), que detecta descargas eléctricas mediante sensores terrestres capaces de registrar ondas de radio de muy baja frecuencia (VLF). Esta red cuenta con más de 80 estaciones distribuidas en todos los continentes, incluidas seis en el sur de Sudamérica (cuatro en Argentina y dos en Chile). Se consideraron exclusivamente aquellas descargas con energía comprendida entre 10^6 y 10^8 J, con un error estándar del ajuste de energía menor al 30 %, y que hayan sido detectadas por al menos siete estaciones WWLLN.

Con el fin de explorar el posible vínculo entre los Superbolts y la actividad de la CCCB/SALLJ, se calculó una climatología para el período 1984–2024 a partir de datos del reanálisis ERA5, con resolución de 6 horas. Siguiendo los criterios propuestos por Montini et al. (2019), se seleccionaron dos estaciones: Santa Cruz de la Sierra, Bolivia (17.8°S , 63.2°W) y Mariscal Estigarribia, Paraguay (22.0°S , 60.6°W). Para cada una, se calcularon los percentiles 75 estacionales tanto de la velocidad del viento en 850 hPa como de la cortante vertical de viento entre 700 y 850 hPa. Teniendo en cuenta esto, se considera que hay un evento SALLJ cuando se cumplen simultáneamente las siguientes condiciones en al menos uno de los horarios subdiarios (00, 06, 12 o 18 UTC):

- i) velocidad del viento en 850 hPa superior al percentil 75 estacional,
- ii) cortante del viento entre 850 y 700 hPa superior al percentil 75 estacional, y
- iii) dirección del viento en 850 hPa entre $292,5^{\circ}$ y 45° (es decir, desde el noroeste hacia el noreste).

Por otra parte se analizó preliminarmente, la influencia de la actividad solar mediante la comparación del número de manchas solares con la evolución anual de los Superbolts en la

región andina de estudio.

3) RESULTADOS PRELIMINARES

Bajo estos criterios, se identificaron aproximadamente 1.000 Superbolts sobre un total de 18×10^6 de descargas registradas en la región. Además, se observa una mayor presencia de Superbolts entre los meses de diciembre y marzo, con un pico de actividad en los años 2014 y 2015. Por otro lado, se observa que las distribuciones anuales del número de manchas solares y Superbolts varían de manera similar, con un coeficiente de Pearson de 0.469, coincidiendo ambos máximos en 2014, lo que sugiere una posible influencia de la actividad solar en estos eventos extremos (Figura 2).

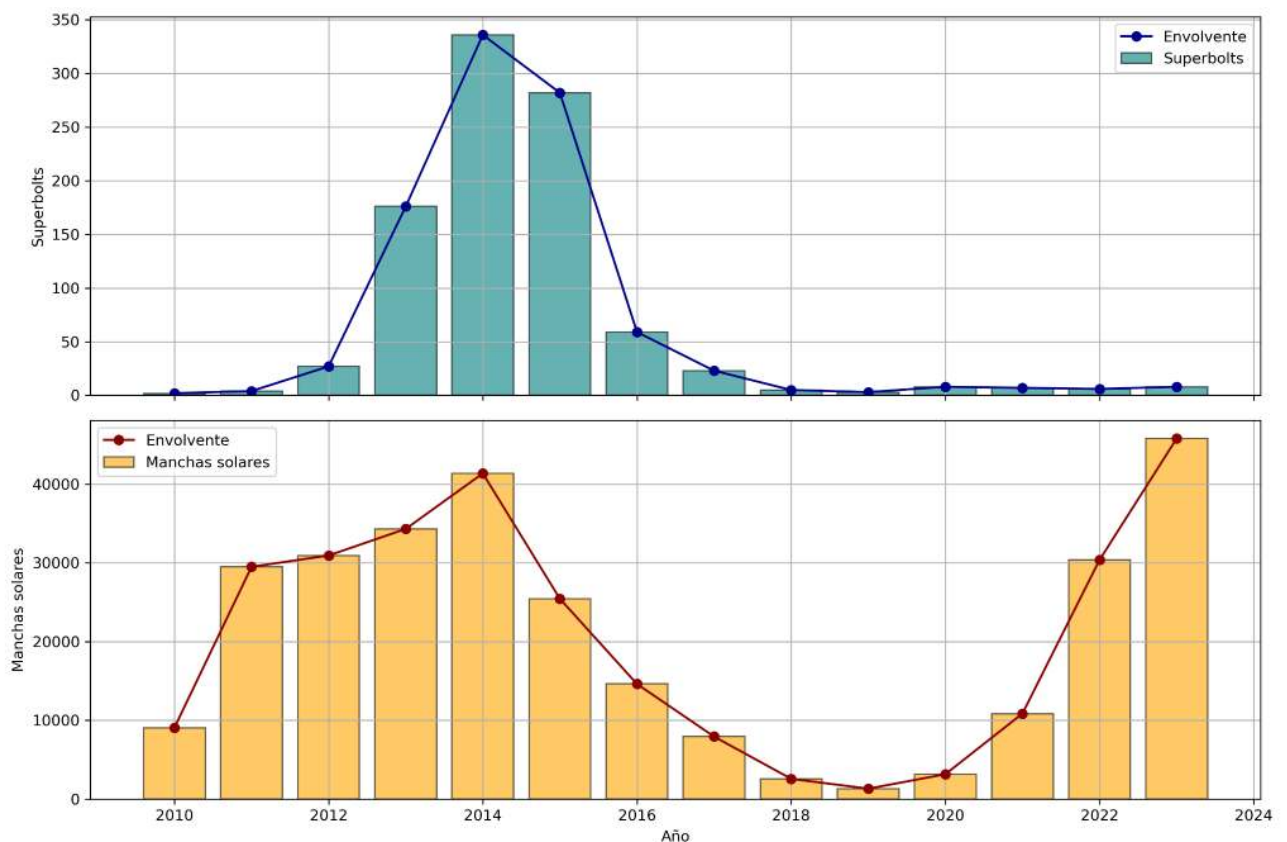


Figura 2: Distribuciones anuales de Superbolts (arriba) y cantidad de manchas solares (abajo) y sus envolventes correspondientes.

REFERENCIAS

Albrecht, Rachel I. Steven J. Goodman, Dennis E. Buechler, Richard J. Blakeslee, and Hugh J. Christian., (2016). Where are the lightning hotspots on Earth?

Holzworth, R. H., McCarthy, M. P., Brundell, J. B., Jacobson, A. R., & Rodger, C. J. (2019). Global distribution of superbolts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 9996–10,005. <https://doi.org/10.1029/2019JD030975>.

Montini, T. L., Jones, C., y Carvalho, L. M. V. (2019). The South American low-level jet: A new climatology, variability, and changes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 1200–1218. <https://doi.org/10.1029/2018JD0296>.

INCENDIO FORESTAL POR RAYOS EN TIERRA DEL FUEGO - CASO DEL 1 DICIEMBRE 2023 -

Daiana M. Baissac^{1,2}, M. Gabriela Nicora^{1,2}, Eldo E. Ávila³
dbaissac@citedef.gob.ar. Autora correspondiente.

¹Div. Atmósfera, Instituto de Ciencias y Tecnología para la Defensa – UNIDEF - CONICET

²CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

³Facultad de Astronomía, Matemática y Física FAMAF - UNC

Palabras clave: Descargas eléctricas, Sistemas de detección, Tormenta.

1) INTRODUCCIÓN

Las descargas eléctricas atmosféricas son corrientes transitorias de gran intensidad, generadas principalmente en nubes de tormenta. Un impacto clave de estas descargas, y en particular de las descargas a tierra (CG, comúnmente conocidas como rayos), es la ignición de incendios forestales (Ordóñez et al., 2012), siendo la principal causa natural de tales eventos. Al ocurrir frecuentemente en zonas remotas y de acceso limitado, los incendios forestales iniciados por rayos suelen detectarse con demora, lo que puede acarrear graves consecuencias ecológicas y económicas.

La capacidad de que un rayo inicie un incendio depende de múltiples factores: condiciones meteorológicas, características de la tormenta, así como del terreno y la vegetación predominante (Moris et al., 2024). También de las propiedades específicas de la descarga, por ejemplo si bien existe evidencia de que las descargas CG de polaridad positiva (Pérez-Invernón et al., 2023), asociadas a corrientes continuas prolongadas (LCC), son más eficientes en iniciar incendios, otros trabajos encuentran que la mayoría de los incendios por rayos han atribuido a

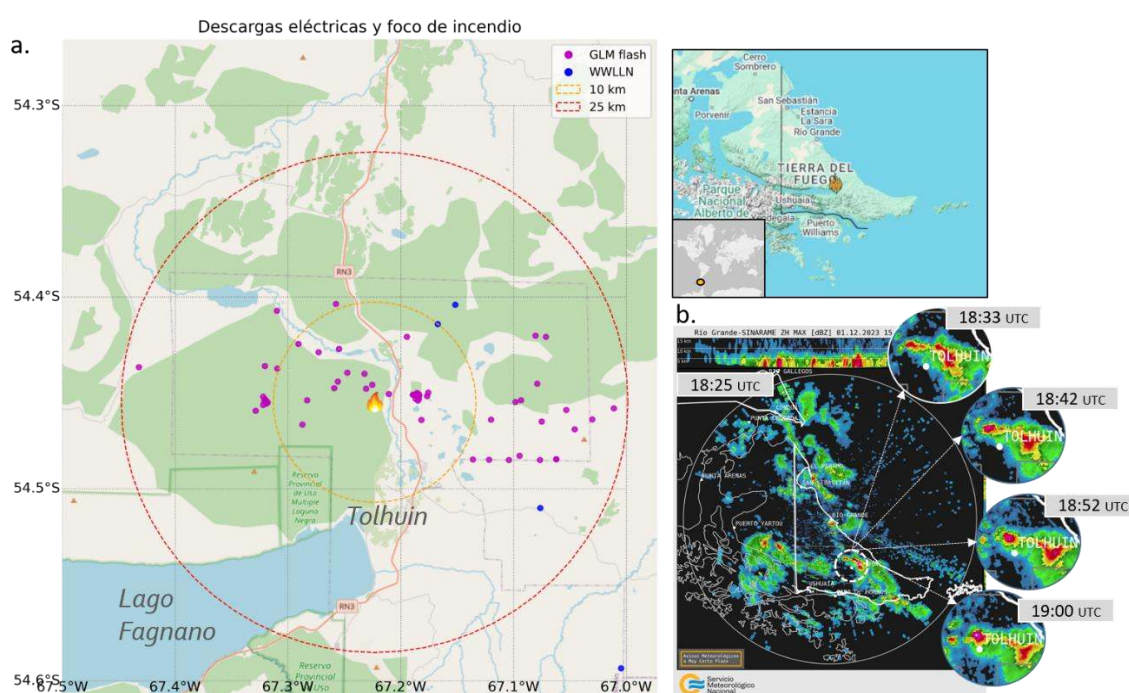


Figura 1: a. Ubicación del incendio El Relincho, con la distribución de las descargas detectadas por la WWLLN y GLM. b. Imágenes del radar Rio Grande.

descargas CG negativas (Schultz et al., 2024).

En este contexto, el presente trabajo se centra en el estudio de la actividad eléctrica atmosférica asociada a un incendio denominado “*El Relincho*”, ocurrido en Tierra del Fuego el 1 de diciembre de 2023 (Figura 1a). El mismo fue vinculado a la actividad eléctrica en la región. Para ello, se combinan datos de distintos sistemas de detección de descargas eléctricas y análisis meteorológicos del día del evento.

2) BASE DE DATOS

Para el análisis de los casos de estudio se utilizaron diversas fuentes de datos sobre actividad eléctrica atmosférica y condiciones meteorológicas, complementadas con información proporcionada por personal de Parques Nacionales y Manejo del Fuego. Las descargas eléctricas fueron identificadas mediante dos sistemas de detección: el sensor *Geostationary Lightning Mapper* (GLM; Goodman et al., 2013), a bordo del satélite geoestacionario GOES-16, y la red global terrestre *World Wide Lightning Location Network* (WWLLN; Rodger et al., 2014). Se consideraron las descargas eléctricas registradas dentro de un radio de 25 km del foco del incendio. Adicionalmente, se utilizaron datos meteorológicos de reanálisis ERA5 (ECMWF) para caracterizar las condiciones meteorológicas durante el mismo día del evento. Este conjunto de datos incluyó variables como temperatura, humedad, viento y presión en superficie y los diferentes niveles. También se incorporaron datos de satélite (GOES-16) y radar (Rio Grande; SMN) para evaluar la evolución de las tormentas asociadas a las descargas eléctricas (Figura 1b).

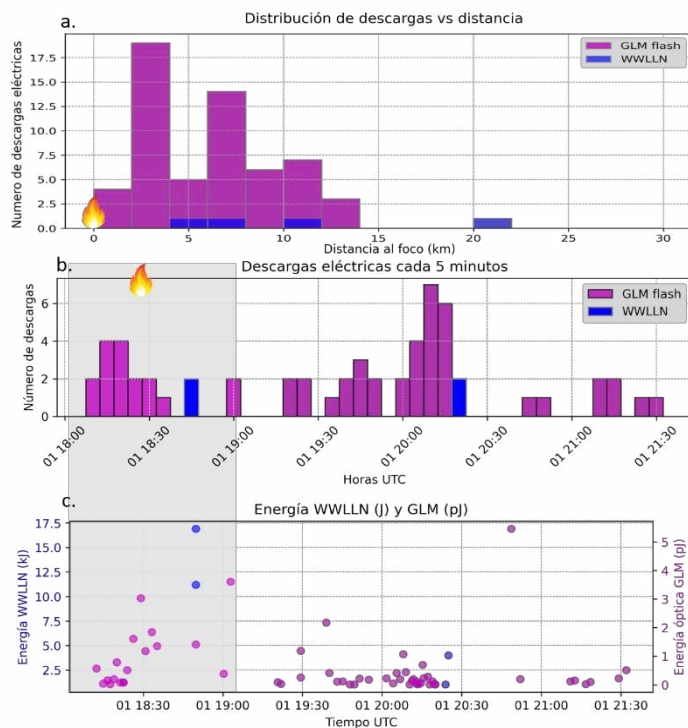


Figura 2: a. Distribución de las descargas en función con la distancia. b. Evolución temporal de las descargas detectadas por el GLM y la WWLLN en cercanías del incendio. C. Energía de las descargas eléctricas detectadas (energía óptica para el caso del GLM y energía en el rango de VLF para la WWLLN).

3) RESULTADOS

El incendio “*El Relincho*” fue reportado como iniciado por la tarde del 1 de diciembre de 2023, en el partido de Tolhuin, Tierra del Fuego. Afectó vegetación de bosque nativo y para el 2 de diciembre ya se encontraba extinguido.

Desde las 15:00 UTC se observó inestabilidad en las inmediaciones de Tolhuin. La actividad eléctrica, sin embargo, fue registrada luego de las 18:00 UTC por ambos sistemas de detección (Figura 1a y 2b).

Dentro de un radio de 25 km del foco se detectaron 57 descargas GLM y 4 WWLLN (Figura 2a). Se estima que el incendio se inició entre las 18:00 y 19:00 UTC (franja gris en Figura 2b y 2c). En ese periodo se

registraron 18 descargas GLM y 2 WWLLN. Al observar la energía de las descargas (Figura 2c), se destacan valores elevados durante ese lapso, en comparación con el resto del día.

Del análisis de las condiciones meteorológicas (no mostrado aquí), se observó un aumento de la temperatura hacia horas de la tarde, un aumento del CAPE y un ascenso en la humedad relativa para el día analizado. La precipitación asociada a la tormenta fue escasa (menor de 1 mm) y los vientos mostraron un leve incremento hacia el final del día. Estas condiciones podrían haber favorecido la ignición y propagación del fuego.

Este caso permitió explorar la relación entre condiciones atmosféricas específicas, actividad eléctrica y ocurrencia de incendios forestales para un caso puntual en una región austral, resaltando el valor de integrar múltiples fuentes de datos para una mejor comprensión de estos eventos. A futuro, se prevé avanzar en el estudio de la eficiencia de las descargas en la ignición de incendios incorporando más casos de estudio. Por otro lado, un aspecto relevante es que el área afectada se encuentra cerca del límite del campo visual del GLM. Profundizar en el análisis de la eficiencia de detección de los sistemas de detección en la región, resulta clave para mejorar el monitoreo y la alerta temprana.

Agradecimientos: Los autores de este trabajo agradecen a UNIDEF (CITEDEF-MINDEF) y a la IRL 3351 – IFAECI por su apoyo en la realización de este trabajo. Agradecemos también a la WWLLN cuyos datos son producidos con la ayuda y cooperación de numerosas universidades, institutos e investigadores de todo el mundo; al GLM, por el acceso público a sus datos; y al personal de Parques Nacionales y del Manejo del Fuego por aportar información valiosa para este estudio.

REFERENCIAS

- Goodman, S. J., Blakeslee, R. J., Koshak, W. J., Mach, D., Bailey, J., Buechler, D., Carey, L., Schultz, C., Bateman, M., McCaul, E., & Stano, G., 2013:** The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM). *Atmospheric Research*, 125-126, 34-49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006>
- Moris, J. V., Ascoli, D., & Hunt, H. G. P., 2024:** A new method to assess the probability of lightning causing wildfires. *ICLP 2024; 37th International Conference on Lightning Protection*, 1072-1077. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10832489>
- Ordóñez, C., Saavedra, A., Rodríguez-Pérez, J. R., Castedo-Dorado, F., & Covián, E., 2012:** Using model-based geostatistics to predict lightning-caused wildfires. *Environmental Modelling & Software*, 29(1), 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.10.004>
- Pérez-Invernón, F. J., Gordillo-Vázquez, F. J., Huntrieser, H., & Jöckel, P., 2023:** Variation of lightning-ignited wildfire patterns under climate change. *Nature Communications*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36500-5>
- Rodger, C. J., Brundell, J. B., Hutchins, M., & Holzworth, R. H., 2014:** The world wide lightning location network (WWLLN): Update of status and applications. *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, 1-2. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929581>
- Schultz, C. J., Bitzer, P. M., Antia, M., Case, J. L., & Hain, C. R., 2024:** Assessing Flash Characteristics in Lightning-Initiated Wildfire Events between 1995 and 2020 within the Contiguous United States. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-23-0166.1>

TENDENCIAS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN ARGENTINA, 1993-2022

María Mercedes Poggi¹, César Azorín-Molina², María Laura Bettolli³, María de los Milagros Skansi¹, Tim R. McVicar⁴, Shalenys Bedoya-Valestt²

mpoggi@smn.gob.ar

¹Dirección Central del Monitoreo del Clima, Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.

²Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CIDE, CSIC-UV-GVA), Climate, Atmosphere and Ocean Laboratory (Climatoc-Lab), Moncada, Valencia, España.

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

⁴CSIRO Environment, GPO Box 1700, Canberra, ACT 2601, Australia.

Palabras clave: Observaciones, variabilidad, fenómenos *stilling*-reversal.

1) INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se han observado cambios en la velocidad del viento cercano a superficie (SWS, 10-m). Se han identificado tendencias decrecientes, un fenómeno denominado *stilling* por Roderick et al. (2007), tanto en las regiones tropicales como en las latitudes medias de ambos hemisferios y sobre superficies continentales, en el período que comienza aproximadamente en los años 1960-1970 y termina en los años 2000-2010 (McVicar et al., 2012). Desde 2011, sin embargo, varios estudios indicaron que la tasa del *stilling* ha disminuido (Guo et al., 2011), informando de una recuperación de la SWS, fenómeno referido como *reversal* (Zeng et al., 2019). Gran parte de estos estudios son de naturaleza regional, ubicándose exclusivamente en el hemisferio norte (Azorín-Molina et al., 2014), y aquellos globales utilizan principalmente observaciones de dicho hemisferio. En el hemisferio sur, por el contrario, existe poca evidencia, pero tanto las observaciones como las proyecciones indican tendencias positivas de la SWS, lo que resalta una asimetría interhemisférica. Para complementar estos análisis, es importante abordar estudios allí y, en especial, en América Central y Sudamérica, donde aún faltan investigaciones exhaustivas (McVicar et al., 2012).

En Argentina, los estudios sobre las tendencias de la SWS son escasos, a pesar de los avances logrados por Merino y Gassman (2021). Los estudios suelen centrarse en una única estación o región, principalmente en la Patagonia, debido a sus vientos intensos y persistentes. Frente a este contexto, el objetivo general del trabajo es analizar las tendencias de la SWS en la red de estaciones convencionales del país entre 1993 y 2022, para evaluar si se observan los fenómenos de *stilling* y *reversal* en estas latitudes. Los objetivos principales son:

a) obtener series mensuales de la SWS de calidad y homogeneizadas, con una compilación detallada del instrumental de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN);

b) evaluar las tendencias y variabilidad decadal de las series anuales y estacionales de las anomalías de la SWS, junto con su distribución espacial, en el período 1993-2022 y en los subperíodos 1993-2012 y 2013-2022, considerando las estaciones australes estándar;

c) investigar la posible relación entre las tendencias observadas y ciertos forzantes de escala global y regional que tienen influencia en el clima de Argentina, así como con la circulación de la Celda de Hadley y la frecuencia de tipos de circulación sinóptica o *weather types*.

2) DATOS

Se trabajó con series mensuales de SWS de 86 estaciones del SMN en el período 1993-2022, equipadas con distintos tipos de instrumental: anemómetros ultrasónicos, electromecánicos y anemoveletas pendulares. Se utilizó el paquete Climatol v4.1.0 (Guijarro, 2024) para realizar el control de calidad, el relleno de datos faltantes y la homogeneización de estas series.

Para investigar la influencia de ciertos fenómenos y de la circulación atmosférica en las tendencias observadas, se consideraron índices de aquellos forzantes globales que son impulsores importantes de la variabilidad climática sobre Sudamérica. También se incluyeron índices de forzantes de escala regional y de cambios en la intensidad y posición de los anticiclones subtropicales del Pacífico Sur y del Atlántico Sur. Por último, se emplearon series de frecuencias de *weather types*, obtenidas a partir del esquema de Jenkinson y Collison (1977).

3) METODOLOGÍAS

Se realizó una clusterización de las series de la SWS, lo que permitió definir dos regiones: el centro y norte argentino, y la Patagonia. Se analizaron series de anomalías mensuales medias de la SWS, tanto en los puntos de estación como en los promedios regionales. Se trabajó con series a escala anual y estacional, a las que se aplicó un filtro de media móvil centrada con una ventana de 10 años, con el objetivo de resaltar la variabilidad de baja frecuencia. En las series observadas y filtradas se identificaron *breakpoints*, los cuales pueden indicar cambios en las tendencias. Se realizó un análisis de tendencias para el período completo 1993-2022 y los subperíodos 1993-2012 y 2013-2022. Para ello, se utilizó el método no paramétrico de Sen y el test de Mann-Kendall modificado. Asimismo, para identificar el inicio y la persistencia de las tendencias observadas, se aplicó un análisis de tendencias móviles.

Se calculó el coeficiente de correlación de rangos de Spearman entre las series de anomalías de la SWS y los índices considerados, así como con la frecuencia de los *weather types*.

La significancia de la identificación de los *breakpoints*, de las tendencias y de la correlación se clasificó en 3 categorías: significativa a $p < 0,05$ y a $p < 0,10$ y no significativa a $p > 0,10$.

4) RESULTADOS

Entre 1993 y 2022, en ambas regiones, se observa una disminución de la SWS anual y en verano y primavera, lo que evidencia la presencia del *stilling*. Esta disminución resulta significativa en verano en la Patagonia y en primavera en el centro y norte argentino.

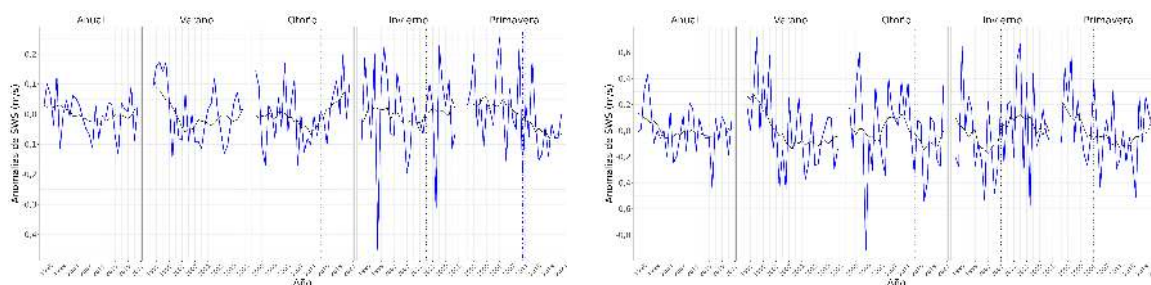


Figura 1: Series de anomalías de la SWS (en m/s) para el centro y norte argentino (izq.), y la Patagonia (der.), en el período 1993-2022. La línea negra representa un filtro de media móvil centrada con una ventana de 10 años.

Sin embargo, el análisis por subperíodos reveló que, en gran parte de los casos, hay un cambio de signo en las tendencias. A escala anual, en el subperíodo 1993-2012, el 69% (31%) de las estaciones muestran tendencias negativas (positivas), mientras que el 20% (5%), tendencias significativas negativas (positivas). Por el contrario, en el subperíodo 2013-2022, el 45% (55%) de las estaciones exhibe tendencias negativas (positivas), mientras que el 7% (7%), tendencias significativas negativas (positivas).

5) DISCUSIÓN

A partir de series regionales, se confirmó una disminución significativa de la *SWS* anualmente y durante el verano y la primavera desde 1993 hasta 2022. Esta disminución no fue constante en el tiempo, observándose un comportamiento variable a lo largo del período. El análisis de tendencias en los subperíodos 1993-2012 y 2013-2022, así como en ventanas móviles, permitió confirmar que existe un cambio en las tendencias en el inicio y hacia el final del período, con una transición de tendencias negativas a tendencias menos negativas o incluso positivas. Este cambio se advierte en todas las estaciones del año, con la excepción del invierno en Patagonia. Lo hallado pone en evidencia el fenómeno *stilling*, el cese del mismo e, inclusive, la presencia del *reversal*.

Las correlaciones significativas encontradas con los índices y los *weather types* resaltan el papel de la circulación atmosférica en la variabilidad multidecadal de la *SWS*.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se desarrolló en el marco del proyecto RED-CLIMA 2 (programa LINCGLOBAL - CSIC, Ref. LINC24042).

REFERENCIAS

- Azorín-Molina, C., Vicente-Serrano, S. M., McVicar, T. R., Jerez, S., Sanchez-Lorenzo, A., López-Moreno, J. I., ... y Espírito-Santo, F., 2014: Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961–2011. *Journal of Climate*, 27(10), 3692-3712.
- Guijarro, J. A., 2024: *climatol: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products)*. R package version 4.1.0, <https://CRAN.R-project.org/package=climatol>.
- Guo, H., Xu, M., y Hu, Q., 2011: Changes in near-surface wind speed in China: 1969-2005. *International Journal of Climatology*, 31, 349-358.
- Jenkinson, A. F., y Collison, F. P., 1977: An initial climatology of gales over the North Sea. Synoptic climatology branch memorandum, 62, 18.
- McVicar, T. R., Roderick, M. L., Donohue, R. J., Li, L. T., Van Niel, T. G., Thomas, A., ... y Dinpashoh, Y., 2012: Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology*, 416, 182-205.
- Merino, R. A., y Gassmann, M. I., 2022: Wind trends analysis in southern South America from weather station and reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 42(4), 2117-2134.
- Zeng, Z., Ziegler, A. D., Searchinger, T., Yang, L., Chen, A., Ju, K., ... y Wood, E. F., 2019: A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nature Climate Change*, 9(12), 979-985.

CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA NO PACÍFICO ORIENTAL E SUA RELAÇÃO COM A PRECIPITAÇÃO EM AMÉRICA DO SUL NA ESCALA DE 2 A 10 DIAS

Luis Martin Suarez Sotelo¹, Ricardo de Camargo¹, Pedro Leite da Silva Dias¹
luis.suarez@usp.br

¹Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo (IAG-USP)

Palavras chave: Self-Organizing Maps, Monção de América do Sul, Ondas Mistas de Rossby-Gravidade

1) INTRODUÇÃO

A região que se estende da Amazônia até a bacia do rio da Prata, na América do Sul apresenta uma intensa variabilidade sazonal fortemente influenciada pela atuação do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS). O ciclo de vida do SMAS e suas variações durante a estação chuvosa são modulados por diversos fatores, como a variabilidade e a interação de seus principais componentes, entre eles, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os jatos de baixos níveis, além da convecção na Amazônia e nos Andes.

Adicionalmente, teleconexões com os hemisférios Sul e Norte também influenciam a monção por meio da propagação de ondas atmosféricas. Visando aprofundar a compreensão dos mecanismos dinâmicos associados à circulação atmosférica no contexto do SMAS, este trabalho propõe explorar as relações entre a variabilidade espaço-temporal da circulação sobre o Pacífico Oriental e a distribuição da precipitação sobre a América do Sul.

2) DADOS E METODOLOGIA

Para este estudo, foram utilizados dados diários das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento nos níveis de 200 hPa e 850 hPa, obtidas do reanálise ERA5 (Herbath et al., 2020), disponibilizado pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), abrangendo o período de 1979 a 2023. Adicionalmente, foram utilizados dados diários de precipitação provenientes do produto Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).

Os campos de função corrente foram calculados a partir dos campos de vento em 200 hPa e, posteriormente, submetidos à filtragem na banda temporal de 2 a 10 dias. Para focar no comportamento atmosférico durante o verão austral, foram selecionados os meses de dezembro, janeiro e fevereiro.

A técnica dos Mapas Auto-organizáveis (SOM, *Self-Organizing Maps*; Kohonen 1982) foi aplicada às anomalias filtradas da função corrente em 200 hPa considerando o domínio geográfico entre 20°N-30°S e 140°W-10°W com o objetivo de identificar os principais padrões da circulação. Após o treinamento da rede, os neurônios foram classificados com o método k-means, a fim de reduzir o número de padrões.

Para investigar a evolução temporal dos padrões, foi calculada a matriz de probabilidade de transição entre os padrões identificados. Por fim, foram elaboradas composições de anomalias de vento em 200 hPa e 850 hPa, além de composições de anomalias de precipitação considerando os dias associados a cada padrão identificado.

3) RESULTADOS

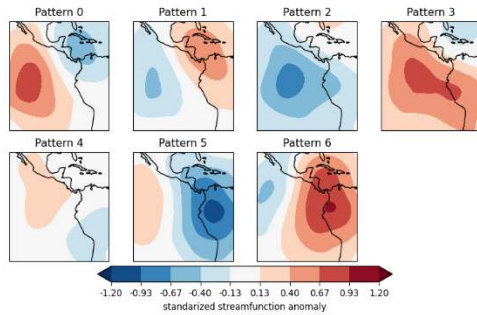


Figura 1. Anomalia padronizada da Função Corrente, filtrada na banda de 2 a 10 dias, associada a cada padrão.

Para investigar as transições entre os padrões, foi calculada a matriz de probabilidades de transição (Figura 2a). Com base nessa matriz, foi possível estabelecer a sequência mais provável de ocorrência dos padrões (Figura 2b). Essa sequência revela um deslocamento para oeste dos núcleos da função corrente, característico da propagação de ondas mistas de Rossby–Gravidade.

Foram elaboradas composições das anomalias de vento em 200 hPa para os dias associados a cada padrão. Na figura 3, observa-se a presença de trens de ondas em latitudes médias, em interação com a circulação equatorial nos núcleos dos padrões identificados. Esses resultados estão em concordância com o estudo de Braga e Magaña (2025), que apontam a forçante lateral por distúrbios de latitudes médias como um dos principais mecanismos de geração das ondas mistas de Rossby–Gravidade no oceano Pacífico tropical.

Detectar padrões de circulação é essencial para mapear as circulações do vento predominantes e as teleconexões associadas a esses padrões. A figura 1 mostra os 7 padrões de função corrente em 200 hPa filtrada na banda de 2-10 dias. Nesta figura pode-se observar uma configuração de número de onda meridional 1 com centro sobre a linha equatorial. Dependendo do padrão, nota-se a presença de um ou dois núcleos de circulação localizados em diferentes longitudes.

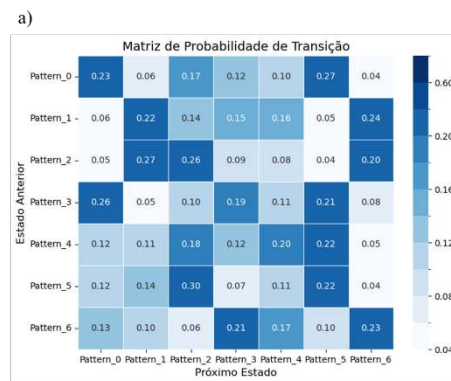


Figura 2. a) Matriz de probabilidade de transição diária entre cada padrão. **b)** Sequência mais provável da evolução temporal dos padrões de anomalia padronizada de função corrente filtrada na banda 2-10 dias.

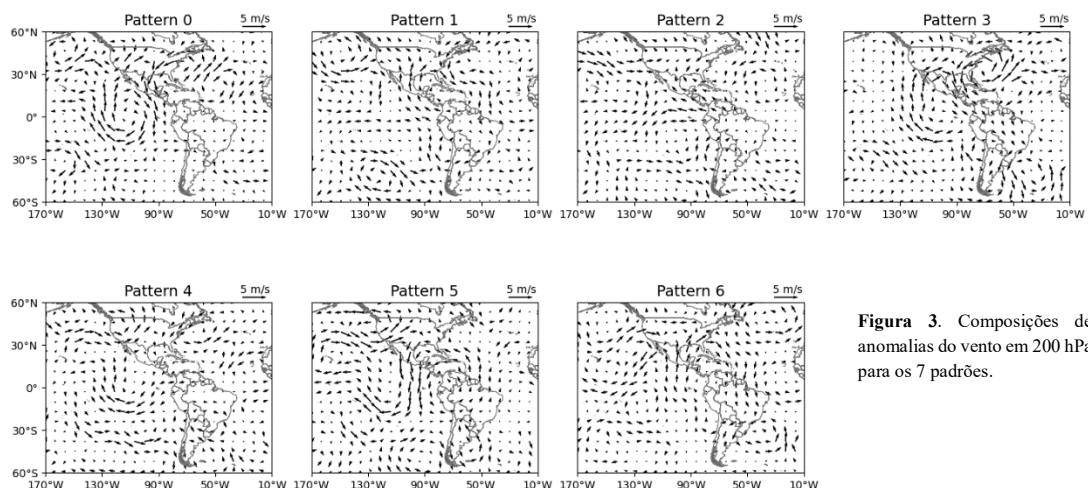
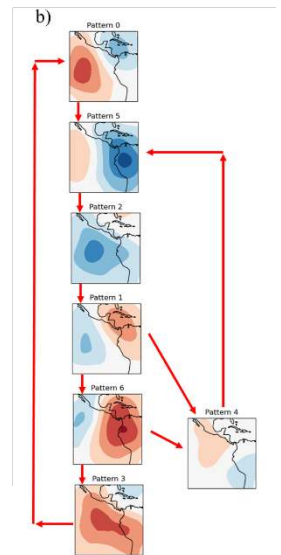


Figura 3. Composições de anomalias do vento em 200 hPa para os 7 padrões.

Foram elaboradas composições para analisar a configuração do vento em 850 hPa associada a cada padrão (figura não mostrada), com o objetivo de obter uma visão da circulação na baixa troposfera. A principal característica observada é a presença de trens de ondas em latitudes médias. Além disso, destaca-se que o padrão 3 está associado a anomalias de vento de norte em baixos níveis sobre a Bolívia, o Paraguai e o sul do Brasil, enquanto na Argentina predominam anomalias de sul, o contrário ocorre no padrão 5.

A Figura 4 apresenta as composições dos campos de anomalia de precipitação. Observa-se uma associação entre os padrões identificados e sistemas organizados de convecção, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), A zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e a convecção na região da Monção da América do Sul. As anomalias de precipitação evidenciam diferentes comportamentos espaciais, de modo que é observado a diminuição da chuva em alguns casos e aumento em outros.

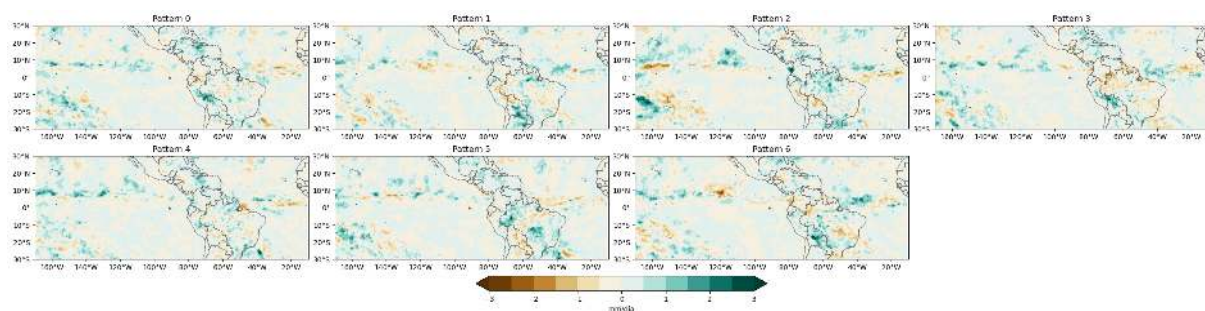


Figura 4. Composições da anomalia filtrada de precipitação na banda 2-10 dias (mm/dia) para os 7 padrões.

4) CONCLUSÕES

Na escala sinótica (2–10 dias), foi observada sobre o Pacífico Equatorial a presença de estruturas compatíveis com ondas mistas de Rossby-Gravidade, que parecem estar relacionadas à precipitação em sistemas como a ZCIT, ZCPS, ZCAS e a monção da América do Sul. Por exemplo, as composições de precipitação associadas a fases opostas, como os padrões 3 e 5, apresentam configurações distintas de anomalias.

5) REFERÊNCIAS

Braga, H. A. e Magaña, V. 2025: Atmospheric mixed Rossby–gravity waves over the tropical Pacific during the austral summer, *Weather Clim. Dynam.*, 6, 265–277, <https://doi.org/10.5194/wcd-6-265-2025>.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146 (730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Kohonen, T. 1982: Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biol. Cybern.* 43, 59–69.

PATRONES DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICOS ASOCIADOS A LA COVARIABILIDAD ENTRE PRECIPITACIÓN Y NIVELES DEL RÍO PARAGUAY

Camila Prudente^{1,2,3} Federico A. Robledo^{1,2,4}

camila.prudente@cima.fcen.uba.ar

¹Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN),
Buenos Aires, Argentina

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la
Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IFAECI) - IRL 3351-
CNRS-CONICET-IRD-UBA. Buenos Aires, Argentina

⁴Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de
Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: Cuenca del Río Paraguay, variabilidad climática,

1) INTRODUCCIÓN

El río Paraguay, principal afluente del Paraná, recorre una cuenca que incluye el Pantanal, uno de los humedales más extensos y valiosos del mundo por su biodiversidad. La dinámica del sistema fluvial genera inundaciones estacionales que afectan tanto al Pantanal como a las provincias argentinas de Chaco y Formosa, donde las crecidas del Paraguay se ven amplificadas por eventos extremos de precipitación (PP) y por el efecto de remanso del Paraná (Barros y otros, 2004, 2006). En Puerto Bermejo, Chaco, desde 1975 en adelante se observa una tendencia positiva del caudal anual tanto en el semestre cálido como en el frío (Krepper y otros, 2006). No obstante, son escasos los estudios que vinculan estos cambios con patrones atmosféricos regionales y de gran escala. Este trabajo analiza la variabilidad climática en las cuencas del río Paraguay y del alto Paraná, a partir de los niveles de río (NR) mensuales del Paraguay entre 1940 y 2022 con foco en el semestre lluvioso (septiembre a abril), con el objetivo de profundizar en la comprensión de los procesos hidrometeorológicos que controlan la dinámica regional del agua en esta zona clave del sur de América del Sur.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron series históricas de NR mensual en las siguientes estaciones hidrométricas, Ladario y de Porto Murtinho (Sistema Nacional de Información sobre Recursos Hídricos de Brasil); Bahía Negra (Dirección de Meteorología e Hidrología de Paraguay), Puerto Pilcomayo y Puerto Bermejo (Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica). También, se emplearon datos de PP mensuales de la base de datos reticulada de University of East Anglia Climatic Research Unit (CRU) Time-series, versión 4.08, a una resolución de 0,5° x 0,5° (CRU, 2024). Para identificar los patrones dominantes de covariabilidad entre PP y NR, se aplicó la técnica de Descomposición en Valores Singulares (DVS) a datos trimestrales de PP (entre Septiembre-Octubre-Noviembre (SON) y Febrero-Marzo-Abril(FMA)) y NR mensual del último mes del trimestre de PP, es decir entre Noviembre(N) y Abril (A). Esta

metodología permitió descomponer la covarianza en modos ortogonales que maximizan la correlación (R) entre ambos campos.

Por otra parte, para explorar la circulación atmosférica asociada a los modos del DVS, se emplearon datos de reanálisis ERA5 (1940–2022) (Hersbach y otros, 2023). Se realizaron regresiones lineales entre las componentes principales (PCs) de PP obtenidas de los modos del DVS y variables climáticas trimestrales como: velocidad vertical (ω) a 700 hPa, divergencia de humedad integrada verticalmente (DHIV), viento en 850 hPa, altura geopotencial en 200 y 850 hPa, radiación de onda larga saliente (OLR). Estas relaciones lineales se testearon estadísticamente a partir de un test t-Student al 95% de confianza.

3) RESULTADOS

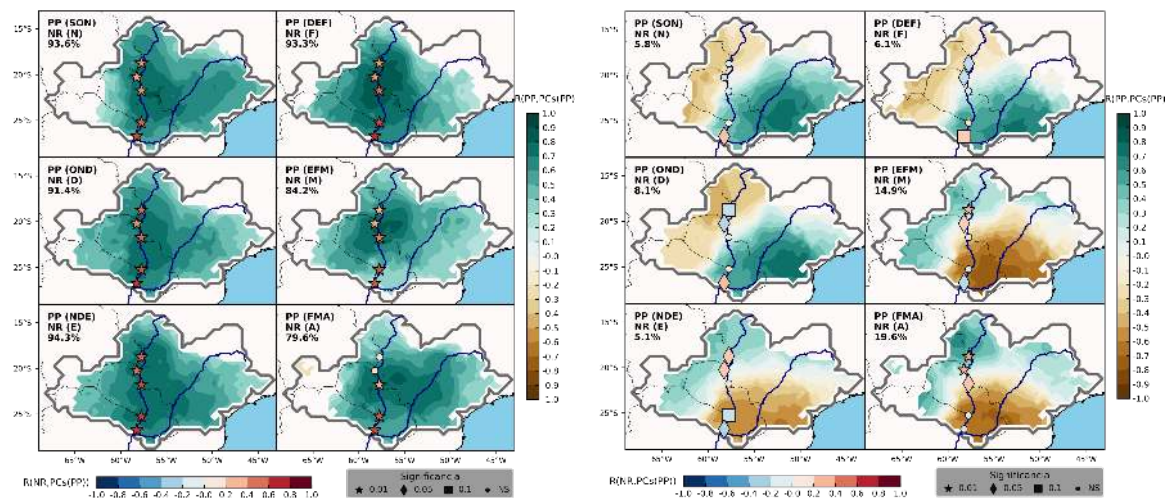


Figura 1. Primer (panel izquierdo) y segundo (panel derecho) modo de covariabilidad entre PP trimestral entre SON y FMA y NR del Paraguay mensual entre Noviembre y Abril (último mes del trimestre de PP). Campos homogéneos de PP ($R(PP, PCs(PP))$) sólo significativos en contornos con nivel de confianza al 95%. Campos heterogéneos de NR ($R(NR, PCs(PP))$) en puntos. Nivel de confianza en símbolos, 99 % (estrellas), 95 % (rombos), 90 % (cuadrados) y no significativos (círculos).

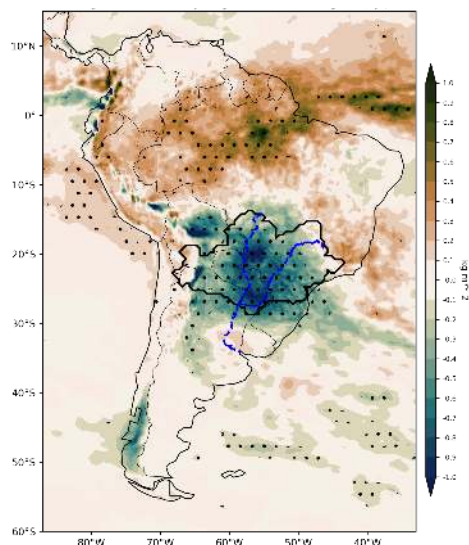


Figura 2. Campos de regresión lineal entre las PCs de PP y DHIV para representar la circulación regional y forzantes termodinámicos sobre la cuenca del Paraguay. Relaciones estadísticamente significativas en regiones con puntos al 5%.

El primer modo de covariabilidad, que explica más del 90% de la covarianza total, está caracterizado por un patrón espacial homogéneo de anomalías de PP coherente con el campo heterogéneo de NR, lo que refleja una señal conjunta dominante que controla la variabilidad interanual en ambas variables (Fig. 1). En cambio, el segundo modo, que explica cerca del

10% de la covarianza, mostró un dipolo en los campos de PP y NR, con correlaciones de signo opuesto entre el noroeste y el sureste de la cuenca del Paraguay (Fig. 1).

Por otro lado, las regresiones lineales entre las PCs del primer modo de PP del trimestre DEF (con NR de Febrero) y la DHIV mostraron relaciones estadísticamente significativas sobre la Cuenca del Paraguay con convergencia (divergencia) de humedad asociada a mayor (menor) PP, y la relación inversa se observa en la zona de Amazonía (Fig. 2). Además la regresión lineal entre las PCs de PP y la OLR global muestra relación significativa entre mayor (menor) PP sobre la cuenca y OLR negativa (positiva) sobre la cuenca y sobre el pacífico subtropical central (Amazonía, Atlántico subtropical y Pacífico subtropical oeste) (Fig. 3)

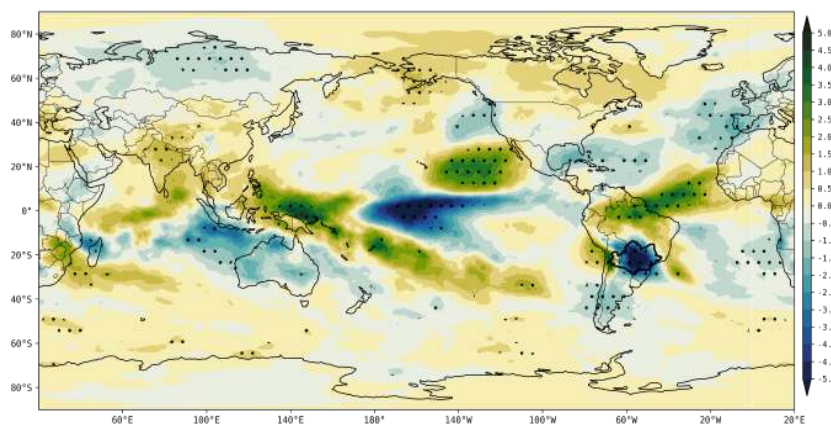


Figura 3. Campos de regresión lineal entre las PCs de PP y OLR para representar la circulación de gran escala y patrones de teleconexión vinculados a la variabilidad climática sobre la cuenca del Paraguay. Relaciones estadísticamente significativas en regiones con puntos al 5%.

REFERENCIAS

Barros, V., L. Chamorro, G. Coronel, y J. Báez 2004. The major discharge events in the paraguay river: Magnitudes, source regions, and climate forcings. Journal of Hydrometeorology - J HYDROMETEOROL, 5.

Barros, V., R. Clarke, y P. Silva Dias 2006. El cambio climático en la cuenca del plata. Proyecto SGP II 057 - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. 2023: ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)

Krepper, C., N. García, y P. Jones 2006. Paraguay river basin response to seasonal rainfall. International Journal of Climatology, 26:1267 – 1278.

University of East Anglia Climatic Research Unit; Harris, I.C.; Jones, P.D.; Osborn, T. (2024): CRU TS4.08: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.08 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901- Dec. 2023). NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, enero, 2025.

Comparando el Efecto de las Emisiones Naturales de Halógenos Sobre el Ozono Troposférico Durante Períodos Históricos

Javier A. Barrera^{1,2}, Rafael P. Fernandez^{2,3}, Alfonso Saiz-Lopez², Douglas E. Kinnison⁴
javier.barrera@unc.edu.ar. Autor/a correspondiente.

¹ Instituto de Investigaciones en Fisicoquímica de Córdoba (INFIQC - CONICET/UNC),

² Departamento de Química Atmosférica y Clima, Instituto de Físico Química Blas Cabrera, CSIC, Madrid, España, ³Instituto Interdisciplinario de Ciencias Básicas (ICB-CONICET)

⁴Atmospheric Chemistry Observations and Modelling, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, CO, USA

Palabras clave: Halógenos, Ozono, Cambio-Antropogénico.

1) INTRODUCCIÓN

El ozono troposférico es un gas traza que influye significativamente en la capacidad oxidativa de la tropósfera, el clima, la calidad del aire y por lo tanto en la salud humana [1,2]. A diferencia del ozono estratosférico, que actúa como un escudo protector frente a la radiación ultravioleta, el ozono en la troposfera es un contaminante secundario que se forma mayoritariamente por reacciones fotoquímicas entre óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y la luz solar. Aunque su formación está fuertemente influenciada por actividades antropogénicas, su destrucción química es en parte modulada por procesos naturales, entre ellos las reacciones químicas impulsadas por halógenos reactivos como el yodo (I), cloro (Cl) y bromo (Br), liberados a la atmósfera por fuentes oceánicas. Una fuente importante de halógenos son los halocarbonos de vida corta (VSL, por sus siglas en inglés), como el bromoformo (CHBr_3) y el dibromometano (CH_2Br_2), que son emitidos principalmente por el metabolismo de organismos marinos como el fitoplancton. Estos halocarbonos reaccionan en la troposfera mediante oxidación o fotólisis, liberando halógenos inorgánicos reactivos. Otra fuente relevante es la emisión oceánica directa de yodo inorgánico (HOI e I_2), resultado de la reacción entre el ozono troposférico depositado sobre el mar y el yoduro presente en la superficie del mar, generando especies como HOI e I_2 que luego se liberan a la atmósfera. La liberación de bromuro (Br^-) desde el seno de los aerosoles de sal marina (SSA) a la fase gaseosa constituye una fuente mayoritaria de bromo reactivo a la troposfera, mientras que las reacciones heterogéneas en aerosoles troposféricos que contienen cloruro (Cl^-) también constituye una fuente de cloro reactivo a la troposfera.

El objetivo de este estudio es cuantificar el impacto de los halógenos naturales sobre el ozono troposférico a escala global, comparando su efecto en condiciones preindustriales (PI) y actuales (PD). El estudio utiliza el modelo atmosférico global CAM-Chem, una versión del Community Earth System Model (CESM) que incluye una representación detallada de la química atmosférica. CAM-Chem simula procesos físicos y químicos en la atmósfera con una resolución horizontal de $1.9^\circ \times 2.5^\circ$ y 32 niveles verticales desde la superficie hasta

aproximadamente 40 km de altitud. Para ello, se implementó en CAM-Chem una representación detallada de la química de halógenos que incluyó tanto las fuentes naturales como el mecanismo químico de reacción.

2) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

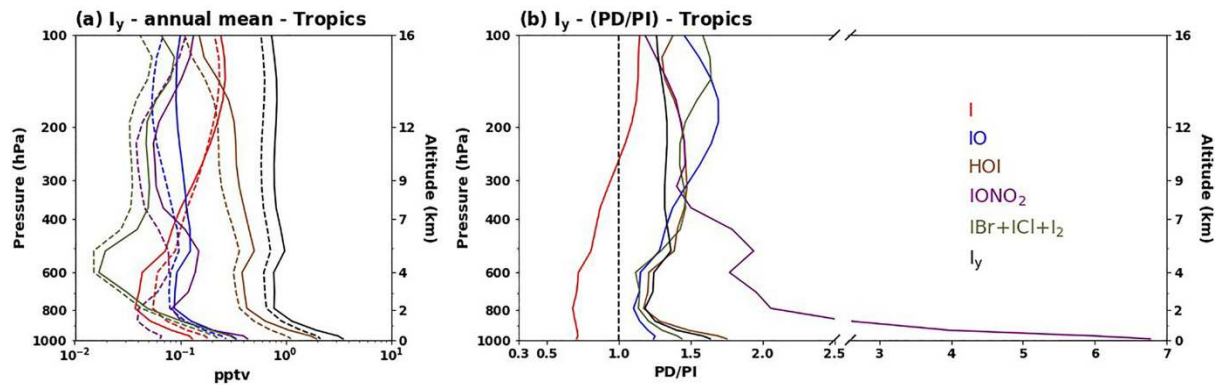


Figura 1: Ejemplo del cambio de particionado de yodo inorgánico en la transición de condiciones preindustriales (PI) a las actuales (PD).

De la Figura 1 se observa un aumento del yodo inorgánico (I_y) como respuesta al incremento en las emisiones antropogénicas de precursores (NO_x , COV_s , CO) de ozono. El incremento en los precursores de ozono, también afecta al particionado de yodo, con un claro desplazamiento de especies reactivas (ej: I e IO) a reservorios (ej: HOI e IONO_2). Esto también tienen lugar para el Br y Cl .

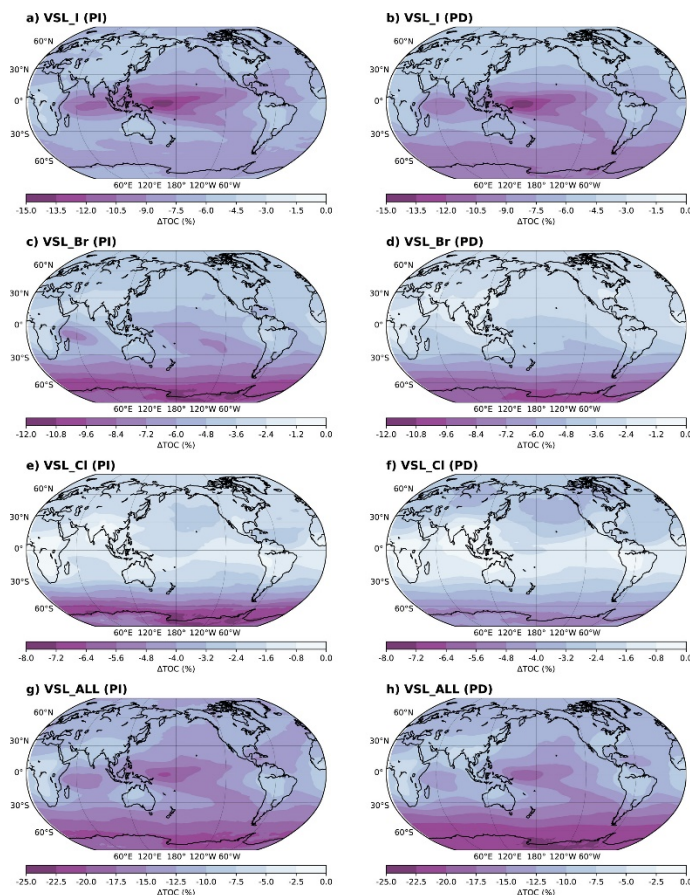


Figura 2: Mapas comparativos de cambios en la columna de ozono troposférico discriminado por halógenos individuales como así también de manera acoplada ($\text{ALL}=\text{I}+\text{Br}+\text{Cl}$).

De la Figura 2, se destaca:

- 1.El efecto del yodo (I) maximiza en la reserva cálida del Pacífico occidental, una región caracterizada por un transporte convectivo eficiente y vientos alisios débiles.
- 2.Debido al mayor reciclaje halógeno-SSA sobre el océano Antártico [3,4], el Br y Cl tienen una contribución significativa a la reducción del ozono alrededor de la Antártida.
- 3.Notoriamente, la contribución del Br y Cl se reduce sobre estas latitudes en la transición de PI a PD.

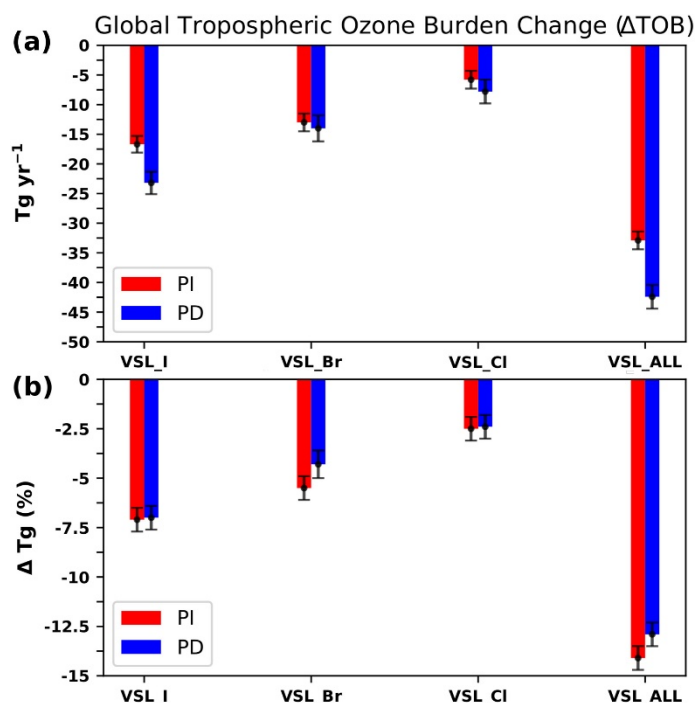


Figura 3: Cambio absoluto y relativo de la columna de ozono troposférico global (TOB) discriminado por halógenos individuales como así también de manera acoplada (ALL=I+Br+Cl).

La Figura 3 muestra que el rol del Br en la reducción del ozono troposférico es comparativamente más relevante bajo condiciones PI que en PD. En contraste, el impacto del I y Cl presenta diferencias mínimas entre ambos periodos, sin variaciones significativas desde el punto de vista cuantitativo. Un aspecto clave a destacar es que, a pesar del aumento en el presupuesto total de halógenos naturales entre el periodo PI y el PD, la eficacia de los halógenos reactivos en la destrucción de ozono disminuye. Esto se debe a un cambio en el particionado de los halógenos inorgánicos, que favorece la formación de especies de reserva menos reactivas, limitando así su capacidad de participar en reacciones catalíticas de destrucción de ozono.

Ver detalles en la presentación o publicación: <https://doi.org/10.1029/2022JD038283>

3. REFERENCIAS

1. Barrera, J., Kinnison D., Fernandez R., Lamarque J., Cuevas C., Tilmes S. and Saiz-Lopez A. *Comparing the Effect of Anthropogenically Amplified Halogen Natural Emissions on Tropospheric Ozone Chemistry Between Pre-Industrial and Present-Day*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022JD038283>
2. Fahey, D. W., & Hegglin, M. I. (2011). *Twenty questions and answers about the ozone layer: 2010 update*. World Meteorological Organization.
3. Barrera, J. A., Fernandez, R. P., Iglesias-Suarez, F., Cuevas, C. A., Lamarque, J.-F., & Saiz-Lopez, A. (2020). Seasonal impact of biogenic VSL bromine on the evolution of mid-latitude lowermost stratospheric ozone during the 21st century. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 1–31.
4. Fernandez, R. P., Kinnison, D. E., Lamarque, J.-F., Tilmes, S., & Saiz-Lopez, A. (2017). Impact of biogenic very short-lived bromine on the Antarctic ozone hole during the 21st century. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(3), 1673–1688.

IMPACTO DE EVENTOS EXTREMOS COMPUESTOS SOBRE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA BRUTA EN LA REGIÓN PAMPEANA

Belén Amancay Martorelli^{1,2}, Rodrigo Andrés Merino^{2,3}, Maria Isabel Gassmann^{2,3},
María L. Bettolli^{2,3}

martorelli.belen@inta.gob.ar rmerinomt@gmail.com

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN - UBA)

Palabras clave: Estrés térmico, déficit hídrico, SPEI, balance de carbono

1) INTRODUCCIÓN

En décadas recientes se ha registrado un aumento considerable en la frecuencia de eventos climáticos extremos. En particular, la ocurrencia simultánea de eventos de sequía y temperaturas elevadas (denominados eventos extremos compuestos) ha recibido creciente atención por su capacidad de amplificar los impactos en comparación con eventos individuales (Wu y otros, 2020). Estos fenómenos, cuya frecuencia y extensión espacial han aumentado en varias regiones del mundo (Sarhadi y otros, 2018), representan un desafío significativo para la sostenibilidad de los sistemas productivos, la salud de los ecosistemas y el bienestar de la sociedad en su conjunto.

Desde una perspectiva ecofisiológica, las plantas son especialmente vulnerables a este tipo de eventos compuestos. El estrés térmico y la escasez de agua afectan negativamente procesos clave como la fotosíntesis, la apertura de estomas y la actividad enzimática. La suma de estos efectos combinados puede generar una disminución de la eficiencia de captura de carbono de los ecosistemas, y por ende, afectar de forma considerable el balance de carbono de la biosfera.

En este trabajo se propone analizar la ocurrencia de eventos compuestos secos y cálidos en la región pampeana Argentina durante las últimas décadas y evaluar su impacto sobre la producción primaria bruta (GPP, por sus siglas en inglés) en zonas de cultivo.

2) MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio de este trabajo es la región núcleo-productiva Argentina (30-38°S y 58-66°O). Debido a que se desea estudiar el impacto de los eventos compuestos sobre los cultivos principales de la región, se analizaron únicamente los meses típicamente asociados al desarrollo vegetativo de las plantas de soja (*Glycine max*), entre diciembre y marzo.

Existen diversas metodologías que permiten caracterizar eventos compuestos, habitualmente considerando criterios basados en percentiles o umbrales fijos de temperatura y precipitación. En este trabajo se definieron como “meses con evento cálido” a aquellos en que existieran al menos 10 días al mes en que la temperatura máxima diaria supera los 32°. Se decidió utilizar este umbral ya que representa el límite superior de tolerancia a la temperatura de las plantas de soja (Ergo y otros, 2018). En el caso de los eventos secos, se utilizó el índice

SPEI (Vicente-Serrano y otros, 2010) para evaluar la disponibilidad hídrica. De esta manera, se definieron como “meses con evento seco” a aquellos en que el índice SPEI fuera inferior a -1. Por último, los “eventos compuestos” se definieron como aquellos meses en que se cumplieran los criterios de evento cálido y de evento seco de forma simultánea.

Los datos de temperatura máxima diaria se obtuvieron de la base de datos CRUv4, mientras que los de SPEI de la base SPEIbase (Vicente-Serrano y otros, 2010), ambas con una resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. De esta manera, cada punto de retícula del dominio utilizado fue clasificado en función de los criterios mencionados anteriormente en 4 categorías: “mes normal”, “mes con evento cálido”, “mes con evento seco”, mes con evento compuesto”. Este criterio se aplicó para todos los meses del periodo 2000-2022.

Para estudiar el impacto de los eventos compuestos sobre la captura de carbono se utilizó la base de datos MOD17A2HGF, que contiene estimaciones de GPP cada 8 días obtenidas a partir de datos satelitales. A partir de estas imágenes se generaron promedios mensuales de GPP, y se re-escalaron los datos mediante promedios espaciales de modo de coincidir con la retícula utilizada por las bases de datos CRUv4 y SPEIbase. Luego, se eliminaron las tendencias para el periodo analizado y se calcularon las anomalías de GPP para cada mes (Figura 1). Por último, a partir de la clasificación generada se calculó una distribución de las anomalías de GPP para cada mes y tipo de evento.

3) RESULTADOS

La Figura 1 muestra, a modo de ejemplo, la clasificación obtenida para el mes de febrero de 2018. Durante este mes la región de estudio experimentó temperaturas elevadas y un pronunciado déficit hídrico, por lo que la mayoría de los puntos de retícula fueron clasificados como “evento compuesto”. Pueden observarse anomalías negativas de GPP para toda la zona de hasta $-1.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ asociadas a este evento.

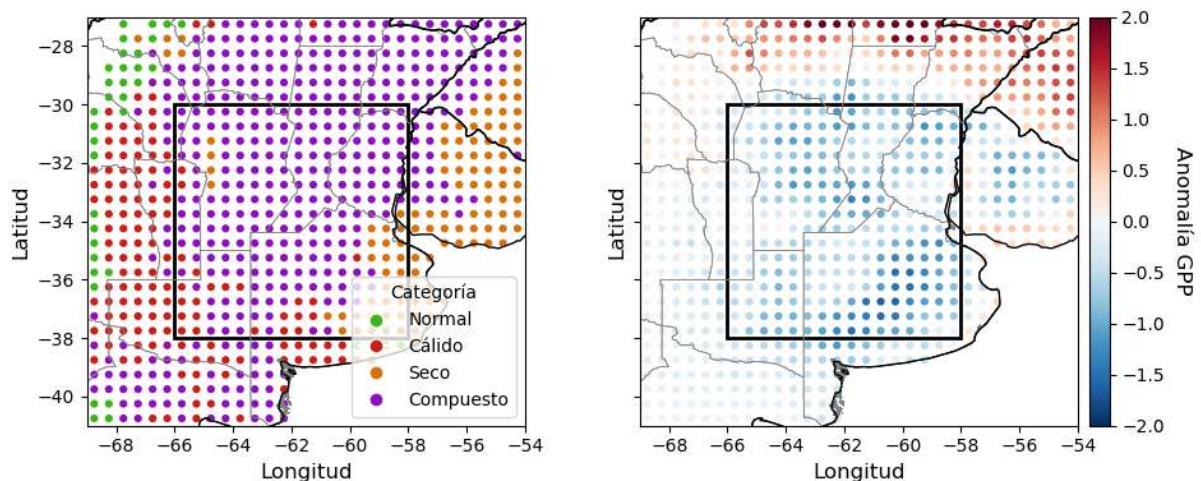


Figura 1 - Clasificación obtenida para eventos “normales”, “cálidos”, “secos” o “compuestos” (izquierda) y anomalías de GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) para el mes de febrero de 2018.

La Figura 2 muestra las distribuciones de anomalías de GPP según el tipo de evento para cada mes. Para todos los meses la mediana asociada a los eventos normales posee valores de entre 0.2 a $0.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Por otro lado, los eventos cálidos muestran anomalías de entre -0.1 y $-0.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, los eventos secos de entre 0.2 y $-0.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, y los eventos

compuestos de entre -0.6 y $-0.8 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

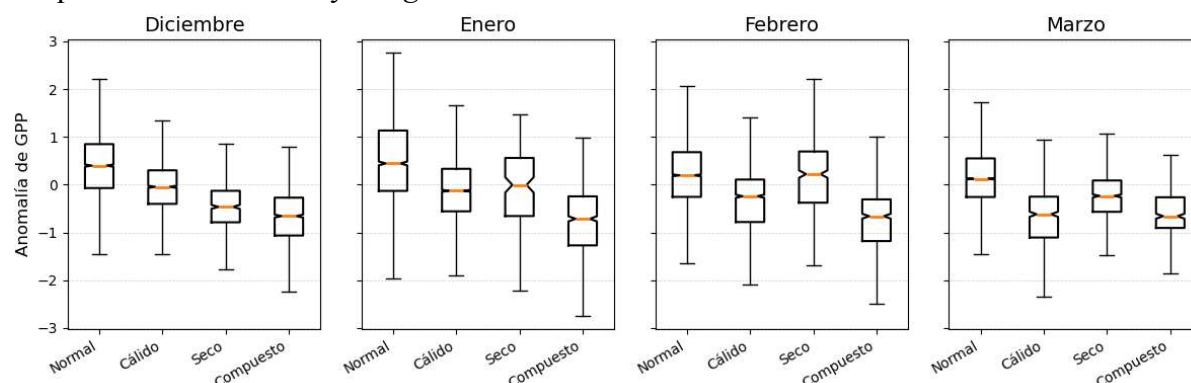


Figura 2 - Boxplot de anomalías de GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) para eventos normales, cálidos, secos y compuestos en el área de estudio en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo.

4) DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las distribuciones de anomalías de GPP obtenidas para eventos compuestos presentan, en general, valores inferiores con respecto a los asociados a eventos individuales cálidos y secos. La combinación de estrés térmico y deficiencia hídrica limita el proceso de fotosíntesis de las plantas de forma considerable. Las plantas poseen mecanismos que podrían generar una compensación que modera las caídas de GPP ante un solo tipo de estrés, como por ejemplo la apertura de estomas que permite la disipación de calor mediante transpiración vegetal o el desarrollo de raíces más profundas ante condiciones de déficit hídrico.

Las medianas de casos compuestos representan caídas de entre 16 y 18% con respecto a la captura de carbono promedio de cada mes (diciembre: $3.61 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, enero: $3.87 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; febrero: $4.30 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; marzo: $3.89 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Además, temperaturas elevadas pueden asociarse a un incremento en la emisión de carbono por la respiración de las plantas y del suelo. De esta manera, los eventos compuestos pueden generar alterar considerablemente el balance de carbono de los ecosistemas.

REFERENCIAS

- Ergo, V. V., Lascano, R., Vega, C. R., Parola, R., & Carrera, C. S. (2018). Heat and water stressed field-grown soybean: A multivariate study on the relationship between physiological-biochemical traits and yield. *Environmental and Experimental Botany*, 148, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.023>
- Sarhadi, A., Ausín, M. C., Wiper, M. P., Touma, D., & Diffenbaugh, N. S. (2018). Multidimensional risk in a nonstationary climate: Joint probability of increasingly severe warm and dry conditions. *Science advances*, 4(11), eaau3487. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau3487>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., Angulo, M., & El Kenawy, A. (2010). A new global 0.5 gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology*, 11(4), 1033-1043. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1224.1>
- Wu, Xinying & Hao, Zengchao & Tang, Qihong & Singh, Vijay & Zhang, Xuan & Hao, Fanghua. (2020). Projected increase in compound dry and hot events over global land areas. *International Journal of Climatology*. 41. <https://doi.org/10.1002/joc.6626>.

EFFECTO DEL TRANSPORTE HORIZONTAL DE HUMEDAD SOBRE AMBIENTES POTENCIALMENTE TORNÁDICOS EN CHILE CENTRO-SUR

Javier Campos^{1,2}, Martín Jacques-Coper^{1,2,3}, Julio C. Marín^{4,5}, Bradford S. Barrett⁹, Lucía Scaff¹, Raúl Valenzuela^{2,6}, Diana Pozo^{4,5}, Felipe Gutiérrez⁴, Daniel Veloso-Águila⁷, Vittorio A. Gensini⁸

jcampos2020@udec.cl. Autor/a correspondiente.

¹Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción, Chile.

²Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Concepción, Chile.

³Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental COPAS Coastal, Universidad de Concepción, Chile.

⁴Departamento de Meteorología, Universidad de Valparaíso, Chile.

⁵Centro de Estudios Atmosféricos y Cambio Climático (CEACC) U. de Valparaíso, Chile.

⁶Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins, Chile.

⁷Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

⁸Department of Earth, Atmosphere, and Environment, Northern Illinois University, DeKalb, Illinois.

⁹Independent Scholar, Raleigh (USA)

Palabras claves: tornados, parámetros convectivos, clasificación

1) INTRODUCCIÓN

Los tornados en Chile son un fenómeno meteorológico poco frecuente, aunque no inexistente. Debido a su baja recurrencia, gran parte de la población chilena no los considera dentro de las amenazas meteorológicas que afectan al país. Sin embargo, en los días 30 y 31 de mayo de 2019, se produjo un enjambre de tornados que afectó la zona centro-sur de Chile, entre 35°S y 37°S aproximadamente. En particular, dos destructivos tornados impactaron las ciudades de Los Ángeles y Concepción, marcando un hito en la literatura científica dedicada a Chile y propiciando nuevas investigaciones sobre este fenómeno, por una parte con foco en los eventos de 2019 (Barrett et al., 2020; Marín et al., 2021; Vicencio et al., 2021) y, por otra, en el estudio de aspectos climatológicos de tornados en Chile (Marín et al., 2024; Caballero-Morán y Rondanelli, 2025). Además, gracias a los esfuerzos de Bastías-Curivil et al. (2024) se tiene una base de datos de tornados y trombas marinas que cuenta con más de 80 registros desde 1554 a 2023 en su versión más reciente, los cuales fueron obtenidos a partir de revisiones de textos históricos, prensa y redes sociales.

2) OBJETIVOS Y METODOLOGÍAS GENERALES

El objetivo de esta investigación es abordar el análisis de los ambientes potencialmente tornádicos, con foco en el efecto que podría tener el transporte horizontal de humedad, caracterizado por el Vapor de Agua Integrado Verticalmente (IVT). El IVT es una variable que potencialmente incide tanto en la inestabilidad de la columna como en la estructura vertical del viento cercano a la superficie (dos principales factores que inducen tornados), y, en el centro-sur de Chile, las mayores anomalías de IVT están asociados a Ríos Atmosféricos (RAs) que impactan el continente. Los RAs tienen una mayor frecuencia en Chile centro-sur durante JJA (Viale et al., 2018), y muchas veces están asociados a eventos extremos de precipitación (Valenzuela y Garreaud, 2019).

Por una parte, se describen las condiciones sinópticas **asociadas a eventos de tornados** registrados en el listado de Bastías-Curivil et al. (2024). Por medio de un método de clasificación jerárquico –aplicado a los campos de anomalías de IVT, geopotencial en 500hPa y presión a nivel medio del mar (MSLP), en el instante más cercano a la hora del tornado–, se

clasifican los 40 eventos de tornados en 3 grupos principales. Para cada uno de los 3 grupos, se obtuvo la serie temporal promedio de los parámetros convectivos extraídos para cada evento en el punto de grilla más cercano. Los parámetros son: Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE), el cizalle vertical del viento horizontal entre 0-1km (BS01km), la Helicidad Relativa a la Tormenta en los primeros 500m (SRH500m) y el Parámetro de Tornado Significativo (STP).

Por otra parte, se estudian fechas en las que los RAs tocan tierra en distintas bandas latitudinales del área de estudio (32-36°S, 36-40°S y 40-44°S). A diferencia del párrafo anterior, estas fechas **no están asociadas necesariamente a eventos de tornados**.

Finalmente, se realizan compuestos espaciales de IVT y parámetros convectivos en función de la banda latitudinal a la que llega cada RA y de su inclinación en el momento de tocar tierra, empleando la metodología de Valenzuela y Garreaud (2019).

3) RESULTADOS PRELIMINARES Y FIGURAS

La *Figura 1* muestra los resultados obtenidos para uno de los tres principales grupos obtenidos en el método de clasificación. En 1a muestra el promedio espacial de las anomalías de IVT y MSLP georeferenciadas alrededor de los tornados (triángulo rojo invertido). Este compuesto presenta una anomalía ciclónica de presión con centro al sur-oeste del tornado, y un máximo del IVT justo al norte. En 1b se observa como el transporte de humedad se maximiza alrededor de la hora t_0 , y en su estructura vertical se evidencian dos núcleos, alrededor de 900hPa y 700hPa. En 1c se observan parámetros convectivos y el IVT (y sus componentes zonal y meridional) que se maximizan en magnitud cerca de t_0 . La señal del STP muestra un mínimo muy localizado alrededor de la hora t_0 y los demás parámetros aumentan de forma gradual hasta alcanzar su máximo cerca de la hora de los tornados.

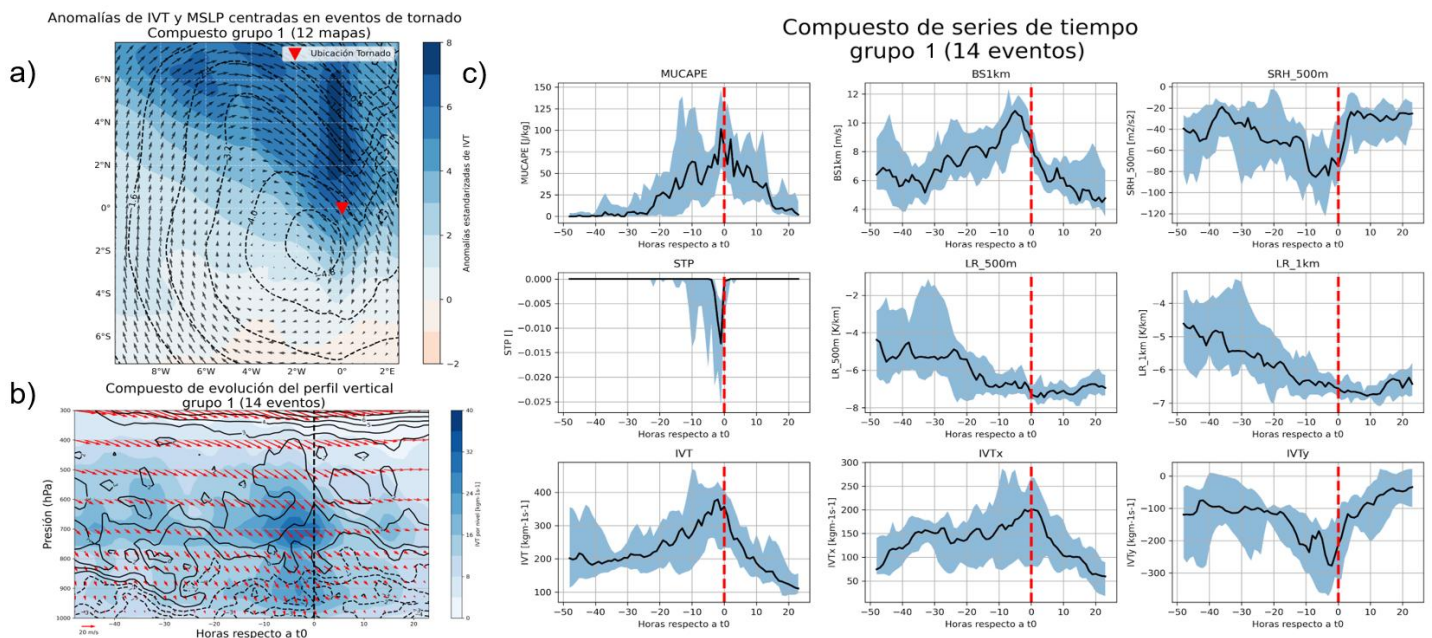


Figura 1: Señales correspondientes a uno de los grupos obtenidos por el método de clasificación jerárquica. En el panel a) se muestra el compuesto espacial de las anomalías del IVT (colores) y presión a nivel del mar (contornos) en el instante más cercano a la ocurrencia del tornado, t_0 . No se muestra la línea de costa debido a georeferenciación alrededor de los tornados. El panel b) muestra la evolución temporal del perfil de transporte de humedad y la inestabilidad cuantificada como $\frac{d\theta_e}{dz}$ en horas previas y posteriores a t_0 . La subfigura c) muestra la evolución temporal de la mediana (línea negra) y rango intercuartil (sombreado) de los parámetros convectivos.

La *Figura 2* muestra el análisis de compuestos para días asociados a la llegada de RAs al continente. Se tienen resultados tanto para eventos inclinados y zonales, discriminando en función del ángulo con el que tocan tierra, pero acá se muestran solo los mapas para eventos **inclinados** de RAs. En 2a se promedian los eventos que llegan entre 32-36°S, mostrando una señal de STP negativa (favorable para el potencial tornádico) al sur del punto de llegada de los RAs. En 2b (36-40°S) la señal de STP muestra dos mínimos, uno dentro de la región de llegada de los RAs, y el otro más al sur pero aledaño a la costa. En 2c (40-44°S) la señal promedio de STP también muestra dos mínimos, pero ambos dentro de la región de llegada de los RAs, uno cerca de la costa, y el otro en sectores cordilleranos.

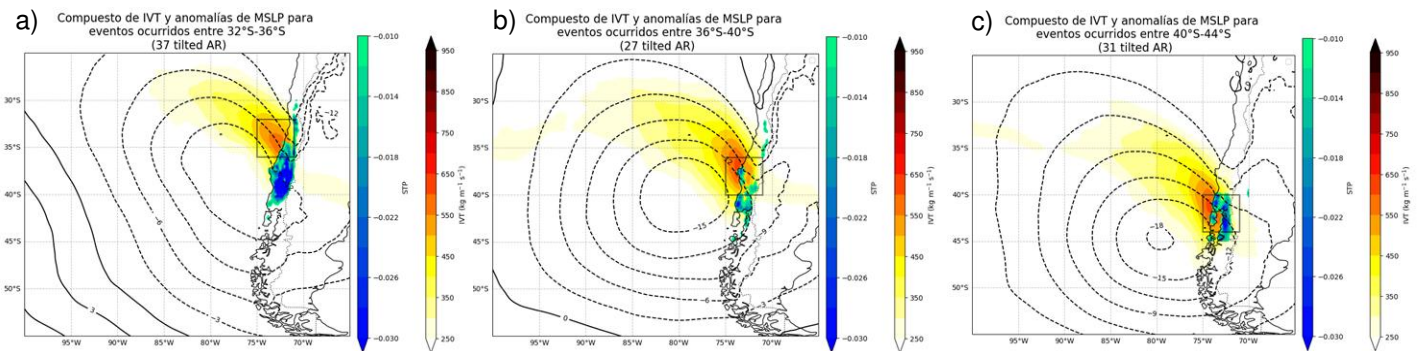


Figura 2: Compuestos de IVT (colores anaranjados), anomalías estandarizadas de MSLP (contornos) y STP (escala verde-azul) durante RAs inclinados ocurridos en las distintas bandas latitudinales. En los paneles a), b) y c) se muestran los compuestos de las regiones 32-36°S, 36-40°S y 40-44°S, respectivamente. Las cajas muestran la banda latitudinal asociada a cada región.

AGRADECIMIENTOS

- Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)2 (ANID/FONDAP/1523A0002).
- NLHPC (ECM-02)
- “Multi-scale study of environments favorable for severe thunderstorms and tornadoes in Chile” (FONDECYT 1211898)

REFERENCIAS

- Bastías-Curivil, C., Rondanelli, R., Vicencio, J., Matus, F., Caballero-Morán, V., Munoz, F., et al. (2024):** Tornadoes and Waterspouts in Chile / Tornados y Trombas en Chile. figshare. Dataset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25119566.v4>
- Barrett, B. S., Marin, J. C., y Jacques-Coper, M. (2020):** A multiscale analysis of the tornadoes of 30–31 May 2019 in south-central Chile. *Atmospheric Research*, 236, 104811.
- Caballero-Morán, V., y Rondanelli, R. (2025):** Tornado seasonality in central-southern Chile. *Geophysical Research Letters*, 52(1), e2024GL110900.
- Marín, J. C., Barrett, B. S., y Pozo, D. (2021):** The tornadoes of 30–31 May 2019 in south-central Chile: Sensitivity to topography and SST. *Atmospheric Research*, 249, 105301.
- Marín, J. C., Gutiérrez, F., Gensini, V. A., Barrett, B. S., Pozo, D., Jacques-Coper, M., y Veloso-Aguila, D. (2024):** Climatological aspects of notable tornado events in Chile. *Monthly Weather Review*, 152(8), 1803-1819.
- Valenzuela, R. A., & Garreaud, R. D. (2019):** Extreme daily rainfall in central-southern Chile and its relationship with low-level horizontal water vapor fluxes. *Journal of Hydrometeorology*, 20(9), 1829-1850.
- Viale, M., Valenzuela, R., Garreaud, R. D., & Ralph, F. M. (2018):** Impacts of atmospheric rivers on precipitation in southern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 19(10), 1671-1687.
- Vicencio, J., Rondanelli, R., Campos, D., Valenzuela, R., Garreaud, R., Reyes, A., y Nicora, G. (2021):** The Chilean tornado outbreak of May 2019: synoptic, mesoscale, and historical contexts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(3), E611-E634.

DOWNSCALING DINAMICO DE SIMULACIONES CMIP6 DE ALTA RESOLUCION EN LA REGION DEL RÍO DE LA PLATA EMPLEANDO UN MODELO NUMERICO DE MESOESCALA

Lucas Zapata¹, Guillermo Berri^{1,2}
lezapata@fcaglp.unlp.edu.ar

¹ Grupo de Modelado Numérico de la Atmósfera
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas – Universidad Nacional de La Plata
² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Palabras clave: validación, temperatura, viento

1. INTRODUCCION

El proyecto Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) es un proyecto de cooperación internacional organizado por el Programa Mundial del Clima que propone un marco experimental estándar para estudiar los resultados de los modelos acoplados de circulación general atmósfera-océano. La fase más reciente del proyecto (CMIP6) incorpora los últimos avances en el modelado climático (Eyring et al., 2016) con el propósito de evaluar las fortalezas y debilidades de los modelos climáticos y contribuir a mejorar y orientar el desarrollo de modelos futuros.

El High Resolution Model Intercomparison Project –HighResMIP- (<https://highresmip.org/>), en el marco de trabajo de CMIP6, implementa un enfoque multi-modelo para estudiar el impacto que tiene la resolución horizontal de los mismos. El proyecto realizó simulaciones climáticas históricas del período 1950-2014 resultantes del forzamiento de los modelos con observaciones. La resolución de los modelos del proyecto es 20-50 km para la atmósfera y 0.25 km para el océano, pero las salidas de los mismos que están disponible en los repositorios del proyecto ofrecen una resolución considerablemente menor, alrededor de 100 km.

Este trabajo tiene como objetivo analizar la capacidad de las simulaciones climáticas HighResMIP para representar las condiciones en escala local en la región del Río de la Plata en donde las observaciones meteorológicas muestran marcados contrastes entre sí, como consecuencia del ciclo diario de la diferencia de temperatura superficial entre la tierra y el agua y la geometría de las costas del río. Para superar esta limitación de la baja resolución disponible de modelos HighResMIP, el presente estudio implementa un downscaling dinámico mediante la realización de una serie de pronósticos diarios con el modelo de capa límite en mesoescala BLM, con condiciones iniciales y de borde definidas a partir de un conjunto selecto de simulaciones HighResMIP.

2. METODOLOGIA

El BLM es un modelo numérico de capa límite en mesoescala, seco e hidrostático, que resuelve las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento, masa y energía, empleando una clausura de turbulencia de primer orden (Berri et al., 2010; Berri and Dezzutti, 2020). Se seleccionó un conjunto de 5 modelos HighResMIP con al menos 5 realizaciones (ver Tabla 1) y salidas cada 3 horas que se emplearon para definir las condiciones iniciales y de borde, el viento en el tope de la capa límite y la temperatura en superficie, que requiere el modelo BLM para su ejecución.

El dominio de BLM es un rectángulo de 400 km (longitud) y 300 km (latitud) centrado en el Río de la Plata. Los datos de viento y temperatura de HighResMIP, con resolución del orden de 100 km, se interpolaron espacialmente a la resolución de 5 km de BLM mediante el

modelo HighRes IP	sigla	lat x long (°)	institución
AWI-CM-1-1-MR	AWI	0.94 x 0.94	Alfred Wegener Institute, Germany https://www.awi.de/en
CMCC-CM2-SR5	CM2	0.94 x 1.25	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Italy - https://www.cmcc.it/
EC-Earth-Consortium EC-Earth3	EC	0.70 x 0.70	EC-Earth consortium https://ec-earth.org/consortium/
MPI-M.MPI-ESM1-2-HR	MPI	0.94 x 0.94	Max-Planck-Institut für Meteorologie, Germany https://mpimet.mpg.de/en/homepage
MRI-ESM2-0	MRI	1.12 x 1.12	Meteorological Research Institute, Japan https://www.mri-jma.go.jp/index_en/

Tabla 1: Lista de modelos HighResMIP utilizados.

forzado por HighResMIP y se seleccionó el período 1996-2001, ya que las series de observaciones trihorarias de las 8 estaciones meteorológicas de la región (ver Tabla 2), que se emplean para analizar el resultado, están más completas.

Con las salidas de BLM y HighResMIP se generaron las respectivas secuencias trihorarias de temperatura y viento mediante la interpolación por el método de Cressman entre los cuatro puntos de retículo que rodean a cada estación meteorológica. Luego se promedió el resultado de las 5 realizaciones de cada modelo y en las horas en que todas las estaciones meteorológicas disponían simultáneamente de datos se comparó la temperatura máxima diaria (adoptada como la observación de la hora local 15), la temperatura mínima diaria (adoptada como la observación de la hora local 06), y la dirección del viento, con las respectivas observaciones.

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La Figura 1 muestra el diagrama de Taylor resultado de la simulación de la temperatura máxima diaria del periodo 1996-2001 en las 8 estaciones meteorológicas de la región, promedio de las 5 realizaciones. En todas las estaciones el coeficiente de correlación con las observaciones que se obtiene con BLM es similar o levemente mayor, y el RMSE de BLM es también similar o levemente menor, que los de los correspondientes modelos HighResMIP. En todos los casos el desvío standard es similar al de las observaciones, aunque los de BLM son en general levemente menores que los de HighResMIP. En el caso de la temperatura mínima, los resultados son similares a los de temperatura máxima, aunque con menor

método de Cressman, mientras que las secuencias trihorarias HighResMIP en cada punto se interpolaron mediante funciones spline al paso de tiempo de integración de BLM de 30 segundos.

Se realizó una serie de pronósticos diarios con BLM

estación	sigla	% datos
Ezeiza	EZE	96.0
Aeroparque	AER	96.1
La Plata Aero	LPA	83.0
Palomar	PAL	73.0
San Fernando	SFO	93.0
Punta Indio	PIN	85.3
Carrasco	CAR	90.6
Colonia	COL	92.5

Tabla 2: Estaciones utilizadas.

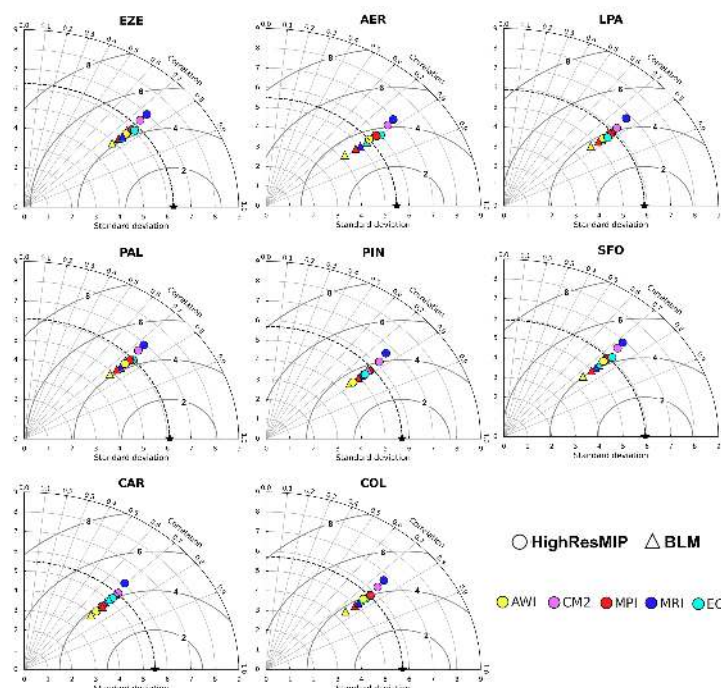


Figura 1: Diagrama de Taylor del resultado de la simulación de temperatura máxima diaria obtenida con las simulaciones de los 5 modelos HighResMIP de la Tabla 1, y con BLM forzado con HighResMIP, en 8 estaciones meteorológicas de la región del Río de la Plata de la Tabla 2, promedio del periodo 1996-2001 y de las 5 realizaciones.

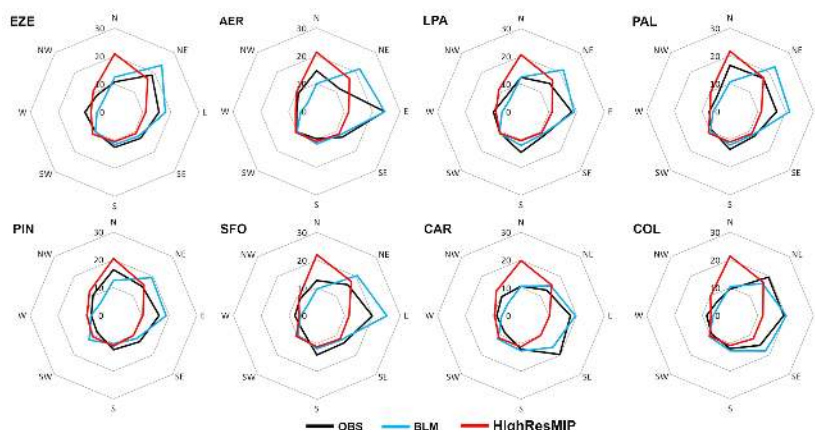


Figura 2: Frecuencias porcentuales de dirección del viento de las simulaciones de los 5 modelos HighRes MIP (línea roja) de la Tabla 1, de BLM (línea azul) forzado con HighRes MIP, y las observaciones (línea negra) en las 8 estaciones meteorológicas de la región del Río de la Plata de la Tabla 2, promedio del periodo 1996-2001 y de las 5 realizaciones.

SE. La distribución de frecuencias obtenida con BLM coincide en general y con razonable exactitud, con las observadas y, además, aciertan en identificar a las direcciones dominantes. Los resultados obtenidos con HighResMIP muestran, en cambio, que la distribución de frecuencias es prácticamente idéntica en toda la región, con N como sector dominante, en clara contradicción con las observaciones.

La conclusión es que el downscaling dinámico de las simulaciones HighResMIP realizado con BLM resulta satisfactorio y demuestra tener una buena capacidad para representar las principales características de la circulación atmosférica en capas bajas en la región del Río de la Plata con razonable exactitud. Además, el procedimiento es muy eficiente ya que un pronóstico de 24 horas de BLM forzado por HighResMIP demora 5 minutos de ejecución en un servidor standard.

RECONOCIMIENTOS: Los datos de Ezeiza, Aeroparque, La Plata Aero, Palomar, San Fernando y Punta Indio fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina. Los datos de Colonia y Carrasco fueron proporcionados por el Instituto Uruguayo de Meteorología.

REFERENCIAS

- Berri GJ, Sraibman L, Tanco R, Bertossa G, 2010:** Low-level wind field climatology over the La Plata River region obtained with a mesoscale atmospheric boundary layer model forced with local weather observations. *J App Meteorol Climatol* 49:1293–1305.
- Berri GJ, and Dezzutti M, 2020:** A sea breeze case study in the La Plata River region using local observations, satellite images and model simulations, *Boundary Layer Meteorology*, 177, 1, 123-147 doi:10.1007/s10546-020-00548-3.
- Eyring V, Bony S, Meehl GA, Senior CA, Stevens B, Stouffer RJ, Taylor KE, 2016:** Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev* 9:1937–1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.

disparidad entre los diferentes modelos.

La Figura 2 muestra la distribución porcentual de las frecuencias de dirección del viento en las 8 estaciones meteorológicas de la región, promedio de las 5 realizaciones durante el periodo 1996-2001. Las observaciones muestran que la dirección del viento dominante varía considerablemente entre puntos de la región, por ejemplo, en PAL y PIN es N, en EZE y COL es NE, AER es E y en CAR es

ACTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA COMO PROXY PARA LA DETECCIÓN DE EVENTOS METEOROLÓGICOS SEVEROS

Constanza I. Villagrán Asiares^{1,2,3}, M. Gabriela Nicora^{1,2,3,4}, Paola Salio^{3,5,6}, Hernán Bechis^{3,5,6}, Vito Galligani^{3,5,6}, Eldo E. Ávila⁷, Amalia Meza^{2,8}
villagranasiares.constanza@gmail.com. Autora correspondiente.

¹Centro de Investigaciones en Láseres y sus Aplicaciones, Unidad de Investigación y Desarrollo Estratégico para la Defensa, CONICET. Villa Martelli, Argentina

²Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP), La Plata, Argentina.

³CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

⁴Departamento en Láseres y Aplicaciones, CITEDEF. Villa Martelli, Argentina.

⁵Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO). Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Buenos Aires, Argentina.

⁶Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

⁷Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FAMAF), Universidad Nacional de Córdoba (UNC). CONICET, Córdoba, Argentina.

⁸Laboratorio MAGGIA (FCAGLP-UNLP). CONICET, Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: Lightning Jumps, SESA, WWLLN

1) INTRODUCCIÓN

En las tormentas convectivas es frecuente observar un aumento rápido en la tasa de descargas eléctricas atmosféricas unos minutos antes del desarrollo del tiempo severo, estos aumentos abruptos son denominados Lightning Jumps (LJ). Estos LJ pueden anticipar la ocurrencia de eventos meteorológicos severos con hasta 45 minutos de antelación (Williams et al., 1999; Schultz et al., 2011; Villagrán Asiares, C. I., 2022.)

En 2023 se creó la Base de Datos de Amenazas Meteorológicas y sus Impactos de América del Sur (SAMHI) (<https://samhi.cima.fcen.uba.ar/>) es un proyecto que busca comprender mejor las condiciones atmosféricas que generan los eventos severos, desarrollar proxis útiles para la detección remota de tormentas y sus peligros asociados, cuantificar su previsibilidad y establecer un sistema de alerta temprana en el contexto del cambio climático. (Salio, P. et al., 2024).

Dado que la recopilación de reportes, especialmente en zonas rurales, constituye una tarea desafiante, este estudio se propone enriquecer la base SAMHI e identificar zonas vulnerables mediante el uso combinado de reportes de eventos severos y datos de LJ.

2) METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos, se utilizaron reportes de granizo, tornados y ráfagas intensas correspondientes al período 2018–2023, obtenidos de la base SAMHI. Estos datos se combinaron con información sobre Lightning Jumps derivada del procesamiento de AEA entre 2009 y 2023.

Los LJ fueron calculados mediante el procesamiento de datos de actividad eléctrica atmosférica (AEA) provenientes de la red World Wide Lightning Location Network (WWLLN) utilizando el algoritmo Georayos (<https://georayos.citedef.gob.ar/>). Este algoritmo aplica el método de

clusterización DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) para agrupar descargas eléctricas y detectar aumentos significativos en la tasa de descargas. (Nicora et al., 2015)

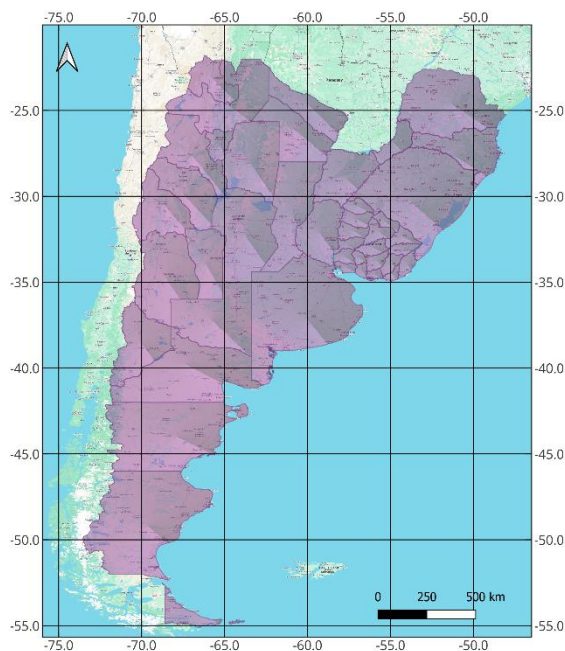


Figura 1: Mapa del Sudeste de América del Sur (SESA) con la zona de estudio resaltada en color violeta.

Este estudio se realizó para la región del Sudeste de Sudamérica (SESA), principalmente para Argentina, Uruguay y Sur de Brasil (Figura 1). Esta área se destaca como una de las regiones del mundo con mayor frecuencia de tormentas severas, las cuales generan un gran número de reportes de eventos severos tales como granizo, tornados, inundaciones y fuertes ráfagas de viento (Zipser et al., 2006).

El análisis se centró en evaluar la presencia o ausencia de LJ ante cada evento severo reportado, con el fin de estudiar la relación entre ambos. Posteriormente, se aplicó el algoritmo de clusterización K-Means para identificar las regiones con mayor propensión al tiempo severo.

3) RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran una correspondencia significativa entre la ocurrencia de Lightning Jumps y los eventos meteorológicos severos, con un tiempo promedio de anticipación de 29.3 minutos.

Más del 60 % de los LJ precedieron eventos severos, con tasas de correspondencia específicas del 70 % para granizo, 60 % para tornados y 50 % para ráfagas intensas. Las regiones con mayor propensión al tiempo severo fueron Uruguay, el norte y centro de Argentina y el sur de Brasil.

La aplicación del algoritmo K-Means a los datos de LJ y Reportes, permitió agrupar las provincias en función de la frecuencia y el tipo de evento severo. Además, este análisis posibilitó identificar nuevas zonas vulnerables previamente subestimadas, lo cual podría deberse a factores como la baja densidad poblacional, dificultades en el acceso a medios de comunicación y una limitada cultura de reporte en ciertas áreas rurales.

4) CONCLUSIONES

Este estudio demuestra la utilidad de integrar datos de Lightning Jumps para mejorar la detección temprana de eventos meteorológicos severos en América del Sur. La incorporación de estos indicadores, junto con la base de datos SAMHI, no solo refuerza las capacidades predictivas en una de las regiones más afectadas por tormentas intensas a nivel mundial, sino que también permite identificar zonas de riesgo subrepresentadas en los registros actuales.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer a la WWLLN, una colaboración de alrededor de 50 universidades e instituciones, por proveer la localización de las descargas eléctricas utilizadas en este trabajo, así como a IRL 3351IFAECI y UNIDEF (MINDEF-CONICET) por brindar las condiciones y el apoyo necesario para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

Nicora, M. G., Quel, E. J., Bali, J. L., Acquesta, A., Vidal, L., Bürgesser, R. E., ... & de Schwarzkopf, M. L. A. (2015): GeoRayos a new application for severe weather warning. In 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA) (pp. 165-168). IEEE.

Salio, P., Bechis, H., Ribeiro, B. Z., de Lima Nascimento, E., Galligani, V., Garcia, F., ... & Villagrán Asiares, C. I. (2024): Toward a South American high-impact weather reports database. Bulletin of the American Meteorological Society, 105(7), E1204-E1217.

Schultz, C. J., Petersen, W. A., & Carey, L. D. (2011): Lightning and severe weather: A comparison between total and cloud-to-ground lightning trends. Weather and forecasting, 26(5), 744-755.

Villagrán Asiares, C. I. (2022): Caracterización de la Actividad Eléctrica Atmosférica en la zona central de Argentina por medio de las variaciones en la tasa de descargas eléctricas atmosféricas (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

Williams, E., Boldi, B., Matlin, A., Weber, M., Hodanish, S., Sharp, D., ... & Buechler, D. (1999): The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. Atmospheric Research, 51(3-4), 245-265.

Zipser, E. J., Cecil, D. J., Liu, C., Nesbitt, S. W., & Yorty, D. P. (2006): Where are the most intense thunderstorms on Earth?. Bulletin of the American Meteorological Society, 87(8), 1057-1072.

EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS EN CHILE: ¿QUÉ INFORMACIÓN PRÁCTICA PARA SU PRONÓSTICO PODEMOS EXTRAER DE SEÑALES DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA INTRAESTACIONAL?

**Martín Jacques-Coper^{1,2,3}, Christian Segura^{1,2}, Javier Campos^{1,2},
Paloma Navarrete^{1,2}, Natalia Ruiz^{1,2}, Álvaro Constanzo^{2,4,5}**
martinjacques@udec.cl

¹Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

²Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

³Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental COPAS Coastal, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

⁴Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Chile

⁵Dirección Meteorológica de Chile, Chile

Palabras clave: Olas de calor, Tornados, Oscilación de Madden-Julian

1) INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de diversos eventos meteorológicos extremos en Chile concita creciente interés social, debido –entre otros motivos– a sus potenciales impactos, sus causas y posibles formas de pronóstico, y su eventual relación con el cambio climático de origen antrópico. En esta contribución nos enfocamos en el rol que puede tener la variabilidad climática en la escala sinóptica-intraestacional (es decir, en escalas de pocos días a algunas semanas) en modular ambientes propicios para eventos meteorológicos extremos en Chile centro, sur y austral.

2) TIPOS DE EVENTOS CUBIERTOS Y MARCO CONCEPTUAL

Mediante una síntesis de estudios realizados en los últimos años, describimos resultados científicos que contribuyen a generar un esquema sistemático de posibles relaciones causales entre forzantes, teleconexiones y diversos eventos meteorológicos extremos. En cuanto a forzantes, nos enfocamos particularmente en la Oscilación de Madden-Julian (MJO, el principal modo de variabilidad intraestacional tropical) y su posible interacción con fenómenos extra-tropicales. Específicamente, mostramos un marco conceptual para abordar el desarrollo de algunas olas de calor de verano y el desarrollo de índices de monitoreo (Jacques-Coper et al., 2021), con ejemplos de su aplicación práctica a eventos concretos, como es el caso de floraciones algales nocivas en Chiloé en enero-febrero de 2021 (Segura & Jacques-Coper, *in prep.*) y los incendios de la Región de Valparaíso en febrero de 2024 (Jacques-Coper & Segura, 2024). Además, con foco en el invierno en Chile central, abordamos resultados novedosos en torno a la modulación de heladas (Hernández, 2021), olas de calor (Muñoz, 2025), y tormentas, incluyendo las que presentan condiciones potencialmente tornádicas (Campos, 2025; Navarrete, 2025). Finalmente, recalcamos oportunidades y limitaciones asociadas a aplicaciones de estos resultados, especialmente en el contexto de la generación de pronósticos y posibles alertas. En particular, discutimos el rol de la interacción entre la escala sinóptica y la intraestacional, y proponemos ideas para abordar este aspecto.

3) UN EJEMPLO: VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL & AMBIENTES TORNÁDICOS EN EL SUR DE CHILE

Los tornados y las trombas marinas son manifestaciones de tiempo severo propios del centro-sur de Chile, y así da cuenta el largo registro directo e indirecto de estos eventos, que cubre varios siglos (Bastías-Curivil et al., 2024). Como han demostrado recientes estudios (Caballero-Morán & Rondanelli, 2025; Marín et al., 2024), mayo y junio son meses donde se concentra la frecuencia de tornados y trombas marinas históricas, y esto corresponde a que la combinación de vorticidad (producto del cizalle del viento a distintos niveles) y la inestabilidad se maximizan en este periodo. Esto concuerda preliminarmente con el más reciente evento registrado el 25 de mayo de 2025 en Puerto Varas, Región de Los Lagos.

En la escala sinóptica, una configuración predominante asociada a tornados que se generan en el área de inestabilidad postfrontal consiste en una depresión en superficie que promueve viento del norte y advección cálida, bajo una vaguada en niveles medios, que induce advección fría y viento del oeste (Vicencio et al., 2021). En conjunto, estos procesos desencadenan vorticidad y convección. En un contexto intraestacional, las fases 8-1-2 activas de la MJO promueven precipitación asociada a actividad frontal de invierno en esta región (Barrett et al., 2012) y las fases 1-2 están particularmente asociadas a eventos históricos de tornados (e.g. Barrett et al., 2019).

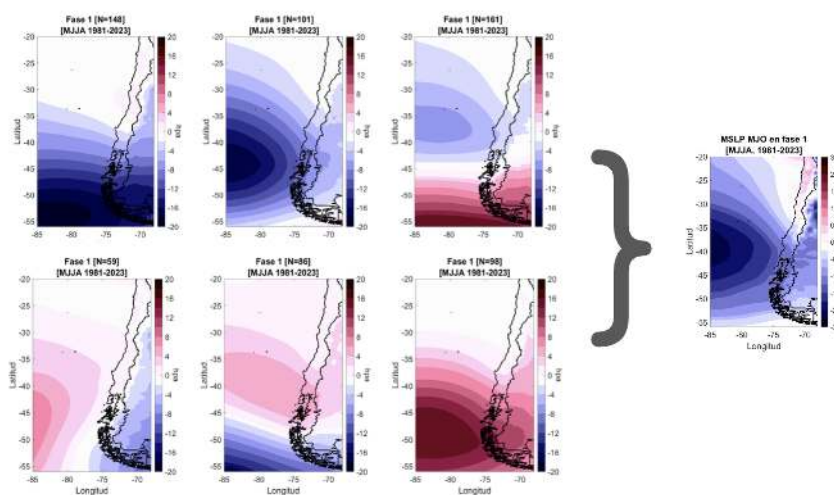


Figura 1: Compuestos de anomalías de presión a nivel del mar de días clasificados como fase 1 activa de la MJO. El panel derecho muestra el campo promedio de todos los días, mientras que los 6 paneles de la izquierda corresponden a un agrupamiento de dichos días empleando el método k-means. Datos: reanálisis ERA5; periodo mayo-agosto de 1981-2023.

Empleando datos del reanálisis ERA5 para el periodo mayo-agosto de 1981-2023, la Figura 1 exhibe el compuesto anomalías de presión a nivel del mar de todos los días clasificados como fase 1 activa de la MJO (panel derecho). En efecto, se aprecia un patrón sinóptico característico de perturbaciones baroclínicas de latitudes medias, que incluye la configuración sinóptica asociada a tormentas potencialmente tornádicas. Sin embargo, un desglose mediante agrupamiento k-means permite identificar que tal campo de anomalías resulta del promedio ponderado de configuraciones sinópticas diferentes, que corresponden, a su vez, a dos subgrupos: uno de anomalías ciclónicas (concordantes con el promedio global) y otro, de anomalías anticiclónicas (que no promoverían situaciones potencialmente tornádicas).

4) DISCUSIONES

Si se pretendiera emplear la MJO como una fuente de predictibilidad intraestacional de

configuraciones sinópticas favorables para eventos meteorológicos extremos, tales como tormentas severas y potencialmente tornádicas, el resultado presentado en la Figura 1 resalta la ambigüedad que se enfrenta al considerar sólo patrones sinópticos asociados a una fase activa particular de este modo de variabilidad. En efecto, los patrones sinópticos sobre latitudes medias resultan eventualmente de la superposición constructiva o destructiva de señales de origen tropical y extra-tropical en la escala sinóptica e intraestacional. Por lo tanto, para un mejor diagnóstico y pronóstico de configuraciones sinópticas particulares, es necesario considerar la forma en que se desarrollan las teleconexiones de origen tropical –en el sentido de Schreck et al. (2013)–, además de incluir el uso de índices que cuantifiquen la variabilidad extra-tropical.

Agradecimientos: Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)2 (ANID/FONDAP/1523A0002), Center for Oceanographic Research COPAS COASTAL (ANID/FB210021), ANID/FONDECYT/1251907 & 1211898.

REFERENCIAS

Barrett, B. S., J. F. Carrasco, and A. P. Testino, 2012: Madden–Julian Oscillation (MJO) Modulation of Atmospheric Circulation and Chilean Winter Precipitation. *J. Climate*, 25, 1678–1688

Barrett, B. S., Marin, J. C., y Jacques-Coper, M., 2020: A multiscale analysis of the tornadoes of 30–31 May 2019 in south-central Chile. *Atmospheric Research*, 236, 104811.

Bastías-Curivil, C., Rondanelli, R., Vicencio, J., Matus, F., Caballero-Morán, V., Munoz, F., et al., 2024: Tornadoes and Waterspouts in Chile / Tornados y Trombas en Chile. figshare. Dataset.

Caballero-Morán, V., y Rondanelli, R., 2025: Tornado seasonality in central-southern Chile. *Geophysical Research Letters*, 52(1), e2024GL110900.

Hernández, A., 2021: Análisis intraestacional de heladas meteorológicas de la región del Maule, Tesis para optar al título de Meteoróloga, Departamento de Geofísica, U. de Concepción.

Jacques-Coper, M., Veloso-Aguila, D., Segura, C., Valencia A., 2021: Intraseasonal teleconnections leading to heat waves in central Chile. *Int J Climatol.*, 41, 4712–4731.

Jacques-Coper, M., Segura, C., 2021: Análisis CR2 | ¿Calor extremo a la vista? Olas de calor, incendios forestales y marea roja / CR2, 19.01.2024.

Marín, J. C., Gutiérrez, F., Gensini, V. A., Barrett, B. S., Pozo, D., Jacques-Coper, M., y Veloso-Aguila, D., 2024: Climatological aspects of notable tornado events in Chile. *Monthly Weather Review*, 152(8), 1803-1819.

Muñoz, P., 2025: Patrones sinópticos asociados a olas de calor de invierno en Santiago y Concepción, Chile, Tesis para optar al título de Meteoróloga, Departamento de Geofísica, U. de Concepción.

Vicencio, J., Rondanelli, R., Campos, D., Valenzuela, R., Garreaud, R., Reyes, A., y Nicora, G., 2021: The Chilean tornado outbreak of May 2019: synoptic, mesoscale, and historical contexts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(3), E611-E634.

CARACTERIZACIÓN DE EXTREMOS COMPUESTOS CÁLIDOS EN EL SUDESTE DE SUDAMÉRICA

Francisca Castillo¹, Maria Laura Betolli¹²³

francastillo650@gmail.com

¹ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN)

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

³ Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI/CNRS-IRD-UBA), Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: Cambio climático, calor extremo, extremos climáticos multivariados.

1) INTRODUCCIÓN

Sudamérica está altamente expuesta y fuertemente impactada por el cambio climático. Esto se refleja en las tendencias ascendentes detectadas en la temperatura y también en la creciente frecuencia de eventos climáticos extremos, como las olas de calor. Estos fenómenos tienen como resultado impactos socioeconómicos y ambientales, así como también efectos negativos en la salud de los seres humanos, aumentando las condiciones de estrés por calor y la mortalidad.

Los extremos cálidos compuestos (CHE, por sus siglas en inglés) son eventos en los que las temperaturas máximas (Tx) y mínimas (Tn) diarias se mantienen excepcionalmente altas durante un mismo período de tiempo, lo que lo convierte en un problema multivariable. Sin embargo, los CHE han sido poco explorados en Sudamérica, siendo las olas de calor definidas a partir de la temperatura máxima uno de los eventos extremos mejor caracterizados. En particular, Rusticucci et al. (2015) realizaron una caracterización espacio-temporal de los eventos CHE en la región centro-norte de Argentina en base a datos de estaciones meteorológicas en el período 1961-2010 y para la época cálida (Octubre-Marzo). Los autores encontraron tendencias positivas en estos eventos y una mayor exposición en el noreste de Argentina. En este trabajo se extiende la caracterización de los CHE en una región más amplia, el Sudeste de Sudamérica, en un período reciente y a lo largo de todo el año. Asimismo, la caracterización exhaustiva de los extremos climáticos en regiones con escasez de datos resulta un desafío. Por lo tanto, es esencial utilizar múltiples conjuntos de datos para abordar estas incertidumbres. En este contexto, el objetivo de este trabajo es caracterizar la variabilidad espacio-temporal de los CHE utilizando múltiples fuentes de observación en el Sudeste de Sudamérica.

2) METODOLOGÍA

Para realizar este trabajo se utilizaron datos de Tx y Tn diarias de estaciones meteorológicas provistas por los Servicios Meteorológicos Nacionales de Argentina, Brasil, Uruguay y Paraguay, y del conjunto de datos de temperatura unificada global del CPC para el período

1979-2024 en el Sudeste de Sudamérica (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globaltemp.html>).

Para determinar un evento CHE se utilizó el siguiente criterio en base a Rusticucci et al. (2015): la T_x y T_n diaria deben superar simultáneamente su respectivo percentil 90 diario durante al menos 3 días consecutivos. El cálculo del percentil diario se realizó considerando una ventana móvil de 15 días centrada en el día de interés.

En este trabajo se caracterizó y comparó la frecuencia, duración e intensidad de los CHE entre los distintos conjuntos de datos, junto con su variabilidad temporal y espacial.

3) RESULTADOS

Tanto para la frecuencia calculada a partir de estaciones como de CPC (Figura 1) el número promedio de olas de calor por año se encuentra alrededor de 1.5 en todo el dominio, alcanzando mayores valores 3 eventos promedio por año en las regiones donde se emplazan grandes ciudades como Buenos Aires y Rosario. Las estaciones muestran un patrón similar (no mostrado), aunque el máximo identificado al norte de Paraguay no es captado debido a la escasa cobertura observacional en esa zona..

La duración media de los CHE para el período analizado (Figura. 2) toma valores máximos de casi 6 días en la región sudeste de Brasil, mientras que hacia el sudoeste del dominio los valores son relativamente más bajos (entre 3.5 y 4.5 días).

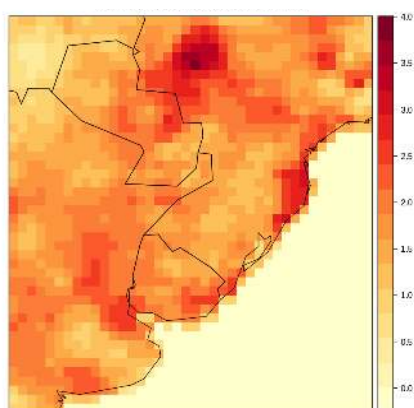


Figura 1: Frecuencia media anual de eventos CHE representada por CPC

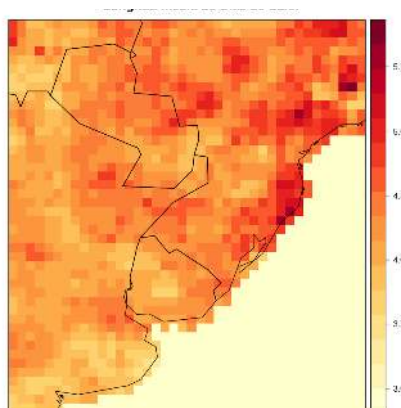


Figura 2: Duración media de eventos CHE representada por CPC

Se analizó la evolución temporal de la frecuencia de los CHE en el período estudiado. En la Figura 3 se observa que los valores del estadístico τ del test de Mann-Kendall, calculados para la frecuencia anual de CHE, tienden a ser mayores y estadísticamente significativos en la región norte del dominio, particularmente sobre Paraguay y el sur de Brasil. En cambio, sobre Argentina la tendencia es más variable, e incluso negativa en algunas estaciones.

Se analizó la evolución de la frecuencia anual media de CHE en las últimas décadas para dos grandes ciudades de Argentina: Rosario-Aero y Buenos Aires OCBA (Figura 4). En ambas estaciones se observa una tendencia positiva, lo cual es consistente con el análisis anterior, ya que el τ es positivo en ambas (2.7 para Rosario y 1.1 para Buenos Aires), aunque la tendencia resulta estadísticamente significativa únicamente en Rosario.

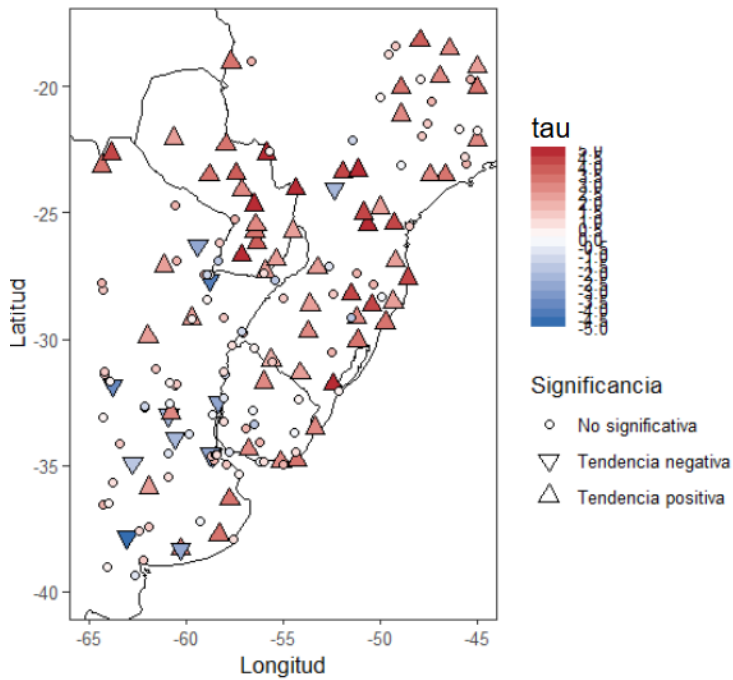


Figura 3: Tendencia de frecuencia media anual de CHE aplicando MannKendall. El valor de significancia es 0.05

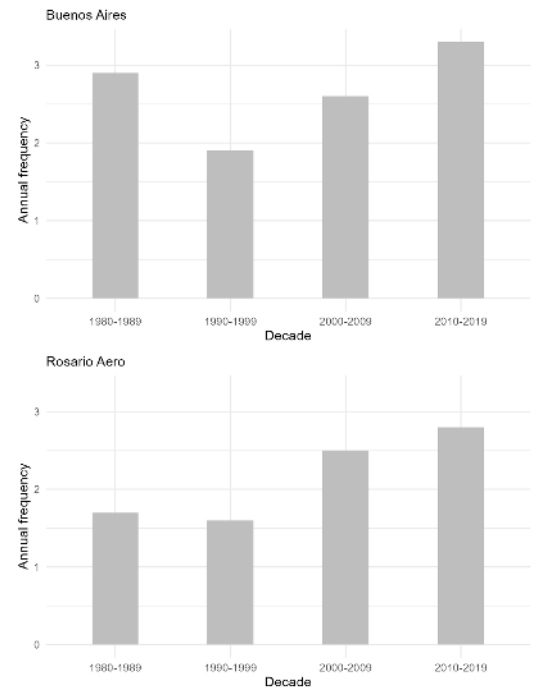


Figura 4: Frecuencia media anual de CHE por década

4) CONCLUSIONES

Los eventos CHE más intensos se registran en el noroeste del dominio, mientras que las frecuencias más altas se observan sobre las grandes ciudades. Los eventos CHE de mayor duración se encuentran sobre Brasil. La frecuencia de los CHE presenta tendencias positivas, especialmente en el centro-norte y noreste del dominio donde se encuentran emplazadas grandes ciudades. Esta tendencia confirma la continuidad del aumento de los eventos de calor extremo en la región, ya detectado por Rusticucci et al. (2015) en el período 1961-2010.. Adicionalmente, la gran incertidumbre observacional en algunas áreas de la región es un desafío a tener en cuenta en este tipo de caracterizaciones.

Futuros estudios se enfocarán en ampliar el dominio de análisis para abarcar toda Sudamérica y abordarán el desarrollo de modelos de aprendizaje automático para simularlos eventos CHE en aplicaciones relacionadas con el cambio climático.

REFERENCIAS

Rusticucci, M., Kysely J., Almeida G. y Lhotka O., 2015: Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. Theoretical and Applied Climatology 124, 679-689

PROYECCIONES TÉRMICAS DE VERANO EN CIUDADES DE ARGENTINA BAJO DIFERENTES UMBRALES DE CALENTAMIENTO GLOBAL

Malena S. Lozada Montanari^{1,2,3}, Ana Belén Sánchez Schütze^{1,2,3}, Inés
Camilloni^{1,2,3}, Rafael Seoane⁴
malena.lozada@cima.fcen.uba.ar

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO)

² CONICET-Universidad de Buenos Aires, Centro de Investigaciones del Mar y de la
Atmósfera (CIMA)

³ CNRS-IRD-CONICET-UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y
sus Impactos (IRL 3351 IFAECI)

⁴ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Veterinarias, Centro de Estudios
Transdisciplinarios del Agua (CETA)

Palabras Clave: Clima Urbano, Cambio Climático, Umbrales de Temperatura

1) INTRODUCCIÓN

Argentina es un país “hiperurbanizado”, con el 91 % de su población viviendo en ciudades. Los efectos de la urbanización y el cambio climático están convergiendo de una manera cada vez más peligrosa, lo que hace crucial generar información sobre escenarios futuros de condiciones térmicas estivales para diferentes áreas urbanas, incluyendo tanto los valores promedio como los extremos. En este contexto, la evaluación de proyecciones climáticas futuras a escala urbana se presenta como una prioridad para contribuir al desarrollo de políticas adecuadas de adaptación y mitigación.

Este trabajo tiene por objetivo evaluar extremos de temperatura en las estaciones de verano para dos ciudades de Argentina: Buenos Aires y Mendoza utilizando cuatro escenarios de cambio climático (ssp126, ssp245, ssp370 y ssp585) bajo los umbrales de calentamiento global de 1.5°C, 2°C y 3°C respecto del período preindustrial.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos de temperatura máxima y mínima provenientes de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN): Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA) y Mendoza Observatorio. En cuanto a las simulaciones, se emplearon modelos del *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP6) (Eyring et al, 2016). Se consideraron 15 modelos que fueron seleccionados por encontrarse entre los de mayor resolución espacial y por contar con información de temperatura máxima y mínima en los escenarios de emisiones a analizar. La habilidad de estos modelos para representar el clima observado fue analizada mediante un índice de evaluación de modelos (IVT) propuesto por la Tercera Comunicación Nacional (TCNCC, 2015).

A partir de esta evaluación, se seleccionaron los modelos EC-Earth3-Veg, FGOALS-g3, GFDL-ESM4 e INM-CM5-0 para la ciudad de Buenos Aires y los modelos EC-Earth3, FGOALS-g3, GFDL-ESM4 y MPI-ESM1-2-HR para la ciudad de Mendoza.

Con el objetivo de generar proyecciones climáticas a escala local para las dos ciudades de estudio se evaluaron distintos métodos de *downscaling* y corrección de sesgo. Se analizaron cinco métodos ampliamente utilizados en la literatura para la corrección de la temperatura: *delta*, *empirical quantile mapping*, *detrended quantile mapping*, *quantile delta mapping* e *ISIMIP3*. Además, se consideró la salida original de los modelos, cuya

escala fue reducida mediante la técnica de regrillado de vecino más cercano (*nearest-neighbour*, en inglés).

El análisis se llevó a cabo en dos períodos: 1965-1989 y 1990-2014, utilizando uno como referencia para corregir el otro, y contrastando con las observaciones reales.

Finalmente, a partir de la selección de los mejores métodos de corrección se calcularon para cada ciudad los índices climáticos extremos SU (*summer days*), TR (*tropical nights*), TX (temperatura máxima), TN (temperatura mínima). Estos se estimaron considerando como referencia futura los períodos en que cada modelo alcanza los umbrales de calentamiento global de 1.5°C, 2°C y 3°C. Los índices obtenidos permitieron evaluar cómo podrían modificarse las condiciones climáticas en cada ciudad bajo distintos escenarios de cambio climático.

3) RESULTADOS

Para evaluar el rendimiento de los distintos métodos de corrección de sesgo en ambas ciudades, se elaboró un ranking a través de nueve métricas estadísticas basado en el trabajo de Vogel et al. (2023). Como el análisis consideraba cuatro modelos distintos y seis métodos de corrección, se comparó el conjunto modelo/método en función de su rendimiento, desde el de mejor desempeño al de peor a lo largo de 24 puestos. Luego, se promediaron los puestos obtenidos por cada método (independientemente del modelo) para obtener un valor final en el ranking, donde un valor más bajo indicaba mayor eficiencia del método para corregir el sesgo.

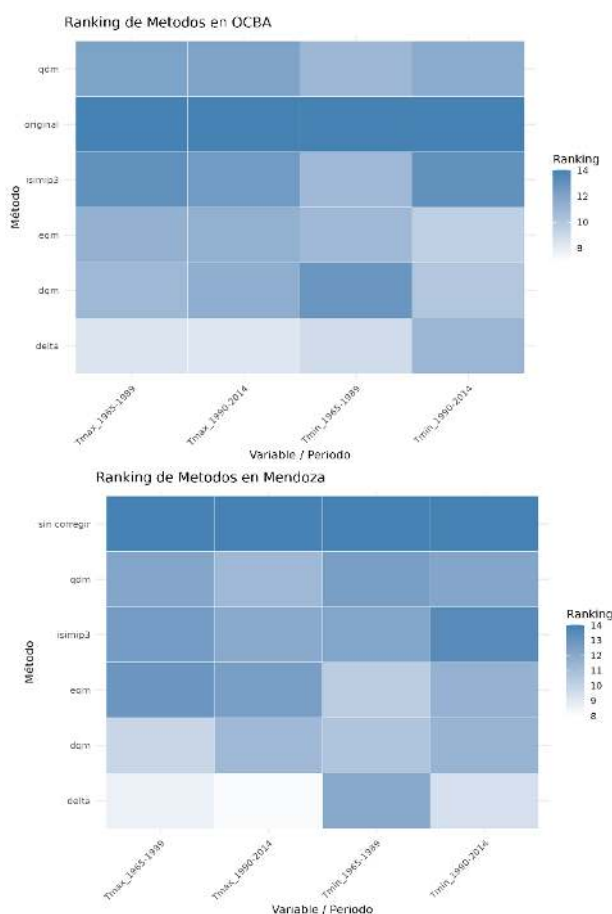


Figura 1: Mapas de Calor presentando los resultados del ranking para cada los métodos de corrección de sesgo en Buenos Aires y Mendoza.

Los resultados del ranking se muestran en forma de mapas de calor en la figura 1. Se puede observar que, a pesar de ser el más simple, el método delta tiene uno de los mejores desempeños al corregir las simulaciones de modelos. De manera similar, el método basado en cuantiles (dqm) también muestra buenos resultados. En contraste, los métodos ismip3 y qcm así como la salida original del modelo, presentan mayores limitaciones para una corrección adecuada. En Buenos Aires, el método eqm también se destaca entre los más efectivos.

A partir de estos resultados, se seleccionaron los métodos de mejor rendimiento para cada ciudad, y con ellos se calcularon los índices extremos térmicos de verano con el objetivo de evaluar el impacto del cambio climático en áreas urbanas.

Utilizando el método delta -común a ambas ciudades- se analizaron las diferencias en los índices extremos bajo distintas proyecciones y para tres umbrales de calentamiento (1.5°C, 2°C y 3°C) en comparación con el período histórico 1995-2014. Los resultados para el índice TX se presentan en la tabla I, mostrando para cada ciudad, escenario y umbral la diferencia media del índice extremo y su significancia estadística, evaluada mediante el test de Welch (Welch, 1947), donde la hipótesis nula es la igualdad de las medias comparadas, pero sin asumir igualdad de varianzas, lo que resulta en mayor robustez del resultado.

Umbral (°C)	Escenario	Buenos Aires		Mendoza	
		Diferencia (°C)	Significativo	Diferencia (°C)	Significativo
1.5	ssp126	0,59	Falso	0,37	Falso
1.5	ssp245	0,64	Falso	0,62	Falso
1.5	ssp370	0,72	Falso	0,77	Falso
1.5	ssp585	0,61	Falso	0,60	Falso
2	ssp245	0,95	Verdadero	1,41	Verdadero
2	ssp370	1,15	Verdadero	1,27	Falso
2	ssp585	0,95	Verdadero	1,35	Verdadero
3	ssp370	1,90	Verdadero	2,36	Verdadero
3	ssp585	1,78	Verdadero	2,28	Verdadero

Tabla I: Diferencia media del índice TX para las distintas proyecciones y umbrales en Buenos Aires y en Mendoza.. En negrita, los valores de cambio significativos.

Para el umbral de calentamiento de 3°C, las diferencias en el índice TX son significativas en ambas ciudades, alcanzando en Mendoza valores superiores a 2°C. Sin embargo, en esta ciudad se requiere un incremento mayor para que los cambios sean estadísticamente significativos: en Mendoza los cambios comienzan a ser significativos a partir de un aumento de aproximadamente 1.35 °C, mientras que en Buenos Aires esto ocurre desde un incremento de solo 0.95 °C.

También se observan diferencias significativas bajo el umbral de 2°C en ambas ciudades, excepto en la proyección ssp370 para la ciudad de Mendoza. Pero en ningún caso se observa una diferencia media significativa bajo el umbral de 1.5°C.

4) CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo muestran que el impacto del cambio climático sobre los extremos térmicos de verano se vuelve más pronunciado a medida que aumentan los niveles de calentamiento global, con efectos ya detectables a partir de un incremento de 2 °C. La ausencia de diferencias significativas bajo el umbral de 1.5 °C refuerza la importancia de limitar el calentamiento global para evitar cambios severos en los extremos de temperatura, especialmente en contextos urbanos donde el calor extremo representa un riesgo creciente.

REFERENCIAS:

Eyring et al, 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, Geosci. Model Dev., 9, 1937-1958.

TCNCC; 2015: Resumen Ejecutivo de la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/tercera-comunicacion> (Último acceso: 29-05-2025)

Welch, B.L., 1947: The generalization of 'student's' problem when several different population variances are involved, Biometrika, Volume 34, Issue 1-2, January 1947, Pages 28–35

Vogel E., et al. 2023: An evaluation framework for downscaling and bias correction in climate change impact studies, Journal of Hydrology, Volume 622, Part A, 129693, ISSN 0022-1694

INFLUENCIA DE LA CONVERGENCIA DE HUMEDAD EN EL ACOPLE HUMEDAD DEL SUELO-PRECIPITACION

Lucas Longo¹, Claudio Menéndez^{1,2,3}, Romina C. Ruscica^{1,3,4}, Julian Giles⁵
menendez@cima.fcen.uba.ar

1 CONICET - UBA, CIMA, Buenos Aires, Argentina

2 UBA, FCEN, DCAO, Buenos Aires, Argentina

3 CNRS – CONICET – IRD – UBA, IFAECI, IRL 3351, Buenos Aires, Argentina

4 UBA, FCEN, Buenos Aires, Argentina

5 Institute of Geosciences, Meteorology Section, University of Bonn, Germany

Palabras clave: acople suelo-precipitación, forzante sinóptico, ciclo diurno

1) INTRODUCCIÓN

Las interacciones suelo-atmósfera, incluyendo el acople entre la humedad del suelo (HS) y la precipitación (P), tienen un rol no menor en el sistema climático de Sudamérica (Grimm et al., 2007; Giles et al., 2023). Las características de la superficie pueden afectar P mediante diferentes procesos, como la influencia de suelos secos en el desarrollo de la capa límite, la de suelos húmedos en el reciclado de humedad, o la de la heterogeneidad en la creación de inestabilidades sobre contrastes de HS. Estos procesos pueden actuar simultáneamente, complejizando el análisis, y haciendo que el feedback entre HS y P (preferencia de P para desarrollarse sobre suelos húmedos o secos) presente a veces resultados aparentemente contradictorios especialmente en la escala diurna. Con el fin de contribuir a separar y comprender estos diferentes procesos investigamos el acople HS-P en la escala subdiurna. Para ello, se analizó el impacto de las condiciones antecedentes de HS sobre la ocurrencia de eventos de precipitación vespertina (EPVs) empleando la metodología de Giles y Menéndez (2022).

Los EPVs no solo dependen del estado de la HS matutina; también son influenciados por la inestabilidad atmosférica, las condiciones sinópticas y los forzantes de gran escala, los cuales no fueron tenidos en cuenta por Giles y Menéndez (2022). Asimismo, la persistencia de EPVs, relacionada con forzantes sinópticos o de mayor escala, dificulta aislar la influencia del acople local HS-P. Para distinguir diferentes forzantes que pueden afectar el acople HS-P se consideró la convergencia de vapor de agua, similarmente a Welty y Zeng (2018), por ser un indicador clave de la influencia sinóptica y de la circulación de gran escala.

2) METODOLOGIA

La metodología se basa en el análisis de EPVs en cada punto de retículo y en el cálculo de diagnósticos que definen las condiciones de HS antes de estos eventos. Un EPV se caracteriza por ausencia de P matutina y por superar un mínimo de P por la tarde. Para cada punto se identifican los días con EPV y se analizan las condiciones de HS previas a cada evento (en horas de la mañana) en una región de 3x3 puntos centrada en el EPV (donde ocurre la máxima P). A su vez, se clasifican los días con EPV según su régimen dinámico basado en la convergencia horizontal de humedad: regímenes dinámicos con baja, media y alta convergencia de humedad. Estos regímenes corresponden a diferentes niveles de influencia sinóptica: baja convergencia indica influencia sinóptica limitada, mientras que alta

convergencia indica una influencia sinóptica más pronunciada.

Se definen tres diagnósticos, basados en las anomalías (respecto al promedio de 31 días centrado en el día del evento) de HS matutina, para analizar procesos de acople debido a anomalías espaciales, temporales y a las condiciones de heterogeneidad. El diagnóstico espacial (Y_s) compara espacialmente las anomalías de HS entre el punto de máxima P y el punto de mínima P (identifica si el EPV prefiere condiciones de HS más húmedas o más secas respecto a su entorno). El diagnóstico temporal (Y_t) cuantifica la anomalía temporal de HS matutina en el punto de máxima P (identifica preferencia por días con suelo húmedo o seco). El diagnóstico de heterogeneidad (Y_h) cuantifica la heterogeneidad espacial de las anomalías de HS matutina en la región de 3x3 mediante el desvío estándar de las 9 anomalías de HS (identifica preferencia por condiciones de HS espacialmente más o menos heterogéneas).

Para cada régimen dinámico (convergencia de humedad integrada verticalmente baja, media y alta), el acople se evalúa utilizando estos diagnósticos (Y_s , Y_t , Y_h) y comparando las condiciones durante los días con EPVs con las condiciones de días sin EPVs (muestra control). Se promedia cada diagnóstico para la muestra de días con EPVs y para la muestra control en cada punto, se calcula la diferencia entre estos promedios, y se determina la significancia estadística de esta diferencia con un método de bootstrapping creando muestras aleatorias mezclando los valores de los diagnósticos de los días con eventos y de control, y se calcula la diferencia promedio para cada muestra aleatoria. La diferencia observada se compara con la distribución de las diferencias aleatorias y el percentil donde se ubica indica el grado de significancia estadística. Percentiles altos o bajos (ej. por encima del 90% o por debajo del 10%) sugieren una relación significativa asociada al acople local. El período analizado corresponde a los semestres octubre-marzo entre 1983 y 2012. La metodología se aplicó a una simulación con el modelo regional RCA4 y al reanálisis ERA5 en un dominio que cubre Sudamérica al sur de 10°S (ver detalles adicionales sobre la metodología y los datos empleados en Giles y Menéndez, 2022).

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Por razones de espacio se muestran solo los resultados para el diagnóstico temporal Y_t (figura 1). El modelo y el reanálisis presentan resultados similares para la preferencia temporal para las tres condiciones de convergencia de humedad. En los días con alta convergencia (fuerte forzante sinóptico) los EPVs prefieren condiciones de HS secas durante la mañana (paneles de la izquierda). Este feedback negativo puede deberse a que el suelo seco favorece el desarrollo de la capa límite y el inicio de la convección si hay suficiente agua disponible en la atmósfera para precipitar. En los días con convergencia de humedad media o baja (forzante sinóptico débil, paneles del centro y de la derecha) los EPVs en general prefieren condiciones húmedas en regiones tropicales (feedback positivo a través de mayor evaporación), pero condiciones secas en el centro de Argentina y Uruguay (feedback negativo, pero con menor número de puntos significativos en comparación con el caso de alta convergencia).

La interacción entre la HS matutina y los EPVs varía significativamente según las condiciones sinópticas y según la región. En consecuencia, el signo del feedback asociado con el acople HS-P no es uniforme, siendo la convergencia de vapor de agua un factor determinante. El modelo RCA4 y el reanálisis ERA5 proveen resultados similares para el diagnóstico de preferencia temporal de EPVs para los diferentes forzantes sinópticos.

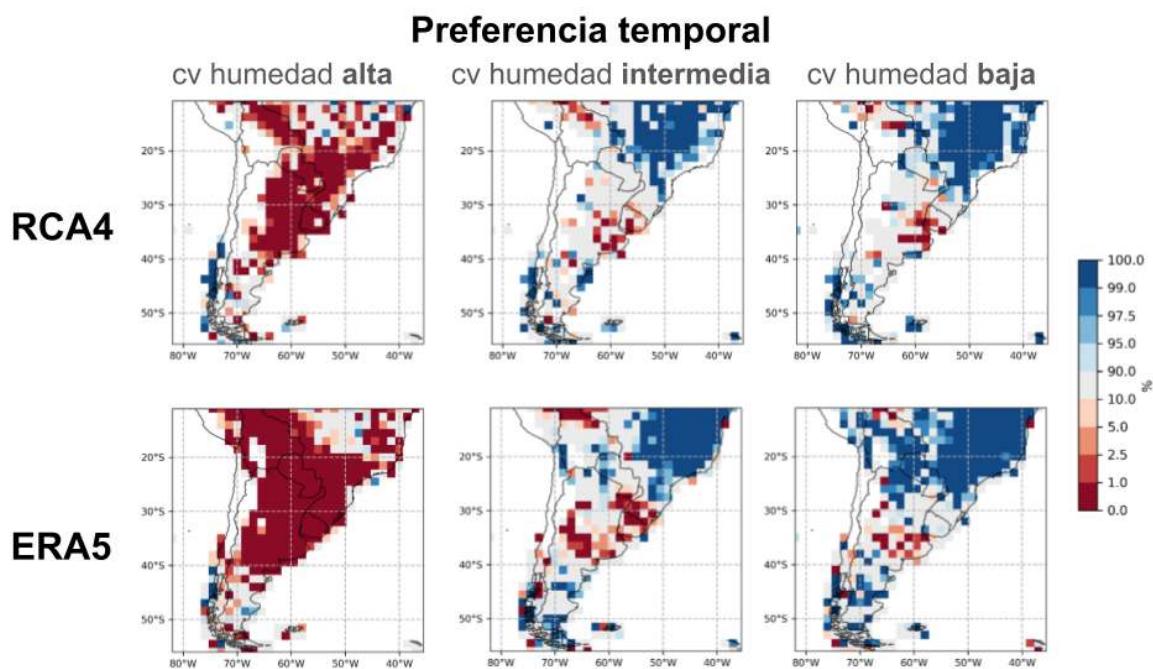


Figura 1: Preferencia temporal de EPVs respecto a las anomalías matutinas de HS para simulación con modelo regional RCA4 (arriba) y reanálisis ERA5 (abajo); para condiciones de convergencia de humedad integrada verticalmente alta (columna izquierda), media (columna central) y baja (columna derecha). Las preferencias están representadas por el percentil en el que se ubica el diagnóstico de los eventos respecto a una distribución aleatoria (hipótesis nula: no hay acople). Los percentiles altos (color azul) indican valores más altos que los esperados aleatoriamente, es decir preferencia de EPVs sobre suelos más húmedos que la media. Los percentiles bajos (color rojo) indican valores más bajos que los esperados aleatoriamente, es decir preferencia de EPVs sobre suelos más secos que la media. Los valores entre los percentiles 10 y 90 se consideran no significativos.

Agradecimientos: CONICET (PIP-112-2020-0102141-CO), ANPCYT (PICT-2021-I-A-01097), DFG (SFB 1502/1–2022 - Projektnummer: 450058266)

REFERENCIAS

Giles J.A., C.G. Menéndez y R.C. Ruscica, 2023: Nonlocal impacts of soil moisture variability in South America: Linking two land–atmosphere coupling hot spots. *J. Climate* 36, 227–242.

Giles J.A. y C.G. Menéndez, 2022: How morning soil moisture conditions influence afternoon precipitation events in South America. *Int. J. Clim.* 42 (15), 7899–7913.

Grimm A., J. Pal y F. Giorgi, 2007: Connection between spring conditions and peak summer monsoon rainfall in South America: Role of soil moisture, surface temperature, and topography in eastern Brazil. *J. Climate*, 20, 5929–5945.

Welty, J. y Zeng, X., 2018: Does soil moisture affect warm season precipitation over the southern Great Plains?. *Geophysical Research Letters*, 45, 7866–7873.

CLIMATOLOGÍA Y TENDENCIAS DE LAS OLAS DE CALOR EN ARGENTINA

Natalia Herrera¹

nherrera@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: ola de calor, climatología, tendencia.

1) INTRODUCCIÓN

No existe una definición única de ola de calor (OC). La Organización Meteorológica Mundial define una ola de calor como dos o tres días consecutivos con temperaturas máxima y mínimas superiores a un umbral basado en las condiciones climáticas de una región (WMO, 2015). El Servicio Meteorológico Nacional de Argentina define como OC al período en el cual las temperaturas máximas y mínimas igualan o superan, por lo menos durante 3 días consecutivos y en forma simultánea, al percentil 90, calculado a partir de los datos diarios durante los meses de octubre a marzo (semestre cálido en el hemisferio sur) del período 1961-2010 (<https://www.smn.gob.ar/estadisticas>).

Las OC amplifican muchos riesgos, como los relacionados con la salud o los económicos, incluido el aumento de la morbilidad y mortalidad humana, la sequía y la calidad del agua, los incendios forestales y el humo, la escasez de energía y las pérdidas agrícolas, lo que causa daños importantes a las comunidades de todo el mundo. En el semestre cálido 2013-2014 (octubre de 2013 a marzo de 2014) se registraron tres períodos de olas de calor de gran extensión, duración e intensidad en el centro-norte de Argentina, en los cuales se registraron 1877 muertes en exceso y encontraron que el riesgo de morir por olas de calor se incrementó en 13 de las 18 provincias analizadas (Chesini y otros, 2021).

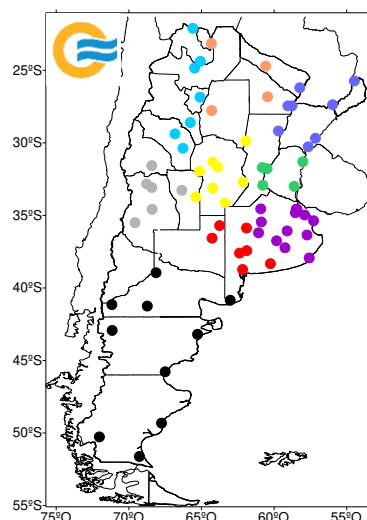
En este trabajo se presenta una climatología de las OC en Argentina en el período octubre-marzo entre los años 1961/62 y 2022/23. Se analiza a nivel regional los meses de ocurrencia, la duración y la cantidad de eventos durante el período. También se analizan las tendencias de los eventos de OC a nivel local.

2) METODOLOGÍA

OC: $TX_i \geq P90TX$ & $TN_i \geq P90TN$, en donde TX_i/TN_i es la temperatura máxima/mínima observada el día i , $P90TX/P90TN$ es el percentil 90 de la temperatura máxima/mínima. Ambos percentiles se calculan a partir de los datos diarios entre el 1 de octubre y el 31 de marzo del período 1961-2010. Esta condición se tiene que cumplir para 3 días consecutivos.

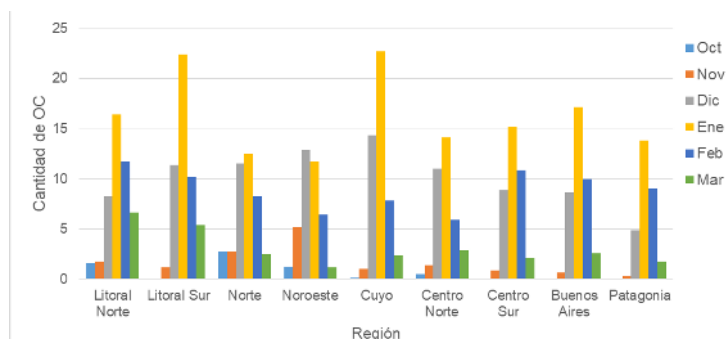
Se utilizaron datos diarios observados de temperatura máxima y temperatura mínima en 68 estaciones meteorológicas de Argentina, agrupadas en 9 regiones (Figura 1).

Figura 1: Estaciones meteorológicas utilizadas. Azul: Litoral Norte; Verde: Litoral Sur; Naranja: Norte; Celeste: Noroeste; Gris: Cuyo; Amarillo: Centro Norte; Rojo: Centro Sur; Violeta: Buenos Aires; Negro: Patagonia.



3) RESULTADOS

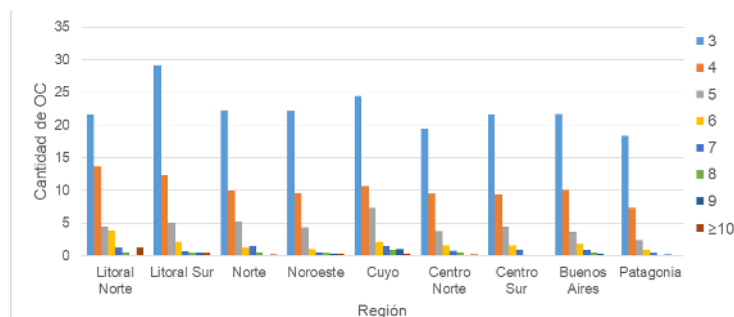
La distribución mensual normalizada de las OC muestra que -en todas las regiones salvo en el Noroeste- enero fue el mes que presentó la mayor cantidad de OC (Figura 2). Para el Noroeste el mes con mayor frecuencia fue diciembre, seguido por enero. Febrero fue el segundo mes con mayor frecuencia para Litoral Norte, Centro Sur, Buenos Aires y Patagonia. En cambio para



Litoral Sur, Norte, Cuyo y Centro Norte diciembre fue el segundo mes con mayor frecuencia. En octubre no hubo eventos para las regiones Litoral Sur, Buenos Aires, Centro Sur y Patagonia.

Figura 2: Distribución mensual normalizada de los eventos de OC.

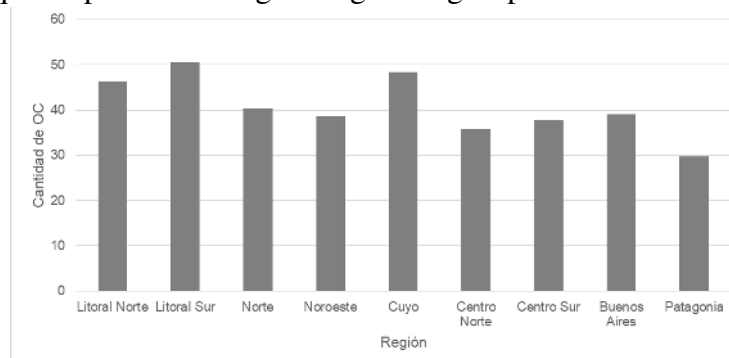
La distribución normalizada de la duración de los eventos de OC muestra que en general para casi todas las regiones se observa mayor cantidad de eventos de menor duración y a medida que aumenta la duración del evento disminuye la frecuencia observada (Figura 3). Se destaca el Litoral Norte como la región que tiene más eventos de OC que duran 10 o más días. Las otras regiones que presentan eventos de OC de más de 7 días son Litoral Sur, Centro Norte,



Norte, Cuyo, Noroeste, Buenos Aires y Patagonia. La región Centro Sur no presentó nunca eventos de más de 7 días de duración.

Figura 3: Distribución de la duración normalizada de las OC para el período 1961/62-2022/23.

En la Figura 4 se muestran los resultados de sumar la cantidad de eventos de OC normalizado presentado en la Figura 2. Se concluye que el Litoral Sur presentó la mayor cantidad de eventos de OC (51), seguido por Cuyo (48), Litoral Norte (46), Norte (40), Buenos Aires (39), Noroeste (39), Centro Sur (38), Centro Norte (36), y por último Patagonia (30). A nivel regional se tiene que en promedio ninguna región llega a presentar una OC por cada semestre cálido. Patagonia

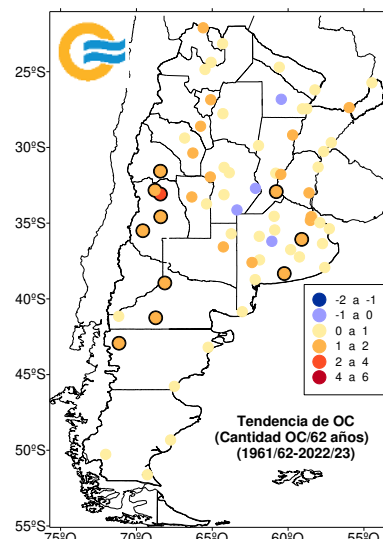


fue la región con menor cantidad de eventos, presentando en promedio casi 1 evento de OC cada 2 años

Figura 4: Cantidad total de eventos de OC normalizado para cada región para el período 1961/62-2022/23.

En la Figura 5 se muestran las tendencias lineales de la cantidad de eventos de OC. Se observan en general tendencias positivas. Solamente 4 estaciones meteorológicas presentaron tendencias levemente negativas (entre 0 y -1 eventos de OC en 62 años). Las estaciones meteorológicas que presentaron tendencias positivas y significativas se ubicaron principalmente en Cuyo, noroeste de Patagonia, sur del Litoral Sur y centro de Buenos Aires, con valores que indican que hubo un incremento de entre 1 y 2 eventos de OC en el período.

Figura 5: Tendencia lineal de la cantidad de eventos de OC durante el período 1961/62-2022/23 (62 años). Círculo con borde negro: tendencia estadísticamente significativa al 90%.



4) CONCLUSIONES

En este trabajo se analizan las Olas de Calor (OC) de Argentina ocurridas en los semestres cálidos octubre-marzo del período 1961/62-2022/23 (62 años). Enero fue el mes que presentó la mayor cantidad de eventos de OC en todas las regiones, salvo en el Noroeste, que fue diciembre. Febrero fue el segundo mes con mayor frecuencia para Litoral Norte, Centro Sur, Buenos Aires y Patagonia. En cambio para Litoral Sur, Norte, Cuyo y Centro Norte el segundo mes con mayor frecuencia fue diciembre. En octubre no hubo eventos para las regiones Litoral Sur, Buenos Aires, Centro Sur y Patagonia. En general se observa mayor cantidad de eventos de menor duración y a medida que aumenta la duración del evento disminuye la frecuencia observada. Se destaca el Litoral Norte como la región que tiene más eventos de OC que duran 10 o más días. La región Centro Sur no presentó nunca eventos de más de 7 días de duración. A nivel regional el Litoral Sur presentó la mayor cantidad de eventos de OC normalizado, seguido por Cuyo, Litoral Norte, Norte, Buenos Aires, Noroeste, Centro Sur, Centro Norte, y por último Patagonia. En promedio ninguna región llega a presentar una OC por cada semestre cálido. Patagonia fue la región con menor cantidad de eventos. A nivel local se analizaron las tendencias lineales de la cantidad de eventos de OC, encontrando en general tendencias positivas. Las tendencias fueron significativas principalmente en Cuyo, noroeste de Patagonia, sur del Litoral Sur y centro de Buenos Aires, con valores que indican que hubo un incremento de entre 1 y 2 eventos de OC en el período.

REFERENCIAS

World Meteorological Organization (WMO), 2015: Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development. WMO-No. 1142. 140 pp. Geneva: World Meteorological Organization. <https://library.wmo.int/idurl/4/54600>.

Chesini F., Herrera N., Skansi M., Morinigo C. G., Fontán S., Savoy F., de Titto E., 2021: Mortality risk during heat waves in the summer 2013-2014 in 18 provinces of Argentina. Ecological study. Cien Saude Colet [periódico na internet]. Disponible en: <https://cienciaesaudecoletiva.com.br/artigos/mortalityrisk-during-heat-waves-in-the-summer-20132014-in-18-provinces-of-argentina-ecologicalstudy/18174>.

CLIMATOLOGÍA Y TENDENCIAS DE LAS OLAS DE FRÍO EN ARGENTINA

Natalia Herrera¹
nherrera@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Ola de frío, climatología, tendencia.

1) INTRODUCCIÓN

A nivel global no existe un criterio uniforme para definir una ola de frío (OF). La Organización Meteorológica Mundial la define como “un clima marcado e inusualmente frío, que puede estar asociado con una caída brusca y significativa de la temperatura del aire cerca de la superficie de la Tierra y que persiste durante al menos dos días consecutivos” (WMO, 2023). El Servicio Meteorológico Nacional de Argentina define una OF como el período en el cual las temperaturas máximas y mínimas son inferiores o igualan, por lo menos durante 3 días consecutivos y en forma simultánea, al percentil 10, calculado a partir de los datos diarios durante los meses de abril a septiembre (semestre frío en el hemisferio sur) del período 1961-2010 (<https://www.smn.gob.ar/estadisticas>).

A nivel mundial, hubo una disminución en los nuevos registros de temperaturas frías como resultado del calentamiento global. Sin embargo, las bajas temperaturas continuarán formando parte de los patrones climáticos invernales.

Los eventos de frío extremo en Argentina se han relacionado con un aumento significativo en la mortalidad (Chesini y otros, 2019). Hay una asociación entre los eventos de temperatura extrema y la mortalidad en la mayoría de las ciudades analizadas en el período 2005-2015, impacto que se verifica durante los 7 y 14 días posteriores al evento.

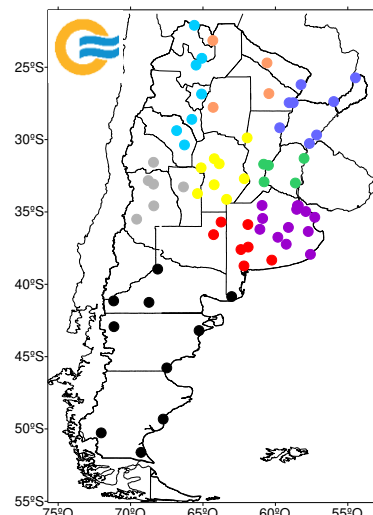
En este trabajo se presenta una climatología de las OF en Argentina en el período abril-septiembre entre los años 1961 y 2023. Se analiza a nivel regional los meses de ocurrencia, la duración y la cantidad de eventos durante el período. También se analizan las tendencias de los eventos de OF a nivel local.

2) METODOLOGÍA

OF: $TX_i \leq P10TX$ & $TN_i \leq P10TN$, en donde TX_i/TN_i es la temperatura máxima/mínima observada el día i , $P10TX/P10TN$ es el percentil 10 de la temperatura máxima/mínima. Ambos percentiles se calculan a partir de los datos diarios entre el 1 de abril y el 30 de septiembre del período 1961-2010. Esta condición se tiene que cumplir para 3 días consecutivos.

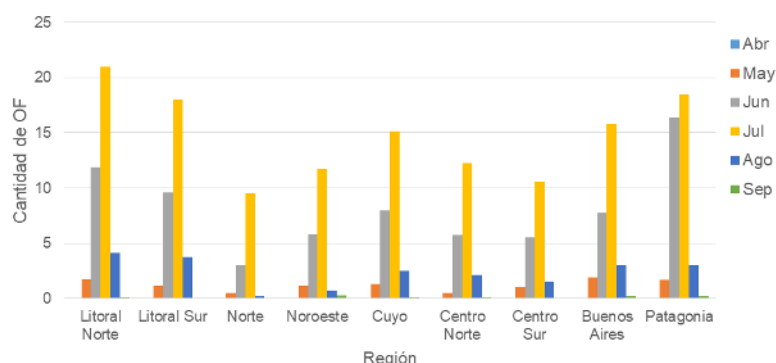
Se utilizaron datos diarios observados de temperatura máxima y temperatura mínima en 68 estaciones meteorológicas de Argentina, agrupadas en 9 regiones (Figura 1).

Figura 1: Estaciones meteorológicas utilizadas. Azul: Litoral Norte; Verde: Litoral Sur; Naranja: Norte; Celeste: Noroeste; Gris: Cuyo; Amarillo: Centro Norte; Rojo: Centro Sur; Violeta: Buenos Aires; Negro: Patagonia.



3) RESULTADOS

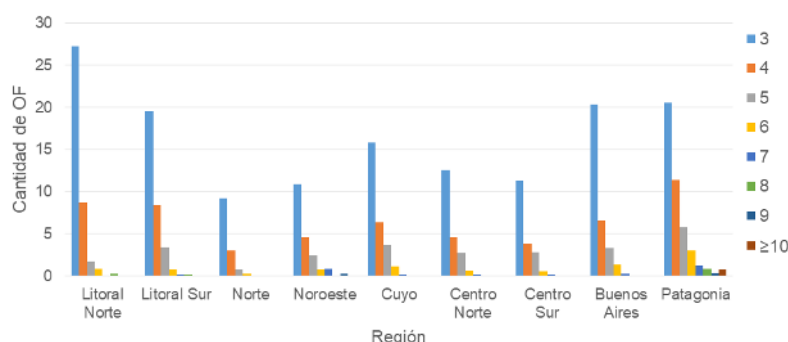
La distribución mensual normalizada de las OF muestra que en todas las regiones julio fue el mes que presentó la mayor cantidad de eventos de OF, seguido por junio (Figura 2). Agosto fue el tercer mes con mayor frecuencia para Litoral Norte, Litoral Sur, Cuyo, Centro Norte, Centro Sur, Buenos Aires y Patagonia. En cambio para Norte y Noroeste el tercer mes con mayor frecuencia fue mayo. En



mayor frecuencia fue mayo. En abril no hubo de OF en ninguna región. En septiembre no hubo eventos de OF para las regiones Litoral Sur, Norte y Centro Sur.

Figura 2: Distribución mensual normalizada de las OF en 1961-2010.

La distribución normalizada de la duración de los eventos de OF muestra que en general para todas las regiones se observa mayor cantidad de eventos de menor duración y a medida que aumenta la duración del evento disminuye la frecuencia observada (Figura 3). Se destaca la Patagonia como la región que tiene más eventos de OF que duran 10 o más días. Las regiones que presentan eventos de duración de más de 7 días -además de la Patagonia- son Litoral Norte, Litoral Sur, Noroeste y Buenos Aires. La región Norte no presentó nunca eventos de más de 6 días de duración.



Litoral Sur, Noroeste y Buenos Aires. La región Norte no presentó nunca eventos de más de 6 días de duración.

Figura 3: Distribución de la duración normalizada de las OF en 1961-2023.

En la Figura 4 se muestran los resultados de sumar la cantidad de eventos de OF normalizado presentado en la Figura 2. Se concluye que la Patagonia presentó la mayor cantidad de eventos de OF (40), seguido por Litoral Norte (39), Litoral Sur (33), Buenos Aires (29), Cuyo (27), Centro Norte (21), Noroeste (20), Centro Sur (19), y por último Norte (13). A nivel regional se tiene que en promedio ninguna región llega a presentar una OF por cada semestre frío. El Norte fue la región con menor cantidad de eventos, presentando en promedio aproximadamente 1 evento de OF cada 5 años.

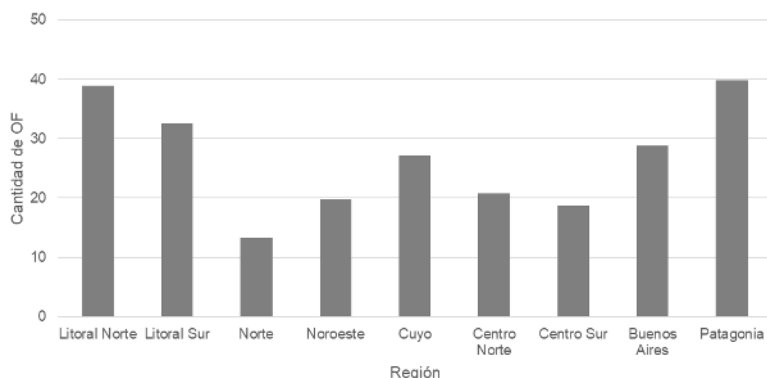
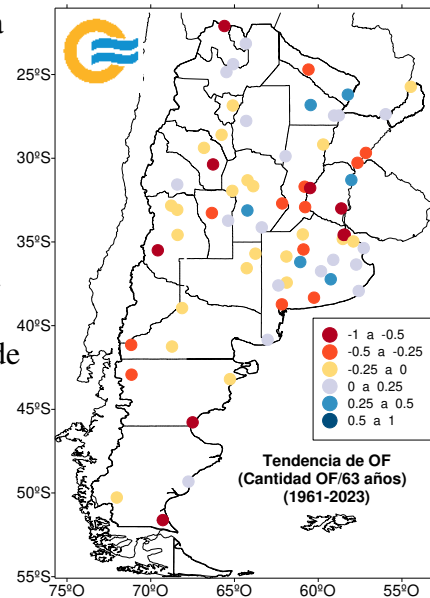


Figura 4: Cantidad total de eventos de OF normalizado en 1961-2023.

En la Figura 5 se muestran las tendencias lineales de la cantidad de eventos de OF, expresado como la variación total de la cantidad de eventos en el período de estudio. El resultado está expresado como la variación total de la cantidad de eventos en el período de estudio. Ninguna tendencia fue significativa.

Se observan en general tendencias negativas (entre -0.5 y 0 eventos de OF en 63 años), implicando menor cantidad de eventos con el paso del tiempo. Las tendencias positivas (entre 0 y 0.5) se dieron principalmente en el sureste de Buenos Aires, parte del Litoral Norte, del Noroeste y del Centro Norte.

Figura 5: Tendencia lineal de la cantidad de eventos de OF en 1961-2023 (63 años).



4) CONCLUSIONES

En este trabajo se analizan las Olas de Frío (OF) de Argentina ocurridas en los semestres fríos abril-septiembre del período 1961-2023. La mayor cantidad de eventos de OF se dio en julio, seguido por junio. Agosto fue el tercer mes con mayor frecuencia para Litoral Norte, Litoral Sur, Cuyo, Centro Norte, Centro Sur, Buenos Aires y Patagonia. Mayo fue el tercer mes con mayor frecuencia para las regiones Norte y Noroeste. En abril no hubo eventos para ninguna región y en septiembre no los hubo para las regiones Litoral Sur, Norte y Centro Sur. En cuanto a la duración de los eventos de OF, se observa una mayor cantidad de eventos de menor duración y a medida que aumenta la duración del evento disminuye la frecuencia observada. Se destaca la Patagonia como la región que tiene presente eventos de OF de 10 o más días. Las regiones que presentan eventos de duración de más de 7 días -además de la Patagonia- son Litoral Norte, Litoral Sur, Noroeste y Buenos Aires. La región Norte no presentó nunca eventos de más de 6 días. La Patagonia presentó la mayor cantidad de eventos, seguido por Litoral Norte, Litoral Sur, Buenos Aires, Cuyo, Centro Norte, Noroeste, Centro Sur, y por último Norte. Los eventos de OF presentan en general tendencias negativas (con valores que indican disminución de entre 0 y 1 OF en el período), ninguna significativa. Las tendencias positivas se dieron en el sureste de Buenos Aires, parte del Litoral Norte, del Noroeste y del Centro Norte, con valores que indican un aumento de entre 0 y 1 OF en el período.

REFERENCIAS

World Meteorological Organization (WMO), 2023: Guidelines on the Definition and Characterization of Extreme Weather and Climate Events. WMO-No. 1310. 36pp. Geneva: World Meteorological Organization. <https://library.wmo.int/idurl/4/58396>.

Chesini F., Abrutzky R., Herrera N., Skansi M., Fontán S., Morinigo C. G., Savoy F., de Titto E., 2019: Mortalidad asociada a eventos extremos de frío en Argentina, 2005-2015. Rev Argent Salud Pública, 2019; 10(41): 28-36. ISSN 1852-8724 impreso, ISSN 1853-810X en línea. Disponible en: <http://rasp.msal.gov.ar/rasp/articulos/volumen41/28-36.pdf>.

EXPLORACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LA RESPUESTA CONVECTIVA A CONDICIONES AMBIENTALES EN SIMULACIONES IDEALIZADAS DE SUPERCELAS CON WRF

Esteban Semino¹, Jorge Gacitúa Gutiérrez^{1,2}, Juan Ruiz^{1,2,3}, Paola Salio^{1,2,3}
esti.semino@hotmail.com

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina

² CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina

³ CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: modos convectivos, simulación numérica de la convección, convección húmeda profunda

1) INTRODUCCIÓN

Predecir la intensidad y estructura de la convección profunda sigue siendo un desafío debido a la sensibilidad de los procesos convectivos a las condiciones termodinámicas y cinemáticas del entorno. Los experimentos numéricos idealizados brindan un marco controlado para investigar teórica y sistemáticamente la sensibilidad, tal como se hizo en el trabajo de Peters et. al. (2022a). Inspirado en trabajos recientes con simulaciones numéricas como los de Sueki (2024) y Peters et. al. (2022b) este estudio explora la influencia de diferentes configuraciones iniciales del entorno en la evolución convectiva y la intensidad de las tormentas utilizando simulaciones idealizadas con el modelo numérico WRF. En particular, el objetivo de este estudio es desarrollar una metodología objetiva para la clasificación de los modos convectivos a partir de simulaciones realizadas con un modelo numérico.

2) METODOLOGÍA

Se utiliza el modelo WRF en modo idealizado con una resolución horizontal de 2 km en un dominio de 80×80 puntos con 41 niveles verticales. Se realizaron un total de 96 simulaciones, cada una de 4 horas de duración, variando parámetros físicos relacionados con la forma del perfil vertical de viento y temperatura. Este conjunto de 96 simulaciones es analizado y clasificado manualmente bajo el criterio de un humano experto, considerando la evolución de variables como reflectividad, velocidad e índices termodinámicos importantes. Se determinaron 6 categorías: celda inhibida, no meteorológico, supercelda, celda ordinaria, supercelda con crecimiento de escala y celda ordinaria con crecimiento de escala. La Figura 1 muestra la evolución temporal de la reflectividad máxima y velocidad vertical máxima, junto con la hodógrafa e índices termodinámicos iniciales, de una de las simulaciones que ha sido clasificada como supercelda.

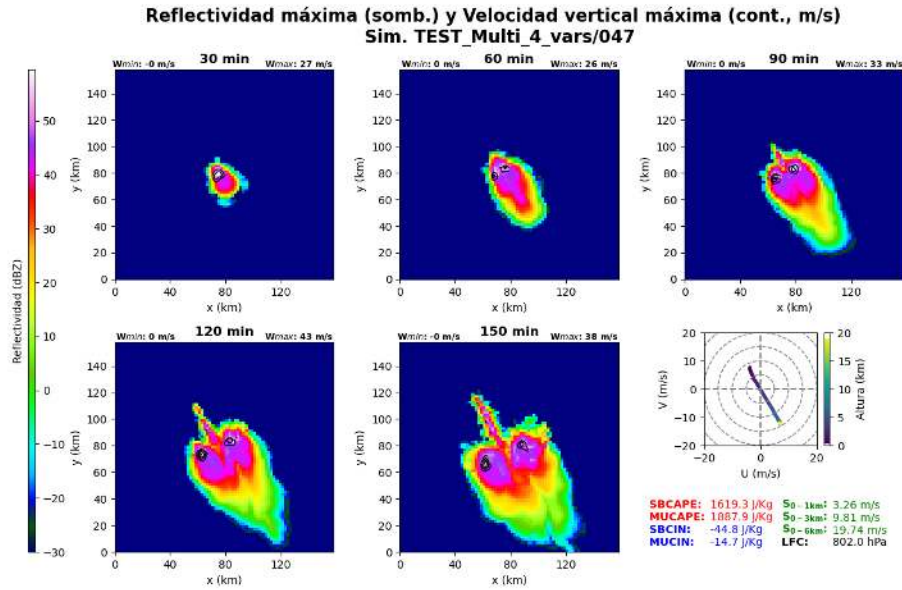


Figura 1: Evolución temporal de la reflectividad máxima (sombreado, dBZ) y velocidad vertical máxima (contornos, m/s) para uno de los casos simulados clasificado como supercelda. Los paneles muestran imágenes cada 30 minutos desde los 30 hasta los 150 minutos. El panel inferior derecho muestra la hodógrafa del entorno y los parámetros derivados de los perfiles verticales iniciales de viento y temperatura, incluyendo S06 (cortante 0–6 km), MUCAPE y el nivel de libre convección.

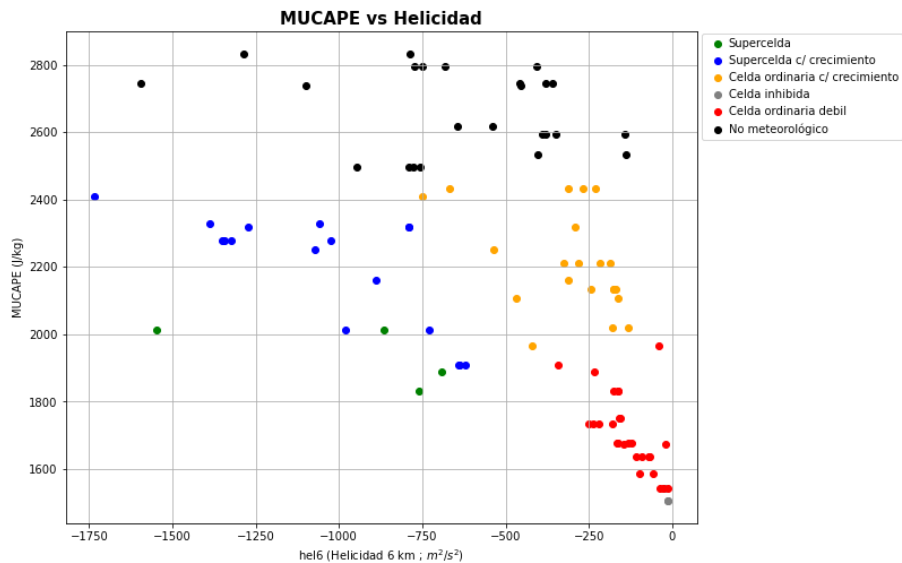


Figura 2: Clasificación basada en expertos de las simulaciones idealizadas en el espacio MUCAPE–helicidad. Cada punto representa una simulación, coloreada según su clasificación subjetiva: supercélula, supercélula en crecimiento, célula creciente ordinaria, célula ordinaria, célula ordinaria débil o simulación no meteorológica.

Posteriormente, se seleccionarán parámetros o métricas individuales en conjunto con series temporales representativas, que serán sometidas a técnicas de reducción de dimensionalidad, para luego generar una clasificación automatizada basada en técnicas de agrupamiento estadísticas (como por ejemplo K-Means) que reproduzca de la forma más fehaciente la clasificación del ojo humano experto.

3) RESULTADOS

El análisis de conglomerados presente en la Figura 2 revela seis regímenes característicos que van desde condiciones no convectivas o eventualmente no meteorológicas hasta superceldas altamente organizadas. Aproximadamente la mitad de las simulaciones no presentan convección significativa, lo que indica que solo combinaciones específicas de parámetros desencadenan el desarrollo de tormentas. Las condiciones iniciales del entorno influyen de forma particular en el tipo de tormenta que se puede generar, por ejemplo, las superceldas requieren de un alto CAPE y helicidad, mientras que las celdas ordinarias se presentan en entornos con poca cortante y CAPE moderado.

4) DISCUSIÓN

Los resultados preliminares sugieren que es posible implementar una clasificación automática confiable que refleje adecuadamente el criterio experto, empleando únicamente información objetiva derivada de las simulaciones. Este enfoque tiene potencial para ser adaptado a contextos operativos, facilitando el diagnóstico temprano y la evaluación de riesgos asociados a tormentas severas, especialmente en situaciones que demandan respuestas rápidas y precisas.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se desarrolla en el marco del Proyecto SNF SPIRIT: “UnWeather Wizard: Visualización e Interpretación de la Incertidumbre en Pronósticos Numéricos de Alta Resolución” y del proyecto [PREVENIR](#)

REFERENCIAS

Peters, J. M., Morrison, H., Nelson, T. C., Marquis, J. N., Mulholland, J. P., & Nowotarski, C. J. (2022a). The influence of shear on deep convection initiation. Part I: Theory. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79(6), 1669-1690.

Peters, J. M., Morrison, H., Nelson, T. C., Marquis, J. N., Mulholland, J. P., & Nowotarski, C. J. (2022b). The influence of shear on deep convection initiation. Part II: Simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79(6), 1691-1711.

Sueki, K. (2024). Massive parameter sweep experiment on convective cloud environment: Changes in rainfall characteristics in Moisture–Instability–Shear Space. SOLA, 20B(Special_Edition), 1–9.



4

Obtención, procesamiento y análisis de datos ambientales

NUEVA CLIMATOLOGÍA DE CICLONES EXTRATROPICALES EN EL MAR ARGENTINO Y SU IMPACTO EN LA SEGURIDAD NÁUTICA

Julietta Camila Arce¹, María Paula Llano^{2,3} y Alvaro Santiago Scardilli¹

jcarce@armada.mil.ar

¹Departamento Meteorología, Servicio de Hidrografía Naval (SHN)

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras claves: ciclones extratropicales, Atlántico Sur, seguridad náutica

1) INTRODUCCIÓN

Los ciclones extratropicales (CE) son sistemas clave en la dinámica atmosférica de latitudes medias, responsables de una amplia variedad de fenómenos meteorológicos sinópticos tanto sobre continentes como sobre océanos. Su impacto en el entorno marino incluye vientos y ráfagas intensas, oleaje elevado, ondas de tormenta; entre otras condiciones que representan un riesgo significativo para la navegación y la seguridad náutica (Gramscianinov et al., 2019). Este peligro ha sido reconocido por organismos internacionales como la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2022) y la Organización Marítima Internacional, que destacan la necesidad de fortalecer el conocimiento en meteorología marina para mejorar la seguridad y la planificación de rutas marítimas. En el océano Atlántico Sudoccidental, y en particular sobre el Mar Argentino, los CE constituyen una amenaza recurrente. Estudios previos han mostrado discrepancias sobre la estacionalidad y localización de estos sistemas, muchas veces atribuibles a diferencias en las fuentes de datos, metodologías de identificación y criterios de clasificación. A pesar de ello, existe consenso en cuanto a que la región generadora de ciclones se encuentra al este de Sudamérica y al predominio de estos fenómenos entre los 35°S y 60°S.

El objetivo principal de este trabajo es construir una nueva climatología de CE en la región, utilizando un algoritmo automatizado sobre datos de reanálisis, orientado a la caracterización de distintos aspectos clave como zonas de ciclogénesis, trayectorias típicas, duración y tasa de profundización; con especial atención a aquellas características que implican riesgos para la navegación. Este abordaje permitirá contribuir al entendimiento regional de los CE y proporcionar herramientas para desarrollar estrategias de prevención y mitigación de riesgos en el ámbito náutico.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para este estudio se utilizan datos del Reanálisis-2 del NCEP (National Center of Environmental Prediction)/ DOE (Department of Energy) (Kanamitsu et al., 2002), para el período 1979-2022, en toda la zona de responsabilidad nacional de la seguridad náutica comprendida entre las latitudes 20°S y 80°S, y longitudes 80°O a 0°. Se utilizaron los datos de presión a nivel del mar, viento zonal y meridional (estos últimos a 10 m); en intervalos de 6 horas y distribuidos espacialmente en una retícula de 2,5° x 2,5°. Además, para un análisis posterior, se incorporó una base de datos proporcionada por la Prefectura Naval Argentina que contiene registros de naufragios ocurridos en el Mar Argentino entre 1983 y 2017.

El algoritmo implementado para detectar CE sigue al descrito por Blender et al. (1997) y Trigo et al. (1999), y más recientemente adaptado por Mendes et al. (2010). Las trayectorias de los ciclones se realizan con un enfoque lagrangiano, utilizando la metodología *nearest*

neighbour, como en los trabajos mencionados. Una vez identificadas las trayectorias, sólo se utilizan aquellas que duraron 24 horas o más, con el fin de evitar el registro de eventos débiles (Gan y Rao, 1991; Trigo, 2005). Las trayectorias son filtradas para eliminar aquellas que corresponden exclusivamente a regiones continentales, evitando clasificar como ciclones del Mar Argentino a sistemas que no cumplen con los criterios oceánicos necesarios.

3) RESULTADOS

A partir de los criterios detallados previamente, se detectaron un total de 8870 ciclones a lo largo de los 44 años analizados, con una mayor ocurrencia durante el otoño y el invierno. Como ejemplo representativo de los resultados obtenidos en esta climatología, la Figura 1 muestra la distribución de densidad de ciclogénesis para cada estación. Esta representación permite identificar con claridad los núcleos asociados a regiones de mayor inicio de actividad ciclónica. En invierno, el primer núcleo se localiza sobre la región costera de Argentina, Uruguay y el sur de Brasil, mientras que el segundo y tercer núcleo se sitúan al sur de la isla Grande de Tierra del Fuego, el pasaje Drake y las primeras islas de la península Antártica. En el resto de las estaciones, la ubicación de las regiones más activas permanece relativamente constante, aunque en verano se observa un leve desplazamiento hacia el norte.

Adicionalmente, se definió un umbral de severidad relevante para la seguridad náutica, considerando un viento horizontal a 10 metros igual o superior a 35 nudos. Los ciclones cuyas trayectorias completas presentaron vientos iguales o mayores a este valor fueron seleccionados para estudiar de manera similar, y los máximos de densidad en este caso se concentran sobre el océano Atlántico, con variaciones estacionales en el área de influencia. Particularmente en el invierno se observa un patrón distintivo, con trayectorias más próximas al continente y un máximo de densidad desplazado hacia la costa, lo que indica una mayor cercanía de estos eventos severos a áreas continentales durante esta estación.

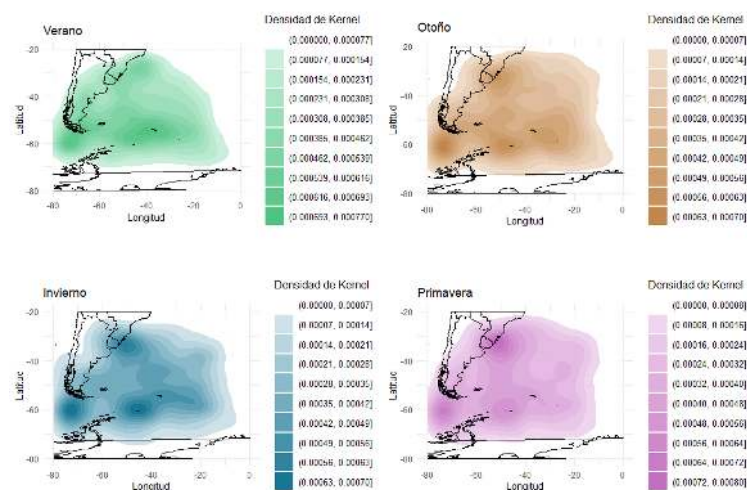


Figura 1: Densidad de ciclogénesis, por estación para el periodo de 44 años.

Para vincular los CE con situaciones concretas de riesgo para la navegación, en la Figura 2 se presentan las ubicaciones de los naufragios informados por la Prefectura Naval, los cuales fueron inspeccionados manualmente en los campos sinópticos y vinculados a la climatología de CE previamente elaborada. Del total de los 102 eventos registrados, se identificaron 33 casos con posible vinculación a CE. La distribución estacional de estos casos muestra una mayor incidencia durante el verano y el invierno, y se concentran principalmente sobre la costa patagónica, una región que, según los resultados previos, presenta una elevada frecuencia de trayectorias ciclónicas.

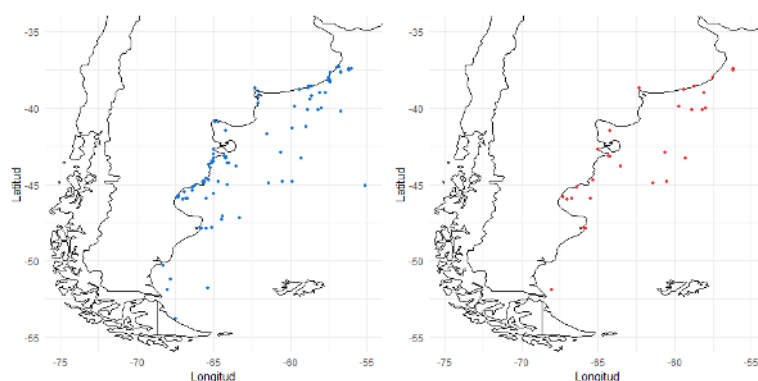


Figura 2: Distribución de los hundimientos registrados por Prefectura Naval Argentina entre 1983 y 2017. En el panel izquierdo todos los casos informados, y en el derecho aquellos que pudieron estar afectados por un CE.

4) CONCLUSIONES

En este estudio se analizaron diversos aspectos climatológicos de los CE en el Mar Argentino y en el océano Atlántico Sudoccidental. El análisis temporal reveló un comportamiento determinístico con un aumento en la frecuencia anual de CE en el invierno, verano y otoño en el período estudiado. Además, se observó una variabilidad interanual, la cual podría estar influenciada por teleconexiones como la Oscilación Antártica y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. Desde una perspectiva espacial, y en concordancia con estudios previos, se identificaron tres áreas preferenciales de ciclogénesis previamente mencionadas. En cuanto a los tiempos de vida se observaron casos de hasta 8 y 9 días. El análisis de las distancias recorridas reveló, entre otras características, que el invierno tiene el caso de mayor distancia, con 8090 km. En cuanto a la profundización, se determinó que la mayoría de los eventos tienen un máximo de -2 a -4 hPa/6h. No obstante, se observaron ciclones con profundizaciones más intensas, llegando hasta -18 hPa/6h.

Considerando el umbral de viento definido, los valores extremos se registraron en invierno, y la localización de los casos de mayor impacto fue detallada en Resultados. Aunque los naufragios asociados a CE no representan la mayoría de los casos, es importante destacar que su clasificación se basó exclusivamente en esta climatología desarrollada y en la información disponible para cada evento. Varios de estos incidentes estuvieron vinculados a CE intensos y a zonas propensas al desarrollo de estos sistemas. Por ello, el conocimiento climatológico y geográfico de los CE resulta fundamental para la toma de decisiones, la preparación de los buques ante eventos severos y la mejora de la adaptación de la actividad marítima.

REFERENCIAS

- Blender, R., Fraedrich, K., Lunkeit, F., 1997:** Identification of cyclone track regimes in North Atlantic. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 123, no 539, p. 727-741.
- Gan, M.A., y Rao, V.B., 1991:** Surface Cyclogenesis over South America. Monthly Weather Review. 119, 1293-1302.
- Gramscianinov, C. B., Hodges, K. I., & Camargo, R. D., 2019:** The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones. Climate Dynamics, 53, 4115-4140.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K., Hnilo J. J., Fiorino M., y Potter G. L., 2002:** NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). Bulletin of the American Meteorological Society, 1631-1643.
- Mendes, D., Souza, E. P., Marengo, J. A., & Mendes, M. C., 2010:** Climatology of extratropical cyclones over the South American-southern oceans sector. Theoretical and applied climatology. 100, 239-250.
- Trigo, I. F., Davies, T. D., Bigg, G. R., 1999:** Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. Journal of climate, vol. 12, no 6, p. 1685-1696.
- Trigo, I. F. 2005:** Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. Climate Dynamics, 2006, vol. 26, no 2, p. 127-143.
- World Meteorological Organization, 2022:** Maritime Forecasting, Meteorology and WMO: History and Evolution. MMO Series No. 4, Geneva.

APLICACIÓN DE UN PROYECTO PARTICIPATIVO HIDROMÉTRICO EN LA SUBREGION B4 DE LA CUENCA RIO SALADO

Vivian Barbero¹, Lucía de Antueno¹, Verónica Guerrero Borges¹, Francisco Leguizamón¹, Maximiliana Müller¹, David Orellano¹, Valeria Redolatti¹, Catalina Suárez Chrestía¹, Pablo Toscani¹, Mariano Vignau¹, Juan Facundo Yannicella Chaparro¹

vbarbero@ada.gba.gov.ar. Vivian Barbero.

¹Autoridad del Agua de la Provincia de Buenos Aires (ADA)

Palabras clave: ciencia ciudadana, hidrometría, gestión del recurso hídrico

1) INTRODUCCIÓN

La Autoridad del Agua de la Provincia de Buenos Aires (ADA) está llevando adelante un proyecto de acción participativa en la subregión B4 de la cuenca del río Salado, denominado *Programa de Monitoreo Participativo* (PMP). Según Torres y Katzer (2024), la ciencia participativa comprende diversas metodologías que promueven la participación activa de la población en proyectos de investigación científica, donde personas vinculadas o no a instituciones científicas colaboran para llevar a cabo un proyecto científico en forma conjunta.

La finalidad de este trabajo es presentar el PMP, las bases en las cuales se fundamenta, sus objetivos y las metodologías empleadas para alcanzarlos. El proyecto cuenta con la participación voluntaria de una amplia variedad de actores, incluyendo agentes provinciales (técnicos, profesionales, administrativos), miembros de instituciones científicas (UNLP, ILPLA, UNICEN, etc.), vecinos, productores, sociedades rurales, empleados municipales, entre otros.

Esta iniciativa se originó en 2018 en el marco del programa denominado *Blue Deal*, un convenio de cooperación y asistencia técnica entre el Ministerio de Infraestructura de la Provincia de Buenos Aires, la ADA y las Autoridades del Agua de los Países Bajos, cuyo propósito principal es fortalecer la gobernanza del agua.

La gobernanza del agua hace referencia al rango de los sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que se establecen para desarrollar y manejar los recursos hídricos y el suministro de agua en los diferentes niveles de la sociedad (GWP; 2002). En este contexto, el proyecto busca identificar, priorizar, analizar y resolver problemáticas relacionadas con el agua en el área seleccionada, basándose en la información generada por el PMP a través de talleres, antecedentes, mediciones en el territorio y el conocimiento de expertos.

El proyecto inició como un plan piloto en la cuenca de los arroyos Tandileofú, Chelforó y el Canal 2 (perteneciente a la subcuenca del Río Salado Región B4), abarcando los partidos de: Tandil, Ayacucho, Maipú, General Guido, General Madariaga y General Lavalle. Actualmente, el programa se ha extendido a la cuenca de los arroyos Langueyú, El Perdido y el Canal 1, incorporando los partidos de Dolores y Tordillo (Figura 1).

La elección de las cuencas respondió a su representatividad del territorio de la Provincia de Buenos Aires (PBA), al incluir características tales como sierras con altas pendientes, zona de recarga de acuíferos, usos productivos agropecuarios, áreas urbanas, llanuras, humedales, bañados y áreas inundables, zona costera, intrusión salina, antiguos canales de marea y sitio RAMSAR, entre otros.

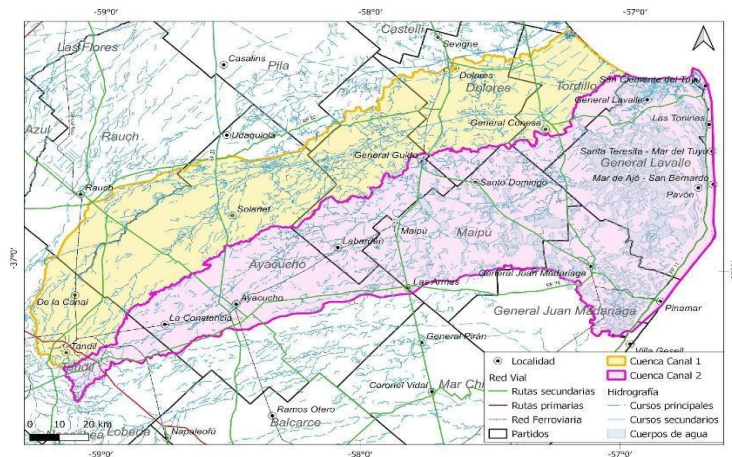


Figura 1. Cuencas piloto Canal 1 y Canal 2.

2) METODOLOGIA

La primera fase del proyecto consistió en la evaluación integral de la situación hídrica de la región, considerando su integración con el ordenamiento territorial, la producción agropecuaria, la infraestructura vial, los aspectos naturales y socioculturales. Esta etapa fue desarrollada principalmente por técnicos y profesionales de la ADA. En la segunda fase, se diseñó un Modelo Participativo de Gobernanza del Agua y un Plan de implementación adaptado a las particularidades de la cuenca.

Entre 2018 y la actualidad, se han realizado dos visitas anuales a la cuenca piloto, salvo en 2020 debido a la pandemia por COVID-19. Durante estas visitas se recorrieron zonas representativas donde se realizaron talleres abiertos a la comunidad, así como reuniones con actores específicos, tales como autoridades municipales, productores, vecinos y representantes de organizaciones locales.

En los talleres se trabajó en grupos reducidos y en plenario, abordando diversas temáticas con la participación activa de los interesados. Se distinguieron tres etapas: identificación de problemáticas; propuesta de soluciones; y elaboración de un plan de acción (con medidas a corto, mediano y largo plazo). Los resultados obtenidos se presentan periódicamente en nuevos talleres abiertos, promoviendo su validación y discusión con los actores involucrados.

3) RESULTADOS

Durante los talleres surgieron problemáticas generales y específicas relacionadas con inundaciones, anegamientos, sequías y calidad del agua. El análisis de los temas tratados reveló que la falta de conocimiento sobre la dinámica hídrica constituye una barrera significativa para la toma de decisiones y la formulación de soluciones eficaces.

Ante esta situación, se consideró prioritario subsanar la carencia de información mediante el desarrollo del Programa de Monitoreo Participativo (PMP), principalmente a través de la instalación de escalas hidrométricas que permiten registrar la altura del agua en el terreno. Las escalas fueron colocadas y referenciadas al nivel del mar (0 msnm), por la ADA y la Dirección Provincial de Hidráulica de la provincia de Buenos Aires. El PMP promueve la participación

activa y continua de los actores locales mediante la observación de escalas hidrométricas ubicadas en puntos estratégicos del territorio. Estos puntos, identificados por partido y número, son clave para evaluar la dinámica de los sistemas hídricos en estudio. Además, la ADA, desarrolló una aplicación móvil (Figura 2) que permite cargar los datos recopiados en campo de forma sencilla. Esos datos son validados por personal técnico y luego son publicados en el sitio web de información georreferenciada de la ADA (<https://gis.ada.gba.gov.ar/gis/>).

Figura 2. Aplicación móvil



Si bien el ADA dispone de una red hidrométrica provincial esta no es suficiente para cubrir todo el territorio, por lo que se busca completarla con la coparticipación ciudadana. La Figura

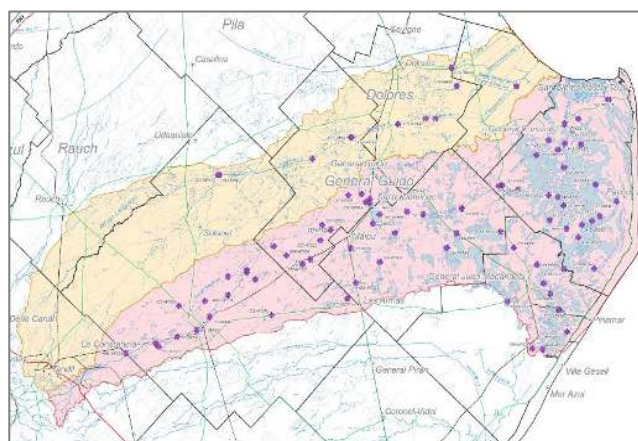


Figura 3. Ubicación de las escalas hidrométricas

3 muestra las 87 escalas hidrométricas instaladas en las cuencas piloto, con un total de 4151 mediciones registradas hasta la fecha.

La Figura 4 presenta ejemplos de las fotografías tomadas por los participantes y enviadas mediante la aplicación para su posterior validación.

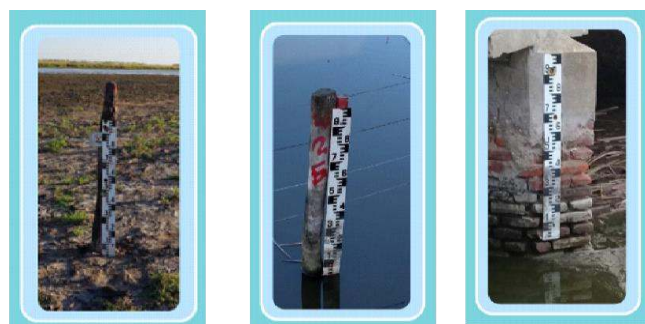


Figura 4. Fotos originales del PMP.

Actualmente, el PMP se encuentra en funcionamiento y en constante expansión, tanto hacia otras zonas de la provincia como en la incorporación de nuevas variables de medición, tales como precipitación y conductividad del agua superficial y subterránea. La información recabada tiene como finalidad generar una base de datos útil para la toma de decisiones, contribuyendo así al objetivo central de mejorar la gobernanza del recurso hídrico.

REFERENCIAS

GWP. 2002. Una Gobernabilidad Eficaz para el Agua Documento Base para el Diálogo. GWP, Estocolmo.

Torres, D. y Katzer, L. 2024. Pensar Ágora como un dispositivo para la ciencia participativa desde el sur global. XII Jornadas de Sociología de la UNLP, Ensenada, diciembre 2024. (Disponible: <https://digital.cic.gba.gov.ar/items/d83b3c45-aa89-477b-8e3d-48a453b41861>)

EVALUACIÓN DEL PRODUCTO ÍNDICES DE ESTABILIDAD DERIVADOS GOES-16 SOBRE TORMENTAS SEVERAS EN ARGENTINA

Kevin F. Yaringaño¹, Rafael A. Lighezzolo², Edgardo Pierobon³
kyaringanogarcia@gmail.com

¹Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich – Córdoba, Argentina (CONAE/UNC)

²Comisión Nacional de Actividades Espaciales - Córdoba, Argentina (CONAE)

³Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Radiosondeos, índices, estabilidad, GOES-16.

1) INTRODUCCIÓN

En Argentina, las tormentas son fenómenos que ocurren con frecuencia en la zona del litoral y en la pampa húmeda, donde son intensos y de gran duración debido a las nubes de gran porte e importante desarrollo vertical que se forman en estas regiones. Conocer cuál es el estado de la atmósfera o como va evolucionando en base a su estabilidad es de especial interés para realizar diferentes actividades. En esta investigación se analizó el producto satelital llamado Índices de Estabilidad Derivados del satélite GOES-16. Para verificar si la estimación (probabilidad) realizada por este producto satelital en los índices de estabilidad es correcta, se comparó con los datos de los radiosondeos lanzados en las estaciones meteorológicas aeronáuticas usando herramientas de estadística. Si los resultados son favorables, entonces es posible que el producto satelital del GOES estimó, en buen acuerdo, el estado de la atmósfera.

Los índices de estabilidad son medidas construidas a partir de ecuaciones matemáticas que permiten estimar el potencial para que ocurra un desarrollo convectivo, ignorando los efectos de forzamiento dinámico/mecánico, que se basan en diferentes métodos de calcular la estabilidad, en función de propiedades termodinámicas de la columna atmosférica (Davison and Gálvez, 2016). Los índices tradicionales se diseñaron para latitudes medias, donde se encuentra Argentina en el hemisferio sur, las cuales son las siguientes: Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE), Índice de Showalter (SI), Índice de Elevación (LI), Índice K (KI) y el Índice Total Totals (TT). Por último, existen herramientas o datos para realizar pronósticos a corto plazo o en tiempo real (mejor conocidos como nowcasting) para las tormentas, ya sea como unidad o sistema. Usar este tipo de datos satelitales sería fundamental para mejorar la identificación de zonas con altas probabilidades de que se forme una tormenta, y se tomen las acciones preventivas, como los sistemas de alerta temprana, para salvar vidas y disminuir daños materiales.

2) METODOLOGÍA

Se realizaron solicitudes mediante enlaces URL's para recopilar la información de los radiosondeos de cada estación de lanzamiento. Se obtuvieron los valores correspondientes a los cinco índices de estabilidad calculados a partir de cada radiosondeo. Además, se descargó la información del producto satelital proveniente del GOES-16 usando el lenguaje de programación Python. La información que se recopiló en ambas fuentes de datos, tanto de radiosondeo y satelital fue desde diciembre de 2019 hasta diciembre de 2022. Este periodo de estudio se debe a que el producto satelital Índices de Estabilidad Derivados del GOES-R se publicó el 6 de diciembre de 2019.

Para la validación de los índices de estabilidad estimados por el producto satelital y del radiosondeo, se calcularon los parámetros estadísticos que son: el coeficiente de Correlación de Pearson (R), Bías (B) y la Raíz Cuadrada Media del Error (RMSE).

2) RESULTADOS

En la tabla 1 se muestra los valores de los parámetros estadísticos con ambas fuentes de datos.

		Estaciones de Radiosondeo						
		Resistencia	Córdoba	Ezeiza	Santa Rosa	Mendoza	Neuquén	Comodoro
LI	R	0.93	0.86	0.90	0.88	0.85	0.85	0.56
	RMSE	2.68	3.36	2.94	3.03	3.01	2.82	4.24
	B	1.03	1.11	1.15	1.10	-0.75	-0.81	0.40
SI	R	0.85	0.83	0.84	0.81	0.89	0.85	0.46
	RMSE	3.51	3.26	3.06	3.31	2.21	2.44	4.17
	B	0.45	0.75	0.39	0.74	0.07	0.08	0.23
KI	R	0.92	0.89	0.90	0.88	0.91	0.86	0.39
	RMSE	9.72	8.31	9.10	8.86	6.70	8.86	17.14
	B	0.98	-0.53	1.21	-1.72	-0.19	-0.40	-0.83
TT	R	0.84	0.90	0.81	0.88	0.94	0.90	0.51
	RMSE	7.71	4.56	7.41	4.90	2.82	4.19	9.24
	B	0.72	-1.71	0.98	-1.06	-0.57	-0.29	-0.55
CAPE	R	0.63	0.69	0.58	0.55	0.67	0.38	-0.01
	RMSE	262.11	185.70	115.33	132.65	87.46	59.99	12.49
	B	-78.85	-47.55	-25.49	-22.69	5.83	3.50	-1.02

Tabla 1. Parámetros estadísticos en cada estación de lanzamiento para cada Índice de Estabilidad entre los datos reales y los datos estimados.

Los valores de R son mayores a 0.85 en seis de las siete estaciones evaluadas en los índices LI, SI, KI y TT. Esto quiere decir que existe una correlación entre el dato real del radiosondeo y el dato estimado del producto satelital del GOES-16. En la estación de Comodoro se tiene valores de R menores a 0.6 para estos mismos Índices, por lo que no se observa una relación definida entre ambas fuentes de datos. Los valores del RMSE se alejan del cero en las siete estaciones evaluadas para los cinco índices evaluados dando a entender que la estimación no es precisa. La misma situación se observa con el Bias (B) donde el producto satelital sobreestima y subestima. No muestra un sesgo general, lo que hace indicar que la estimación del producto satelital muestra diferencias entre ambas fuentes de datos, satélite y radiosondeo.

Un caso particular se muestra con el índice CAPE para las siete estaciones evaluadas. El valor de R es menor a 0.7 lo que indica que no existe una correlación fuerte entre el dato real y el dato estimado. El RMSE posee valores alejados del cero, lo cual indica que hay error en la estimación. Con respecto al Bias, se observa que hay diferencias notables entre el dato real y el estimado debido a que están alejados del cero también, el producto satelital subestima ($B < 0$) y sobreestima ($B > 0$) en las estaciones de lanzamiento. Esta situación indica que el algoritmo que se emplea para estimar los valores del índice CAPE son incorrectos, ya que esta región de Sudamérica se caracteriza por ser de las más inestables al tener una mayor energía convectiva para el desarrollo de tormentas. Por lo que, el resultado de estos parámetros estadísticos no es favorable para este índice.

En la figura 1 se muestra la comparación entre la banda 13 del GOES-16, que es muy útil para nubes convectivas en cualquier momento del día y la noche, con los índices de estabilidad del producto satelital, teniendo en cuenta que una limitante en los productos satelitales es la presencia de nubes.

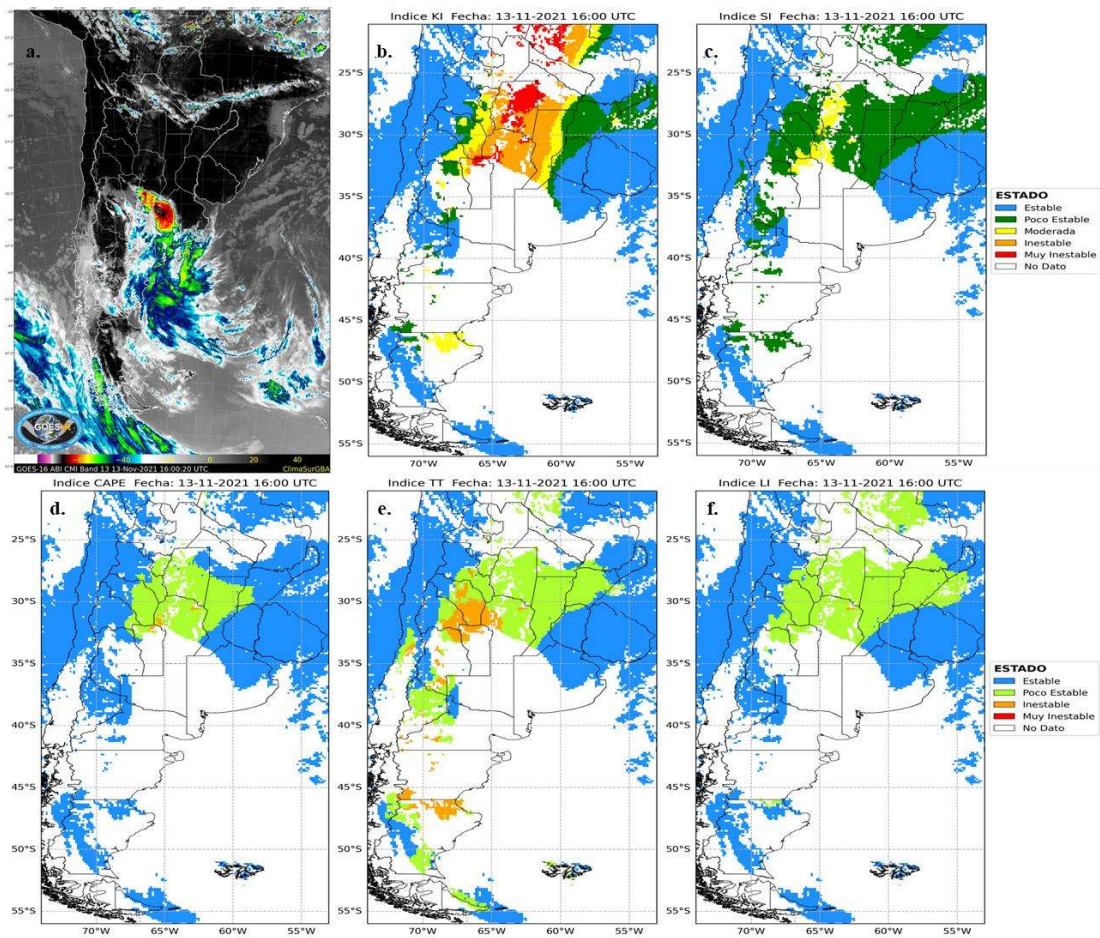


Figura 1. Imagen de la banda 13 del GOES-16 (a) y los índices KI (b), SI (c), CAPE (d), TT (e) y LI (f) del producto Índices de Estabilidad Derivados del GOES-16.

En la figura 1, se observa que en el sur de la provincia de Córdoba se desarrolló tormentas. El índice KI interpretó correctamente el estado de la atmósfera ya que mostró áreas con estado Inestable y Muy Inestable. El índice TT subestimó el estado de la atmósfera con Inestable y Poco Estable. Los índices SI, CAPE y LI subestimaron el estado de la atmósfera con Estable.

CONCLUSIONES

Los resultados de la validación muestran que el producto satelital logra estimar en cuatro de los cinco índices calculados mediante radiosondeos, aunque con una precisión limitada.

La comparación entre la banda 13 y el producto satelital del GOES-16 permitió detectar con precisión la estabilidad de la atmósfera. Este análisis facilita una observación anticipada, previa a la ocurrencia del evento, sobre los cambios en la estabilidad y la probabilidad de tormentas.

REFERENCIAS

Davison, M. y Gálvez, J., 2016: Índices de Estabilidad. Obtenido de WPC International Desks.

Li, J., Schimt, T., Jin, X., Martin, G., & Li, Z., 2019: Algorithm Theoretical Basis Document for Legacy Atmospheric Moisture Profile, Legacy Atmospheric Temperature Profile, Total Precipitable Water, and Derived Atmospheric Stability Indices. USA: NOAA NESDIS, CENTER for SATELLITE APPLICATIONS and RESEARCH.

Losos, D., 2021: How to acquire, analyze, and visualize GOES-R Series data. *Beginner's Guide to GOES-R Series Data*. USA: GOES-R Product Readiness and Operations

DETECCIÓN DE NUBES DE CENIZA VOLCÁNICA Y SO₂ UTILIZANDO DATOS DEL SENSOR ABI A BORDO DEL SATÉLITE GOES-16

Diana Marina Rodríguez², Juan Augusto Díaz^{1, 2}, Micaela Maurizi³, Luciano Vidal², Soledad Osoreo²

dmr@smn.gob.ar

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP)

²Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

³Universidad de Buenos Aires (UBA)

Palabras clave: Ceniza volcánica, ABI, VAAC

1) INTRODUCCIÓN

La dispersión de ceniza volcánica representa un riesgo para la navegación aérea, requiriendo metodologías satelitales para su detección (Casadevall, 1994a, b; Prata, 2009). Para identificar nubes de ceniza volcánica, se han desarrollado metodologías basadas en la combinación de bandas térmicas satelitales (Watson y otros, 2004; Pavolonis y otros, 2013). Osoreo y otros, (2015) exploraron la clasificación de ceniza mediante diferencias de temperatura de brillo entre bandas (BTD, del inglés Brightness Temperature Difference) siguiendo a Prata (1989b, a), Pavolonis y otros, (2020). El objetivo de este trabajo es presentar una metodología mejorada para la clasificación de píxeles mixtos que contienen ceniza volcánica y SO₂, a partir del uso de cinco bandas térmicas del sensor ABI a bordo de satélite GOES-16. Los resultados de este trabajo contribuirán a la labor de vigilancia y verificación del VAAC Buenos Aires.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Siguiendo con la metodología de Rodríguez y otros (2021), Guéhenneux y otros (2015) se calcularon las diferencias de temperatura de brillo BTD_(C13-C15), BTD_(C11-C13) y BTD_(C10-C09) utilizando datos del sensor ABI a bordo del satélite GOES-16 de la NOAA con una resolución espacial de 2 km. Posteriormente se combinaron las BTD, sumado al producto Clear Skies Mask (CSM) para ensayar tres métodos de clasificación de ceniza volcánica. El análisis se centró en la nube de ceniza del volcán Ubinas (Perú) para tres escenas del 19 y 20 de julio de 2019. Los umbrales utilizados en los tres métodos de clasificación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Umbrales M2B, M3B y M5B.

Criterio	Categoría	Condición
M2B	Ceniza	$[BTD_{(C13-C15)} \leq 0.0K] \ \& \ [CSM=1]$
	No ceniza	$[BTD_{(C13-C15)} > 0.0K] \ \& \ [CSM=0]$
	Incierto	Todo lo que no se encuentre incluido en las dos condiciones de arriba y CSM=1
M3B	Ceniza 1	$[BTD_{(C13-C15)} \leq -0.7K] \ \& \ [BTD_{(C11-C13)} \geq -1.2K] \ \& \ [CSM=1]$
	Ceniza 2	$[-0.7K < BTD_{(C13-C15)} \leq 1.0K] \ \& \ [BTD_{(C11-C13)} \geq -0.1K] \ \& \ [CSM=1]$
	No ceniza	Todo lo que no se encuentre incluido en las dos condiciones de arriba y CSM=0
	Incierto	Todo lo que no se encuentre incluido en las tres condiciones de arriba y CSM=1
M5B	Ceniza 1	$[BTD_{(C13-C15)} \leq -0.7K] \ \& \ [BTD_{(C11-C13)} \geq -1.2K] \ \text{or} \ (BTD_{(C10-C09)} \leq 0.0K) \ \& \ [CSM=1]$
	Ceniza 2	$[-0.7K < BTD_{(C13-C15)} \leq 1.0K] \ \& \ [BTD_{(C11-C13)} \geq -0.1K] \ \text{or} \ (BTD_{(C10-C09)} \leq 0.0K) \ \& \ [CSM=1]$
	No ceniza	No incluido en CENIZA 1 y 2 and $[CSM=0]$
	Incierto	No incluido en CENIZA 1 y 2 and $[CSM=1]$

3) RESULTADOS

Los resultados aquí mostrados se centran en la escena correspondiente al de 19 de julio del 2019 a las 18:00 UTC (Fig. 1). En esta figura las categorías mostradas en los paneles (b) a (d) son CENIZA 1 (rojo), CENIZA 2 (naranja), NO CENIZA (blanco) e INCIERTO (gris).

En el M2B (Fig. 1b), la categoría CENIZA detecta la nube volcánica, coincidiendo con los tonos magenta brillante, naranja y amarillos del RGB de ceniza (Fig. 1a), pero no con los píxeles magenta claro al sudeste del volcán. La categoría INCIERTO (Fig. 1b) filtra píxeles en la región árida, aunque persisten falsas alarmas en el Océano Pacífico.

El M3B (Fig. 1c) mejora la detección al sudeste del volcán con las categorías CENIZA 1 y CENIZA 2, pero no capta los píxeles al este de la nube que sí detectaba el M2B. Sin embargo, filtra más píxeles en la región árida. En el M5B (Fig. 1d), CENIZA 1 y CENIZA 2 detectan la nube volcánica y su mezcla con SO₂ en distintos niveles de la estratósfera, incluyendo los píxeles al este que el M3B no detectaba y la categoría INCIERTO filtra más píxeles en la región árida que el M3B.

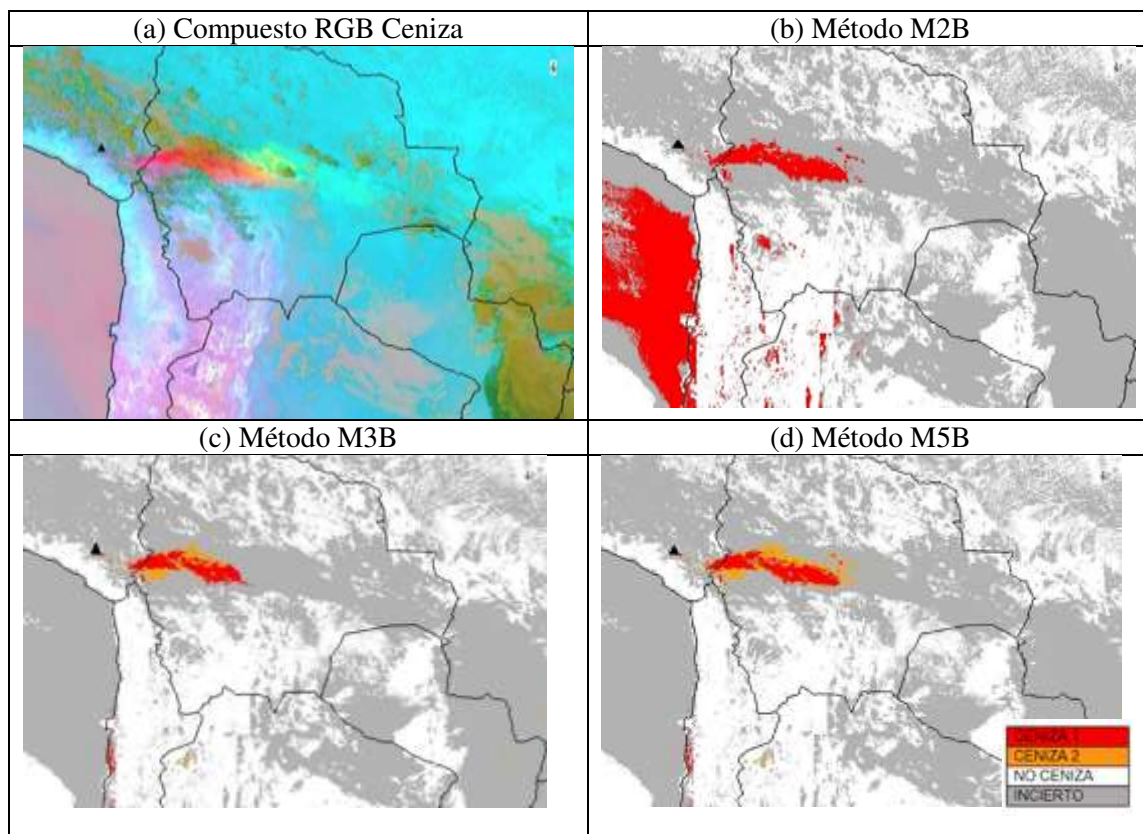


Figura 1: (a) Imagen RGB Ceniza ABI/GOES-16 para el día 19/7/2019 a las 18:00 UTC. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro, (b) Método M2B. (c) Método M3B. (d) Método M5B. Categorías “Ceniza 1” (rojo), “Ceniza 2” (naranja), “no ceniza” (blanco) e “incierto” (gris).

4) CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el método M2B sobrestima la presencia de ceniza, generando falsas alarmas en regiones áridas y oceánicas. M3B mejora al incluir nuevas (BTD), permitiendo detectar píxeles mixtos, pero sigue sin identificar píxeles con solo ceniza. No obstante, reduce falsas alarmas y añade una nueva categoría de ceniza no contemplada en M2B.

M5B logra el mejor desempeño al detectar más píxeles de la nube de ceniza y minimizar falsas alarmas.

La incorporación del producto CSM mejora los tres métodos al eliminar falsas alarmas en zonas áridas e identificar píxeles inciertos. La detección es más efectiva en escenas diurnas, mientras que en la nocturna la nubosidad y el menor espesor óptico dificultan la identificación de ceniza. Si bien los resultados son prometedores, el M5B debería utilizarse en combinación con el algoritmo clásico de detección de cenizas (BTD (C13-C15)), para considerar no solo los píxeles mixtos sino también aquellos que contienen únicamente ceniza volcánica y que el M5B filtra. Asimismo, para reducir las falsas alarmas producidas por los suelos áridos el M5B resulta una buena alternativa.

REFERENCIAS

Casadevall, T.J., 1994a: The 1989/1990 eruption of Redoubt volcano Alaska: impacts on aircraft operations. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 62 (30), 301–316, [http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90038-8](http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273(94)90038-8).

Casadevall, T.J., 1994b: Volcanic ash and aviation safety. *Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*. USGS Bull 2047, p. 450.

Guéhenneux, Y., Gouhier, M., Labazuy, P., 2015: Improved space borne detection of volcanic ash for real-time monitoring using 3-Band method. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 293, 25-45.

Pavlonis, M. J., A. K. Heidinger, y J. Sieglaff, 2013: Automated retrievals of volcanic ash and dust cloud properties from upwelling infrared measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118** (3), 1436–1458, doi:<https://doi.org/10.1002/jgrd.50173>.

Pavlonis, M. J., J. M. Sieglaff, y J. L. Cintineo, 2020: Chapter 10 - remote sensing of volcanic ash with the goes-r series. *The GOES-R Series*, S. J. Goodman, T. J. Schmit, J. Daniels, y R. J. Redmon, Eds., Elsevier, 103–124, doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814327-8.00010-X>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012814327800010X>.

Prata, A.J., 2009: Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic. *Nat. Hazards* 51 (2), 303–324.

Prata, A.J., 1989a: Observations of volcanic ash clouds using AVHRR-2 radiances. *Int. J. Remote Sens.* 10 (4–5), 751–761, <http://dx.doi.org/10.1080/01431168908903916>.

Prata, A.J., 1989b: Radiative transfer calculations for volcanic ash clouds. *Geophys. Res. Lett.* 16 (11), 1293–1296, <http://dx.doi.org/10.1029/GL016i011p01293>.

Rodriguez, D., L. Vidal y S. Osoreo, 2021: Algoritmo de identificación de nubes de ceniza volcánica en imágenes satelitales - Parte 1: sensor VIIRS. *Nota Técnica SMN* 2021-116. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1758>

Watson, I. M., Realmuto, V. J., Rose, W. I., Prata, A. J., Bluth, G. J., Gu, Y., Yu, T., 2004: Thermal infrared remote sensing of volcanic emissions using the moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of volcanology and geothermal research*, 135(1-2), 75-89.

Osoreo, S., G. Toyos, G. Pujol, J. Ruiz, E. Collini, y A. Folch, 2015: Mass loadings of the 2011 cordón caulle volcanic ash clouds. a quantitative comparison between modis and numerical simulations. *IUGG-IAVCEI General Assembly*.

IMPACTO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS EXTREMAS EN EL CULTIVO DE SOJA: HALLAZGOS SOBRE UMBRALES CRÍTICOS

Juan Guillermo Barberis¹, Mariana Barrucad^{2,3}, Adriana Kantolic¹
barberis@agro.uba.ar

¹Facultad de Agronomía (UBA)

²Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)

³CONICET

Palabras clave: extremos térmicos, ERA5, MODIS, estrés térmico

INTRODUCCIÓN

Las temperaturas elevadas afectan negativamente varios procesos relacionados con el crecimiento y rendimiento de la soja. Sin embargo, el umbral por encima del cual la temperatura afecta negativamente estos procesos varía según la etapa de desarrollo estudiada o la aproximación experimental utilizada (Nahar et al., 2016). En este trabajo se analiza el impacto que tiene el uso de distintos umbrales térmicos para caracterizar la influencia de las temperaturas extremas del aire y la superficie del suelo sobre el cultivo de soja en la Pampa Húmeda Argentina a partir de distintas fuentes de datos: observaciones de estaciones meteorológicas, reanálisis ERA5 y datos satelitales. Se pretende establecer i) si las tres bases de datos permiten obtener correlaciones congruentes o similares con el rendimiento de soja considerando la ocurrencia de extremos de temperatura en etapas tempranas y tardías de su época crítica y ii) identificar cuál es el umbral térmico más adecuado para describir la relación entre las temperaturas altas en el período crítico de la soja (enero a marzo) y su rendimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se obtuvieron datos de temperatura del aire y la superficie del suelo del período 2004-2020 en 18 localidades argentinas (Tabla 1), considerando 3 fuentes de información:

- i) Temperaturas máximas diarias (EST) provistas por el Servicio Meteorológico Nacional
- ii) Temperaturas máximas de la base de datos de reanálisis ERA-5 correspondiente al pixel en el que se encontraba localizada cada estación meteorológica (ERA5)
- iii) Temperaturas de superficie diarias derivadas del satélite MODIS Aqua (SAT) tomadas en un horario cercano al de ocurrencia de la temperatura máxima en zonas compatibles con cultivo de soja en cada una de las localidades estudiadas. Estas zonas fueron previamente seleccionadas a través de un estudio de valores de NDVI (Barberis et al., 2025).

Tabla 1. Listado de localidades incluidas en el estudio

Azul	Gral. Pico	Laboulaye	Paraná	Pigüé	San Pedro
Ceres	Gualeguaychú	Manfredi	Pehuajó	Rio Cuarto	Santa Rosa
Concordia	Junín	Nueve de Julio	Pergamino	Rosario	Tandil

Se agruparon los datos en períodos decádicos mensuales (DM: 30 días comenzando en la primera, segunda o tercera década del mes) durante los meses correspondientes al período crítico de la soja. Para cada localidad, año y DM se calculó un índice (TXu), estimado

como la frecuencia de días con temperaturas máximas (TX) superiores a un umbral de temperatura (u), fijado entre 30 y 36°C a intervalos de 1°C.

Se tomaron datos de rendimiento de soja provistos por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación correspondiente a los departamentos en los que se encuentran ubicadas las estaciones meteorológicas, a los que se les removió la tendencia lineal a fin de filtrar cambios debidos a avances tecnológicos. Se correlacionó los rendimientos de soja con los índices de temperatura correspondiente a cada período DM y localidad. Los resultados fueron sintetizados mediante diagramas de caja (“boxplots”), prestándose especial atención a las medianas, que puede tomarse como un valor de referencia regional. Finalmente, se analizó la relación entre las medianas de los valores de correlación y los distintos umbrales térmicos considerados para las 3 bases de datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Independientemente del umbral térmico utilizado, la relación entre el rendimiento y el TXu fue negativa y significativa en la mayor parte de los casos en los que se utilizaron temperaturas medidas con SAT (Fig. 1). Estos resultados sugieren que el rendimiento de soja se reduce al aumentar la frecuencia de días con temperaturas máximas elevadas durante su período crítico registradas a nivel del canopeo. La temperatura foliar está directamente asociada con el metabolismo de las plantas y aumenta, también, por el cierre estomático en respuesta al estrés hídrico. Por lo tanto, el Txu estimado con SAT no solo reflejaría el impacto directo del aumento térmico del aire sino también el calentamiento originado por el déficit hídrico.

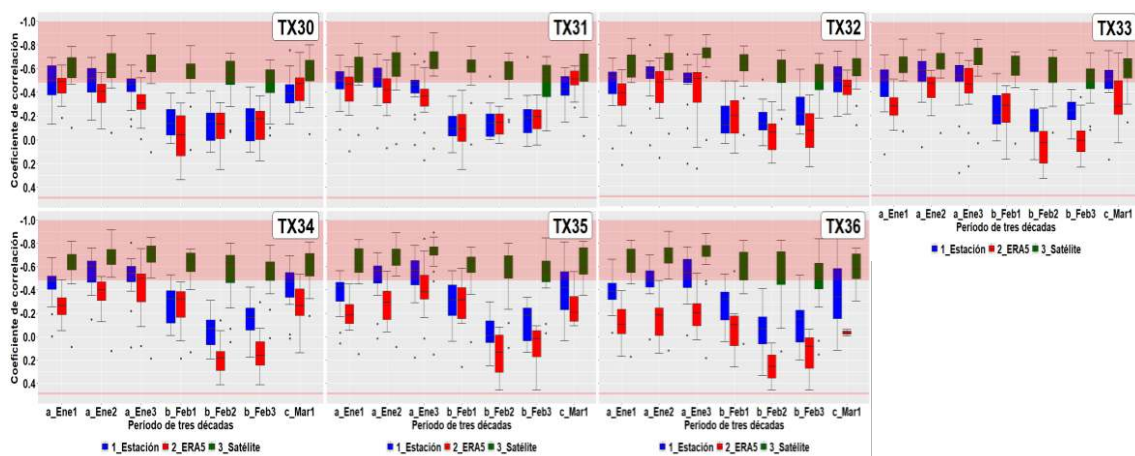


Fig. 1. Box-plots de los coeficientes de correlación entre los rendimientos de soja y la frecuencia de días con temperaturas máximas (TX) superiores a 30 (a), 31 (b), 32 (c), 33 (d), 34 (e), 35 (f) y 36°C (g) según la fuente de los datos de temperatura. Las líneas horizontales de cada caja indican las medianas; el sector coloreado corresponde a los rangos de r que resultaron significativos. El eje Y está con escala invertida.

Cuando se utilizaron índices calculados con EST, las relaciones con los rendimientos de soja resultaron significativas solamente en los tres periodos DM de enero y el primero de marzo (Fig. 1). Si bien estos resultados pueden sugerir una sensibilidad diferente de las distintas etapas del cultivo a las temperaturas ambientales altas, cabe señalar que en febrero el NDVI del cultivo fue máximo (Barberis et al., 2025). Puede suponerse que, a medida que se incrementa el área foliar del cultivo, se reduce el acoplamiento entre la temperatura del canopeo y la del aire. De hecho, se ha encontrado que en canopeos de soja sometidos a estrés térmico, la temperatura foliar se incrementa en cultivos con déficit

hídrico, pero es inferior a la ambiental en cultivos con buen suministro hídrico debido al enfriamiento producido por la transpiración (Ergo et al. 2021). Las correlaciones entre el rendimiento y los TXu calculados por reanálisis ERA5 fueron similares a las de EST cuando el umbral se fijó en 30 o 31°C en el inicio del período crítico, pero con las temperaturas mayores las relaciones fueron no significativas. Los datos ERA5 parecerían no capturar los efectos de las temperaturas más altas sobre el rendimiento de la soja en la región.

A modo de síntesis regional, en la figura 2 se presentan los valores de mediana de los coeficientes de correlación discriminados por umbral térmico y período DM. El máximo valor encontrado corresponde al período que inicia en la 3ra década de enero con un umbral de 34°C en la superficie del suelo (SAT). Este umbral también maximiza la mediana de correlación en otros períodos considerados (Fig. 2c). No fue posible encontrar un umbral único que maximizara la mediana de la correlación en todos los períodos DM utilizando mediciones de EST (Fig. 2 a) ni ERA 5 (Fig2 b).

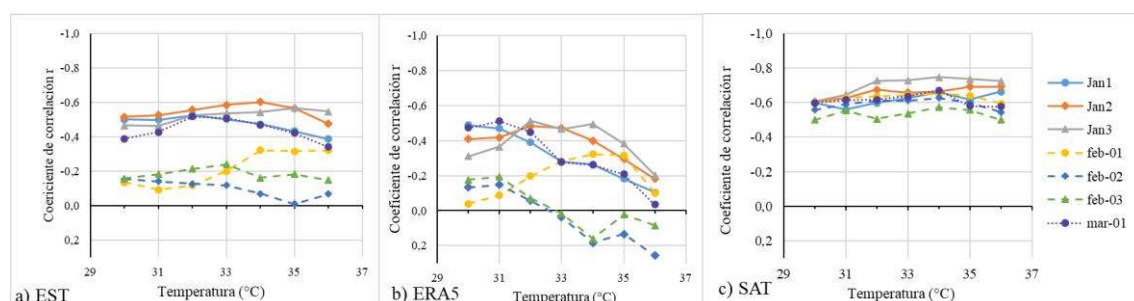


Fig 2. Mediana del coeficiente de correlación entre rendimientos de soja y el TXu, según período DM y umbral térmico (a) datos de estaciones (b) ERA5 (c) datos satelitales. El eje Y esta con escala invertida.

CONCLUSIONES

Los datos de SAT resultaron más adecuados para describir los efectos de las temperaturas máximas extremas sobre el rendimiento de soja que los de EST o ERA5, especialmente cuando éstos ocurren promediando la época crítica del cultivo. Es difícil establecer un único umbral para caracterizar extremos térmicos con impacto en rendimientos de soja en la Pampa Húmeda, pero en función de los resultados aquí presentados, puede considerarse al valor de 34°C (SAT) como un umbral adecuado para esta caracterización.

AGRADECIMIENTOS: subsidios PICT2019-2019-02933, CONICET PIP 0333 (2021-2023) y UBACyT 20020220200111BA

REFERENCIAS

- Barberis, G., Barrucad, M., Kantolic, A. 2025 Extreme air and surface temperatures in areas compatible and non-compatible with soybean cultivation. *Theoretical and Applied Climatology* 156, 221. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05447-6>
- Ergo, V. V., Veas, R. E., Vega, C. R. C., Lascano, R., Carrera, C. S. 2021. Leaf photosynthesis and senescence in heated and droughted field-grown soybean with contrasting seed protein concentration. *Plant Physiology and Biochemistry* 166, 437–447
- Nahar, K., Hasanuzzaman, M., Fujita, M. 2016. Heat stress responses and thermotolerance in soybean. En: Miransari, M. (Ed) *Abiotic and biotic stresses in soybean production*, pp. 261-284. Elsevier.

ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN EL OBSERVATORIO ARGENTINO-ALEMÁN DE GEODESIA

Jonatan Pendiuk^{1,2}, Luis Guarracino^{1,2}, María Florencia Degano^{2,3}, Raúl Rivas^{2,4}
jpendiuk@fcaglp.unlp.edu.ar Autor correspondiente.

- ^{1.} Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP).
- ^{2.} Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
- ^{3.} Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff" (IHLLA)
- ^{4.} Comisión de investigaciones Científicas (CIC)

Palabras clave: Precipitación satelital, Evapotranspiración, Balance Hidrológico.

1) INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones (P) y la evapotranspiración (ET) constituyen las variables hidroclimáticas más relevantes en la provincia de Buenos Aires, ya que son los principales mecanismos de entrada y salida de agua en los sistemas hidrológicos de llanura. Una cuantificación precisa de estos procesos resulta fundamental para comprender los eventos de inundaciones y sequías que afectan a la región.

El Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO; -34,873611, -58,139778) cuenta con instrumental geodésico avanzado que puede ser utilizado para la cuantificación de la ET . En diciembre de 2015, se instaló un gravímetro superconductor (SG038) que permite monitorear de manera indirecta las variaciones de las reservas de agua de manera integral dentro de un radio de 1000 m. Además, AGGO cuenta con 3 estaciones pluviométricas y sensores de humedad del suelo distribuidos a diferentes profundidades. Desafortunadamente, los pluviómetros se encuentran cercanos a edificaciones y son frecuentemente obstruidos por hojas de una plantación de eucaliptos lindera. Debido a ello, los datos de precipitación muestran ciertas inconsistencias que limitan significativamente su utilización en la ecuación de balance dando lugar a estimaciones no realistas de la ET .

Para abordar esta limitación, se evaluaron dos productos satelitales de precipitación: CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*; Funk et al., 2015) y GSMaP V8 (*Global Satellite Mapping of Precipitation*; Kubota et al., 2020). Estos productos fueron validados con registros de una estación meteorológica instalada en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG) situada a una distancia aproximada de 19 km de AGGO. Los datos de precipitación satelital están disponibles en la plataforma *Google Earth Engine* y permiten realizar una caracterización espacio-temporal de la precipitación. CHIRPS provee datos de precipitación diaria a una escala de 30 km², mientras que GSMaP ofrece datos horarios con una resolución espacial de 124 km². Esta comparación permite evaluar la eficacia de ambos productos satelitales para reproducir las precipitaciones locales en la FCAG, y a su vez, evaluar la confiabilidad de los datos medidos en AGGO.

Para estimar la ET a escala mensual se utiliza la siguiente expresión simplificada de la ecuación de balance hidrológico para ambientes de llanura (Pendiuk et al. 2023):

$$ET = 0,95P - C\Delta g \quad (1)$$

donde Δg son los residuos de gravedad obtenidos del gravímetro SG038; C es un factor de conversión específico para el sitio de estudio que relaciona variaciones de gravedad con cambios en el almacenamiento de agua, cuyo valor es $2,57 \text{ mm/nm/s}^2$; y el término $0,95P$ considera que una pequeña parte de P se pierde por escorrentía en el sitio de estudio (alrededor del 5 %). La metodología propuesta combina productos satelitales de P con datos de un gravímetro superconductor constituyendo una herramienta novedosa para la estimación de la ET .

2) METODOLOGÍA Y RESULTADOS

La comparación entre los productos CHIRPS y GSMaP con los datos pluviométricos de la FCAG a una escala mensual se realizó para los periodos 1981–2023 y 1998–2023, respectivamente. La Figura 1 muestra el diagrama de dispersión de los datos cuyas métricas estadísticas se listan en la Tabla 1. El análisis comparativo integral muestra que GSMaP presenta errores menores y una correlación mayor a los estimados con CHIRPS. Por lo tanto, se sugiere el uso de GSMaP complementado con correcciones locales para aplicaciones hidrometeorológicas en la zona de estudio.

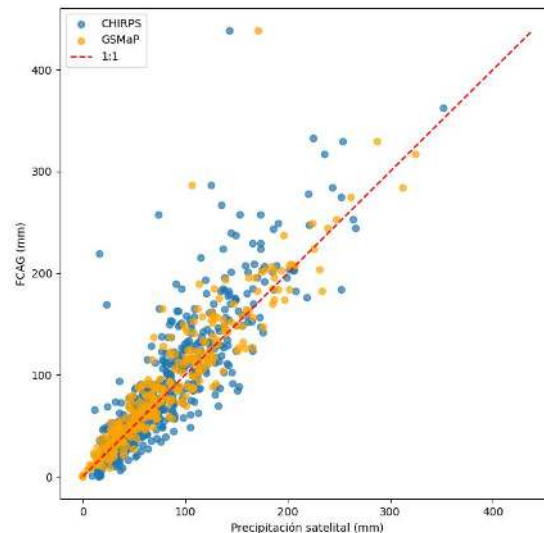


Figura 1: diagrama de dispersión entre las precipitaciones observadas en FCAG y los productos satelitales CHIRPS y GSMaP.

Producto	N	r	RMSE (mm/mes)	MAE (mm/mes)	Sesgo (mm/mes)
CHIRPS	504	0,84	35,1	22,7	-8,2
GSMaP	300	0,92	26,6	15,2	-7,0

Tabla 1: resultados de las métricas estadísticas. r: coeficiente de correlación de Pearson; RMSE: raíz del error medio cuadrático; MAE: error medio absoluto; N: número de datos utilizados en el análisis.

Para analizar la confiabilidad de los datos de precipitación medidos en AGGO se utilizó el producto GSMaP para el período 2017-2023. Las métricas estadísticas obtenidas en este caso

fueron $RMSE = 62$ mm/mes, $MAE = 44,3$ mm/mes, sesgo = $-32,4$ mm/mes y $r = 0,84$. Como puede observarse, los registros pluviométricos de AGGO muestran un desempeño limitado al representar el ingreso de agua al sistema, el cual no está en concordancia con los datos observados de nivel freático, gravedad y humedad del suelo.

Valorada la inconsistencia de P , se estima la ET mensual mediante la ecuación (1) utilizando datos del gravímetro SG038 junto con los datos de GSMaP y los registros de los pluviómetros de AGGO (Fig. 2). Este análisis permite evaluar el impacto de las diferentes fuentes de datos en la estimación de la ET . Los datos de P local de AGGO tienden a sobreestimar la ET generando salidas de aguas del sistema que superan la precipitación. Además, se observan picos inconsistentes en la ET que no se corresponden con los valores observados de humedad del suelo. En contraste, los datos de GSMaP proporcionan estimaciones más confiables de ET y representan una alternativa viable para su estimación a escala mensual.

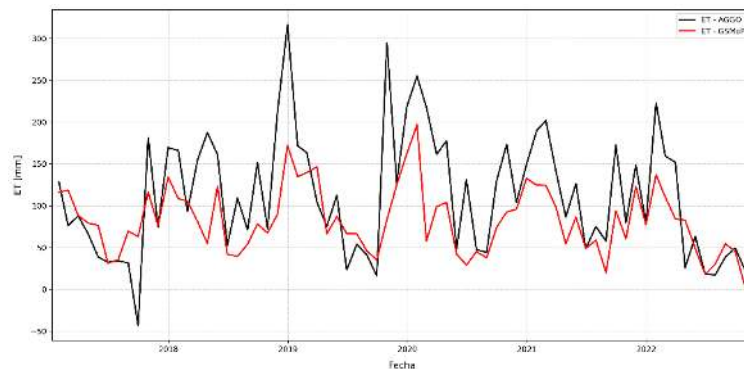


Figura 2: Estimación de la ET utilizando datos de precipitación de GSMaP ($ET - GSMaP$) y registrados en AGGO ($ET - AGGO$).

3) CONCLUSIONES

Este trabajo contribuye al entendimiento de los procesos hidroclimáticos en la región de AGGO mediante la integración de observaciones satelitales y datos gravimétricos, con aplicaciones directas para la evaluación de las reservas de agua y la respuesta del sistema hidrológico ante la variabilidad climática. El análisis estadístico realizado demuestra que GSMaP tiene un mejor desempeño que CHIRPS en la zona de estudio, reproduciendo con mayor precisión la dinámica general de las precipitaciones a escala mensual. Además, se muestra que los datos de P satelital minimizan los efectos de la falta de limpieza y mala ubicación de los pluviógrafos de AGGO siendo de gran valor para la estimación precisa de la ET .

REFERENCIAS

- Funk, C., et al, 2015: The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2, 150066.
- Kubota, T., et al., 2020: Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) Products in the GPM Era. In: Levizzani, V., Kidd, C., Kirschbaum, D.B., Kummerow, C.D., Nakamura, K., Turk, F.J. (eds) *Satellite Precipitation Measurement. Advances in Global Change Research*, vol 67. Springer, Cham.
- Pendiuk, J., et al., 2023: Superconducting Gravimeters: A Novel Tool for Validating Remote Sensing Evapotranspiration Products. *Hydrology*, 146.

A CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA MARINHA NA CONFLUÊNCIA BRASIL-MALVINAS: UMA COMPARAÇÃO ENTRE OBSERVAÇÕES *IN-SITU* E ERA5

**Raquel Machado Machado¹, Douglas da Silva Lindemann¹, Jonas da Costa Carvalho¹,
Luís Felipe Ferreira de Mendonça², Luciano Ponzi Pezzi³**
machadomraquel@gmail.com. Autora correspondente.

¹Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

²Universidade Federal da Bahia (UFBA)

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Palavras-chave: Interação oceano-atmosfera, validação de reanálise, estatística

ABSTRACT

The aim of the study was to compare the ERA5 reanalysis with in-situ data from the 41st Antarctic Operation, collected between October 19 and 21, 2022, at the Brazil-Malvinas Confluence. The results showed that the reanalysis underestimates the potential temperature and performed best on the 21st, when the boundary layer was stable. The reanalysis reasonably represents atmospheric conditions but has limitations in situations with a more turbulent boundary layer.

1) INTRODUÇÃO

O oceano e a atmosfera são componentes do sistema climático global fortemente relacionados, e os processos de interação oceano-atmosfera ocorrem na camada limite atmosférica marinha (CLAM). No Oceano Atlântico Sudoeste, diversos estudos destacam a importância de estudar a Confluência Brasil-Malvinas (CBM), uma feição oceânica muito energética. Essa região é caracterizada pelo encontro de duas correntes superficiais de sentidos opostos: A Corrente do Brasil (CB) de águas quentes e salinas e a Corrente das Malvinas (CM) de águas frias e menos salinas (Legeckis and Gordon, 1982).

Esses gradientes de temperatura da superfície do mar influenciam a estabilidade da CLAM na região da CBM (Pezzi *et al.*, 2021), de forma que, na CB, as águas quentes induzem mudanças na magnitude e intensidade dos ventos, ocasionando ventos mais intensos na superfície do mar e tornando a CLAM mais turbulenta e instável (Shi *et al.*, 2017). O oposto ocorre na região da CM.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar os perfis verticais da camada limite atmosférica marinha em três pontos da região da CBM, nos dias 19 a 21 de outubro de 2022, por meio da comparação entre dados observados *in-situ* e dados da reanálise ERA5 a fim de avaliar a capacidade da reanálise em representar as condições atmosféricas observadas.

2) METODOLOGIA

A área de estudo abrange 3 pontos específicos na região da Confluência Brasil-Malvinas, no Oceano Atlântico Sudoeste: 41.06° S; 50.42° W (19 de outubro de 2022 às 15h00), 43.23° S; 53.16° W (20 de outubro de 2022 às 9h40) e 45.02° S; 55.39° W (21 de outubro de 2022 às 03h30), conforme mostrado na Figura 1.

Serão utilizados dois conjuntos de dados: temperatura do ar (°C) e pressão atmosférica (hPa) oriundos de lançamentos de radiossondas ao longo do trajeto do NPo Almirante Maximiano durante a 41ª Operação Antártica, e dados das mesmas variáveis provenientes da reanálise ERA5, pertencente ao ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) (Hersbach et al., 2020).

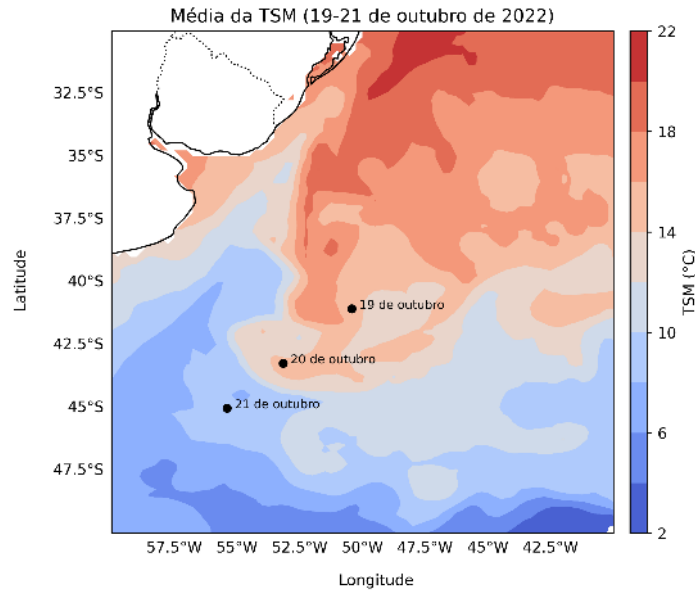


Figura 1: Localização da região de estudo e das medições dos dados observados.

Os perfis verticais da camada limite atmosférica para os dois conjuntos de dados foram estimados a partir do cálculo da temperatura potencial, conforme metodologia proposta por Stull (1988). A fim de comparar o desempenho do ERA5 em relação aos dados observados, foram realizadas avaliações estatísticas com os cálculos da raiz do erro quadrático médio (RMSE), que define a diferença entre os valores previstos pela reanálise e os valores dos dados observados, e valores de viés (*BIAS*), que mostram a tendência do resultado da reanálise em superestimar ou subestimar os valores registrados pelos dados observados.

3) RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os perfis verticais de temperatura potencial (K) para os dados observados (em azul) e da reanálise ERA5 (em vermelho). De maneira geral, a reanálise foi capaz de detectar um padrão de perfil, mas, devido à sua baixa resolução, não conseguiu representar com precisão os dados observados, que são de alta resolução, especialmente nos primeiros metros próximos à superfície. Essa limitação pode estar relacionada à resolução vertical e horizontal da reanálise.

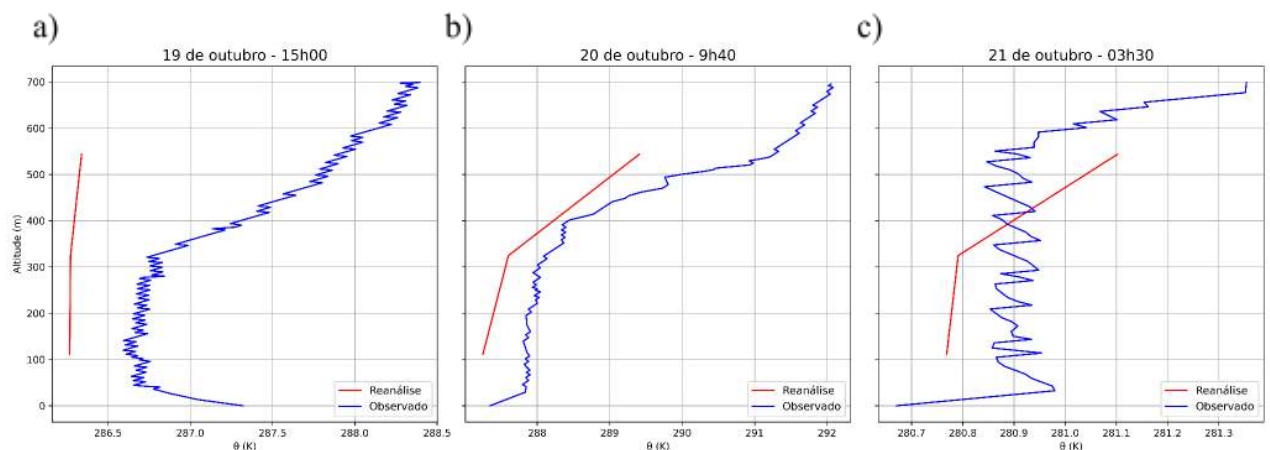


Figura 2: Perfis verticais de temperatura potencial (K) dos dados observados (em azul) e da reanálise ERA5 (em vermelho) para os dias a) 19, b) 20 e c) 21 de outubro.

Na comparação estatística do desempenho da reanálise com os dados observados (Tabela 1), os resultados mostram um desempenho razoável da reanálise na representação das condições atmosféricas. A ERA5 tende a subestimar a temperatura potencial nos 3 dias analisados, especialmente nos dias 19 e 20 de outubro. Essa subestimação pode estar associada aos horários das medições, realizadas pela manhã no dia 20 e pela tarde no dia 19, quando a camada limite se encontra mais turbulenta e instável. O pior desempenho da reanálise foi pela manhã, quando a camada limite se encontrava em transição.

Por outro lado, no dia 21, a reanálise obteve o melhor desempenho, com o viés quase nulo e RMSE baixo. Esse resultado sugere que as condições atmosféricas foram mais bem capturadas pelo modelo, possivelmente porque a medição foi realizada durante a madrugada, quando a camada limite estava mais estável, o que pode ter facilitado o alinhamento com os padrões representados pelo ERA5.

	19 de outubro	20 de outubro	21 de outubro
RMSE	1.1835	1.3906	0.1314
BIAS	-1.0244	-1.1192	-0.0364

Tabela 1: Avaliação estatística entre a reanálise e os dados observados para os dias 19, 20 e 21 de outubro.

4) CONCLUSÃO

Os resultados indicam que a reanálise ERA5 representa de forma razoável os perfis verticais da camada limite atmosférica marinha, mas tende a subestimar a temperatura potencial, especialmente em condições de maior turbulência atmosférica. O melhor desempenho ocorreu sob condições mais estáveis, sugerindo que a precisão da reanálise está relacionada à estabilidade da atmosfera.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o suporte financeiro fornecido pela Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- Hersbach, H. et al., 2020.** The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999-2049.
- Legeckis, R.; Gordon, A. L., 1982.** Satellite observations of the Brazil and Falkland currents - 1975 to 1976 and 1978. Deep-Sea Research, Great Britain, 29, 375-401.
- Pezzi, L.P. et al., 2021.** Oceanic eddy-induced modifications to air-sea heat and CO₂ fluxes in the Brazil-Malvinas Confluence. Scientific Reports, 11, 10648.
- Shi, R. et al., 2017.** Ship observations and numerical simulation of the marine atmospheric boundary layer over the spring oceanic front in the northwestern South China Sea. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122, 3733-3753.
- Stull, R. B. 1988.** An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Dordrecht: Springer Netherlands.

INTEGRACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS DE DISTINTOS SENSORES DE VARIABLES AMBIENTALES Y DE CENTRALES METEOROLÓGICAS

Leonardo Navarría^(1,2) , Guillermo D. Rodríguez^(1,2), R. Ezequiel García^(1,2)

lnavarria@fcaglp.unlp.edu.ar

1 - Grupo de Investigación y Desarrollo en Radiofrecuencia e
Instrumentación (GIDRI). Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad
Nacional de La Plata

2 - Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata

Palabras clave: integración, conectividad, mensajería

1. Introducción

La posibilidad de adquirir y procesar cualquier tipo de datos registrados es hoy más una necesidad que un deseo. Dentro de las competencias/proyectos en los que participa el Grupo de Investigación y Desarrollo en Radiofrecuencias e Instrumentación (GIDRI), hay varios relacionados con la captura de datos (meteorológicos, geofísicos, etc) [1] y resulta imperioso abordar esta tarea para simplificar y potenciar la capacidad operativa. Los sensores empleados para la obtención de datos ambientales emplean distintas tecnologías, por lo tanto es necesario disponer de un sistema suficientemente flexible que permita la recolección de los datos de modo transparente al sensor que lo produce. En nuestro caso, una de las plataformas empleadas y presentada en este trabajo es Node-RED, a la cual se vinculan los distintos transductores utilizando diferentes interconexiones. Este trabajo puede ser escalable a cualquier variable, por ejemplo del tipo geofísica [2] que se desee monitorear cómo el campo magnético terrestre o la precipitación de partículas energéticas en la ionósfera.

2. Desarrollo

Los datos meteorológicos suelen provenir de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) de diferente origen en este caso en particular para el desarrollo se utilizó una estación de la marca Campbell Scientific, modelo CR310[3] y otra de diseño propio basado en la plataforma Arduino[4]. Para la integración de estos dispositivos se utilizó el protocolo MQTT, Node Red y un visualizador de datos tanto en Node Red como en Ubidots.

En este trabajo adoptamos que las variables de interés por medir sean temperatura, presión atmosférica, humedad, humedad de suelo y precipitación.

En la figura 1 se muestra el prototipo de la EMA realizada con la plataforma Arduino , plataforma de desarrollo basada en una tarjeta electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador programable en distintas versiones según el microcontrolador seleccionado de cada modelo. Todas las variables monitoreadas son transmitidas a un servidor externo, a través de ethernet en este caso la plataforma ThingSpeak, que es servicio en una plataforma analítica que permite visualizar y analizar datos en tiempo real almacenados en la nube acorde a las velocidades limitantes de la red. Los datos almacenados pueden ser procesados en un código de MATLAB y ser visualizados en la misma página.

La estación meteorológica comercial Campbell CR-310 (fig 2) utiliza como forma de enlace remoto el software PC400, propietario de la firma que además de recolectar datos permite la configuración de la estación. Este software es provisto con la compra de la estación.

El software permite la lectura punto a punto por puerto usb, puerto serie RS-232C o por ethernet. La recolección de datos se realiza de forma asincrónica, es decir, se bajan los datos en determinado formato de archivo y luego se realiza el procesamiento para la visualización. En caso de detectar un valor de determinada variable que requiera cierta intervención, esta se haría con el retardo que lleva el procesamiento del dato. En el caso de las estaciones Campbell para poder adquirir datos de forma remota de varias estaciones y poder visualizarlas en tiempo real mediante dashboards, la firma ofrece bajo pago distintos paquetes de software, como ser LoggerNet, RTMCPRO [3] y sus distintas versiones, que requieren una licencia anual. La dependencia de licencias anuales genera una dependencia con el proveedor además del costo en moneda extranjera que esto conlleva.

Seleccionar un sistema de almacenamiento de datos que facilite la recopilación y utilización de grandes cantidades de datos meteorológicos es un gran desafío. Garantizar el acceso rápido y eficiente a estos datos puede ser una tarea compleja, ya que los enfoques centrados en el almacenamiento y procesamiento local sólo son adecuados para sistemas más pequeños. El Internet de las cosas (IoT), acompañado de la proliferación de dispositivos que generan y consumen diferentes tipos de datos, también implica la necesidad de métodos de procesamiento de datos capaces de abordar la naturaleza descentralizada de la información. En este sentido, han surgido

varias opciones para el desarrollo de servicios basados en la nube, entre los que se pueden citar IBM Cloud, Microsoft Azure, Amazon Web Services y Google Cloud [5]. Se debe tener en cuenta que todas las opciones mencionadas anteriormente poseen un costo acorde al volumen de datos que se desea trabajar. Para aplicaciones de bajo volumen de datos se pueden utilizar servidores locales acorde a las necesidades de la aplicación. Para solucionar la lectura de las estaciones de forma remota y sin depender de licencia se implementó una solución basada en Node-RED[6], el protocolo de comunicación MQTT[7] y opcionalmente la visualización de datos. Node-RED es una herramienta que permite realizar conexiones entre dispositivos, APIs

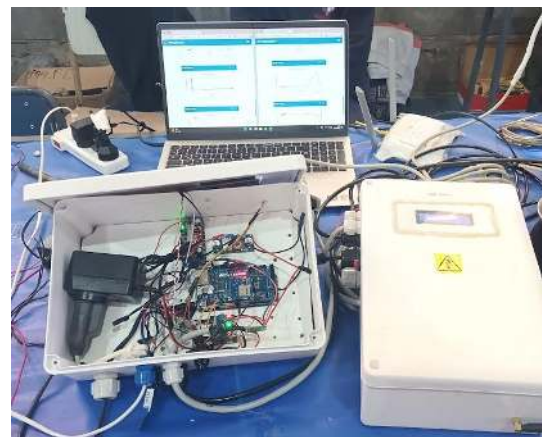


Figura 1: Estación Meteorológica de diseño propio

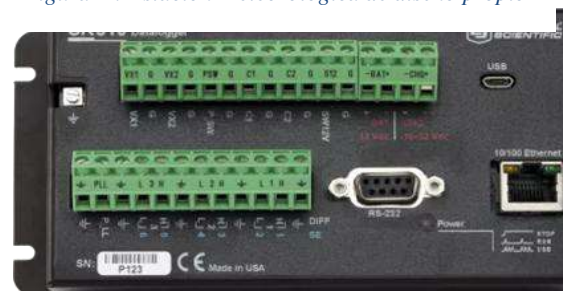


Figura 2: Datalogger Campbell CR-310

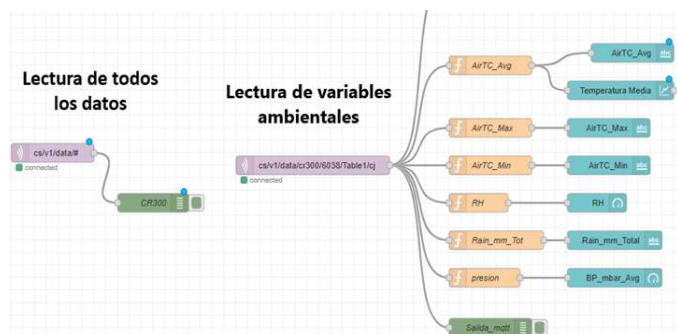


Figura 3 Diagrama de flujo en Node Red

(interfaz de programación de aplicaciones). Se realizan distintas interconexiones entre los dispositivos creando diagramas de flujo que se editan en el navegador de internet. Cada dispositivo o API requiere de la instalación de librerías para ser utilizado.

Dentro de Node Red se puede implementar un visualizador de diseño propio como se muestra en la figura 4. Esto se implementa con el tratamiento de los datos recibidos y luego mediante funciones de JavaScript se acondicionan los datos para ser mostrados.

En nuestro caso, se implementó una base de datos del tipo SQL (por sus siglas en inglés Structured Query Language), la que consta de una colección de tablas en las que se almacena un conjunto específico de datos estructurados. Con el lenguaje SQL se permite crear, leer, actualizar y borrar datos y tablas de las bases de datos. Las consultas permiten extraer los datos necesarios de las bases de datos.. Se utilizó la herramienta XAMPP [7], que es una distribución de Apache sin costo de licencia y que contiene MariaDB, PHP y Perl. Dentro del panel de control de XAMPP se debe correr Apache, también de código abierto, y que es la aplicación más usada globalmente para la entrega de contenidos web. Las aplicaciones del servidor son ofrecidas como software libre por la Apache Software Foundation. [6].

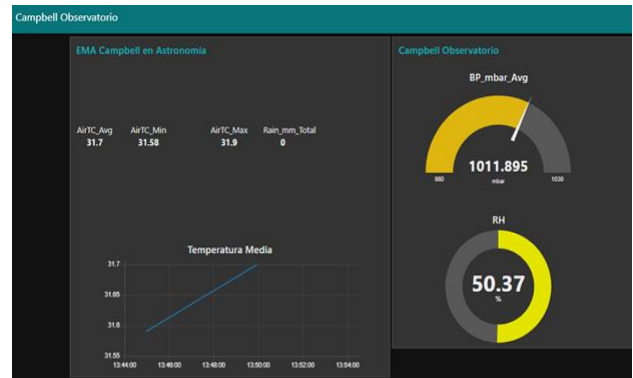


Figura 4: Dashboard diseñada en Node-Red

3. Conclusiones y trabajo a futuro

En la actualidad en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP se encuentran utilizando este sistema para la visualización de las variables climáticas que son adquiridas por una estación Campbell modelo CR-310.

Con este tipo de tecnologías se busca que una gran diversidad de dispositivos instalados en los campos pueda enviar datos y con ellos procesarlos y visualizarlos. La obtención de los datos de interés meteorológico permite conocer el punto de partida para la tesis de doctorado titulada “Modelo digital para la reducción del impacto ambiental de las actividades agrícolas utilizando variables climatológicas en tiempo real aplicado al cordón frutihortícola del gran La Plata”.

Asimismo como política pública de extensión el autor y tesista coordina el proyecto de extensión UNLP “¿Cómo está el tiempo en tu escuela?”

4. Referencias

- [1] Cátedra Instrumentos y Observación. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas – UNLP.
- [2] Cátedra Instrumental Geofísico y Electrónico. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas-UNLP.
- [3] <https://www.campbellsci.es/cr310>
- [4] <https://www.arduino.cc/>
- [5] Derhamy, H.; Eliasson, J.; Delsing, J.; Priller, P. A survey of commercial frameworks for the internet of things. In Proceedings of the 20th IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), Luxembourg, 8–11 September 2015; pp. 1–8
- [6] <https://nodered.org/>
- [7] <https://www.apachefriends.org/>

MONITOREO DE DATOS EN TIEMPO REAL Y ENVÍO DE ALERTAS

Leonardo Navarría^(1,2) , Guillermo D. Rodríguez^(1,2), R. Ezequiel García^(1,2)

lnavarria@fcaglp.unlp.edu.ar

1 - Grupo de Investigación y Desarrollo en Radiofrecuencia e Instrumentación (GIDRI). Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata

2 - Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata

Palabras clave: tiempo real, alertas

1. Introducción

Un sistema de alerta temprana es efectivo cuando puede responder a las necesidades y se actúa de forma consecuente. En la gestión de riesgos, es necesario un monitoreo de las variables testigo que provean los datos para el análisis y evaluación del mismo, como antecesores de la acción que evite o que minimice los posibles daños.

Siguiendo esta línea de investigación, se presenta en este trabajo la implementación de un sistema que permite, además de la recolección de los datos necesarios, el envío de mensajes de alerta utilizando la herramienta Telegram. Tanto el envío de mensajes, los datos y las alertas son configurables por software y la herramienta empleada permite la difusión a múltiples destinatarios.

La estrategia mencionada se aplica en este caso, a una estación meteorológica automática (modelo CR-310 de la marca Campbell Scientific), siendo la herramienta de desarrollo la plataforma Node-RED, empleando protocolos de comunicación MQTT

2. Desarrollo

Según la Organización Meteorológica Mundial (WMO [1]) los sistemas de alerta temprana son una herramienta vital para ayudar a la sociedad a adaptarse a los fenómenos peligrosos relacionados con el tiempo, el agua y el clima. Presentan una buena relación costo/ eficiencia, salvan vidas, reducen las pérdidas económicas y sus beneficios multiplican la inversión realizada.

Los servicios de alerta temprana apuntalan el progreso en muchos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [2] que son el plan maestro para conseguir un futuro sostenible para todos los habitantes del planeta. Se interrelacionan entre sí e incorporan los desafíos globales a los que nos enfrentamos día a día, como la pobreza, la desigualdad, el clima, la degradación ambiental, la prosperidad, la paz y la justicia. Para no dejar a nadie atrás, es importante que se logre cumplir con cada uno de estos objetivos para 2030, tema que en la actualidad se encuentra muy en discusión [3].

La OMM, junto con la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), codirige la iniciativa Alertas Tempranas para Todos, iniciativa que es un ejemplo de consecución práctica del ODS 17, relativo a las alianzas. Esta iniciativa exige la colaboración a escala mundial entre las entidades de las Naciones Unidas, la comunidad científica, el sector privado, las instituciones financieras, los Gobiernos y el mundo académico, entre otros.

En su forma más básica, un sistema de alerta temprana estará conformado por cuatro elementos:

1. Conocimiento sobre el riesgo de desastres,
2. Detección, seguimiento, análisis y previsión,
3. Difusión y comunicación de alertas, y
4. Capacidad de preparación y respuesta.

Los cuatro elementos revisten igual importancia para reducir los impactos de los fenómenos extremos y cada elemento, debe contar con la participación de personas y organizaciones que lo sustenten.

Imbuidos de esta iniciativa, desarrollamos un sistema de alerta temprana, el cuál consta de:

- Sensores que registran datos sobre el comportamiento de los parámetros testigo y que en nuestro caso son: temperatura, presión, humedad y precipitaciones, siendo posible y sencillo agregar sensores para otras variables
- Redes de comunicación que proporcionen una adecuada transferencia de dato,
- Procesamiento adecuado de los datos obtenidos,
- Almacenamiento de datos en una plataforma digital, que permite además un nivel básico de análisis y la ejecución de acciones consecuentes con el mismo, como el envío de mensajes de alerta u otras más complejas como el cierre/apertura de una esclusa.

El buen funcionamiento de estos cuatro componentes y la configuración del nivel de alerta adecuado servirá para cumplir con la detección, seguimiento, análisis y previsión para luego comunicar a quien corresponda las anomalías detectadas.

Los sensores empleados se encuentran conectados a una estación meteorológica automática Campbell Scientific CR-310, perteneciente a la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (La Plata Observatorio¹).

Para poder recolectar los datos de la estación se utilizó un diseño realizado en la plataforma Node-RED junto con el protocolo de comunicación MQTT. Node-RED es una herramienta que permite realizar conexiones entre dispositivos, APIs (interfaz de programación de aplicaciones). Estas interconexiones entre dispositivos se crean mediante diagramas de flujo que se editan en el navegador de internet. Cada dispositivo o API requiere de la instalación de librerías para ser utilizado. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es el protocolo de intercambio de datos para la mensajería de IoT (Internet of Things).

Dentro de la aplicación Node-Red se pueden utilizar distintas paletas (figura 1) para instalar distintos nodos, en este caso, la paleta instalada es la que corresponde a Mensajería MQTT y la correspondiente a Telegram.

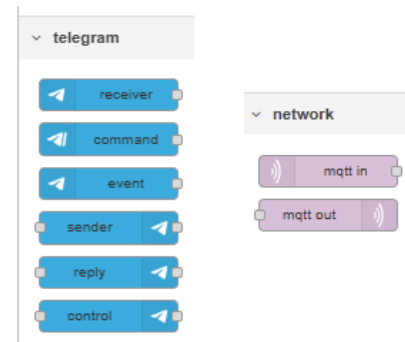


Figura 1: Paletas de Telegram y mqtt

En la figura 2 se muestra la interconexión entre la estación meteorológica que envía los datos a un servidor mqtt al cual se accede para realizar la visualización y control de datos.

¹ <https://maps.app.goo.gl/EGNGVDCKHkZUa5dd6>

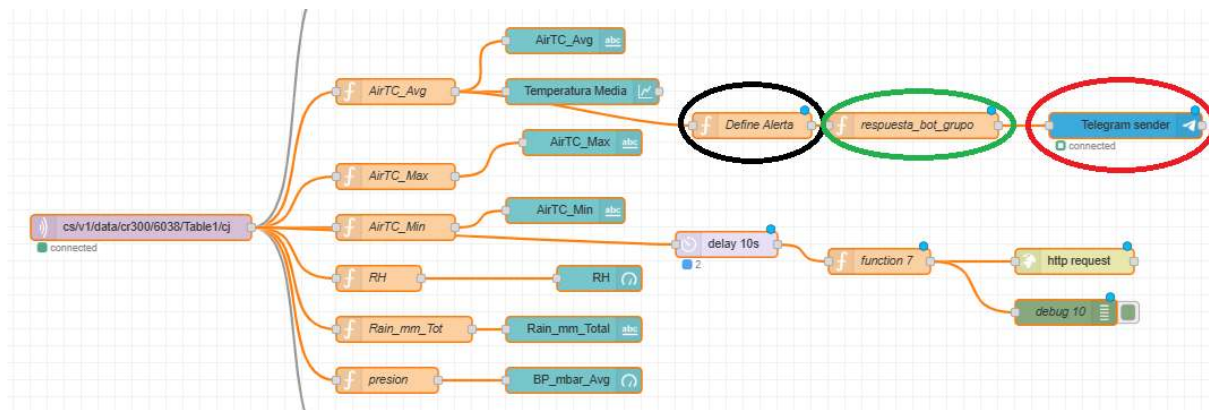


Figura 2: Interconexión entre EMA y Telegram

El bloque de función “Define Alerta” (fig. 3A) es el encargado de detectar el valor que se quiere seguir. Este bloque es programado en lenguaje JavaScript y es configurable acorde a las necesidades del requiriente del sistema. Es decir, se podrían configurar las alertas necesarias, por ejemplo, temperatura, presión, valor de precipitaciones, altura de determinado río, cualquier variable física medida y el valor que se desee alertar.

El bloque de función “respuesta_bot_grupo” (fig. 3B) tiene como misión transferir la alarma al grupo de Telegram, previamente creado. Este grupo contiene un bot previamente creado con la herramienta BotFather de Telegram [4]

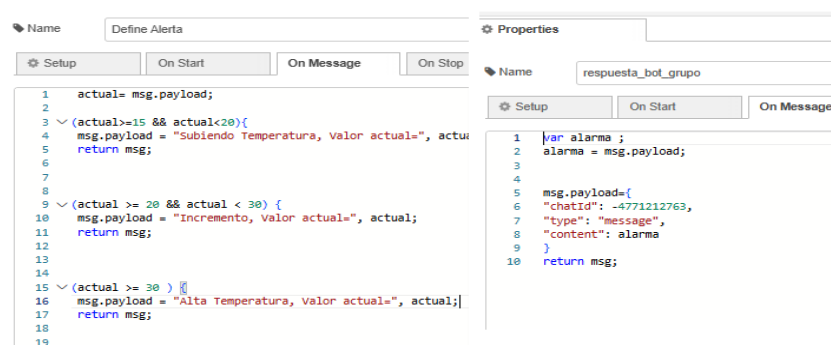


Figura 3A y 3B

Finalmente el bloque “Telegram sender” se encarga de ejecutar el comando para enviar el mensaje hacia el servidor de Telegram.

3. Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo se diseñó un sistema de alertas configurables que permite alertar a un grupo de usuarios que se encuentren asociados a un grupo de telegram. Estas alertas pueden provenir de diferentes sensores de variables físicas, ya sean meteorológicos, geofísicos, eléctricos, etc, ya que la versatilidad del Node-RED permitiría hacer esta acción.

En líneas futuras de investigación este sistema se podría implementar para varias estaciones que se encuentren midiendo de forma simultánea y se buscará la forma de visualizarlas todas en un mismo dashboard.

4. Referencias

- [1] <https://wmo.int>
- [2] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [3] <https://www.unsdsn.org/resources/the-sustainable-development-report-2024/>
- [4] <https://telegram.me/BotFather>

MONITOREO SATELITAL DEL MAR DE NUBES EN EL AERÓDROMO DE LA BASE MARAMBIO: ANÁLISIS SINÓPTICO E IMPACTO DETERMINANTE EN LA EJECUCIÓN DE LAS OPERACIONES AÉREAS VISUALES

Noemí Ethel Troche¹, Diana Marina Rodriguez¹, Matías De Oto¹

ntroche@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Mar de nubes, Base Marambio, satélites

1) INTRODUCCIÓN

La Base Marambio (MBI), situada en una isla amesetada a unos 200 m.s.n.m. en el noreste de la Península Antártica, es un punto estratégico aeronáutico y logístico de la Antártida Argentina. La niebla constituye uno de los principales factores de riesgo para las operaciones aéreas visuales, siendo su anticipación un desafío constante.

Distintos estudios recientes han caracterizado la niebla marina en zonas cercanas como la isla 25 de Mayo/King George, destacando su origen advectivo vinculado a la entrada de aire cálido y húmedo sobre aguas frías del Pasaje Drake (Chen y otros, 2019; Jiménez García y otros, 2022). En la MBI, Jiménez García y otros (2024) identificaron episodios de niebla asociados tanto a la advección cálida y/o fría, aunque no abordaron en detalle un mecanismo particular observado: el ingreso de un mar de nubes compuesto de nubes estratiformes bajas, que al posicionarse al nivel de la pista de MBI reduce drásticamente la visibilidad. El objetivo de este trabajo es documentar y analizar dos eventos recientes en MBI en los que la niebla se produjo por la aproximación de un mar de nubes, utilizando observaciones *in situ*, datos satelitales y pronósticos numéricos.

2) DATOS Y METODOLOGIA

Se utilizaron imágenes infrarrojas nocturnas (IR) y en falso color (FC) diurnas del sensor AVHRR/3 a bordo de los satélites MetOp-B y C, correspondientes al 25 de enero (CASO 1; Fig. 1a, b) y al 3 de marzo (CASO 2; Fig. 1c, d) del 2025. Por otra parte, se compararon las salidas de las 00 UTC de los modelos WRF (Fig. 2) y GFS, con resoluciones espaciales de 3 y 21 km, respectivamente, junto con la secuencia horaria de los datos observados SYNOP/METAR para los periodos comprendidos entre el 24 y el 27 de enero (Fig. 3a) y entre el 3 y el 6 de marzo (Fig. 3b). Considerando esta información, se describió la situación sinóptica.

3) RESULTADOS

CASO 1. Se observa cielo despejado y enfriamiento superficial del mar asociado a un anticiclón de 986 hPa al sur de MBI (Fig. 2a), mientras que desde el norte ingresa una masa de aire templada y húmeda favoreciendo la formación de una inversión térmica y generando nubosidad al nivel del mar, apreciable en la imagen IR en tonos de grises que contrastan con los más claros del hielo (Fig. 1a). En el periodograma (Fig. 3, panel superior) se muestra una circulación predominante del sector sur del orden de 10 kt, favoreciendo condiciones estables y escasa nubosidad. A medida que la intensidad del viento aumenta a 14 kt, se produce una reducción de la visibilidad por niebla entre 01 UTC y 15 UTC del día 25. Posteriormente, el viento rota al noroeste disminuyendo a 5 kt generando una mejora temporal hasta el 26 a la 01 UTC. Luego, el viento se incrementa

a 15 kt del nornoroeste, dando lugar a una reducción de visibilidad que persiste hasta las 08 UTC. Más tarde, disminuye a 5 kt del sudoeste y rota al noroeste, mejorando las condiciones entre las 09 y las 19 UTC. A partir de ahí y durante todo el 27 se mantiene la niebla. Las imágenes satelitales muestran el desplazamiento de stratus en tonos de amarillo desde el sur bordeando la ladera oriental de la isla e ingresando al Mar de Erebus y Terror en contraste con el tono blanco del mar congelado en la imagen FC (Fig. 1b).

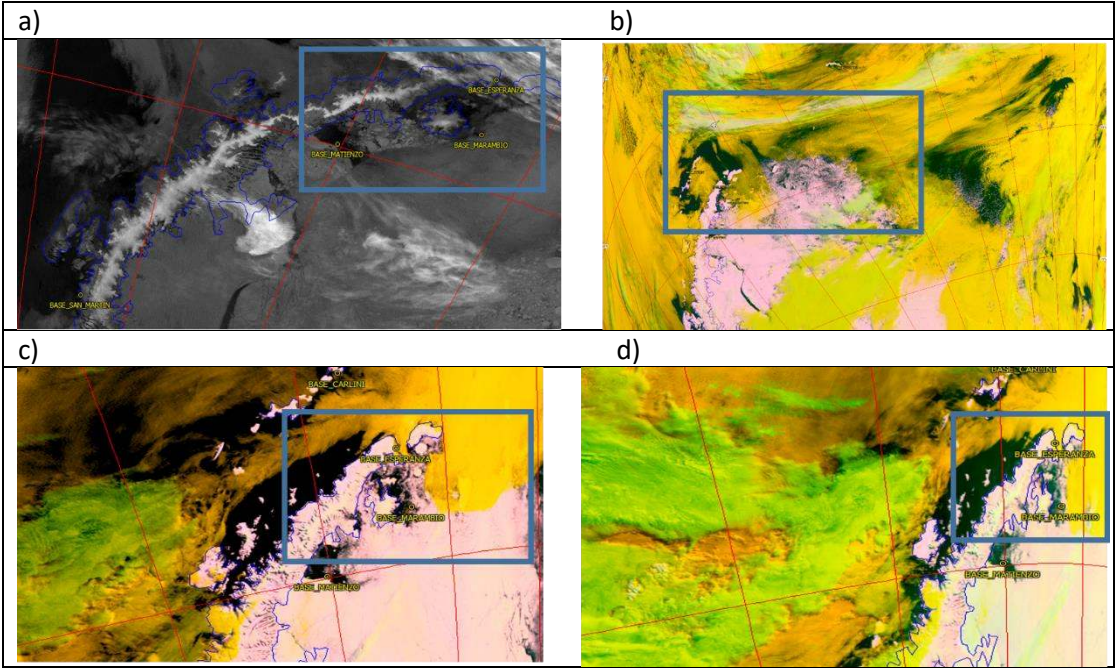


Figura 1: (a) Imagen en infrarrojo AVHRR/3-MetOp-B a las 02:04Z y (b) imagen en falso color AVHRR/3, MetOp-C a las 10:46Z, correspondientes al Caso 1 del 25 de enero de 2025. (c) Imagen en falso color AVHRR/3-MetOp-B a las 12:06Z y (d) imagen AVHRR/3, MetOp-C, correspondientes al Caso 2 del 3 de marzo de 2025. El rectángulo azul indica la zona donde se observa el mar de nubes sobre la Península Antártica.

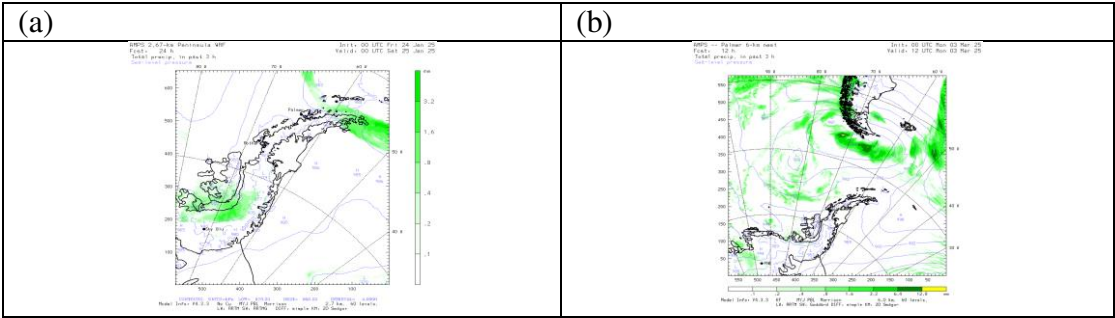


Figura 2: Modelos WRF a) a 3 km de resolución espacial para el CASO 1 y b) WRF a 6 km para el CASO 2.

CASO 2. La noche previa se observa cielo despejado sobre MBI y sobre el Mar de Erebus y Terror se detecta el desplazamiento de una masa de aire templada y húmeda, asociada a una depresión de 976 hPa sobre el Drake Sur, con un rápido movimiento hacia el sureste (Fig. 2b). Esta perturbación se observa en la imagen FC (Fig. 1c) en tonos amarillos indicando el mar de nubes y su posterior avance hacia MBI (Fig. 1d). Entre ambas imágenes se estimó la velocidad de desplazamiento del fenómeno en ~40 km/h. Este avance coincide con la evolución del viento en superficie (Fig. 3, panel inferior), que muestra un flujo del sector norte entre 5 y 10 kt hasta las 14 UTC del 3 de marzo. Con la

rotación del viento al noreste ingresa la niebla que persiste hasta las 07 UTC del día 4, y a partir de las 12 UTC hay una mejora temporal con la rotación al noroeste. Desde las 22 UTC del 4 hasta las 10 UTC del 6 se registra niebla con vientos variables. Y a partir de las 11 UTC mejora la visibilidad.

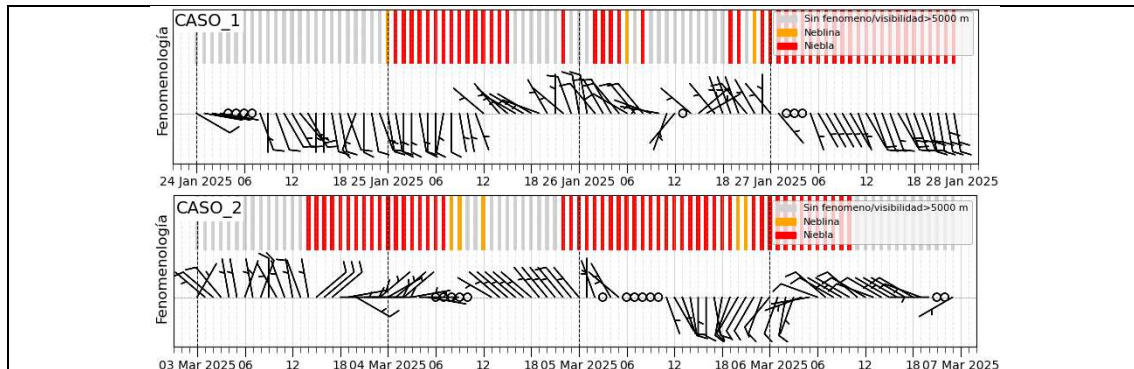


Figura 3: Periodogramas para CASO 1 (superior) y CASO 2 (inferior). En barras de colores se muestra la fenomenología asociada al mar de nubes (ver leyenda) y el viento en barbas (nudos).

4) CONCLUSIONES

Se analizaron dos eventos de mar de nubes que afectaron intermitentemente la visibilidad en la pista del MBI durante cuatro días. La secuencia temporal de los datos y el análisis sinóptico fueron clave para su detección y monitoreo. Los modelos de mesoescala representaron el fenómeno de forma más realista en comparación con los modelos globales. Las imágenes de satélites geoestacionarios, aunque útiles por su alta frecuencia temporal, mostraron limitaciones en resolución espacial en latitudes altas. En cambio, los satélites polares, con mejor resolución espacial, permitieron una observación más precisa, incluso estimando la velocidad del fenómeno en 40 km/h en uno de los casos. Esto resalta la importancia de contar con recepción satelital polar en tiempo real en la MBI para mejorar la predicción de este tipo de eventos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Antonio Gil por sus valiosas contribuciones al área de Meteorología Antártica.

REFERENCIAS

Chen, J., B. Han, Q. Yang, L. Wei, Y. Zeng, R. Wu, y Z. Ding, 2019: Analysis of a sea fog episode at King George Island, Antarctica. *Atmosphere*, **10**(10), 585.

García, M. J., A. Céspedes Ávila, G. Jiménez Sánchez, Á. R. Martínez Mancera, K. A. Chicaeme Ordoñez, y J. Mejía, 2022: Understanding sea fog variability in King George Island, Antarctica using special observations and cloud-resolving simulations (A12H-08). *American Geophysical Union Fall Meeting 2022*, Chicago, IL.

García, M. J., J. Mejía, J. J. Henao, N. Troche, A. R. Martínez, y K. A. Chicaeme, 2024: Visibility and fog synoptic and mesoscale variability over Marambio Base, Antarctic Peninsula (No. EGU24-14236). *Copernicus Meetings*.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE PM_{2.5} EN ROSARIO Y ROLDÁN DURANTE LA PRIMAVERA METEOROLÓGICA DEL AÑO 2024 A PARTIR DEL MONITOREO CON SENSORES DE BAJO COSTO.

Piñol, Greta Ailín^{1,2}, Micheletti María Isabel^{1,3}.

greta.ailin@gmail.com

¹Instituto de Física de Rosario (IFIR, CONICET-UNR)

²Facultad de Química e Ingeniería del Rosario (UCA)

³Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas (FBIOyF, UNR)

Palabras clave: PM_{2.5}, sensores, monitoreo ambiental.

1) INTRODUCCIÓN

El material particulado de 2,5 micras (PM_{2.5}) es un contaminante que ha sido objeto de estudio en muchas investigaciones en las últimas décadas debido a las implicancias negativas que tiene tanto en la salud de los humanos como en el ambiente. Su inhalación puede provocar desde afecciones respiratorias leves, problemas cardiovasculares, hasta cáncer de pulmón (Brugge et al, 2007). Rosario, pese a ser una de las ciudades más pobladas de Argentina, no cuenta con un monitoreo continuo de su calidad de aire y sólo se han realizado estudios durante eventos contaminantes puntuales (Binet et al, 2024).

Si bien los sensores de bajo costo aún no están en condiciones de sustituir a los equipos de referencia utilizados en estudios rigurosos de calidad del aire (Castell et al, 2017), en la actualidad representan una herramienta valiosa para obtener una primera aproximación a la distribución espacial y temporal del PM_{2.5} en aquellos sitios que carecen de registros continuos.

En este trabajo se analizaron datos de PM_{2.5} de los meses de septiembre, octubre y noviembre del año 2024 medidos con equipos “weSense AIR 360” (ZH06) en dos lugares de Rosario y en la zona residencial de Roldán (~25 km a Rosario). El objetivo del presente estudio es analizar el comportamiento de este contaminante en los tres sitios elegidos durante la primavera a partir de su distribución temporal, su relación con variables meteorológicas y la comparación de los valores con normativas internacionales de calidad de aire.

2) METODOLOGÍA

El equipo weSense AIR 360 (figura 1, izq) está compuesto por sensores que suministran información sobre las siguientes variables atmosféricas: CO₂, material particulado (PM) en las fracciones PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀, temperatura y humedad. El sensor de PM mide la concentración de partículas en el aire a través del principio de dispersión de la luz (weSense, 2022). Está configurado para obtener datos cada 5 minutos, pero una vez recolectados, fueron ajustados a promedios horarios para realizar comparaciones con variables meteorológicas.

Los equipos fueron instalados en tres sitios del Gran Rosario: 1) macrocentro de Rosario (MAR), sitio de mediana circulación vehicular y actividad comercial; 2) microcentro de Rosario (MIR), lugar de tráfico medio-alto y con media-alta densidad de población y comercios; 3) Roldan (ROL), área residencial de baja densidad poblacional (donde muchas casas sólo se usan durante los fines de semana) (figura 1, der). Los equipos están instalados a alturas entre 2 y 5 metros desde el nivel del suelo aproximadamente

Para complementar los análisis, se utilizaron datos de presión atmosférica, velocidad y dirección del viento y precipitaciones acumuladas provistas por la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), ubicada en el aeropuerto de Rosario (32.92 S, 60.78 O).

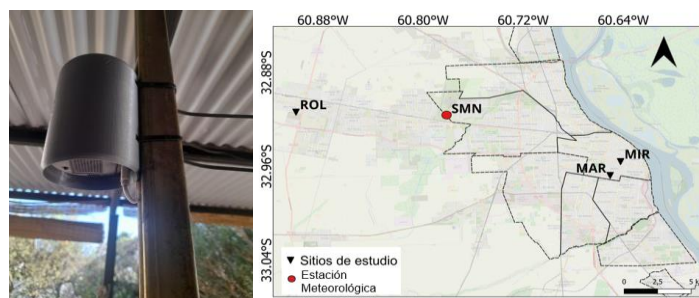


Figura 1: Izq: Equipo Wesense instalado en sitio Roldan. Der: Sitios de estudio (MIR, MAR y ROL) y de la estación meteorológica (SMN).

3) RESULTADOS

En primera instancia se evaluó el comportamiento del PM_{2.5} en los tres sitios durante los tres meses de la primavera del 2024 (figura 2). Se pueden observar picos de PM_{2.5} de elevada

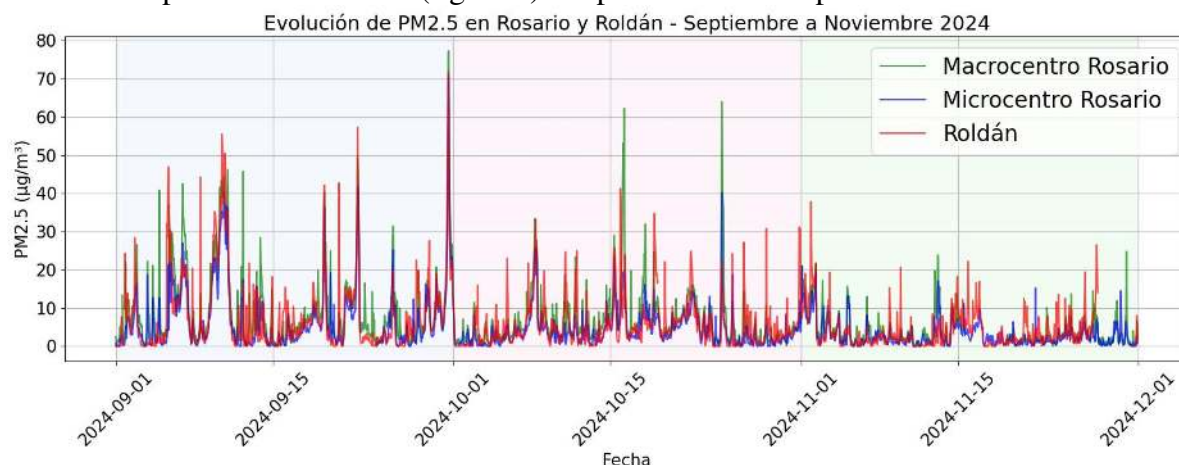


Figura 2: Evolución temporal de los valores medios horarios del PM_{2.5} durante los meses de estudio.

concentración en septiembre (10/09; 22/09; 30/09) atribuibles a las masas de aire provenientes de los incendios en la Amazonía boliviana transportadas por la corriente a chorro Chaco Jet (para corroborar esta suposición se graficaron rosas de los vientos y se calcularon trayectorias de masas de aire con HYSPLIT). En octubre se visualizan dos picos el 15-16/10 y 24/10, los cuales no pudieron relacionarse con ningún evento de quemas, dichos aumentos se mantienen en investigación en búsqueda de encontrar alguna fuente local que haya disparado los valores. En ningún sitio la media de 24 h calculada excedió los 35 µg/m³ sugerida por las Normas Nacionales de Calidad de Aire Ambiental (NAAQS) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).

Al analizar el comportamiento horario de los tres sitios (figura 3 izq) se observa un patrón similar entre éstos, con aumentos en las primeras horas de la mañana (7-8 hs) coincidiendo con los ingresos a las escuelas y los inicios de las jornadas laborales, luego alrededor del mediodía (12-13 hs) y un aumento significativo con la llegada de la noche (19-21 hs), posiblemente atribuible al descenso de la capa límite planetaria.

Los días hábiles concentran la mayor cantidad de PM_{2.5} en los diferentes sitios frente a los fines de semana durante septiembre y octubre, en ROL esta diferencia es menos perceptible. En noviembre, mientras que en MAR y MIR los valores son similares (probablemente debido a una disminución de traslados de las personas durante los días hábiles debido a la finalización de determinadas actividades que concluyen hacia fin de año, sumado en contrapartida a un aumento de salidas y eventos al exterior durante los fines de semana), en ROL se registra una

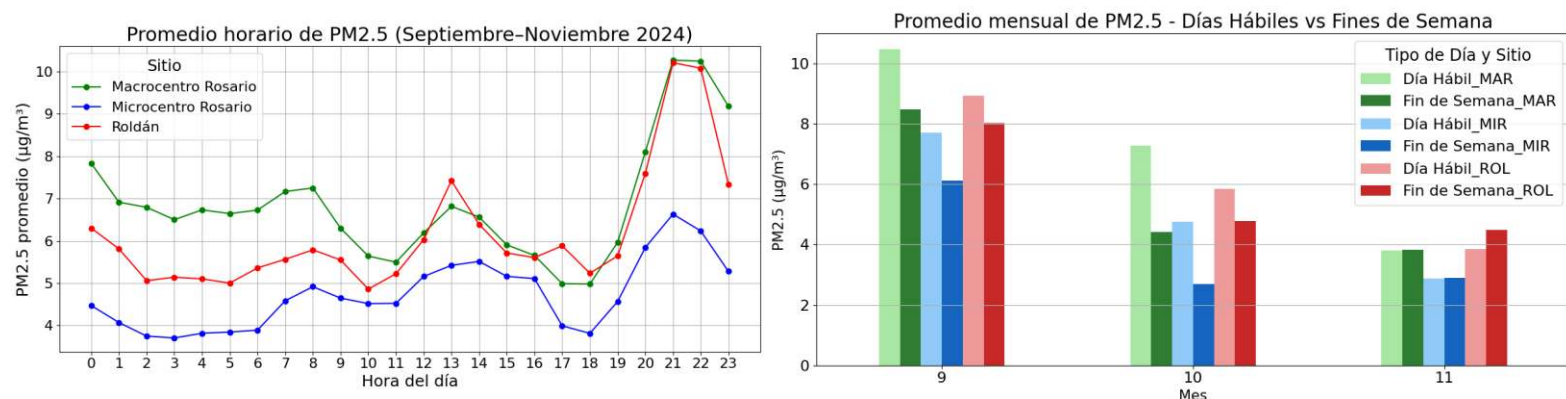


Figura 3. Izq: Media del comportamiento horario del PM2.5 durante la primavera 2024 en los diferentes sitios. Der: Concentración media de PM2.5 durante días hábiles y fines de semana en cada sitio durante los meses de septiembre, octubre y noviembre.

mayor concentración de PM2.5 los fines de semana, esto coincide con la llegada de los días más cálidos y con ello el movimiento de los ciudadanos de zonas aledañas hacia sus casas de fines de semana que se ubican en dicha localidad (figura 3, der). La tendencia en la disminución del promedio mensual de PM2.5, puede atribuirse en gran parte a que en los meses cálidos la capa límite se encuentra más elevada y por tanto el PM se encuentra distribuido hasta alturas mayores, disminuyendo su concentración a las alturas donde están ubicados los equipos.

Al comparar los valores de PM2.5 con temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, utilizando la medida no paramétrica de Spearman, no se encontraron indicios que demuestren una correlación entre las variables. Por otra parte, se encontró que casi el 50% de los valores más altos de concentración de PM2.5 ($P > 75$) se relacionaron con direcciones del viento provenientes del cuadrante Oeste-Norte.

4) CONCLUSIONES

Se observaron comportamientos de PM2.5 similares entre los sitios tanto en la evolución mensual como horaria, como durante eventos de alta contaminación. Los valores mayores hallados en noviembre durante los fines de semana en ROL pueden ser un indicio de patrones de actividades de la población aledaña durante la época estival.

A pesar de las grandes distancias, se detectaron momentos de alta concentración de partículas atribuibles a incendios en el Amazonas boliviano, mostrando buena correlación entre aumentos en PM2.5 y dirección del viento proveniente de esa zona.

El presente estudio es un puntapié para conocer el comportamiento de los aerosoles en Rosario, pero se deben incluir más sensores que aporten más datos que ayuden a explicar picos contaminantes hallados, como así también aumentar la base de datos con el fin de encontrar relaciones con distintas variables meteorológicas.

REFERENCIAS

- Binet, M. V., Micheletti, M. I., & Piacentini, R. D. (2024). Propagation of NO₂ originated in intense fires in the Paraná River Delta analyzed from satellite observations. *Advances in Space Research*, 74(2), 682–694.
- Brugge, D., Durant, J.L. & Rioux, C. (2007) Near-highway pollutants in motor vehicle exhaust: A review of epidemiologic evidence of cardiac and pulmonary health risks. *Environ Health* 6, 23.
- Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293–302.
- WeSense. (2022). Manual de usuario WeSense AIR (Versión 1.1). Boreal Net S.A. [https://wesense.tech/pdf/Manual de usuario wesense AIR 360.pdf](https://wesense.tech/pdf/Manual%20de%20usuario%20wesense%20AIR%20360.pdf)

CALIDAD DE DATOS EN PATAGONIA: BASES DE DATOS RETICULADAS Y DATOS OBSERVADOS

Santiago I. Hurtado^{1,*}, Leandro Almonacid², Santino Adduca³, Natalia Pessacg⁴, Daiana V. Perri

*Autor correspondiente: santiagoh719@gmail.com

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina.

²Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA), Río Gallegos, Argentina

³Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET-UBA), Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (UBA), Buenos Aires, Argentina.

⁴Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales (IPEEC CONICET), Puerto Madryn, Argentina

Palabras clave: Precipitación, Datos Observados, Datos Reticulados, Calidad de datos

1) INTRODUCCIÓN

La cordillera de los Andes recorre meridionalmente la región patagónica, generando dos regiones pluviométricas claramente distinguibles: un sector húmedo al oeste de los Andes que abarca la parte cordillerana de Chile y Argentina (Patagonia Occidental), y un sector semiárido al este de los Andes sobre la meseta patagónica (Patagonia Oriental). La región se caracteriza por tener una muy baja densidad de estaciones meteorológicas, lo que dificulta y limita las investigaciones basadas en datos climáticos. Ante la escasez de datos in situ se pueden utilizar bases de datos regionales y globales para estudiarla. Las bases derivadas de observaciones pueden contar con una buena extensión temporal (desde principios del siglo XX) pero la escasez de estaciones puede ser problemática, especialmente en regiones con orografía compleja. Por su parte, las bases derivadas de satélites no cuentan con gran extensión temporal hacia el pasado. En este sentido, para abordar estudios climáticos rigurosos en la región es necesario considerar y evaluar diferentes bases de datos y considerar las incertezas asociadas. Determinar las ventajas y desventajas de las bases de datos disponibles, es de suma importancia, no solo para las investigaciones climáticas, sino para las investigaciones de otras áreas como ecología, hidrología, agronomía, entre otras, donde se suele utilizar alguna base de datos específica asumiendo que es buena. En este contexto, en este trabajo se sintetizan los últimos estudios que abordan la calidad de datos climáticos en Patagonia (Almonacid y otros, 2024; Hurtado y otros, 2024; Perri y otros, 2024), se evalúan nuevos resultados y se discuten las problemáticas de los datos en la región.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos observados de precipitación del Servicio Meteorológico Nacional, la Red Hidrológica Nacional del Sistema Nacional de Información Hídrica de la Subsecretaría de Recursos Hídricos Nacional, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), y datos provistos por productores, estancias, etc. Adicionalmente, se evaluaron diversas bases de datos globales reticuladas, en particular: CRU, GPCC, ERA5, ERA5-Land, UDEL, TERRACLIMATE y PERSIANN. Se utilizaron diversas métricas estadísticas para evaluar los distintos productos, como error medio (Bias), error cuadrático medio, correlación, entre otros.

3) PATAGONIA NORTE

En el caso de Patagonia Norte, no se cuenta, prácticamente, con datos observados antes de 1960. Y la cantidad de estaciones aumenta considerablemente a partir de 1980. Si bien se logró recolectar datos de 89 estaciones, 13 de ellas fueron descartadas luego del control de calidad de datos. De las 79 restantes, 10 poseen registros muy cortos de menos de 15 años.

De las bases de datos evaluadas en esta región, se encontró que GPCC presenta discrepancias muy grandes con los datos observados mostrando peores valores en todas las métricas respecto a las otras bases de datos. Por otro lado, ERA5-Land muestra un error sistemático grande de sobreestimación de la precipitación. No obstante, es la base de datos global que muestra la mejor representación de la variabilidad temporal. En este sentido, luego de aplicar una corrección a ERA5-Land a partir de un modelo de lag distribuido, es la base de datos con mejor representación de la precipitación en la región tanto en términos de errores como en términos de variabilidad. Por su parte, CRU presenta valores aceptables de las diversas métricas aunque, en general, se encuentra por debajo del desempeño de ERA5-Land corregido.

Por otro lado, se desarrolló una base de datos observada-interpolada (llamada MAWUN) con los datos disponibles. Esta base de datos mostró, en general, mejores métricas que las bases de datos globales, pero no evidenció diferencias relevantes en las métricas respecto a ERA5-Land e incluso MAWUN mostró un mayor error sistemático.

4) PATAGONIA SUR

En el caso de Patagonia Sur, se cuenta con un Banco de Datos Hidrometeorológicos regional que agrupa 97 estaciones con diferentes longitudes temporales, incluyendo registros de Santa Cruz, sur de Chubut y regiones de Chile con recursos hídricos compartidos. Este cuenta también con una base reticulada de precipitación (BPRSC) construida a partir del registro de 42 estaciones para un periodo temporal de 20 años (1995-2014); la cual represento de forma adecuada a la precipitación en Patagonia Sur, especialmente en zonas de menor precipitación; mientras que en zonas cercanas a la cordillera de Los Andes disminuyó su representatividad, debido a una menor densidad de estaciones.

La evaluación de otras bases de datos reticuladas globales evidenció que durante el verano y otoño ERA5 es la base de datos con mejor ajuste a datos de estación, presentando un menor error cuadrático medio y CRU resultó ser la base de datos más ajustada a los valores descritos en BPRSC, presentando las mayores diferencias hacia la cordillera, donde otras bases de datos globales como UDEL, TERRACLIMATE y PERSIANN mostraron los peores desempeños.

La zona de la cordillera, especialmente las regiones cercanas a los Campos de Hielo Norte y Sur, se caracteriza por una marcada variabilidad y alta incertidumbre. En estas áreas no existen registros pluviométricos confiables y de largo plazo, a pesar de lo cual muchas bases de datos globales ofrecen series continuas de datos. Sin embargo, presentan grandes discrepancias entre sí, relacionadas con la dificultad para representar el intenso gradiente de precipitación presente en la región. Este gradiente se evidencia en la fuerte variación de la precipitación media anual, que alcanza los 6000 mm en la costa chilena y disminuye a menos de 300 mm en la costa este de Argentina. En particular, al analizar las distintas bases de datos reticuladas, se encontró un error muy particular en CRU (Fig. 1). En la región de los fiordos chilenos y campo de hielo austral, las series de precipitación mensual muestran un cambio brusco en su comportamiento a partir de fines del 2009. Como se muestra en la figura 2, la

serie pierde su variabilidad natural, baja su desvío estándar, y repite un ciclo anual medio constantemente. Este comportamiento se ve propagado en los distintos puntos de retícula de la base de datos aproximadamente en un radio de 2° en torno a 50°S y 75°O.

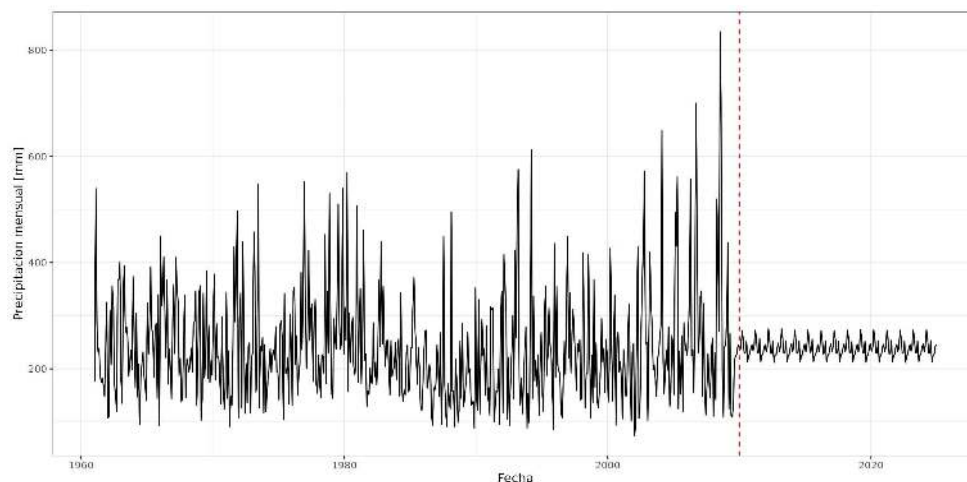


Figura 1: Precipitación mensual de CRU para el pixel Lat:50.25°S , Lon: 75.25°O.

5) CONCLUSIONES

Es fundamental continuar recopilando y actualizando los datos observacionales, así como realizar un compendio detallado de los registros históricos de estaciones meteorológicas. Esto permitirá mejorar la calidad de los productos observados en la región y facilitará la evaluación de las bases de datos globales. En cuanto a los resultados obtenidos, se destaca que la base de datos CRU no debería emplearse en ciertas áreas andinas de la Patagonia Sur para el periodo 2009 en adelante, aunque, exceptuando esta limitación, ofrece un buen desempeño en el resto de la Patagonia. Por otro lado, ERA5-Land muestra un buen rendimiento en toda la Patagonia, aunque sería necesario aplicar una corrección de bias para optimizar su precisión. Las bases de datos regionales disponibles presentan un rendimiento apenas superior al de las bases globales, pero tienen limitaciones temporales y espaciales. Finalmente, se recomienda evaluar cuidadosamente las bases de datos globales frente a observaciones in situ antes de utilizarlas en estudios de impacto.

REFERENCIAS:

Almonacid, L., Pessacg, N., Diaz, B. G., y Peri, P. L., 2024. Caracterización espacio-temporal de las sequías meteorológicas en Santa Cruz en el contexto de cambio climático. *Meteorologica*, 035-035.

Hurtado, S. I., Perri, D. V., Calianno, M., Martin-Albarracin, V. L., y Easdale, M. H., 2024. Monthly gridded precipitation databases performance evaluation in North Patagonia, Argentina. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(9), 8771-8783.

Perri, D. V., Hurtado, S. I., Bruzzone, O., y Easdale, M. H., 2024. Optimal automatic enhanced ERA5 daily precipitation data for environmental and agricultural monitoring tools in scarce data regions. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(3), 1847-1856.

MINI-AGUJERO DE OZONO SOBRE RÍO GALLEGOS EN OTOÑO DE 2025: IDENTIFICACIÓN MEDIANTE DATOS SATELITALES Y TERRESTRES

Cristian Laino Baldini^{1,2}, Facundo Orte^{1,3}, Eduardo Luccini^{1,4}, Facundo Carmona^{1,2}, Gerardo Carbajal Benítez⁵, Raúl D'Elia^{1,3}, Elian Wolfram⁵
cristian.laino@ihlla.org.ar. Autor correspondiente.

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

²Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. Eduardo Jorge Usunoff (IHLLA)

³Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones (DEILAP), UNIDEF (CITEDEF-CONICET), IRL-3351-IFAECI-CNRS, Villa Martelli, Argentina

⁴Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica (UCA)

⁵Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Columna total de ozono, TROPOMI, SAOZ.

1) INTRODUCCIÓN

Desde la década del '70, la capa de ozono sufre un deterioro global, cuyo fenómeno más extremo es la pérdida estacional sobre la región antártica durante la primavera austral, conocida como Agujero de Ozono Antártico (AOA) (Farman et al., 1985). Sin embargo, también ocurren disminuciones transitorias de columna total de ozono (CTO) en otras latitudes y en ambos hemisferios (Norte y Sur), en general no destructivas sino re-distributivas (James, 1998a, b; Hood et al., 2001). Newman et al. (1988) introdujeron el término *ozone mini-holes* para describir disminuciones abruptas (1–5 días) y localizadas de CTO, con escalas horizontales sinópticas (1000–3000 km). Estos eventos resultan fundamentalmente del ascenso dinámico de masas de aire troposférico pobre en ozono y de advección horizontal (Reed, 1950; Salby & Callaghan, 1993; Teitelbaum et al., 1998). Asimismo, hay indicios de que tales eventos también pueden activar reacciones heterogéneas que amplifiquen localmente la pérdida de ozono estratosférico (Grew y Dameris, 1997; Stenke et al., 2003). Los mini-agujeros de ozono son menos frecuentes durante verano y otoño en ambos hemisferios (James, 1998a, b). Pueden generar picos inusuales de radiación UV, con efectos en la salud humana y los ecosistemas (Millán, 2017).

En el presente trabajo se propone una metodología para la identificación de casos de mini-agujero de ozono y se analiza un evento registrado durante marzo de 2025 en el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral (OAPA), Río Gallegos, mediante observaciones terrestres y satelitales.

2) METODOLOGÍA

En este trabajo se emplean umbrales climatológicos para la detección de mini-agujeros de ozono. Un evento se identifica cuando la columna total de ozono diaria cae por debajo del promedio histórico menos dos desviaciones estándar ($\mu - 2\sigma$), representando aproximadamente el 95 % de las observaciones estadísticas de cada día del año. Se construyó una climatología de referencia para el sitio OAPA a partir de la serie Multi-Sensor Reanalysis v2 (TM3DAM-MSR v4.4 Overpass) para el período enero de 1960 a diciembre de 2024 (van der A et al., 2015), y se extendió hasta abril de 2025 utilizando datos del producto OMI OMDOAO3 L2OVP (Veefkind, 2006). Para cada día del año (DOY) se calcularon la media (μ) y la desviación estándar (σ), aplicando un suavizado mediante media móvil centrada de 30 días para definir la banda de variabilidad $\mu \pm 2\sigma$.

El evento fue detectado por las mediciones terrestres de CTO del instrumento SAOZ (*Système d'Analyse par Observations Zénithales*) perteneciente al laboratorio LATMOS (<http://saoz.obs.uvsq.fr/>; último acceso: mayo 2025), y también mediante observaciones satelitales del sensor TROPOMI (producto OFFL_L2_TOCL) a bordo del Sentinel-5P (Lambert et al., 2019), disponibles en Copernicus Data Space (<http://dataspace.copernicus.eu/>; último acceso: mayo 2025).

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El monitoreo diario realizado desde el OAPA permitió identificar un evento anómalo de reducción de ozono el 24 de marzo de 2025 (día 83 del año). Ese día, ambos sensores —TROPOMI y SAOZ— registraron valores por debajo del umbral inferior definido por

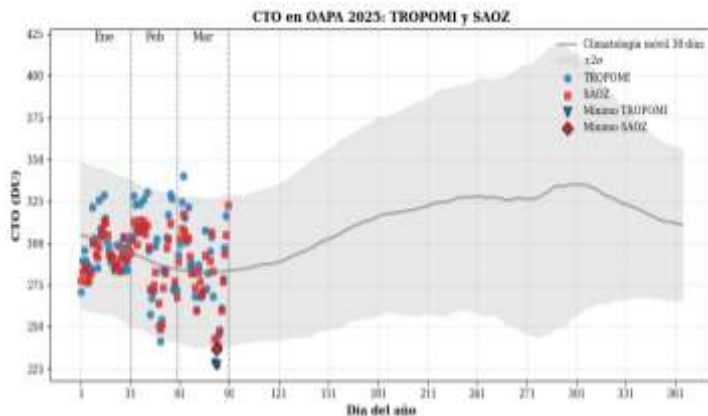


Figura 1: Observaciones satelitales y terrestres superpuestas sobre la climatología.

la climatología ($\mu - 2\sigma$), confirmando la presencia de un mini-agujero de ozono sobre la región. La Figura 1 presenta la climatología móvil de CTO (línea negra) obtenida para el OAPA a partir de las bases de datos del MSR y OMI, junto con su variabilidad ($\pm 2\sigma$). Sobre esta se superpusieron los valores diarios de TROPOMI (en azul) y SAOZ (en rojo) correspondientes al período enero–abril de 2025.

La climatología obtenida exhibe patrones estacionales definidos a esta latitud Sur, con máximos en primavera austral y mínimos en verano. Ambas Como se observa, dos de las observaciones diarias cayeron por debajo del umbral de -2σ el 24 de marzo, lo que constituye una anomalía significativa, considerando que dicha banda representa aproximadamente el 95 % de las observaciones. El valor mínimo fue registrado por TROPOMI, con 227.32 DU, equivalente a un ~ 20 % menos que el valor climatológico para ese día (282.47 DU), y un ~ 4.5 % por debajo del umbral de -2σ . El valor medido por SAOZ fue de 236.85 DU.

La Figura 2 presenta los mapas diarios de CTO observados por el sensor TROPOMI

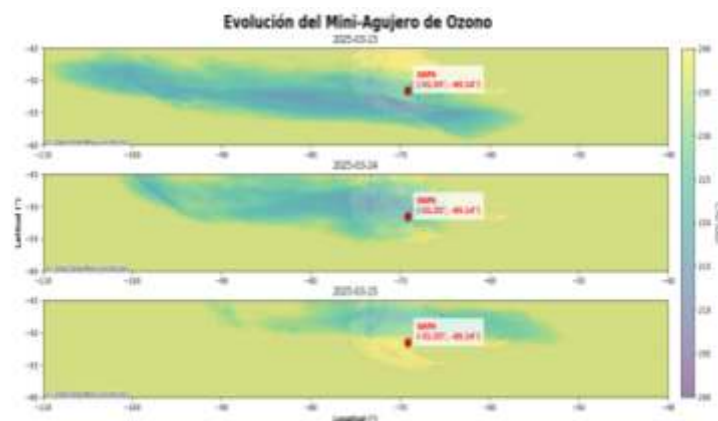


Figura 2: Visualización del mini-agujero de ozono sobre el sur argentino.

correspondientes a los días 23, 24 y 25 de marzo de 2025. Estos mapas permiten visualizar el desarrollo, desplazamiento y posterior disipación del miniagujero de ozono sobre el sur de Sudamérica. El núcleo de la anomalía se intensifica el 24 de marzo, coincidiendo con los valores mínimos detectados desde tierra, y se observa su desplazamiento hacia el este durante los días

posteriores, sobrepasando la ubicación del OAPA.

4) CONCLUSIONES

Se aplicó una metodología basada en la climatología local de CTO para identificar un evento de miniagujero de ozono pasando por sobre el sur de Sudamérica, en torno al 24 de marzo de 2025, confirmada por observaciones satelitales y terrestres, corroborada espacialmente en la región mediante mapas diarios de CTO en alta resolución. Los resultados subrayan la importancia del monitoreo integrado de ozono, a fines de estudiar el desarrollo de estos fenómenos y mejorar su pronóstico, dados los incrementos a corto plazo que pueden ocasionar sobre los niveles de radiación solar UV, y contribuyendo al conocimiento de la dinámica estratosférica regional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a LATMOS/CNRS y a Copernicus Data Space por la disponibilidad de datos SAOZ y TROPOMI, respectivamente.

REFERENCIAS

- Farman, J., Gardiner, B. y Shanklin, J., 1985:** Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature* 315, 207–210.
- Grewe, V., Dameris, M., 1997:** Heterogeneous PSC ozone loss during an ozone mini-hole. *Geophys. Res. Lett.* 24, 2503–2506.
- Hood, L. L., Soukharev, B. E., Fromm, M., y McCormack, J. P., 2001:** Origin of extreme ozone minima at middle to high northern latitudes, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 106, 20925–20940.
- James, P. M., 1998a:** A climatology of ozone mini-holes over the Northern Hemisphere. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(12), 1287–1303.
- James, P. M., 1998b:** An interhemispheric comparison of ozone mini-hole climatologies. *Geophysical research letters*, 25(3), 301–304.
- Lambert, J.-C.; Loyola, D.; McLinden, C.; Pazmino, A.; Pommereau, J.-P.; Redondas, A.; Romahn, F.; Valks, P.; et al., 2019:** TROPOMI/S5ptotal ozone column data: global ground-based validation and consistency with other satellite missions, *Atmos. Meas. Tech.*
- Millán, L. F. y Manney, G. L., 2017:** An assessment of ozone mini-hole representation in reanalyses over the Northern Hemisphere. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 9277–9289.
- Newman, P. A., Lait, L. R. y Schoeberl, M. R., 1988:** The morphology and meteorology of Southern Hemisphere spring total ozone mini-holes. *Geophys. Res. Lett.*, 15, 923–926.
- Reed, R. J. (1950). The role of vertical motions in ozone–weather relationships. *J. Meteorol.*, 7, 263–267.
- Salby, M. L. y Callaghan, P. F., 1993:** Fluctuations of total ozone and their relationship to stratospheric air motions. *J. Geophys. Res.*, 98(D2), 2271–2284.
- Stenke, A., y Grewe, V., 2003:** Impact of ozone mini-holes on the heterogeneous destruction of stratospheric ozone. *Chemosphere*, 50(2), 177–190.
- Teitelbaum, H. et al., 2001:** PSC and ozone mini-hole formation: the primary importance of synoptic scale flow perturbations. *J. Geophys. Res.*, 106(D22), 28173–28188.
- Van Der A, R. J., Allaart, M. A. F., y Eskes, H. J., 2015:** Extended and refined multi sensor reanalysis of total ozone for the period 1970–2012. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(7), 3021–3035.
- Veefkind, J. P., de Haan, J. F., Brinksma, E. J., Kroon, M., y Levelt, P. F., 2006:** Total Ozone from OMI Using the DOAS Technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1239–1244.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN EN EL NORESTE ARGENTINO A PARTIR DE REDES DE MEDICIÓN CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES

Raúl Andrés Durán¹, Federico A. Robledo^{2,3,4}, Leandro B. Díaz^{2,3,4}

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO). Buenos Aires, Argentina.

³CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

⁴Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI) – IRL 3351 – CNRS-CONICET-IRD-UBA. Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: estaciones no convencionales, variabilidad espacial, hidroestimador, departamento bermejo.

1. INTRODUCCIÓN

La caracterización de la variabilidad espacial de la precipitación es fundamental para diversos sectores: la gestión de recursos hídricos, la agricultura y la planificación urbana. En el noreste argentino es una región con alta variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, sin embargo, es baja la densidad de observaciones de redes oficiales (Robledo, F. y Penalba, O.; 2008).

Este trabajo integra tres bases de datos pluviométricos: estaciones convencionales (EC), las estaciones no convencionales (ENC) del la red comunitaria Bermejo del proyecto CLIMAX, y producto experimental de estimación de precipitación satelital con ajuste pluviométrico con una resolución espacial de 0.1°, del Servicio Meteorológico Nacional, denominado SQPE-OBS (Hidroestimador) (Hobouchian et al, 2021) . La combinación de estas tres fuentes de datos permite una caracterización más completa y robusta de la variabilidad espacial de la precipitación en la región, con un enfoque integral, útil para identificar posibles sesgos y complementariedades en los distintos sistemas de observación.

Este estudio se centra en el período 2018-2023, evaluando la coherencia entre estas fuentes en escalas trimestrales para identificar patrones climáticos estacionales y analizar la confiabilidad de las ENC y SQPE-OBS en contextos de baja densidad de redes oficiales.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Se emplearon tres fuentes de datos complementarias: las EC aportan mediciones directas y de alta confiabilidad, aunque limitadas en cobertura espacial; las ENC, por su parte, amplían significativamente la distribución geográfica de los registros, aunque requieren procesos de control y validación más rigurosos, y; el producto SQPE-OBS complementa ambas fuentes mediante estimaciones basadas en sensores remotos, lo cual permite obtener información continua en regiones sin observaciones directas.

Se recopilaron y procesaron datos diarios de precipitación correspondientes al período comprendido entre agosto de 2018 y diciembre de 2023, provenientes de cuatro estaciones convencionales: Resistencia Aero (Rcia), Corrientes Aero (Ctes), Formosa Aero (Fsa) (pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional) y, Pilar (perteneciente a la Dirección de Meteorología e Hidrología de Paraguay); de seis estaciones no convencionales (PB4, PB5, PB11, PB12, PB24 y, PB26): perteneciente a una red comunitaria de mediciones pluviométricas del proyecto Bermejo (Robledo et al, 2018), y del hidroestimador SQPE-OBS (Hobouchian et al, 2021). En la Figura 1, se puede observar la localización de las mencionadas estaciones de medición.

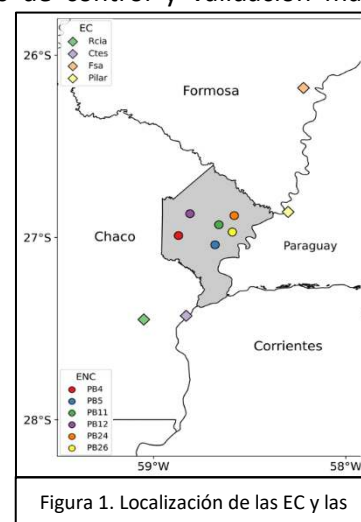


Figura 1. Localización de las EC y las

Se aplicaron procedimientos de control de calidad a los datos de EC y ENC para asegurar su fiabilidad y comparabilidad. Los datos del hidroestimador SQPE-OBS obtuvieron controles de calidad inherentes a su origen, por lo cual no fueron sometidos a controles adicionales (Hobouchian et al,2021).

Se construyeron series de precipitación acumulada trimestral conforme a la división estacional climatológica estándar (MAM, JJA, SON y DEF). La evaluación de la coherencia entre las distintas fuentes se llevó a cabo mediante análisis gráfico y estadístico, centrado en la comparación de los acumulados trimestrales y la identificación de patrones de similitud o discrepancia entre las distintas fuentes de datos.

Para evaluar la coherencia de la precipitación entre pares de localidades, se implementó un análisis de Segmentación-Simultaneidad por Terciles trimestral (SSTt) (Silva, F.; Olinuck, J.; 2019). Este procedimiento consistió en clasificar cada trimestre del período 2018–2023 en tres categorías: seco (valores acumulados por debajo del percentil 33 del período de referencia), normal (entre los percentiles 33 y 66), y húmedo (por encima del percentil 66). Para las EC, los umbrales de referencia se calcularon a partir de sus respectivas series climáticas del período 1991–2020. En el caso de las ENC, dado que no cuentan con series de largo plazo, se utilizaron los promedios trimestrales históricos de las cuatro EC como referencia climática.

3. RESULTADOS

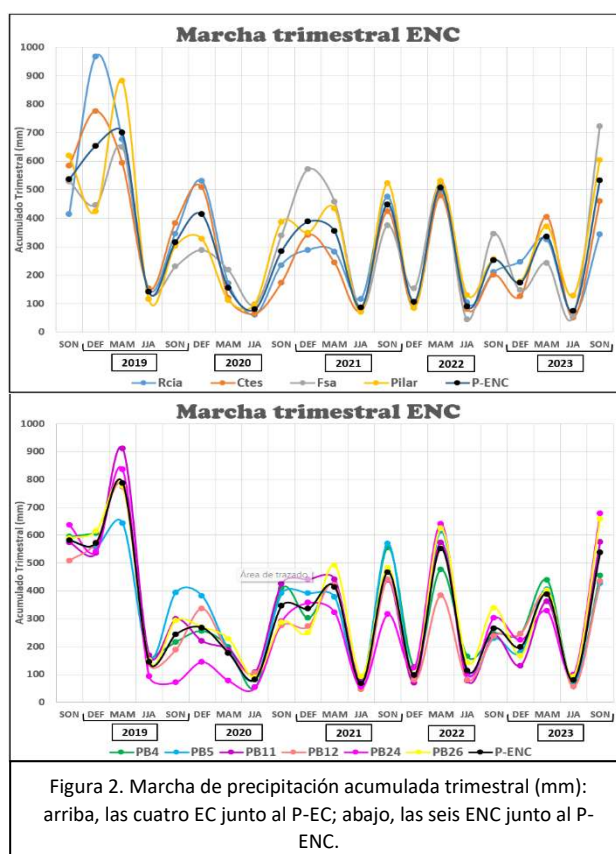
En la Figura 2 se observan las marchas de la precipitación acumulada trimestral para las cuatro EC, junto a su promedio (P-EC), a la izquierda; y, para cada una de las 6 ENC, junto a su promedio (P-ENC), a la derecha. La comparación de las marchas evidencia similitud en la evolución temporal general entre ambas fuentes de datos, lo que expone su coherencia y consistencia. Ambos conjuntos reflejan una marcada estacionalidad, aunque con diferencias en magnitud y dispersión en determinados trimestres.

Se identifican periodos de mayor dispersión entre las fuentes desde la primavera del 2018 hasta el verano del 2021, especialmente en los trimestres húmedos. En contraste, desde el otoño del 2021 hasta la primavera de 2023, exhiben una mayor coincidencia entre estaciones, particularmente en los trimestres secos.

Cabe destacar que, en los veranos del 2022 y del 2023, los acumulados son apenas superiores a los observados en un invierno típico, incluso inferiores al invierno de 2019. Esto sugiere una reducción estacional del contraste en ciertos años, asociadas a condiciones climáticas anómalas en la región. Estas conclusiones resaltan la importancia de un monitoreo multi-fuente para comprender la dinámica de las precipitaciones en la región con mayor precisión.

Se aplicó el análisis de SSTt para comparar la simultaneidad en la ocurrencia de categorías iguales entre pares de localidades. En la Tabla 1 se muestran los resultados del análisis de SSTt para las mejores y peores simultaneidades entre dos EC (izquierda); en entre dos ENC (centro); y, entre una EC y una ENC (derecha).

Del análisis presentado en la Tabla 1, se observa que la mayor cantidad de coincidencias en la clasificación por terciles se da entre dos estaciones no convencionales (PB11–PB12), con 19 trimestres coincidentes sobre un total de 21, lo que evidencia una alta coherencia. En contraposición, las



EC-EC		ENC-ENC		EC-ENC	
Fsa-Pilar (+)	Rcia-Fsa (-)	PB11-PB12 (+)	PB11-PB24 (-)	Pilar-PB24 (+)	Rcia-PB11 (-)
15	9	19	12	17	10

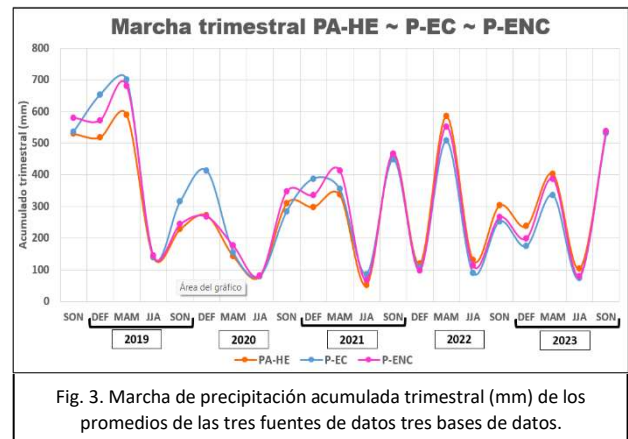
por terciles entre pares de estaciones. Se indican las relaciones con mayor (+) y menor (-) coherencia. Se muestra las relaciones entre dos EC (izquierda), dos ENC (derecha) y, una EC y una ENC (centro).

relaciones marcadas con "(-)", como Rcia–Fsa, PB11–PB24 y Rcia–PB11, muestran bajos niveles de simultaneidad, reflejando la significativa variabilidad espacial, incluso entre localidades relativamente cercanas. También se destaca que las relaciones entre una EC y una ENC, como Pilar–PB24, pueden alcanzar niveles de coherencia comparables o superiores a los de ciertas EC entre sí, lo cual refuerza el potencial de complementariedad entre ambas fuentes.

En la Figura 3 se muestran las marchas de la precipitación acumulada trimestral de los promedios de las EC, de las ENC y, del hidroestimador (PA-HE). Este último se obtuvo como el promedio de todos los píxeles contenidos dentro del polígono más pequeño que abarca la totalidad de las estaciones no convencionales consideradas en este estudio.

En general, se observa un comportamiento similar entre el PA-HE y los promedios de los conjuntos de estaciones (Fig. 2). Sin embargo, en el verano de 2019 y de 2020, P-EC es mucho más elevado que las otras dos bases de datos.

En términos generales, el P-EC tiende a mostrar una mayor discrepancia en sus mediciones, mientras que el PA-HE y el P-ENC muestran una mayor coherencia entre sus datos. Esto podemos asociarlo a que las EC se encuentran a una distancia mayor entre sí.



4. CONCLUSIONES

La comparación de la precipitación acumulada trimestral entre fuentes de datos convencionales, no convencionales y satelitales permitió evidenciar la alta variabilidad espacial que caracteriza al noreste argentino. Si bien se observó una coherencia general en la evolución temporal de la precipitación, algunos periodos mostraron una mayor dispersión, especialmente en los registros de las estaciones convencionales. Las ENC exhibieron una alta coherencia interna, particularmente entre estaciones geográficamente cercanas. Por su parte, el producto SQPE-OBS mostró patrones espaciales acordes con los observados en las demás fuentes, consolidando su potencial como herramienta complementaria. En conjunto, los resultados refuerzan el valor de integrar múltiples fuentes de datos como estrategia para mejorar la cobertura, precisión y confiabilidad del monitoreo climático en regiones con baja densidad observacional, superando así las limitaciones individuales de cada fuente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), a la Dirección de Meteorología e Hidrología de Paraguay y, a la red comunitaria Bermejo del proyecto CLIMAX, por la provisión de los datos utilizados en este estudio.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Hobouchian, M. P.; Díaz, G.; Vidal, L.; García Skabar, Y.; Ferreira, L.; Maas, M.; Rossi Lopardo, M. S.; Veiga, H.; y Rugna, M.; 2021. Ajuste de la estimación de precipitación satelital IMERG con observaciones pluviométricas en Argentina. Nota Técnica SMN 2021-105.
- Robledo, F.; Spinoso, N.; Hernández, V.; Vera, C.; Osman, M.; Díaz, L.; Fossa Riglos, F.; Ortiz de Zárate, M.; Rolla, A.; Ruscica, R.; 2018. Co-diseño de una red comunitaria de monitoreo de lluvia en el departamento Bermejo, Chaco, Argentina. IFRH-2018: 4to Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos.
- Robledo, F.; Penalba, O.; 2008. Análisis estacional de la frecuencia diaria y la intensidad de los extremos de precipitación sobre el sudeste de sudamérica. Revista Meteorologica, Vol. 32 y 33, Nº 1 y 2 (2008), 31-49.
- Silva, F.; Olinuck, J.; 2019. Tendencias de las precipitaciones anuales en el noreste de Argentina. XXIII Simpósio brasileiro de recursos hídricos (ISSN 2318-0358). 2019.

APLICACIÓN DE MAPAS AUTOORGANIZADOS (SOM) A LA CARACTERIZACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ESTIVAL EN EL NORESTE ARGENTINO: RESULTADOS PRELIMINARES (1981–2024)

Gabriela Hernandez¹, Fernanda Cerqueira Vasconcellos², Eduardo Charles Vasconcellos³, Gabriela V. Müller^{4,5}, Bernado Alfonso Nunes⁶, Beatriz de Andrade Silva e Salz⁷

gabrielahernandez@azul.faa.unicen.edu.ar

¹ Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA). Facultad de Agronomía. NAACCE (Núcleo de Estudios en Actividades Agropecuarias y Cambio Climático)

² Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). Instituto de Geociências e da Atmosphere (IGEA). Grupo de Estudos, Previsões e Análises Climáticas (GEPAC/UFRJ)

³ Universidad Federal Fluminense (UFF). Instituto de Computación (IC)

⁴ Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral (CEVARCAM-FICH-UNL), Santa Fe

⁵ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁶ Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). Instituto de Computación (IC)

⁷ Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). Ciencias Matemáticas e da Terra (CMT)

Palabras clave: Aprendizaje automático, anomalías de precipitación, variabilidad climática.

1) INTRODUCCIÓN

El noreste de Argentina es una región frecuentemente afectada por extremos hidroclimáticos severos, cuya intensidad y frecuencia se han visto incrementadas en las últimas décadas (Müller et al., 2021; Lovino et al., 2022). Desde mediados del siglo XX se ha registrado un cambio climático en el noreste argentino, caracterizado por un aumento sostenido de la precipitación regional (Lovino et al., 2018a). Este cambio podría explicarse por una combinación de factores antrópicos y naturales, incluyendo la variabilidad decadal del sistema océano-atmósfera. En este complejo contexto, donde diversos forzantes remotos y locales interactúan de forma no lineal y no homogénea, la identificación de patrones espaciales de anomalías de precipitación resulta clave para comprender los mecanismos subyacentes a estos eventos extremos.

Los recientes avances en técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning, ML) ofrecen nuevas herramientas para el análisis climático. En particular, los Mapas Autoorganizados (Self-Organizing Maps, SOM), una red neuronal no supervisada basada en aprendizaje competitivo, permiten clasificar grandes volúmenes de datos en grupos representativos, facilitando la detección de patrones ocultos en variables meteorológicas (Kohonen et al., 1997). Utilizando esta metodología, el objetivo del presente trabajo es identificar los principales patrones espaciales de anomalías de precipitación en los meses de primavera-verano, en el noreste argentino para el período 1981–2024.

2) METODOLOGÍA

Este estudio analiza patrones espaciales de precipitación en el noreste argentino identificados a partir de datos mensuales del producto satelital Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) (Funk et al., 2014). Se trabajó con promedios correspondientes a los meses de octubre a marzo, para el período 1981–2024, y se calcularon anomalías respecto a la climatología 1991–2020. Para aplicar el algoritmo Self-Organizing Map (SOM), se eliminó la tendencia lineal y se normalizaron los datos mediante la transformación Min-Max. La metodología, implementada en Python con `sklearn-som`, incluyó el preprocesamiento de datos, el entrenamiento de una red 4x4 y la identificación de nodos ganadores. La calidad del agrupamiento fue evaluada mediante el coeficiente de Silhouette (Rousseeuw, 1987). A partir de las fechas asignadas a cada nodo se construyeron compuestos de anomalía de precipitación y se generó una tabla resumen con la cantidad de meses asignados y el porcentaje de celdas significativas. La validación estadística se

realizó aplicando un test t de Student de una muestra en cada celda ($p < 0.05$), lo que permitió generar mapas de anomalía enmascarada y desviación estándar, para evaluar la robustez y la coherencia interna de los patrones espaciales identificados.

3) RESULTADOS

El análisis SOM aplicado a las anomalías normalizadas de precipitación mensual del noreste argentino durante la primavera-verano (1981–2024) permitió identificar 16 patrones espaciales recurrentes (Figura 1). La red 4x4 mostró un coeficiente de Silhouette de 0,053, lo que indica una estructura de patrones espaciales con separación moderada, aunque con evidencias de solapamiento entre nodos. Las Figuras 2a y 2b muestran los patrones espaciales de anomalía media de precipitación y la dispersión intra-nodo correspondientes a los 16 nodos de la red SOM aplicada. Los mapas de anomalía fueron enmascarados mediante un test t de Student ($p < 0.05$), ocultando las celdas sin diferencias significativas respecto a la climatología de referencia. En paralelo, los mapas de desvío estándar permiten evaluar la homogeneidad interna de cada patrón.

La Tabla I resume, para cada nodo, la cantidad de meses asignados y el porcentaje de celdas con anomalías estadísticamente significativas. A partir de esa información, es posible identificar nodos con alta coherencia espacial, baja variabilidad interna y frecuencia de ocurrencia considerable como los nodos (2,3), (3,3), (3,1), (1,0) y (2,2) lo cual sugiere que representan patrones robustos y recurrentes en la región.

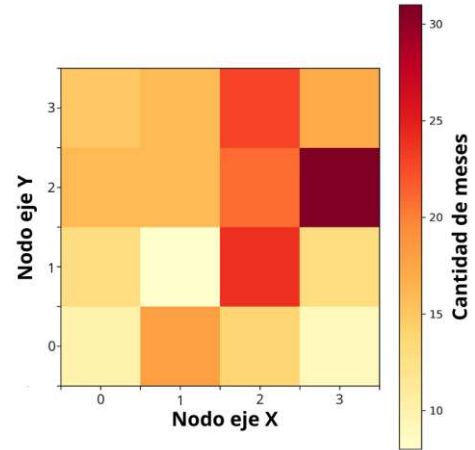


Figura 1: Frecuencia de activación de cada nodo en la red SOM 4x4 para el noreste argentino (1981–2024).

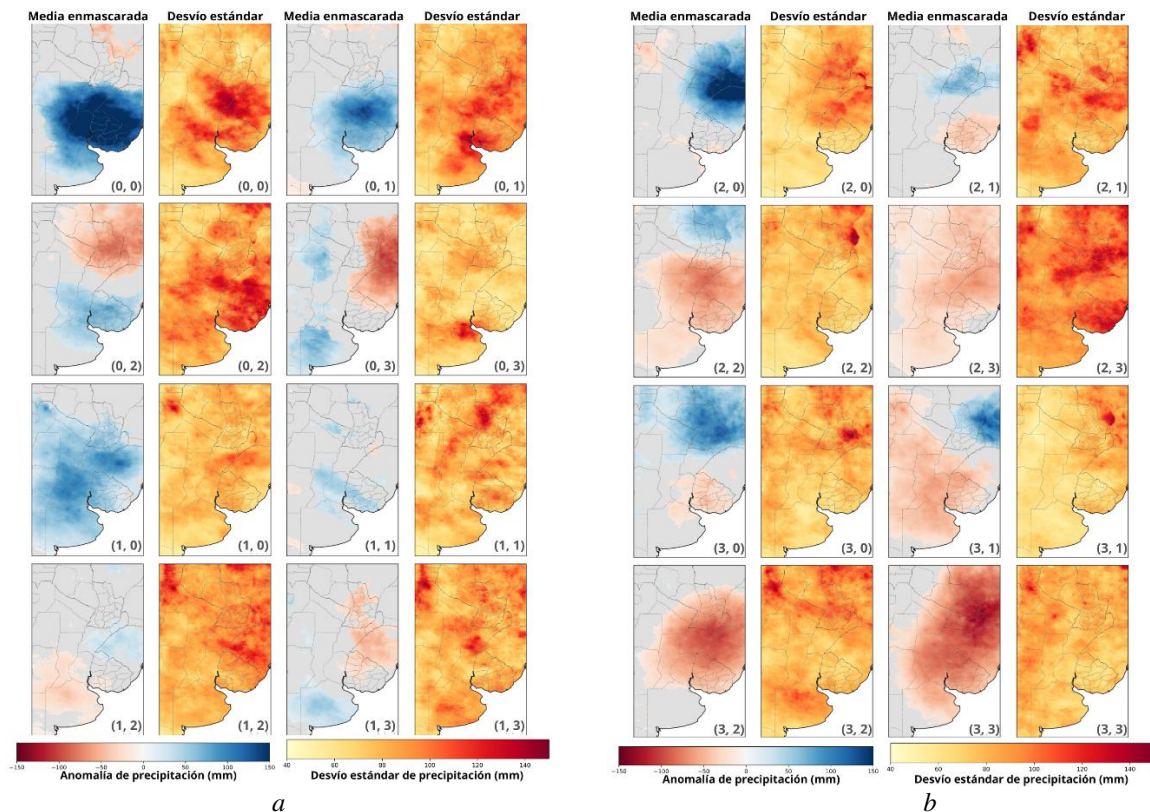


Figura 2. Mapas de anomalía de precipitación (mm/mes) media enmascarada (izquierda) y desvío estándar intra-nodo (derecha) para los 16 nodos del SOM 4x4 aplicado al noreste argentino en primavera-verano (1981–2024). (a) Nodos (0,0) a (1,3). (b) Nodos (2,0) a (3,3).

Por ejemplo, el nodo (2,3), con 31 meses asignados, presenta un 78,7% de celdas significativas y

Nodo	(1, 0)	(1, 1)	(2, 3)	(3, 2)	(2, 1)	(3, 1)	(3, 3)	(1, 2)	(2, 2)	(2, 0)	(3, 0)	(0, 1)	(1, 3)	(0, 0)	(0, 3)	(0, 2)
Cantidad de meses	13	8	31	23	16	16	17	24	21	16	15	18	13	10	9	14
% de celdas significativas	64,5	14,5	78,7	46,5	24,6	63,9	65,5	29,9	62,4	34,1	48,7	37,6	29,2	48,2	43,1	49,5

una desviación estándar moderada, reflejando anomalías negativas concentradas en el centro-este. El nodo (3,3) muestra un patrón deficitario extendido

Tabla I. Meses asignados y % de celdas significativas por nodo del SOM 4×4. Se resaltaron en color las celdas con mayor porcentaje de significancia ($p < 0.05$).

hacia el centro-norte (64,5% de significancia), mientras que en el nodo (3,1) predominan anomalías negativas en el sur-sudeste y positivas en el noreste (78,7%), con baja variabilidad interna. El nodo (1,0) exhibe señal positiva en el centro-oeste (68,4%), y el nodo (2,2), con un 66,6% de celdas significativas, presenta anomalías negativas persistentes sobre el centro-este y positivas al noreste, configurando un patrón robusto de déficit. En contraste, nodos como (1,1), (0,3) o (0,0), con menor frecuencia de ocurrencia (≤ 10 meses) y alta dispersión espacial, podrían reflejar eventos extremos o patrones poco frecuentes que no se repiten en la serie analizada.

4)CONCLUSIONES

Estos resultados preliminares evidencian el potencial del enfoque SOM para identificar patrones menos frecuentes o atípicos dentro de la distribución total de eventos analizados. No obstante, la baja separación entre nodos y la superposición espacial observada sugieren la necesidad de explorar configuraciones alternativas de red y complementar este enfoque con otras métricas de validación. Se continuará con un análisis más detallado orientado a caracterizar los eventos extremos y explorar los posibles forzantes climáticos regionales y globales que actúan.

5)AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a CAPES por la beca de investigación del Programa MOVE la América N° 88881.018732/2024-01, y al laboratorio GEPAC de la UFRJ por la oportunidad de desarrollar la investigación dentro del proyecto FAPERJ N° E-26/210.021/2024.

6)REFERENCIAS

- Funk, C.C., Peterson, P.J., Landsfeld, M.F., Pedreros, D.H., Verdin, J.P., Rowland, J.D., Romero, B.E., Husak, G.J., Michaelsen, J.C., y Verdin, A.P., 2014:** A quasi-global precipitation time series for drought monitoring: U.S. Geological Survey Data Series 832, 4 p. <http://pubs.usgs.gov/ds/832>
- Kohonen, T.; Kaski, S.; Lappalainen, H., 1997:** Self-Organized Formation of Various Invariant-Feature Filters in the Adaptive-Subspace SOM. Neural Computation, v. 9, n. 6, p.1321–1344, 1 ago. 1.
- Lovino, M. A., Müller, G. V., Pierrestegui, M. J., Espinosa E. y Rodríguez L., 2022:** Extreme precipitation events in the Austral Chaco region of Argentina. International Journal of Climatology. <https://doi.org/10.1002/joc.7572>.
- Lovino, M. A., Müller, O., Berbery, E. H. y Müller, G., 2018a:** How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina? Global and Planetary Change, 168, 78- 97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.06.008>.
- Müller, G. V., Lovino, M. A. y Sgroi, L. C., 2021:** Observed and projected changes in temperature and precipitation in the core crop region of the Humid Pampa, Argentina. Climate, Special Issue Climate Change and Land. 9 (3), 40, doi: 10.3390/cli9030040
- Rousseeuw, P. J., 1987:** Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of Computational and Applied Mathematics, v. 20, p. 53–65.

¿LAS TORRES ALTAS ATRAEN MÁS RAYOS? ANÁLISIS PRELIMINAR A ESCALA GLOBAL

Lucía Pini^{1,2,3}, Daiana M. Baissac^{1,3}, M. Gabriela Nicora^{1,2,3,4}
lpini@citedef.gob.ar. Autora correspondiente.

¹Centro de Investigaciones en Láseres y sus Aplicaciones, Unidad de Investigación y Desarrollo Estratégico para la Defensa, CONICET. Villa Martelli, Argentina.

²Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP), La Plata, Argentina.

³CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

⁴Departamento en Láseres y Aplicaciones, CITEDEF. Villa Martelli, Argentina.

Palabras clave: Descargas Eléctricas, Estructuras Altas, WWLLN

1) INTRODUCCIÓN

El aumento en la construcción de estructuras altas a nivel global, como torres de telecomunicaciones, edificios y aerogeneradores, ha despertado interés en conocer su posible influencia en la ocurrencia de descargas eléctricas del entorno. Diversos estudios han demostrado que estas estructuras presentan una mayor incidencia de descargas respecto a construcciones de menor altura, lo que se atribuye principalmente a la intensificación del campo eléctrico en su punta, favoreciendo la generación de descargas ascendentes inducidas por el propio objeto (Shindo, 2018). Este fenómeno predomina en estructuras superiores a 100 metros (Smorgonskiy et al., 2011).

Sin embargo, se ha observado variabilidad entre distintas estructuras alrededor del mundo en cuanto a la proporción de descargas ascendentes, el modo en que se generan y su comportamiento estacional (Diendorfer et al., 2011; Warner et al., 2012; Guimaraes et al., 2014). Factores como la altura estructural, ubicación y las condiciones meteorológicas de la región podrían tener una importante influencia en el fenómeno (Shindo, 2018).

En este trabajo se analizan datos de descargas eléctricas provistos por la red de detección global *World Wide Lightning Location Network* (WWLLN), alrededor de distintas estructuras altas del mundo entre 2012 y 2023, con el objetivo de evaluar si es posible observar una mayor densidad de descargas eléctricas en las proximidades de cada estructura.

2) METODOLOGÍA

Se analizaron las descargas eléctricas detectadas entre 2012 y 2023 en las proximidades de 41 estructuras altas distribuidas alrededor del mundo (Figura 1). Los datos provienen de la WWLLN (<http://wwlln.net/>), una red global de detección terrestre de descargas eléctricas que utiliza receptores de ondas de radio de muy baja frecuencia (VLF). Las estructuras seleccionadas corresponden a casos previamente estudiados en la literatura o se encuentran entre las torres de telecomunicaciones, observación o edificios más altos del mundo. Sus alturas oscilan entre aproximadamente 100 y 630 metros, incluyendo algunas menores a 100 metros que, al estar ubicadas en terrenos montañosos, presentan alturas efectivas significativamente mayores. Este último concepto se define en función de la altura de la estructura y la altitud del terreno donde está ubicada.

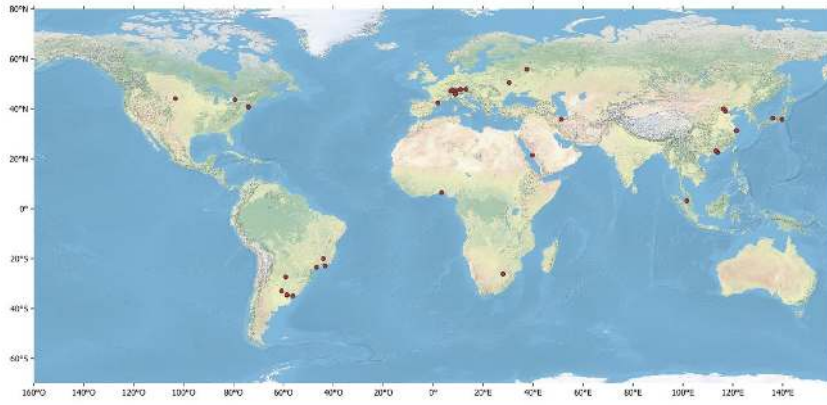


Figura 1: Ubicación de las 41 estructuras analizadas.

El análisis se realizó sobre dos regiones concéntricas: una región circular interna de 2 km de radio, que incluye todas las descargas potencialmente asociadas a la estructura; y una región anular externa entre 2 y 10 km, considerada libre de su influencia.

Se calculó la densidad de descargas (en flashes $\text{km}^{-2} \text{año}^{-1}$) en ambas regiones, dividiendo el número de eventos detectados por el área correspondiente y la duración del período analizado. Por último, se calculó el cociente D_I/N_g , donde D_I representa la densidad en la región interna y N_g en la externa, con el fin de comparar la diferencia relativa de densidades entre las distintas estructuras.

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del cálculo de densidad de descargas para las regiones interna (D_I) y externa (N_g) se presentan en la Figura 2. Para 40 de las 41 estructuras analizadas, ambos valores varían entre aproximadamente 0.2 y 4 flashes $\text{km}^{-2} \text{año}^{-1}$. La única excepción se asocia a la torre Kuala Lumpur (Malasia), que presenta densidades superiores a 20 flashes $\text{km}^{-2} \text{año}^{-1}$, debido a que está ubicada en una de las regiones con mayor actividad eléctrica del planeta (ver Figura 2 en (Kaplan & Lau, 2022)). La línea punteada indica la igualdad entre D_I y N_g ; los puntos situados por encima de dicha línea corresponden a estructuras donde la densidad interna supera a la externa, lo cual se observa en 32 casos.

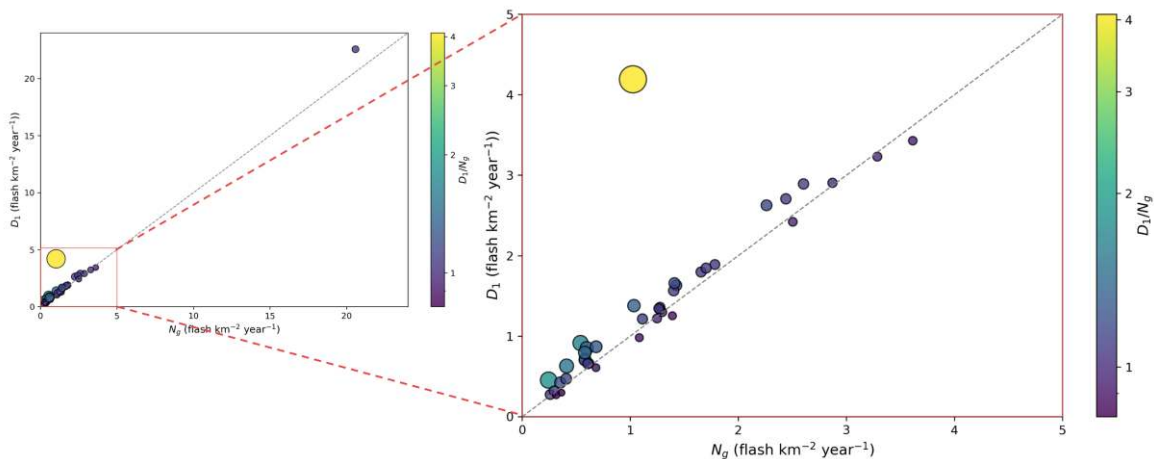


Figura 2: Densidad de descargas eléctricas en la región interna (D_I) y externa (N_g) para cada estructura. Los colores y tamaños de los puntos están definidos según D_I/N_g

El cociente D_I/N_g en general se mantiene cercano a la recta $D_I = N_g$, con valores que oscilan entre 0.82 y 1.86 en todos los casos excepto uno, como también se ilustra en la Figura 2. En

la misma, el tamaño y color de los puntos representan el valor de este cociente. Para estructuras situadas en regiones de baja densidad de descargas, el cociente tiende a ser mayor en comparación a aquellas ubicadas en regiones de alta densidad. El valor máximo y atípico corresponde a la torre Säntis, en Suiza (punto amarillo), con una diferencia particularmente marcada entre ambas regiones ($D_I/N_g = 4.09$), lo que la convierte en un caso interesante para estudios más detallados.

5) CONCLUSIONES

Se analizó la actividad eléctrica en las cercanías de 41 estructuras altas distribuidas en todo el mundo durante el período 2012–2023, utilizando datos de la red global WWLLN. El objetivo fue evaluar la capacidad de esta red para detectar diferencias en la densidad de descargas eléctricas entre una región próxima a la estructura y su entorno más alejado.

Los resultados mostraron que en 32 de las 41 estructuras analizadas, la densidad interna superó a la externa, demostrando la utilidad de la WWLLN para este tipo de análisis. Como trabajo a futuro, se propone identificar patrones o características que expliquen las condiciones bajo las cuales estas diferencias de densidad se manifiestan con mayor claridad, en relación a distintas variables como la altura efectiva, actividad eléctrica de la región y proximidad a otras estructuras elevadas.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer a la WWLLN, una colaboración de alrededor de 50 universidades e instituciones, por proveer la localización de las descargas eléctricas utilizadas en este trabajo, así como a IRL 3351FAECI y UNIDEF (MINDEF-CONICET) por brindar las condiciones y el apoyo necesario para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Diendorfer, G., Zhou, H., Pichler, H., & Thottappillil, R. (2011).** Review of upward positive and bipolar lightning flashes at the Gaisberg Tower. *2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning*, 263–267. <https://doi.org/10.1109/APL.2011.6110121>
- Guimaraes, M., Ramos, P., Sobreiro, R., & Visacro, S. (2014).** Lightning Measurements at Morro do Cachimbo Station: New results. *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1695–1700. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973401>
- Kaplan, J. O., & Lau, K. H.-K. (2022).** World Wide Lightning Location Network (WWLLN) Global Lightning Climatology (WGLC) and time series, 2022 update. *Earth System Science Data*, 14(12), 5665–5670. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5665-2022>
- Shindo, T. (2018).** Lightning striking characteristics to tall structures. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 13(7), 938–947. <https://doi.org/10.1002/tee.22649>
- Smorgonskiy, A., Rachidi, F., Rubinstein, M., Diendorfer, G., Schulz, W., & Korovkin, N. (2011).** A new method for the estimation of the number of upward flashes from tall structures. *2011 International Symposium on Lightning Protection*, 97–100. <https://doi.org/10.1109/SIPDA.2011.6088466>
- Warner, T. A., Cummins, K. L., & Orville, R. E. (2012).** Upward lightning observations from towers in Rapid City, South Dakota and comparison with National Lightning Detection Network data, 2004–2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D19). <https://doi.org/10.1029/2012JD018346>

DETERMINACIÓN DE UMBRALES DE REFERENCIA EN VARIABLES METEOROLÓGICAS PARA LA EVALUACIÓN DE SEVERIDAD DE TEMPESTADES DE POLVO EN EL CENTRO-OESTE DE ARGENTINA

Agustina L. Miatello¹, Juan A. Rivera¹

amiatello@mendoza-conicet.gob.ar.

¹Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA, CCT - CONICET, MENDOZA)

Palabras clave: tempestades de polvo, valores críticos, climatología.

1) INTRODUCCIÓN

En el centro-oeste de Argentina, los episodios de tempestades de polvo representan un fenómeno meteorológico relevante por su impacto en las actividades humanas. Estos eventos pueden clasificarse principalmente en dos tipos: los asociados a la formación de tormentas convectivas que generan frentes de ráfagas que levantan polvo en su desplazamiento (haboobs), y los que se asocian al avance de frentes fríos con poca o escasa precipitación (tempestades de polvo o arena -TPA-). Los haboobs presentan una duración corta, de entre 1 y 3 horas, ocurren principalmente en los meses de primavera-verano. En contraste, las TPA pueden extenderse por más de 12 horas (Eagar y otros, 2017). Dada la importancia de diferenciar estos eventos y de establecer criterios objetivos para evaluar su severidad, este trabajo tiene como objetivo determinar umbrales de referencia en eventos de haboobs y TPA utilizando variables meteorológicas observadas en estaciones del centro-oeste de Argentina.

2) METODOLOGÍA

Para el análisis se utilizaron datos horarios aportados por el Servicio Meteorológico Nacional de las siguientes estaciones meteorológicas: Chilecito Aero (1), La Rioja Aero (2), San Juan Aero (3), San Martín (4), Mendoza Aero (5), San Luis Aero (6), Villa Reynolds (7), Malargüe Aero (8), San Rafael Aero (9), Neuquén Aero (10) (**Figura 1**). Estas estaciones fueron seleccionadas por contar con registros continuos entre 1981 y 2021. Se analizaron las variables meteorológicas de tiempo presente (WW), visibilidad, velocidad del viento y dirección del viento.

La identificación y clasificación de los eventos se realizó según los códigos SYNOP para WW: Los haboobs tienen en el código synop un código específico que es el **98** “Tormenta con tempestad de polvo o arena en el momento de la observación”. Por otro lado, las TPA se clasifican con los códigos **9** “Tempestad de polvo o de arena a la vista en el momento de la observación, o en la estación misma, durante la hora precedente”; **30** “Tempestad de polvo o de arena (TPA) ligera o moderada, que ha disminuido en el curso de la hora precedente”; **31** “TPA ligera o moderada, sin cambio apreciable en el curso de la hora precedente”; **32** “TPA ligera o moderada, que ha comenzado, o ha aumentado en el curso de la hora precedente”; **33** “TPA violenta, que ha disminuido en el curso de la hora precedente”; **34** “TPA violenta, son cambio apreciable en el curso de la hora precedente” y **35** “TPA violenta, que ha comenzado o ha aumentado, en el curso de la hora precedente”. Esta clasificación sigue el criterio utilizado por Bashaa y otros (2019).

Como primera aproximación, se propuso una categorización de los eventos en leves, moderados y severos, utilizando percentiles 10 y 30 (P10 y P30) de visibilidad calculado a partir de todos los casos de haboobs y TPA registrados en la región de estudio. Aproximaciones similares para establecer la severidad de los eventos de haboobs y TPA se llevaron a cabo por Abadi y otros (2025) en Irán. Además se estudió la dirección predominante del viento y la velocidad en ambos tipos de eventos.

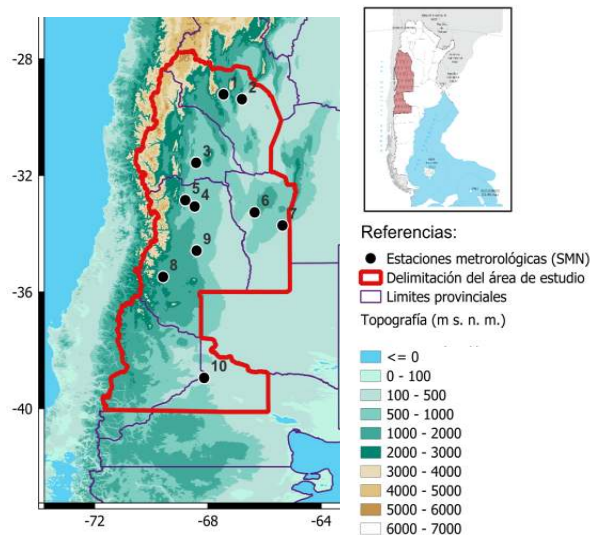


Figura 1. Mapa del área de estudio con la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.

3) RESULTADOS

En base al análisis de los códigos de WW, se identificaron los casos de haboobs y TPA en el área de estudio. La única estación meteorológica en la que no se registraron casos de haboobs es la estación Malargüe Aero, mientras que Chilecito Aero se registró la mayor frecuencia de ocurrencia, con 15 casos. Las tempestades de polvo presentan una mayor frecuencia de ocurrencia en comparación a los haboobs, oscilando entre 26 casos para la estación Chilecito Aero y 109 casos en la estación San Juan Aero. Se calcularon histogramas para ver la dispersión presente en la visibilidad y la velocidad del viento durante los eventos de haboobs y TPA (**Figura 2**). Se puede observar que en los casos de TPA la velocidad del viento es mayor que en los casos de haboobs, pudiendo superar los 90 km/h. La visibilidad presenta la mayor frecuencia en eventos de haboobs en los 5 km, mientras que para las tempestades de polvo se observan tres máximos en 1, 15 y 20 kms.

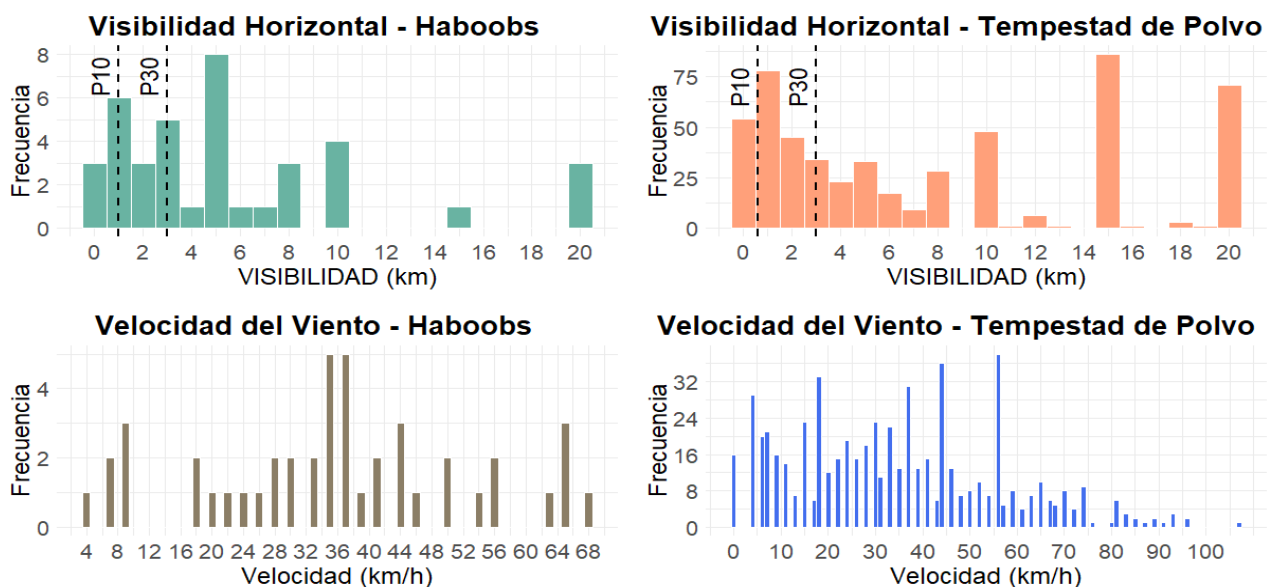


Figura 2. Histogramas de velocidad del viento (paneles superiores) y visibilidad (paneles inferiores) para los casos de haboobs (izquierda) y tempestades de polvo (derecha).

Para la determinación de umbrales de referencia para categorizar los eventos de acuerdo a su severidad se calcularon los percentiles 10 (P10) y 30 (P30) de la distribución de valores de la visibilidad. Esto permite clasificar a los eventos en categorías leves (L) para los casos en los que la visibilidad es superior al P30, moderados (M) para los casos en los que la visibilidad oscila entre los percentiles P10 y P30, y severos (S) para los casos en los que la visibilidad es inferior al P10. En los casos de haboob, el P10 equivale a 1 km y el P30 a 3 km de visibilidad horizontal. Esto representa 25 casos L; 9 casos M; 5 casos S. Cabe destacar que estos umbrales coinciden con la clasificación subjetiva propuesta para Irán por Abadi y otros (2025). Para la visibilidad en los TPA, el P10 equivale a 0,6 km y el P30 a 3 km de visibilidad horizontal, lo que representa 293 casos L; 116 casos M; 52 casos S.

4) CONCLUSIONES

Este estudio realizó una categorización de la severidad de las tempestades de polvo en el centro-oeste de Argentina, separando el origen de las mismas de acuerdo a la actividad convectiva (haboobs) o frontal (TPA). En los casos de TPA se observaron velocidades superiores a los 90 km/h, mientras que los casos de haboobs no superan los 70 km/h. A través de la determinación de umbrales de referencia para la variable de visibilidad horizontal, se seleccionaron dos percentiles (10 y 30) que permitieron clasificar los casos de haboob y TPA en eventos leves, moderados y severos. Se encontraron 5 casos severos para haboobs y 52 casos severos para tempestades de polvo en el período 1981-2021, lo cual representa poco más de un evento al año de estas características.

REFERENCIAS

- Abadi, A. R. S., Hamzeh, N. H., Kaskaoutis, D. G., Opp, C., Kazemi, A. F. 2025:** Long-Term Spatio-Temporal Analysis, Distribution, and Trends of Dust Events over Iran. *Atmosphere*, 16(3), 334, 1-29.
- Bashaa G., Venkat Ratnama M., Niranjana Kumarb K., Ouadac T.B.M.J., Kishored P. , Velicognad I. 2019:** Long-term variation of dust episodes over the United Arab Emirates. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 187, 33–39.
- Eagar J.D., Herckes P., Hartnett H.E., 2017:** The characterization of haboobs and the deposition of dust in Tempe, AZ from 2005 to 2014. *Aeolian Research* 24, 81-91.
- Middleton N., Tozer P., Tozer B. 2019:** Sand and dust storms: underrated natural hazards. *Disasters*, 43: 390-409.

CARACTERÍSTICAS DE ALTA RESOLUCIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA DE BRILLO EN 10.3 μm Y LA ACTIVIDAD ELÉCTRICA EN UNA TORMENTA DE GRANIZO

Matias Ballarin¹, Ezequiel Geslin¹, Maite Cancelada^{1,2}, Paola Salio^{1,2,3}
matidorrego02@gmail.com ; ezegeslin@gmail.com

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina

²CONICET - Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina

³CNRS - IRD - CONICET - UBA. Instituto Franco-Argentino para el estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: Sector de Mesoescala, GOES16, Tiempo Severo.

1) INTRODUCCIÓN

El estudio del granizo es esencial debido a su impacto en la agricultura, infraestructura y economía. Varios estudios en las últimas décadas han correlacionado la actividad eléctrica con la ocurrencia de condiciones climáticas severas, observando que la tasa de descargas se incrementa rápidamente minutos antes de que se inicie un evento severo (Nicora et al., 2015). Cuando hay un aumento significativo en la cantidad de destellos, se indica que las intensas corrientes ascendentes contienen mucha energía cinética, favoreciendo los intercambios de carga eléctrica asociados.

Además, las temperaturas mínimas en los topes de las nubes son una métrica clave como indicador de fenómenos meteorológicos severos (Borquez et al., 2020). Cuando estas temperaturas son más bajas, el tope de las nubes tiende a estar más alto y las nubes tienden a ser más profundas, aumentando la probabilidad de ocurrencia de fenómenos severos con granizo en superficie.

A pesar de su importancia, las observaciones satelitales de estas variables con alta resolución temporal (cada minuto en lugar de 10 o 15) son escasas. Sin embargo, durante las campañas RELAMPAGO-CACTI se proporcionaron tales observaciones en el centro de Argentina durante el verano austral de 2019. Este informe analiza un evento severo con granizo ocurrido en La Pampa el 10 de diciembre de 2018, en particular, se evalúa el tiempo de anticipación (lead time) que los datos del GOES-16 ofrecen frente a reportes de granizo, considerando diferentes frecuencias de escaneo.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Las temperaturas de brillo (T_b) de los topes nubosos se obtuvieron del canal 13 (10.3 μm) del sensor ABI del satélite GOES-16, conocido como ‘canal ventana’ por no verse afectado por la absorción del vapor de agua. Se seleccionaron las T_b mínimas registradas por el satélite en la región mediante un seguimiento (tracking) de manera manual, centrando el dominio en las localidades donde se reportó caída de granizo y siguiendo el movimiento de la tormenta.

El sensor GLM, también a bordo del GOES-16, mide continuamente y en tiempo real la actividad eléctrica. Las tasas de destellos (flashes) del GLM están estrechamente vinculadas a las corrientes ascendentes y a la evolución de las tormentas, por lo que será la variable principal en este estudio. Para generar la serie temporal de destellos (lightning density), se contabilizan todos los destellos ocurridos dentro de un radio de 20 km alrededor de la ubicación de las T_b mínimas en intervalos de 5 minutos.

Los reportes en superficie se obtuvieron a partir de la Base de Datos de Amenazas Meteorológicas y sus Impactos en América del Sur (Salio et al., 2024). Dicha base de datos recopila información a partir de redes sociales y diarios digitales locales. Cada reporte contiene la hora con la mayor probabilidad de ocurrencia de granizo, con una precisión temporal de ± 5 minutos.

En el marco de la campaña RELAMPAGO-CACTI se pudo contar con un sector de dominio de mesoescala (MDS) apuntando a la región central de Argentina. La ventaja de los MDS radica en que

tienen una mayor resolución temporal (1 minuto) que los escaneos de dominio entero (full disk). Las Tb obtenidas a través del MDS permitieron generar series temporales a intervalos de 1, 5, 10 y 15 minutos. Entonces, a partir de la serie temporal de Tb mínimas y la cantidad de destellos se analiza el comportamiento de estas variables momentos antes del tiempo en donde se dio la mayor probabilidad de caída de granizo. Más precisamente, se pretende calcular el tiempo de anticipación entre el cambio o tendencia que existe en un parámetro, que sugiere que podría haber un fenómeno severo, y el momento en que ese fenómeno severo realmente ocurre y es detectado en la superficie (lead time).

3) RESULTADOS

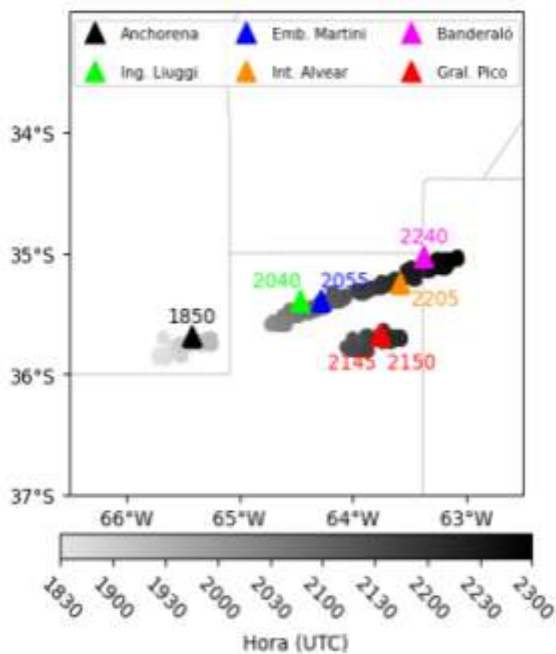


Fig. 1. En puntos con distintos tonos de grises las coordenadas con las temperaturas mínimas a lo largo del tiempo. En triángulos las localidades donde se registró granizo con su correspondiente horario

La Figura 1 muestra las horas de las Tb mínimas y los reportes de granizo. La tormenta muestra un desplazamiento hacia el este-noreste. Esta tendencia es confirmada por los informes de granizo en superficie, que se concentran en localidades más al noreste con el paso de las horas. La serie temporal de Tb a 1 minuto en Anchorena (Fig. 2) revela un marcado descenso de 6.4 K en 5 minutos, comenzando a las 1844 UTC, precediendo en **6 minutos** la caída de granizo más probable (1850 UTC). Este descenso estuvo acompañado por un aumento significativo en la tasa de destellos (incremento de 40 destellos en 5 minutos). En contraste, la serie temporal con datos cada 15 minutos, análoga a obtener las mediciones del sensor si no contáramos con el MDS (a la fecha de realización de este trabajo, el sensor proporciona información cada 10 minutos, sin embargo, en el período en que ocurrió el caso analizado, las mediciones se realizaban cada 15 minutos), muestra un descenso constante y menos abrupto (4 K en 15 minutos), lo que hace más difícil evaluar la evolución real de la variable Tb.

Luego de las 1855 UTC, ocurre un nuevo descenso de la Tb, principalmente con los escaneos cada 1 minuto, acompañado con un aumento en la cantidad de destellos. Este comportamiento podría indicar la inminencia de un fenómeno severo; sin embargo, al no contar con un reporte de granizo en superficie esto podría tratarse de una falsa alarma o, alternativamente, de un evento donde efectivamente ocurrió granizo, pero no fue registrado. Dichas situaciones ocurren también en las demás series temporales (no se muestra).

Minutos más tarde, ya cuando la tormenta se encontraba en una etapa madura, se registraron reportes en las localidades de Ingeniero Luigi (2040 UTC) y en Embajador Martini (2055 UTC). Las series temporales cada 1 y 5 minutos (no se muestran) indican una disminución en la Tb minutos antes de la caída de granizo para ambas localidades. En cambio, las series cada 10 y 15 minutos no registraron una disminución en dicha variable. Por otro lado, no se observa un patrón significativo en la tasa de destellos que puedan predecir la caída de granizo en estos dos casos.

3) CONCLUSIONES

Este trabajo analiza un caso de granizo ocurrido en diciembre de 2018 durante la campaña RELAMPAGO-CACTI, utilizando datos satelitales del GOES-16 (MDS). Se estudió la evolución de la temperatura de brillo (Tb) de los topos nubosos y la densidad de destellos, comparándolos con reportes de granizo en superficie. Se encontró que la Tb mínima fue más efectiva que la densidad de

destellos para anticipar eventos de granizo, mostrando hasta 10 minutos de anticipación.

La baja eficiencia del GLM en condiciones diurnas y la posible atenuación de la señal por nubes densas podrían explicar la menor utilidad de los destellos en este caso, especialmente en etapas maduras del sistema convectivo. Los escaneos satelitales cada 1 minuto captan mejor los descensos de Tb antes del granizo, pero generan más falsas alarmas. Los escaneos de 5 minutos ofrecen un buen balance entre anticipación y precisión, mientras que los de 10 y 15 minutos resultan insuficientes para detectar los eventos severos analizados. Se concluye que, con una red de reportes completa, la frecuencia de 5 minutos es la más adecuada. Para futuros trabajos se propone incorporar variables complementarias como reflectividad de radar (DBZ) para mejorar la predicción de granizo.

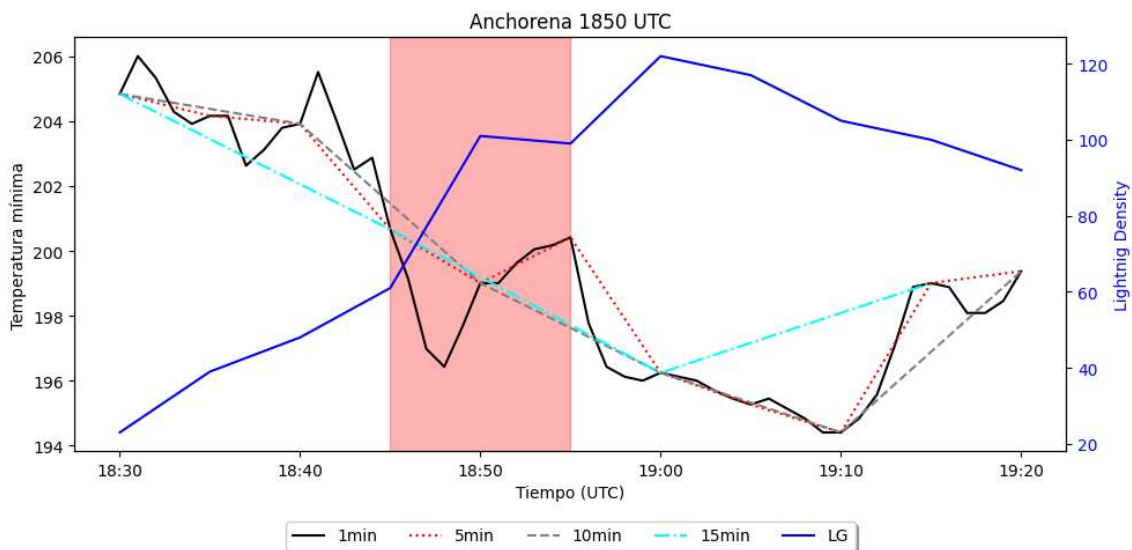


Fig. 4. Serie Anchorena. Variación temporal de la temperatura mínima cada 1, 5, 10 y 15 min. Variación temporal de la densidad de rayos (línea azul), cuyo eje de coordenadas se encuentra a la derecha. El tiempo con la máxima probabilidad de caída de granizo se encuentra en el centro del sombreado rojo, con su correspondiente error de ± 5 min

4) REFERENCIAS

- Borque, P., Vidal, L., Rugna, M., Lang, T. J., Nicora, M. G., & Nesbitt, S. W. (2020). Distinctive signals in 1-min observations of overshooting tops and lightning activity in a severe supercell thunderstorm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(20), e2020JD032856. <https://doi.org/10.1029/2020JD032856>
- Nicora, M. G., Quel, E. J., Bali, L., Acquesta, A., Vidal, L., Bürgesser, R. E., Ávila, E. E., & Altinger de Schwarzkopf, M. L. (2015). GeoRayos: A new application for severe weather warning. En XIII SIPDA International Symposium on Lightning Protection (Número de documento 0007ID2015). Balneario Camboriú, Brasil.
- Salio, P., Bechis, H., Ribeiro, B. Z., Nascimento, E. L., Galligani, V., Garcia, F., Alvarenga, L., et al. (2024). Toward a South American High-Impact Weather Reports Database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(7), E1204–E1217. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0063.1>

ATLAS MENSUAL DE ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR PARA LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Rocío Otero¹, Matías Suarez^{1,2}, Denis Poffo², Lucía Sandalio², Leandro Maturano²,
Andrés Rodríguez¹.

rocio.otero@mi.unc.edu.ar. Autora correspondiente.

¹ Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba(UNC)

² Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC.

Palabras clave: Energías renovables, energía eólica, radiación solar, potencial energético regional

1) INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de la creciente demanda energética, se vuelve imprescindible avanzar hacia fuentes de energía renovables y limpias. Para lograr una planificación eficiente, resulta esencial conocer con precisión el potencial de los recursos disponibles en el territorio. En la provincia de Córdoba son pocos los estudios que caractericen de forma conjunta los recursos eólico y solar con fines energéticos. La energía eólica representa un recurso de gran potencial, pero de compleja caracterización: la intensidad del viento puede variar abruptamente en escalas temporales cortas, cambia con la altura y está fuertemente influenciada por la topografía local. Por su parte, la radiación solar presenta una variabilidad más predecible, con un marcado ciclo diario y estacional. Sin embargo, la presencia de nubosidad representa un desafío importante para su estimación precisa. El objetivo de este trabajo es elaborar un atlas mensual de energía eólica y solar para la provincia de Córdoba, que permita visualizar espacialmente la disponibilidad de estos recursos. Además de la generación del atlas, se realiza una evaluación comparativa del desempeño de diferentes configuraciones de modelo: WRF forzado con condiciones iniciales del modelo GFS, WRF forzado con ERA5, y directamente los datos del reanálisis ERA5 (Hersbach y otros, 2020). Estas simulaciones se contrastan con observaciones provenientes de estaciones meteorológicas, a fin de identificar cuál de las alternativas ofrece mejores estimaciones del recurso disponible en la región.

2) MATERIALES Y MÉTODOS

Para caracterizar el recurso eólico se utilizaron datos del modelo de reanálisis ERA5 y simulaciones del modelo WRF forzado con ERA5, abarcando dos años (2021–2022). Los datos del modelo WRF se generaron sobre un dominio centrado en la provincia de Córdoba, con resolución espacial de 4 km y 35 niveles verticales. La configuración física y dinámica del modelo se basó en el esquema de parametrización operativa D del OHMC, previamente validado para esta región (Suarez y otros 2022 y Otero y otros 2025). Se analizaron intensidades de viento a 10, 50, 80, 100 y 120 metros sobre el nivel del terreno. Para evaluar la calidad de los resultados, se realizó una comparación entre los datos de ERA5, WRF-ERA5 y observaciones de nueve estaciones meteorológicas automáticas que poseen anemómetro a 10 m de altura.

En el caso de la radiación solar, se compararon dos fuentes principales: datos del modelo ERA5 y simulaciones WRF forzadas con GFS, para el período comprendido entre enero de 2019 y diciembre de 2020. Se calcularon valores medios diarios de radiación solar global (directa y difusa) expresados en unidades de kWh/m²/día con una resolución espacial de 20km. Como métricas de validación se utilizaron: la raíz del error cuadrático medio (RMSE),

el sesgo (BIAS), el sesgo medio (MBE), el error absoluto medio (MAE) y el coeficiente de correlación de Pearson (CC) entre los datos simulados y los observados.

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las evaluaciones realizadas permitieron identificar diferencias en el desempeño de las distintas configuraciones modeladas. En el caso del viento, la comparación entre ERA5 y ERA5-WRF muestra que el reanálisis ERA5 representa mejor la intensidad en zonas montañosas y de pie de monte. Por otro lado, en la región de llanura, ambas simulaciones presentan desempeños similares. Un aspecto importante a destacar es que, en algunos casos, WRF acentúa el sesgo positivo observado en la velocidad del viento. Esto puede observarse en la Figura 1, que muestra los valores de RMSE, BIAS y coeficiente de correlación obtenidos para las distintas estaciones. Este comportamiento podría deberse a la configuración física o dinámica del modelo, que en zonas de topografía compleja puede amplificar las diferencias frente a las observaciones.

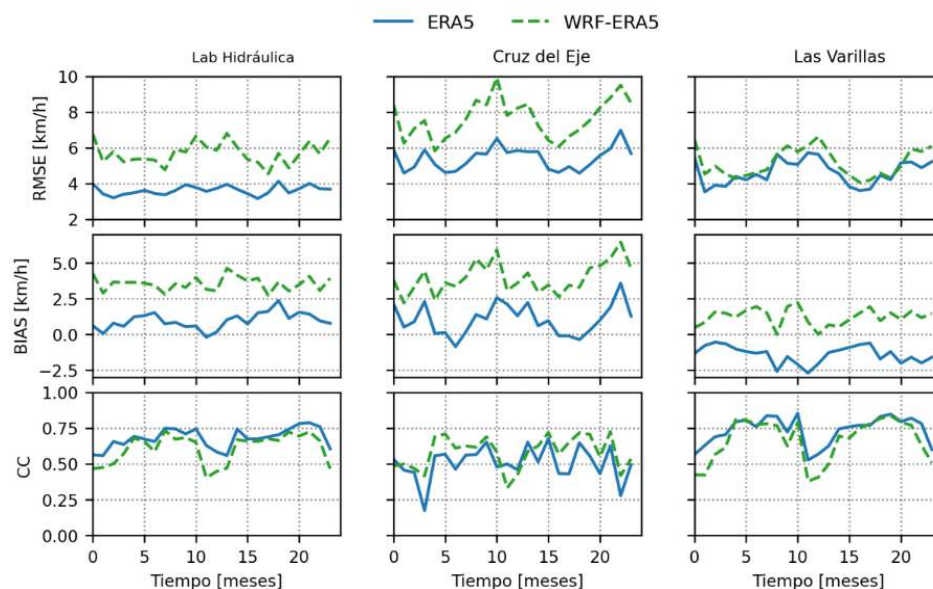


Figura 1: Parámetros estadísticos calculados a partir de la comparación del viento medido por las estaciones con el modelo ERA5 (Azul) y WRF-ERA5 (verde), para los años 2021 y 2022.

En cuanto a la radiación solar, los resultados indican que ERA5 ofrece un desempeño considerablemente superior al de WRF forzado con GFS. Este resultado se debe posiblemente a que ERA5 incorpora correcciones a partir de observaciones, incluyendo información satelital. Para mostrar esto, se presenta una tabla comparativa de métricas en dos estaciones: una en terreno montañoso y otra en la zona centro-sur.

Zona	Estación	Modelo	MBE	MAE	RMSE	CC
Zona Montañosa	Villa Ciudad Parque	ERA5	42.9	45.45	52.6	0.927
		GFS-WRF	58.6	68.5	91.5	0.76
Zona Centro - Sur	Pilar	ERA5	0.7	21.7	34.7	0.927
		GFS-WRF	16.6	40.0	68.9	0.806

Tabla 1: Métricas estadísticas (en W/m^2) entre radiación solar modelada por GFS-WRF y ERA5 y la radiación solar observada por estaciones de superficie.

La Figura 2 muestra los atlas elaborados con las mejores opciones disponibles según el análisis anterior: ERA5-WRF para el caso de viento y ERA5 para el caso de radiación solar.

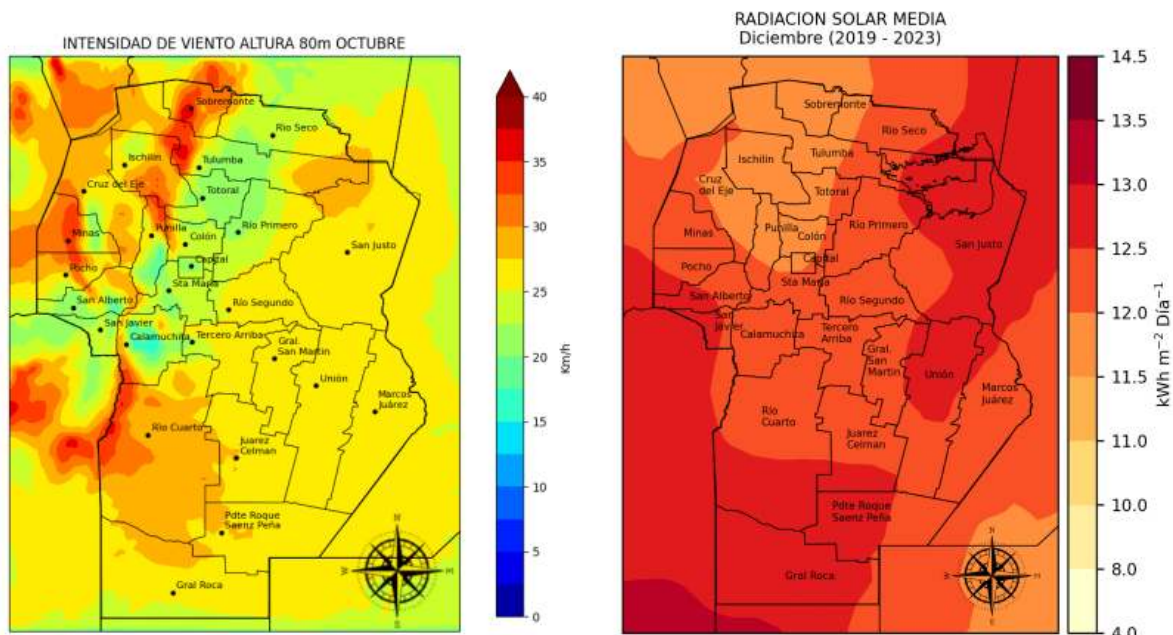


Figura 2: A la izquierda se muestra la distribución espacial del viento a 80 m de altura para octubre. A la derecha, la distribución de la radiación solar media diaria para el mismo mes.

4) CONCLUSIONES

Este trabajo constituye una primera aproximación que intenta caracterizar el potencial eólico y solar en la provincia de Córdoba, evaluando distintas configuraciones de modelos numéricos: WRF forzado con ERA5, WRF forzado con GFS y el reanálisis ERA5 por sí solo. A partir del análisis comparativo con observaciones de superficie, se seleccionaron las configuraciones más precisas para la elaboración del atlas mensual: ERA5-WRF para el caso del viento y ERA5 para la radiación solar. Los atlas obtenidos permiten visualizar espacialmente la disponibilidad del recurso en la provincia y contribuyen a la identificación de zonas ya conocidas por su potencial eólico, así como de nuevas regiones de interés donde se proyecta profundizar la investigación mediante campañas de medición específicas.

REFERENCIAS

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Simmons, A. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.

Otero, R., Suarez, M., Pierobon, E., Maturano, L., Montamat, I., Sanchez, J. E., ... & Poffo, D. (2025). Assessing the Impact of Physical Configuration and Lead Time on WRF Forecasting of an Extreme Wind Event. *Journal of Meteorological Research*, 39(1), 154-171.

Suárez, M., Poffo, D., Pierobon, E., Martina, A., Saffe, J., & Rodríguez, A. (2022). Wind and gust forecasts assessment of Weather Research and Forecast (WRF) model in Córdoba, Argentina. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 16(1), 2021133.

METODOLOGÍA OBJETIVA PARA LA DETECCIÓN DE ÁREAS DE TORMENTA MEDIANTE UN ÍNDICE MULTISENSOR CON DATOS DEL SATÉLITE GOES-16

Luciano Vidal¹, Maria Paula Hobouchian¹

lvidal@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Argentina

Palabras clave: GOES-16, tormentas, aeronáutica.

1) INTRODUCCIÓN

La observación y clasificación de nubes a partir de datos de satélite ha sido una herramienta clave desde hace décadas para comprender mejor los procesos de formación y desarrollo de las nubes y sus fenómenos asociados. Dentro de los diferentes tipos de nubes, las nubes convectivas (en especial las asociadas a convección profunda) son de las más estudiadas debido a los fenómenos meteorológicos de alto impacto social y económico asociados, como precipitaciones intensas, granizo, vientos fuertes y actividad eléctrica, entre otros. Una metodología por excelencia utilizada para estudiar este tipo de nubes a partir de información satelital ha sido la denominada Split-Window Difference (SWD) o de diferencias de temperaturas de brillo (BTD, por sus siglas en inglés) en dos bandas espectrales. No obstante, Liu et al. (2015) propusieron el índice NDCI (Normalized Difference Convection Index), que combina datos de un canal infrarrojo y un canal de vapor de agua, con el fin de detectar zonas de convección profunda en los tifones del océano Pacífico. Los resultados mostraron que en zonas de poca nubosidad, en la parte externa o en el ojo del tifón, los valores de NDCI fueron mayores a cero, mientras que en zonas con nubes opacas y convección profunda, el índice tomó valores negativos. Por su parte, Wu et al. (2016) mediante el análisis de correlaciones espaciales y temporales entre la temperatura de topos en 10.8 μm y las BTDs 12.0-10.8 μm y 6.7-10.8 μm , les permitió generar un modelo conceptual del ciclo de vida de la convección, como base de un índice de nubes convectivas. El objetivo general del presente trabajo es avanzar en el uso de técnicas multispectrales y multisensor que permitan mejorar la identificación objetiva de nubosidad convectiva profunda (áreas de tormenta) relevante para la seguridad operacional de los aeropuertos y las aerolíneas.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos utilizados corresponden a los sensores ABI (Advanced Baseline Imager) y GLM (Geostationary Lightning Mapper) a bordo del satélite GOES-16 y fueron accedidos desde <https://registry.opendata.aws/noaa-goes>. También se utilizaron datos del radar meteorológico Doppler polarimétrico banda C RMA1 ubicado en la Ciudad de Córdoba propiedad de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. La metodología aplicada consistió en la selección de un conjunto de eventos convectivos en el área de las Sierras de Córdoba durante el experimento RELAMPAGO/CACTI (Nesbitt et al., 2021). En estos casos se llevó a cabo un análisis de BTDs siguiendo la metodología propuesta por Wu et al. (2016) para luego definir un índice satelital de convección profunda (ISCP), el cual fue validado utilizando la información provista por el radar RMA1. A partir del índice, se evaluó su relación con GLM con el objetivo de mejorar la detección de las regiones con presencia de nubosidad de gran desarrollo vertical, minimizando las falsas detecciones asociadas por ejemplo a Cirrus espesos. Este producto final se denomina TS-GOES.

3) RESULTADOS

Las cuatro BTDs seleccionadas para desarrollar el producto resultaron ser las siguientes:

- IR9.6 - IR13.3 (O₃ menos CO₂)
- IR9.6 - IR10.3 (O₃ menos IR limpio)
- WV6.2 - IR.10.3 (Vapor de niveles altos menos IR limpio)
- WV6.2 - WV7.3 (Vapor de niveles altos menos vapor de niveles bajos)

Luego, a partir de su análisis se propuso el siguiente índice:

$$\text{ISCP} = k_{9.6-10.3} \text{BTD}_{9.6-10.3} + k_{6.2-7.3} \text{BTD}_{6.2-7.3} + c$$

donde los valores de k son los coeficientes de peso para cada BTD y c es una constante que representa el valor del índice cuando ambas BTDs son igual a 0°C ($\text{BT}_{9.6}=\text{BT}_{10.3}=\text{BT}_{6.2}=\text{BT}_{7.3}$). Se tomaron los siguientes valores: $k_{9.6-10.3}=1$, $k_{6.2-7.3}=0.5$ y $c=5$. Luego, en la figura 1 se muestra el índice resultante.

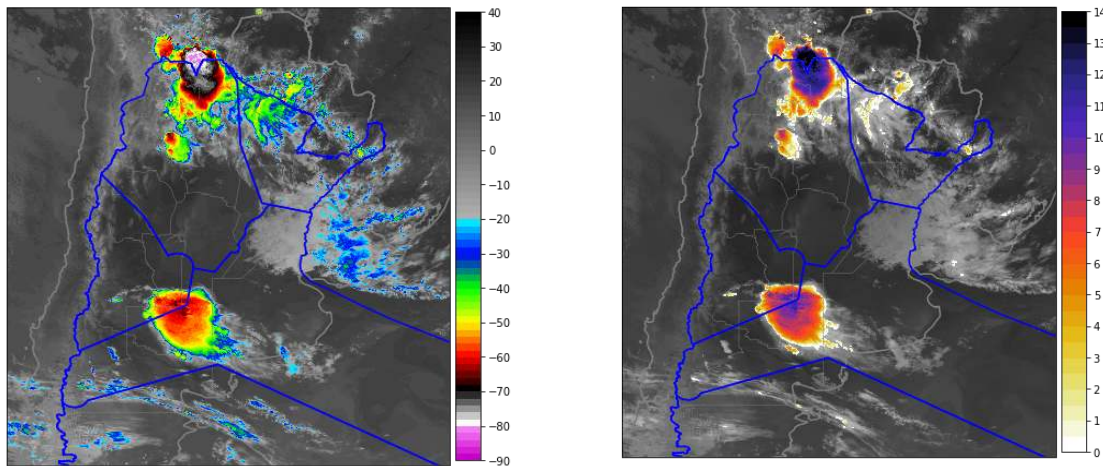


Figura 1: Imagen de temperatura de topes nubosos del 26/1/2023 a las 01:30 UTC (izq.) y su correspondiente índice ISCP (der.). En contornos azules se muestran las regiones FIR.

A partir del índice ISCP, se aplicó un proceso de segmentación de la imagen utilizando un umbral de 0 (Fig. 2 izq.) para luego utilizar la variable “flashes” de GLM para descartar todos aquellos objetos que no tuviesen actividad eléctrica asociada (Fig. 2 der.). El producto final TS-GOES se muestra en la Figura 3.

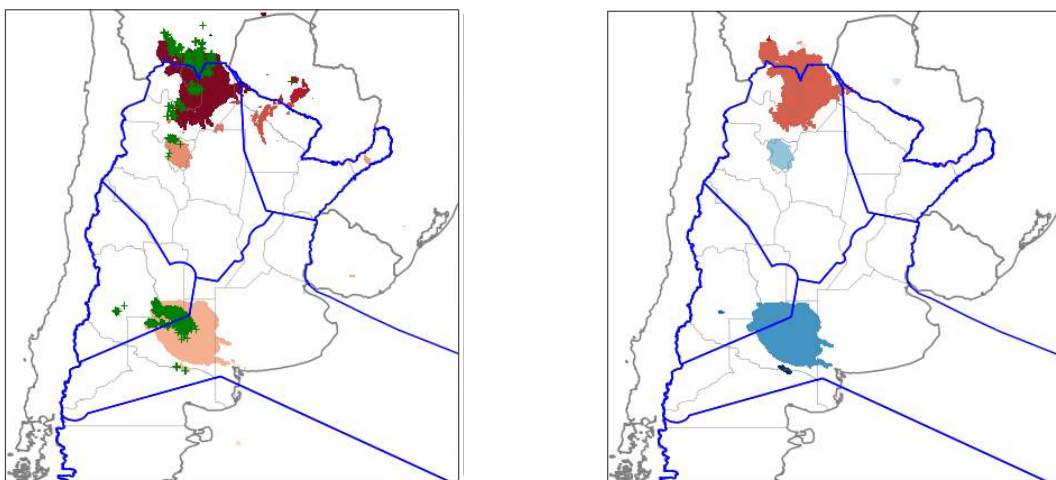


Figura 2: Imagen ISCP con flashes de GLM en verde (izq.) e imagen filtrada (der.).

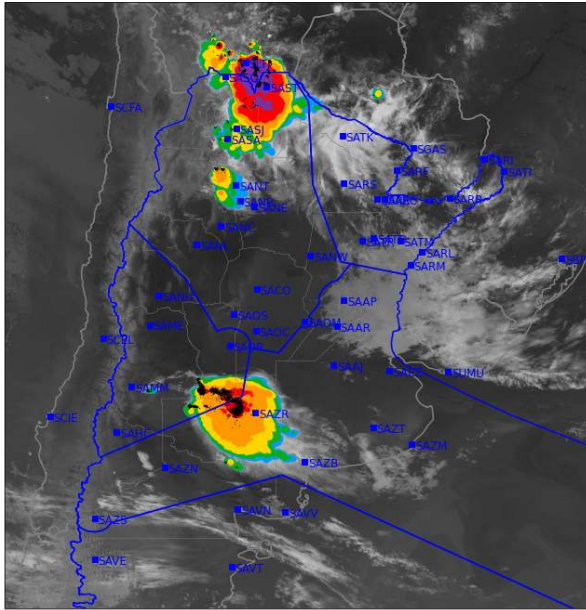


Figura 3: Producto TS-GOES (sombreado en colores), imagen IR 10.3 (sombreado en gris), aeropuertos (puntos azules), regiones FIR (contornos azules) y flashes de GLM (puntos negros).

4) CONCLUSIONES

El producto TS-GOES propuesto se basa en el índice ISCP que combina 4 canales del sensor ABI (6.2, 7.3, 9.6 y 10.3 μm) y busca resaltar las regiones con presencia de nubosidad convectiva espesa. A este índice se le suma información de actividad eléctrica provista por el sensor GLM también disponible en GOES-16 a fin de minimizar las falsas detecciones asociadas por ejemplo a nubosidad alta espesa (ej., cirrus). Los resultados obtenidos son muy alentadores siendo un producto de gran utilidad para el monitoreo en tiempo real de las áreas activas con tormenta, relevantes para la industria aerocomercial y su seguridad operacional. Además, resulta ser un producto útil con gran potencial para un proceso de automatización de SIGMET por tormentas.

Agradecimientos

A la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación por el uso de los datos generados por el radar RMA1 ubicado en la Ciudad de Córdoba y que forma parte de la red SINARAME.

REFERENCIAS

- Chung-Chih Liu, Tian-Yow Shyu, Tang-Huang Lin, Chian-Yi Liu, 2015:** Satellite-derived normalized difference convection index for typhoon observations. J. Appl. Rem. Sens. 9(1) 096074 <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.096074>
- Nesbitt, S. W., and Coauthors, 2021:** A Storm Safari in Subtropical South America: Proyecto RELAMPAGO. Bull. Amer. Meteor. Soc., 102, E1621–E1644, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0029.1>.
- Wu, Q., Wang, H., Zhuang, Y., Lin, Y., Zhang, Y., & Ding, S., 2016:** Correlations of Multispectral Infrared Indicators and Applications in the Analysis of Developing Convective Clouds, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 55(4), 945-960.

ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN HORARIA EN BASE A DATOS SATELITALES Y PLUVIOMÉTRICOS EN EL MARCO DEL PROYECTO PREVENIR

María Paula Hobouchian¹, Gonzalo Díaz¹, Luciano Vidal¹
phobouchian@smn.gob.ar

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: precipitación, sensoramiento remoto, calibración.

1) INTRODUCCIÓN

La precipitación tiene un rol fundamental en diversas actividades científicas y socioeconómicas. La complejidad de esta variable implica un desafío en su representación espacial y temporal. En Argentina, las limitaciones de la red de observaciones pluviométricas motivan el interés en combinar distintas fuentes de datos para mejorar la estimación de precipitación.

Las estimaciones cuantitativas de precipitación por satélite (SQPE, por sus siglas en inglés) tienen una cobertura espacial homogénea y los productos reconocidos a nivel global son de acceso libre. Estos productos combinan la mayor cantidad de datos satelitales y pluviométricos para mejorar su calidad. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina tiene experiencia en la implementación, validación y calibración de las estimaciones satelitales (Hobouchian et al., 2021). Esta línea de trabajo se recorrió principalmente en escala diaria, pero recientemente se impulsó la necesidad de implementar productos de sensoramiento remoto de mayor resolución temporal con disponibilidad en tiempo real. Esta iniciativa forma parte del proyecto de cooperación internacional entre Argentina y Japón para el pronóstico y alerta de inundaciones repentinas en zonas vulnerables y densamente pobladas (PREVENIR).

El objetivo central de este trabajo es avanzar en la combinación del producto satelital Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) desarrollado en Japón (Kubota et al., 2020) con la red de datos pluviométricos disponibles en tiempo real en el SMN de Argentina. En esta línea de trabajo, se vienen realizando distintos esfuerzos en el marco del proyecto PREVENIR. Por un lado, se procesaron datos pluviométricos locales para aplicar el algoritmo original de Japón de combinación con datos satelitales. La validación de esta opción mostró resultados de subestimación que derivaron en planes alternativos. Posteriormente, se planteó un nuevo problema de optimización que adapte mejor el algoritmo utilizado en Japón a las condiciones locales en Argentina. Esta estrategia reciente tiene pendiente su implementación. En este trabajo, se propuso adaptar un producto desarrollado en el SMN de la escala diaria a la escala horaria con la menor latencia posible, para sumar una herramienta en el monitoreo de la precipitación y en el modelado hidrológico.

2) DATOS

Los datos satelitales utilizados provienen de la estimación GSMaP en su versión Gauge NOW desarrollada por la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). Este producto combina múltiples fuentes de datos satelitales con distinta complejidad y tiene un ajuste pluviométrico con las estaciones meteorológicas convencionales que se comparten a nivel global. A su vez, tiene una resolución espacial de 0.1° y temporal de 1 hora y está disponible en tiempo real. El nombre de los archivos indica la hora inicial del periodo de acumulación de la precipitación.

Los datos pluviométricos utilizados para el ajuste provienen de la integración de estaciones meteorológicas automáticas (EMA) del SMN y de terceros (Díaz et al., 2021) como valor

agregado local.

La región de estudio se ubica en el centro este de Argentina (Figura 1) para incluir las zonas de interés para el proyecto PREVENIR y por la disponibilidad de EMAs para el ajuste.

3) METODOLOGÍA

Para combinar GSMaP Gauge NOW con datos pluviométricos horarios se aplica: 1) una corrección por PDF-matching (Gudmundsson et al., 2012) utilizando los pares de datos satelitales y pluviométricos de los últimos 30 días para una hora específica; 2) una corrección por interpolación del bias (Zhang et al., 2011). Los radios de influencia se determinan a partir de una validación cruzada en la región de estudio y también se incluye un paso de consistencia espacial para filtrar errores críticos en los datos pluviométricos. Este producto experimental surgió como adaptación del producto SQPE-OBS (Hobouchian et al., 2021) en línea con los requerimientos de mayor resolución temporal y disponibilidad en tiempo real para el proyecto PREVENIR.

4) RESULTADOS

El producto SQPE-OBS horario está documentado y disponible desde enero de 2025 con una latencia de 20 min en su funcionamiento. El proceso de ajuste dura aproximadamente 1 minuto y la salida numérica se dispone en formato NetCDF. En la Figura 1 se muestra la precipitación horaria obtenida para el 28 de enero de 2025 a las 09:00 UTC como ejemplo de la visualización del producto. En general, los resultados cualitativos muestran una modificación favorable aportada por el PDF-matching de los últimos días para la hora analizada, así como una contribución por parte de la interpolación del bias en la detección de precipitación no estimada por la SQPE, como puede verse en el norte de la provincia de Córdoba. Si bien es un producto experimental disponible recientemente, se está monitoreando su desempeño en casos de estudio para ir realizando los ajustes necesarios hacia una versión definitiva que a futuro se pueda validar estadísticamente.

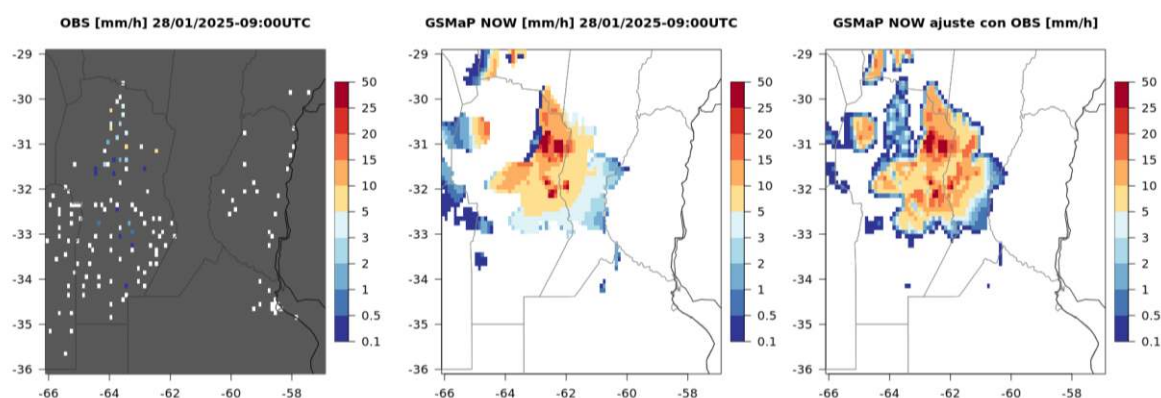


Figura 1: Red de observaciones pluviométricas disponible para el ajuste (panel izquierdo), SQPE sin corregir GSMaP NOW (panel central) y SQPE corregida (panel derecho) en mm/h para el 28 de enero de 2025 a las 09:00 UTC.

5) CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo describe los avances en la adaptación a la escala horaria del producto experimental SQPE-OBS desarrollado en el SMN. Este producto tiene el valor agregado local de la integración continua de redes de observación en superficie por parte del SMN que otras agencias globales no disponen. A futuro, se espera que el producto mejore principalmente con la implementación del sistema de control de calidad para las EMAs. Además, puede seguir evolucionando con la integración de nuevas observaciones pluviométricas de calidad y los

avances en la SQPE de base utilizada. Por último, se espera explorar otros métodos de combinación óptima, así como comparar los resultados con otros productos satelitales en desarrollo para ir ajustando y mejorando su rendimiento.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha realizado en el marco del Proyecto PREVENIR (prevenir.smn.gob.ar).

REFERENCIAS

Díaz, G., Vita, M., Hobouchian, M.P., Ferreira, L. y Giordano, L., 2021: Expansión de la red de referencia empleando los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas automáticas de terceros. Nota Técnica SMN 2021-90

Gudmundsson, L., Bremnes, J.B., Haugen, J.E. and Engen-Skaugen, T., 2012: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations - a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3383-3390.

Hobouchian, M.P., Díaz, G., Vidal, L., García Skabar, Y., et al., 2021: Ajuste de la estimación de precipitación satelital IMERG con observaciones pluviométricas en Argentina. Nota Técnica SMN 2021-105.

Kubota, T., Aonashi, K., Ushio, T., Shige, S., et al., 2020: Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) products in the GPM era. *Satellite Precipitation Measurement. Advances in Global Change Research*, 67, Springer.

Zhang, J., Howard, K., Vasiloff, S. et al., 2011: National Mosaic and multi-sensor QPE (NMQ) system: description, results and future plans. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92, 1321-1338.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE ESCUDOS DE RADIACIÓN DE BAJO COSTO PARA SENSORES DE TEMPERATURA, HUMEDAD, PRESIÓN Y PARTICULADO ATMOSFÉRICO

Carlos A. López¹, Diego Araneo^{1,2}, Gabriela Lenzano¹
clopez@mendoza-conicet.gob.ar

¹IANIGLA – CONICET Mendoza

²FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES – UNCuyo

Palabras clave: Estación meteorológica, bajo costo, calibración de porta sensores

1) INTRODUCCIÓN

El presente estudio provee una evaluación comparativa a partir del diseño de tres prototipos de abrigo para sensores meteorológicos. Se empleó el mismo sensor de temperatura en todas las configuraciones. Para estimar la precisión en la lectura de cada prototipo, a fin de establecer cuáles diseños resultan más adecuados para sistemas de bajo costo, las mediciones fueron contrastadas en una estación meteorológica patrón, dependiente del Servicio Meteorológico Nacional Argentino.

2) METODOLOGIA

Los prototipos fueron diseñados en FreeCAD y fabricados mediante impresión 3D. Dicha impresión se realizó con una impresora ANET A6 v1.7 y el material utilizado fue Ácido Poliláctico (PLA) de alta densidad. Cada abrigo fue recubierto con una capa de pintura blanca, para evitar la biodegradación del material, así como el paso de rayos solares por translucidez con protección UV. De esta manera se minimizó la absorción de radiación solar y los daños en el material. La programación para la integración de los sensores, fue realizada en el entorno Arduino IDE, software de acceso público y libre. A continuación, se describen las principales características de cada uno:

- *Prototipo A:* Consiste en un abrigo meteorológico miniaturizado de 160mm x 60mm x 75mm, dividido en tres cámaras independientes (Fig. 1a). Las cámaras que almacenan los sensores están provistas de perforaciones rectangulares en las paredes y el suelo, con barras de protección a 45°, exteriores e interiores. Con esta configuración se pretende que el aire circule libremente, proporcionando protección contra precipitaciones y radiación directa y difusa. La cámara central es cerrada, almacenando toda la electrónica de conversión de voltaje, cargador, batería, microcontrolador, RTC y lecto/grabador de microSD. A la misma se puede acceder exteriormente, sin abrir la tapa principal, evitando la pérdida de estanqueidad cada vez que se quieren obtener datos. En la cámara izquierda, se aloja el sensor de polvo con una configuración similar a la primera cámara, sólo que la base no posee ningún tipo de protección exterior ni interior.
- *Prototipo B:* Mantiene la misma estructura central e izquierda, para la parte electrónica y sensor de polvo que el A. Los sensores de temperatura se encuentran separados, ubicados satelitalmente (Fig. 1b). La estructura es cilíndrica, con 5 placas de 70mm de diámetro, tipo "hongo". Esta configuración está basada en modelos como los de Young et al., 2014 y Djuni & Agung, 2020.
- *Prototipo C:* Similar al B, pero con un abrigo satélite de geometría rectangular, con 7 placas de 150mm x 100mm, optimizando la ventilación pasiva (Fig. 1c). Dicha

geometría se basó en los diseños de diferentes estaciones meteorológicas del mercado, como DAVIS (<https://www.estacionesdavis.es/>) y HOBO (<https://hobo.com/>).

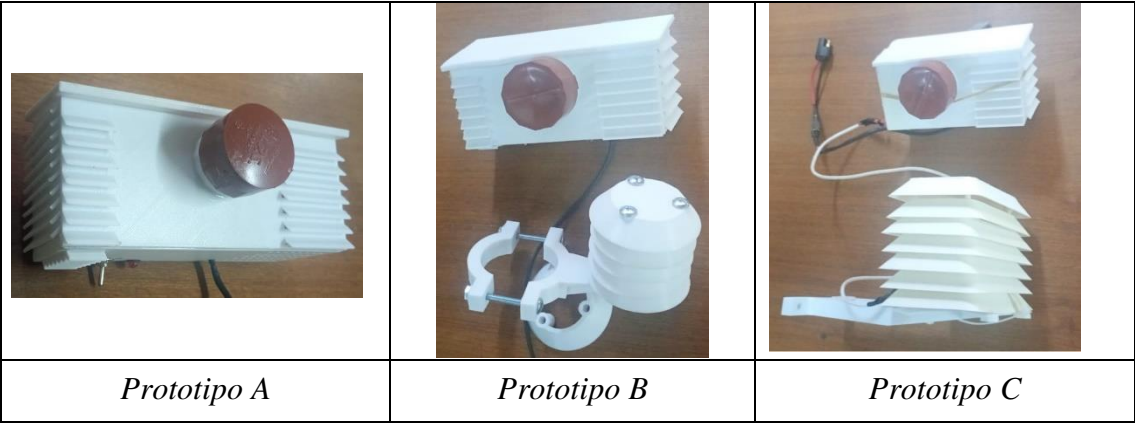


Figura 1. Fotos de los tres prototipos analizados.

2.1) Validación de prototipos

Los prototipos fueron ubicados en el predio de la estación Mendoza Observatorio del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), a fin de comparar los datos obtenidos con los registrados de forma oficial. Para la colocación se siguieron los procedimientos recomendados por el SMN, especialmente en lo que se refiere a altura y orientación de los sensores (“<https://www.argentina.gob.ar/smn>”). Las pruebas realizadas fueron llevadas a cabo durante 7 días, y las variables meteorológicas fueron tomadas cada 10 minutos. Para simular el retardo térmico del termómetro convencional de la estación patrón (de bulbo de mercurio), se decidió programar la obtención del dato final como el promedio de los valores tomados cada 5 segundos, durante 2 minutos antes y 2 minutos después de la hora programada.

3) RESULTADOS

- Prototipo A:* El error cuadrático medio (ECM) fue de 4,92°C en horario diurno, reduciéndose a 0.64°C durante la noche. Las mayores desviaciones se dieron cuando el sol incidía directamente en la estación (Fig 2). Esto se atribuye a la radiación solar directa sobre el abrigo, sumado a la ventilación deficitaria, acumulándose calor en exceso en la estructura. Esta diferencia disminuyó significativamente cuando la nubosidad era baja y de 4 octas o más.

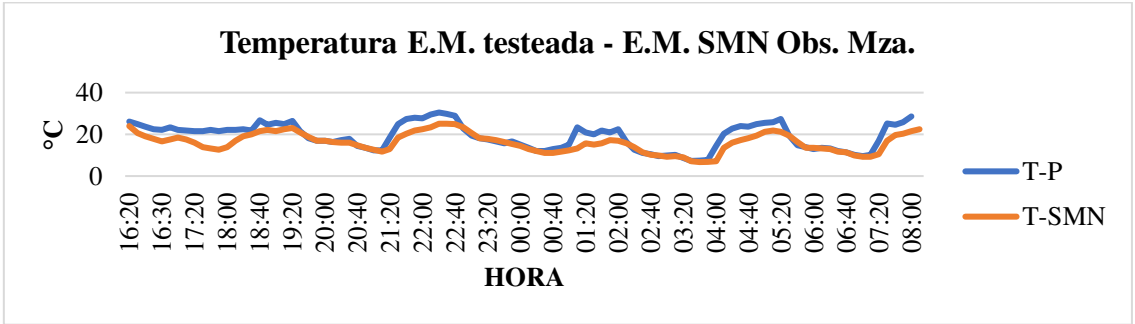


Figura 2. Comparación temporal entre el prototipo A (T-P) y la estación patrón (T-SMN).

- Prototipo B:* Con este modelo se eliminó el pico matutino que se apreciaba en el prototipo A y se redujo el ECM a 2,97°C en el día (Fig. 3). El efecto de la nubosidad tuvo el mismo efecto en este prototipo. Durante la noche, el ECM se mantuvo en 0,69°C.

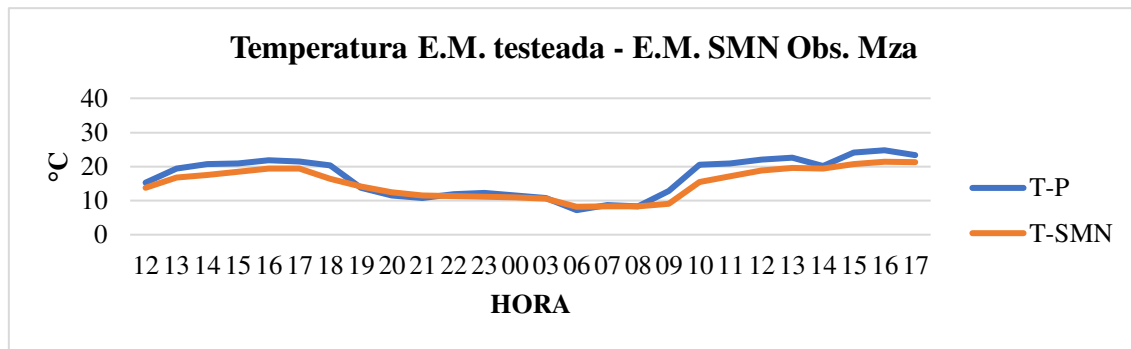


Figura 3. Comparación temporal entre el prototipo B (T-P) y la estación patrón (T-SMN).

- *Prototipo C*: Mostró el mejor desempeño, con un ECM de 1,82°C en el día y de 0,43°C en la noche (Fig. 4). El mayor volumen del abrigo satélite y su ventilación pasiva mejorada, contribuyeron a estabilizar la temperatura.

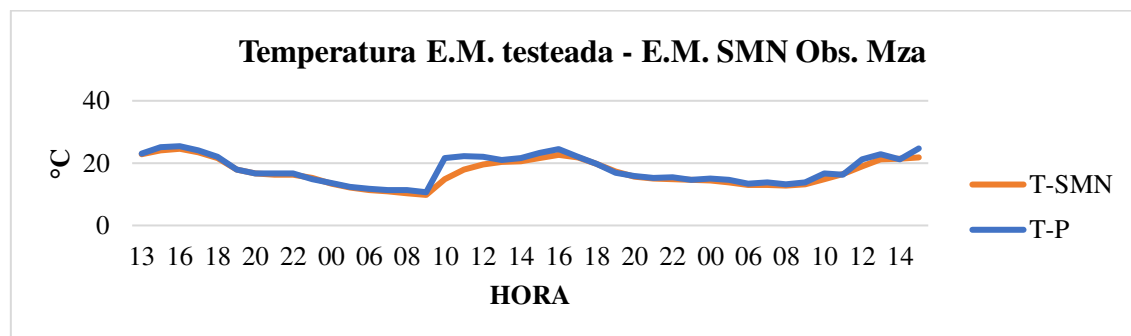


Figura 4. Comparación temporal entre el prototipo C (T-P) y la estación patrón (T-SMN).

4) CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir del análisis de los registros experimentales permiten concluir, que el diseño estructural y funcional del abrigo meteorológico ejerce una influencia determinante sobre la exactitud de las mediciones realizadas por el sensor de temperatura. En particular, se evidencia que variables tales como la geometría del abrigo, la elección de materiales, el grado de ventilación pasiva y la protección frente a la radiación solar directa afectan de manera directa la capacidad del sensor para reflejar con fidelidad la temperatura ambiente real, sin verse afectado por variaciones térmicas inducidos por el entorno inmediato. Esta conclusión subraya la importancia crítica de una adecuada ingeniería del abrigo meteorológico, no debiendo ser considerado como un componente meramente accesorio, sino como un elemento integral del sistema de medición, cuyo diseño debe basarse en principios de transferencia de calor, dinámica de fluidos y exposición radiativa, adaptados al entorno específico de implementación.

5) REFERENCIAS

- Young, D. T., Chapman, L., Muller, C. L., Cai, X., & Grimmond, C. S. B. (2014). A Low-Cost Wireless Temperature Sensor: Evaluation for Use in Environmental Monitoring Applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(4), 938–944. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00217.1>
- Djuni, D., & Agung, I. G. A. P. R. (2020). Design and Implementation of Arduino-Based Weather Monitoring System in Rural. 3(2), 58. <https://doi.org/10.24843/JEEI.2019.V03.I02.P06>

Caracterización óptica de los aerosoles carbonosos en Ushuaia durante 2024

Giselle Marincovich¹, Eija Asmi², Celeste Mulena^{1,3}, Francisco Quarín¹, Gonzalo Gambarte¹,
Lino Condori¹, Emiliano Petrucci¹, M. de los Milagros Skansi¹
gmarincovich@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)- Argentina

²Finnish Meteorological Institute - Finland

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras clave: Aerosoles atmosféricos, carbono negro equivalente, VAG-OMM

1. INTRODUCCIÓN

El carbono negro (BC) es uno de los aerosoles con mayor impacto climático y ambiental. Se genera principalmente por la combustión incompleta de biomasa y combustibles fósiles, y es el principal aerosol absorbente de radiación solar. Su presencia contribuye al forzamiento radiativo positivo y a la reducción del albedo cuando se deposita sobre superficies reflectantes como nieve o hielo (por ejemplo: Bond et al., 2013). Además, forma parte del material particulado fino (PM_{2.5}), lo que representa un riesgo significativo para la salud humana al poder penetrar profundamente en el sistema respiratorio (por ejemplo: Rohrer & Wyzga, 2012).

El presente trabajo se centra en la caracterización de los aerosoles carbonosos, en la estación Ushuaia durante el año 2024. A través de mediciones de absorción óptica y análisis complementarios con variables meteorológicas y retrotrayectorias de masas de aire, se busca identificar la variabilidad estacional, posibles fuentes y condiciones representativas de fondo atmosférico.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

El estudio se realizó en la estación Ushuaia, que está ubicada en la latitud 54.8°S, longitud 68.3 °O y a 11 m sobre el nivel del mar. Se encuentra a aproximadamente 5 km en línea recta de la ciudad de Ushuaia y a 200 m del aeropuerto Internacional de dicha ciudad (Figura 1, A). Es una de las 31 estaciones globales dentro del Programa de Vigilancia Global de la Atmósfera de la Organización Meteorológica Mundial (VAG-OMM) que existen en el mundo, permitiendo el estudio de diferentes componentes de la atmósfera bajo condiciones libres de actividad antropogénica directa en gran parte de su tiempo. Esto se debe primero a que se encuentra lejos del entorno urbano de la ciudad, a orillas del canal de Beagle y que recibe la mayor parte del tiempo, viento del sud-sudoeste (Figura 1, B, C).

En la estación se encuentra instalado un Aethalometer AE33. Este instrumento es un fotómetro de absorción basado en filtros. Permite determinar las concentraciones del BC simultáneamente en siete longitudes de onda que van desde el infrarrojo cercano (950 nm) al ultravioleta cercano (370 nm) a partir de medir la atenuación de la luz a través de una cinta de filtro cargada de partículas.

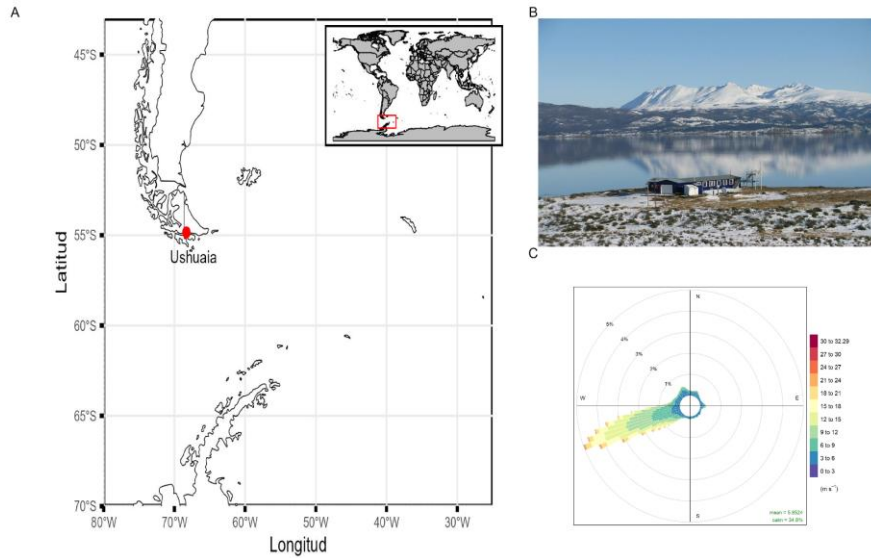


Figura 1: A) Mapa de la ubicación de la estación. B) Fotografía de la estación y su entorno. c) Rosa de los vientos para el año 2024.

Para cumplir el objetivo del estudio los datos del carbono negro en la longitud de onda de 880 nm(eBC) recolectados durante 2024 son limpiados, analizados y procesados. Se descartan las fallas del instrumento, se promedian los datos cada 10 minutos con el fin de reducir el ruido, y con el fin de eliminar los outliers observados se filtran los valores que se encuentren fuera del 99.9% de los datos. Una vez realizado esto, se calculó el coeficiente de absorción (σ_{abs}) y el exponente de angstrom de absorción (AAE) entre las longitudes de onda de 370 y 880 nm. Estas mediciones se analizan y complementan con mediciones de parámetros meteorológicos como temperatura, intensidad y dirección del viento de la estación meteorológica automática del sitio, y con datos de las retrotrayectorias de HYSPLIT.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 presenta diagramas de caja (boxplots) que ilustran la distribución mensual de las concentraciones de eBC. Se observa una clara estacionalidad, con valores más elevados durante los meses de invierno para ambas longitudes de onda. Este comportamiento sugiere una mayor influencia de fuentes locales de emisión, en particular la quema de leña para calefacción residencial, común en los meses más fríos. El valor medio anual de eBC en 2024 fue de 29.8 ng/m³. Bajo condiciones consideradas de fondo (vientos con velocidades superiores a 2.5 m/s y direcciones entre 90° y 270°), las concentraciones disminuyen significativamente, con promedios de 23.57 ng/m³. En contraste, cuando las masas de aire provienen de sectores urbanos con influencia antropogénica directa, las concentraciones aumentan marcadamente, alcanzando valores promedio de 214.85 ng/m³, respectivamente.

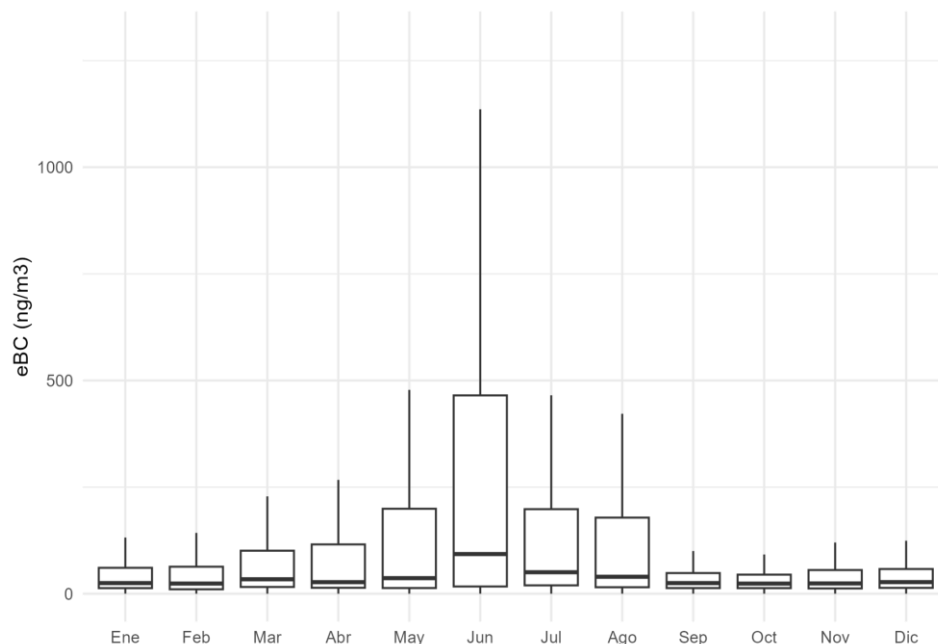


Figura 2: Gráfico de caja (boxplot) para cada mes durante el 2024 de eBC en longitud de onda 880 nm.

4. CONCLUSIONES

El análisis de las concentraciones de eBC en Ushuaia durante el año 2024 evidencia una marcada variabilidad estacional, con máximos en invierno, lo cual puede atribuirse a fuentes locales. Los valores medios anuales se ubican en torno a los 28–30 ng/m³, lo que constituye una línea base representativa para esta región austral. La diferenciación de condiciones según la dirección y velocidad del viento permitió identificar con claridad los aportes de origen antropogénico. En condiciones de fondo, las concentraciones fueron menores, destacando la sensibilidad del sitio a emisiones antropogénicas locales.

Estos resultados refuerzan la importancia estratégica del sitio de monitoreo de Ushuaia, tanto por su ubicación en una región subantártica con escasa presencia de fuentes emisoras, como por su potencial para caracterizar condiciones de fondo en el hemisferio sur. Las mediciones continuas de eBC y otros parámetros atmosféricos en este sitio remoto permiten identificar con precisión eventos de contaminación local, pero también aportan información valiosa para la vigilancia de largo plazo de los aerosoles. Además, de contribuir con información clave para la validación de modelos regionales y globales.

REFERENCIAS

- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., ... & Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5380–5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Rohr, A. C., & Wyzga, R. E. (2012). Attributing health effects to individual particulate matter constituents. *Atmospheric Environment*, 62, 130–152. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.036>

DIAGNOSTICO Y CALIBRACIÓN DE DOS INSTRUMENTOS MICROTOPS II PARA MONITOREO DE OZONO TOTAL.

Gerardo Carbajal Benítez¹, Svetlana Cherkasova¹, Federico Giménez¹

gcarbajal@smn.gob.ar. Autor/a correspondiente.

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: MICROTOPS II, Ozono Total, Estabilización, Factor de calibración, Validación.

1) INTRODUCCIÓN

Para este trabajo, nosotros presentamos dos equipos de bajo costo modelo Ozone Monitor Sunphotometer MICROTOP II de SOLAR LIGHT n/s 16803 y 16804, donde este modelo, principalmente se usa para medir la columna de ozono total (COT). Estos equipos son manuales, se han diagnosticado y calibrado en la ciudad de Buenos Aires (34°35' S, 58°29' O), mediante comparación con el Espectrofotómetro Dobson que es patrón estándar secundario #070 de la red de medición de la capa de ozono del Servicio Meteorológico Nacional y del programa Global Atmospheric Watch de la Word Meteorological Organization (GAW/WMO).

Los Microtops II tienen 5 longitudes de onda, de los cuales usan 3 para medir COT en pares de longitudes de onda en la región del UV (305.5/312.5 y 312.5/320.5 nm)

$$\lambda \begin{cases} 305.5 \text{ nm} & i, j = 1 \\ 312.5 \text{ nm} & i, j = 1 \\ 320.0 \text{ nm} & i, j = 1 \end{cases} \quad (1)$$

Donde los índices i,j indican el número de filtros que se usan para medir la COT para cada longitud de onda en cada banda del UV. Esto es: canal I; Ω_{12} y canal II Ω_{23} Según la fórmula:

$$\Omega_{ij} = \frac{LNV_{12} - \ln\left(\frac{V_i}{V_j}\right) - \beta_{ij} m \frac{P}{P_0}}{\alpha_{ij} \mu} \quad (2)$$

Inicialmente, estos MICROTOPS II (MII) fueron calibrados en la estación Mauna Loa, obteniendo los coeficientes de absorción de ozono (α_{ij}), coeficientes de dispersión Rayleigh (β_{ij}) y el logaritmo natural de la relación entre la radiación solar extraterrestre y la entrante (LNV_{ij}) a esas λ , m representa la masa de aire y μ la masa de aire óptica de ozono y se calcula según Morys y otros, (2001); Komhyr y otros, (1989). P_0 es la presión estándar (1013.25 mb) y P es la presión de la estación de medición. Combinando los valores de los dos canales anteriores se obtiene el canal III (Ω_{123}):

$$\Omega_{123} = \frac{\Omega_{12}\alpha_{12} - \Omega_{23}\alpha_{23}}{\alpha_{12} - \alpha_{23}} \quad (3)$$

2) METODOLOGÍA

Las mediciones con los MICROTOP II 16803 y 16804, se realizaron en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires en la sede central del Servicio Meteorológico Nacional (34°35' S, 58°29' O)

Se usa la presión estándar (P) debido a que la estación a orilla del Río de La Plata ($P_o = P$) El instrumento de referencia que se usa para calibración es el Espectrofotómetro Dobson (D#070) patrón estándar regional secundario que, se encuentra en el Observatorio Central Buenos Aires ~ 7 km de distancia, por lo tanto se considera comparables, debido a la naturaleza de distribución del ozono en la estratosfera (Dobson and Harrison, 1926). Se realizan las mediciones a cielo abierto, sin nubes. La radiación de baja densidad (ds) sin nubes, cercano al medio solar que, para estas fechas es pasado las 13:00 hs en CABA.

3) DIAGNOSTICO

Una condición necesaria para el diagnóstico y buen funcionamiento para este tipo de instrumentos es que los datos COT tienen una incertidumbre del 3 % para las masas de aire de ozono $\mu \leq 3$ (Morys, 2011). Esto verificamos en la Figura 1 y figura 2 (Método Langley), las cuales muestran que el equipo MII 16804 se obtiene una mejor respuesta respecto al patrón estándar D#070 en tanto que, el MII 16803 tiene problemas para reproducir los datos de COT.

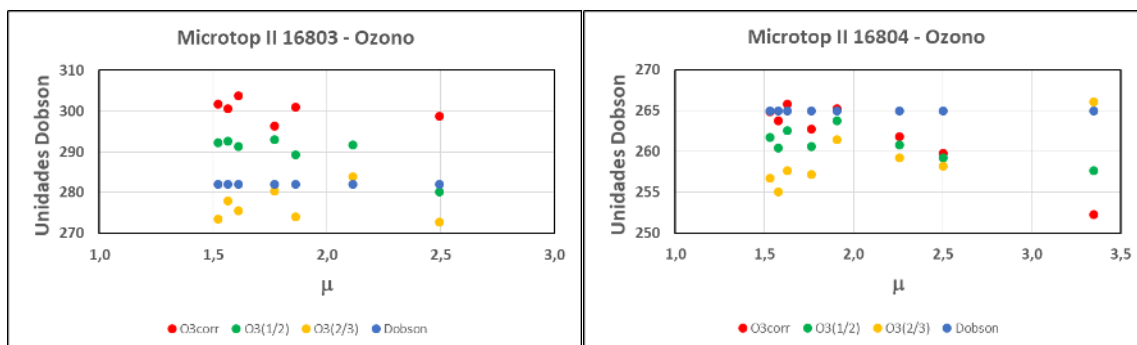


Figura1. Respuesta de los instrumentos a diferentes masas ópticamente con ozono (μ), en un día en particular (29 de abril del 2025) siendo $\mu = 1.5$ cercano al medio día solar.

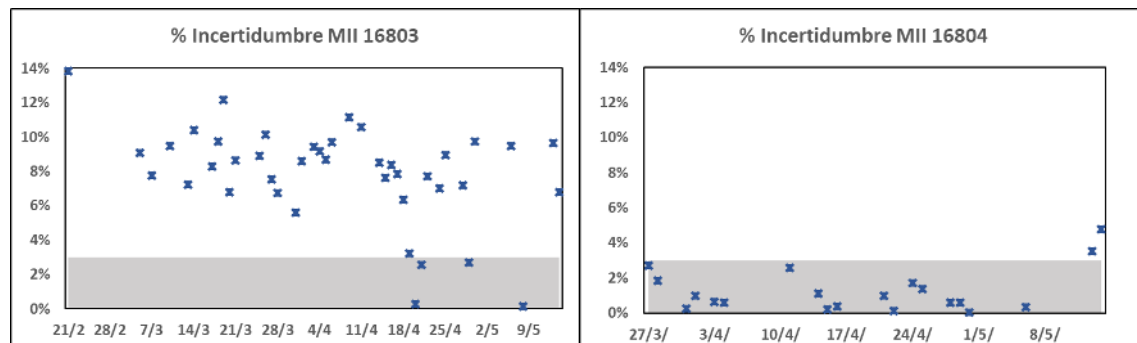


Figura2. Porcentaje de incertidumbre diario donde el área gris contiene los valores por debajo del 3%. Todas las mediciones son al medio día solar ($\mu \sim 1.5$)

4) FACTOR DE CORRECCIÓN (FC)

Después de observar las figuras se puede decir que el MII 16803 necesita de calibración ($R^2=0.6136$), no solo con lampas UV en laboratorio o a través de un factor de corrección a través del D#070, mediante el cual ya se transfiere la trazabilidad y corrección a través de la temperatura efectiva. Mientras que el MII 16804, no requiere de una calibración ($R^2=0.9466$) se presentan en la figura 3, ya que, además se han realizado pruebas complementarias que no están contenidas en este trabajo, de tal manera que solo se procede a calcular el FC del MII 16803 con la ecuación:

$$FC = \frac{COT_{D\#070}}{COT_{MII\ 16803}} \quad (4)$$

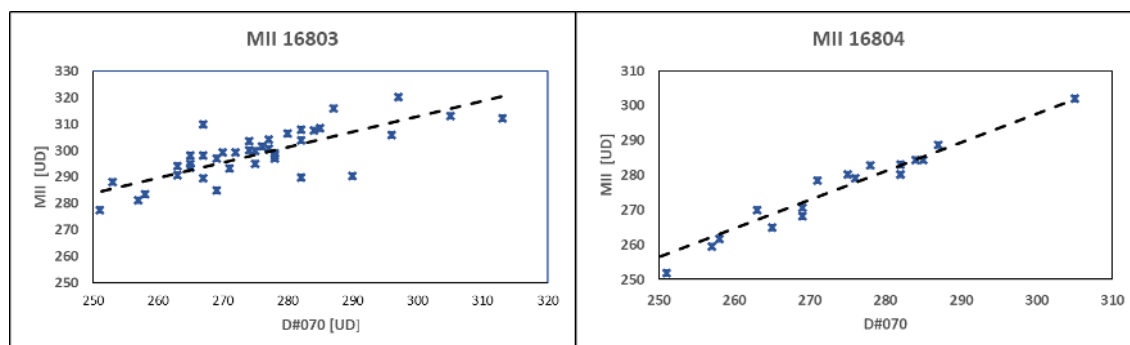
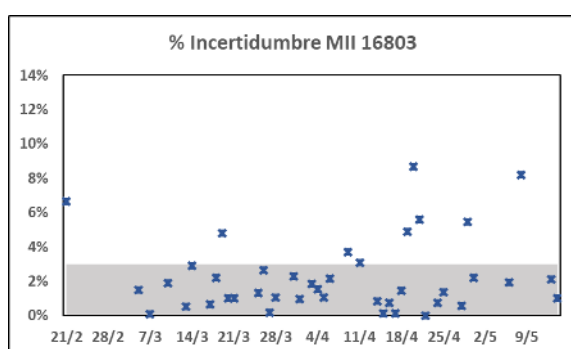


Figura 3. Correlación de los MII vs D#070.



El factor obtenido es $FC = 0.9228$ que tiene trazabilidad al patrón secundario $D\#070$. Este factor obtenido, lo vamos a multiplicar por cada medición de ozono del MII 16803, así evaluamos el porcentaje de incertidumbre en la figura 4, donde se observa una mejora de los datos diarios de la COT.

Figura 4. Corrección de los datos con el factor obtenido.

5) CONCLUSION

Aunque es menos preciso que los espectrofotómetros tradicionales, el MII es un instrumento más económico que puede generar datos de buena calidad si se calibra anualmente y se opera con rigor. Si bien el MII cuenta con sensores de estado sólido para medir la temperatura del aire y la presión atmosférica, utilizados para corregir la deriva electrónica térmica de sus componentes y compensar el efecto de dispersión de Rayleigh de las mediciones de COT, respectivamente, el algoritmo de recuperación de los valores de COT no tiene en cuenta la temperatura efectiva instantánea real de la atmósfera, lo que aumenta la incertidumbre de la medición debido a la dependencia térmica de los coeficientes de absorción de ozono. Si aplicamos el FC al MII 16803 está en condiciones de medir en una estación seleccionada. Mientras que MII 16804 puede medir sin aplicación, ni corrección a los datos de la COT.

REFERENCIAS

- Dobson, G.M.B. and D.N. Harrson. 1926:** Measurements of the amount of ozone in the earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions: Part I. Proc. Roy. Soc. London, A110: 660–693.
- Komhyr, W. D., Grass, R. D., & Leonard, R. K. (1989).** Dobson spectrophotometer 83: A standard for total ozone measurement, 1962–1987. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 94, 9847–9861.
- Morys, M., Mims, F. M., Hagerup, S., Anderson, S. E., Baker, A., Kia, J., et al. (2001).** Design, calibration, and performance of MICROTOS II handheld ozone monitor and Sun photometer. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106, 14573–14582.

PROCESAMIENTO DE DATOS DE DISDRÓMETROS Y ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GOTAS MEDIANTE CURVA GAMMA PARA SU APLICACIÓN FUTURA EN WRF

Elena Lucía Sandalio^{1,2*}, Leandro Maturano^{1,2}, Sergio Masuelli¹, Andres Rodriguez^{2,3}, Ezequiel Chesini¹

¹Laboratorio de Radar y Sensores Remotos - FAMAF UNC

²Observatorio Hidrometeorológico de la Provincia de Córdoba (OHMC)

³Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFN)

* Autoría de contacto: elena.sandalio@mi.unc.edu.ar

Palabras clave: distribución de tamaños de gotas, curva Gamma, WRF, asimilación de datos

1) INTRODUCCIÓN

La parametrización de la microfísica de las precipitaciones en modelos numéricos como WRF se basa en la distribución de tamaños de gotas (DSD), normalmente asumida fija o con una distribución exponencial o gama definida como:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\lambda D)$$

Sin embargo, algunos estudios de tormentas convectivas subtropicales, como los llevados a cabo durante el proyecto RELAMPAGO, CACTI muestran variaciones espaciales importantes de los parámetros de la DSD: N_0 , μ y λ . Los disdrómetros OTT Parsivel permiten caracterizar la DSD con alta resolución temporal, pero su uso operativo requiere procesar datos crudos y parametrizar la DSD. En este trabajo presentamos una herramienta desarrollado en lenguaje Python que automatiza la depuración, corrección y ajuste de los datos Parsivel para extraer, en cada intervalo, los parámetros α , β y N_0 de la curva gamma.

2) METODOLOGÍA

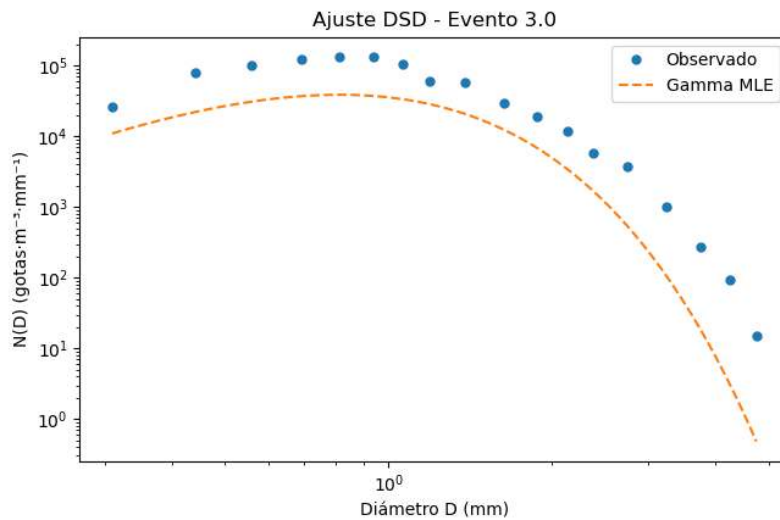
El flujo de procesamiento implementado consta de las siguientes etapas principales: Dentro de los scripts se tiene a `gui_launcher.py` que se encarga de iniciar la interfaz para que el usuario pueda colocar las fechas del periodo que quiere obtener. Luego de fondo comienza a correr el scrip `master_workflow.py` que orquesta todos los pasos siguientes:

```
src/
  __init__.py
  gui_launcher.py
  modules/
    visualization.py
    data_processing.py
    __init__.py
    event_identification.py
    utils.py
  scripts/
    master_workflow.py
    event.py
    __init__.py
    visualization_dsd.py
    get_dsdfile.py
```


(c) Visualización y ploteo: Por ultimo, el script [visualization_dsd.py](#) junto con el modulo [visualization.py](#) se dedican a crear los siguientes gráficos para cada evento: Hietograma, histograma de precipitación acumulada para los intervalos de 1, 5, 10, 15 , 30 y 60 minutos, distribución de velocidad y tamaño, y la curva de velocidad de caída.

3) RESULTADOS PRELIMINARES Y TRABAJO FUTURO

Una vez hecho el preprocesamiento de los datos crudos de los disdrómetros se procedió a un cálculo preliminar de la curva gamma para poder obtener los parámetros necesarios para calibrar las parametrizaciones de la DSD en el modelo WRF, con las características de tormentas locales. Los parámetros preliminares obtenidos para la curva son:



N_0	3.278117e+06
μ	3.666282
Λ	4.516360

Estos valores que se presentan son valores preliminares que no han tenido ninguna clase de validación u calibración. Su fin es ilustrar como es el proceso partiendo desde los datos crudos de los disdrometros para poder asi como paso a futuro ingestarlo al modelo WRF y hacer pruebas de sensibilidad.

REFERENCIAS

Ulbrich, C. W. (1983). Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. *Journal of climate and applied meteorology*, 1764-1775.

Casanovas, C., Salio, P., Galligani, V., Dolan, B., & Nesbitt, S. W. (2021). Drop size distribution variability in Central Argentina during RELAMPAGO-CACTI. *Remote Sensing*, 13(11), 2026.

Yang, Q., Dai, Q., Han, D., Chen, Y., & Zhang, S. (2019). Sensitivity analysis of raindrop size distribution parameterizations in WRF rainfall simulation. *Atmospheric Research*, 228, 1-13.

EVALUACIÓN DEL ÍNDICE FWI (FIRE WEATHER INDEX) CALCULADO A PARTIR DEL MODELO WRF PARA LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Leandro Maturano^{1,2}, Denis Poffo^{1,2}, Matias Suarez^{1,2,3}, Elena Lucía Sandalio^{1,2}, Andrés Rodríguez^{2,3}

leandromta.lm@gmail.com.

¹Laboratorio de Radar y Sensores Remotos - FAMAF UNC

²Observatorio Hidrometeorológico de la Provincia de Córdoba (OHMC)

³Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEfYN)

Palabras clave: Riesgo Incendios, Incendios Forestales, Sistema de Alerta Temprana

1) INTRODUCCIÓN

El Índice Meteorológico de Peligro de Incendios (FWI), desarrollado originalmente en Canadá, se utiliza en Argentina como una herramienta que permite estimar las condiciones de inicio y propagación de incendios forestales en función de diversas variables meteorológicas (temperatura, precipitación, humedad relativa y velocidad del viento). Su implementación en el país comenzó en el año 2000 a través de un proyecto conjunto entre el Plan Nacional de Manejo del Fuego (PNMF) y el Ministerio Forestal de la Columbia Británica. En la provincia de Córdoba, el cálculo del índice se inició en 2011 a partir de datos provistos por estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). En el año 2021, la Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, el Observatorio Hidrometeorológico de Córdoba (OHMC) y el PNMF comenzaron a trabajar para implementar de manera operativa el FWI a partir de salidas del modelo numérico WRF.

Actualmente, se generan mapas diarios de FWI con 24 horas de anticipación, disponibles en el portal IDECOR (<https://mapascordoba.gob.ar/viewer/mapa/442>). Estos productos fortalecen la evaluación de riesgos al analizar factores clave para la propagación e impacto de incendios, facilitando acciones preventivas y gestión de emergencias. Este trabajo analiza la implementación del FWI que opera diariamente desde septiembre de 2022 sobre la provincia de Córdoba brindando una herramienta esencial para priorizar áreas críticas y optimizar recursos en la prevención y respuesta ante incendios.

2) MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó el modelo original tomado del trabajo de Van Wagner y otros, 1985. El FWI se compone de tres códigos de humedad de combustibles forestales que representan diferentes capas para el modelo, **FFMC**– Código de humedad del combustible fino (Fine Fuel Moisture Code), **DMC** – Código de Humedad del Material Orgánico Intermedio (Duff Moisture Code) y **DC** – Código de Sequía (Drought Code), dos índices intermedios, **ISI** – Índice de Propagación Inicial (Initial Spread Index) y **BUI** – Índice de Acumulación (Buildup Index) y un índice final que refleja el peligro general de incendio debido a las condiciones meteorológicas **FWI** – Índice Meteorológico de Peligro de Incendios (Fire Weather Index). Los parámetros de entrada (temperatura a 2 metros, humedad relativa a 2 metros, velocidad del viento a 10 metros y precipitación acumulada en las últimas 24 horas) para el cálculo del FWI operativo del OHMC se toman del modelo WRF que se ejecuta en la misma institución (Lighezzolo y otros 2018, Suarez y otros 2022 y Otero y otros

2025). Los valores obtenidos del FWI, que tienen una resolución horizontal de 4 km, se clasifica como: **Extremo** (FWI > 46), **Muy Alto** (FWI entre 28 y 45,9), **Alto** (FWI entre 15 y 27,9), **Moderado** (FWI entre 6 y 14,9) y **Bajo** (FWI entre 0 y 5,9).

3) RESULTADOS

A continuación se presenta un análisis del FWI calculado por el OHMC entre diciembre de 2022 y diciembre de 2024. Dicho análisis está centrado en mostrar las variaciones que presentó durante ese periodo dentro del territorio y como él mismo se comportó frente a la comparación con datos medidos por satélites brindados por el PPMF (focos de calor).

La Figura 1 presenta las curvas asociadas a la variación en el tiempo de las clases: Bajo, Alto y Extremo del índice FWI. Si bien las clases asociadas a este índice son cinco, por una cuestión de análisis de tendencias, las tres clases presentadas permiten realizarlo sin cargar demasiado el gráfico.



Figura 1: Variación temporal del FWI (media = 90 días) para un período comprendido entre diciembre de 2022 y diciembre de 2024.

El análisis muestra que la clase **Extremo** presenta un descenso marcado desde un valor predominante a principios de 2023 hasta mediados de ese año, seguido de un incremento parcial a partir de septiembre del mismo año llegando a un máximo de cobertura del 40% entre los meses de octubre a diciembre de 2023. A partir de enero de 2024, el FWI presenta una tendencia decreciente llegando a valores mínimos en el mes de mayo y manteniéndose con esos valores hasta aproximadamente agosto de 2024. La clase **Alto** muestra una tendencia más estable, manteniéndose relativamente constante a lo largo del período, aunque con un aumento significativo durante el segundo semestre de 2023 y una leve estabilización hacia finales del 2024. La clase **Bajo** sigue un comportamiento opuesto a la clase **Extremo**, comienza con valores bajos a principios de 2023, aumenta progresivamente durante el mismo año y logra valores más altos en 2024.

En la Figura 2 se puede observar, por medio de histogramas, la distribución de los focos de calor sobre las distintas clases del FWI a lo largo de las estaciones del año. Lo primero a notar es que las estaciones de invierno y primavera son las que más datos presentan (4668 y 9466 correspondientemente), lo cual es indicativo de una mayor ocurrencia de incendios forestales en estas estaciones del año dentro de la Provincia de Córdoba. Durante el verano y el otoño, los focos de calor se distribuyen de una manera equilibrada entre las clases del FWI, visto desde la cantidad de datos con la se están generando los histogramas, mientras que durante las estaciones de invierno y primavera la distribución es de tipo exponencial con una marcada tendencia de agrupamiento sobre la clase **Extrema**.

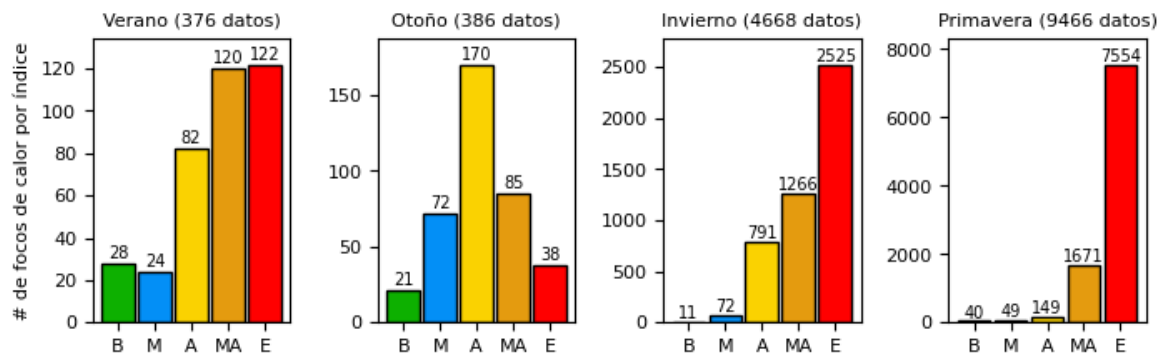


Figura 2: Histogramas de los focos de calor detectados por cada categoría (Bajo, Medio, Alto, Muy Alto, Extremo).

4) CONCLUSIONES

El análisis de la serie temporal revela variaciones estacionales claras en los niveles de riesgo **Bajo**, **Alto** y **Extremo**. Durante los meses cálidos (verano y primavera). El porcentaje de días clasificados como **Extremo** aumenta considerablemente, indicando condiciones más favorables para la ocurrencia de incendios. Por otro lado, en los meses más fríos (otoño e invierno), el porcentaje de días en la categoría **Bajo** es predominante, reflejando condiciones menos propensas a incendios. Estas observaciones son coherentes con las características climáticas de la región, donde las temperaturas más altas y las condiciones de sequedad incrementan el riesgo de incendios, mientras que los periodos de lluvias o menor temperatura tienden a reducirlo. El análisis de los histogramas por estaciones revela que el FWI tiene un buen desempeño general al identificar condiciones de riesgo extremo en verano, invierno y primavera, donde la mayoría de los focos de calor coinciden con las clases de mayor riesgo (**Extremo** y **Muy Alto**). Sin embargo, en otoño, el modelo subestima las condiciones extremas, clasificando la mayoría de los focos en la clase **Alto**. Ésto indica que, si bien el modelo captura adecuadamente los patrones estacionales en las épocas más críticas para incendios, sería beneficioso realizar ajustes específicos para mejorar su sensibilidad en estaciones menos críticas como el otoño.

REFERENCIAS

- Lighezzolo, A., Martina, A., Zigarán, G., Viscardi, D. A. V., Lio, E. N., Rodriguez, A., Montamat I. A., Saffe J. N., Poffo D. A., Caranti G. M., Comes R. A. & Ingaramo, R. (2018, June). WRF model-sensitivity experiments to computational environment changes. In 2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON) (pp. 1-7). IEEE.
- Otero, R., Suarez, M., Pierobon, E., Maturano, L., Montamat, I., Sanchez, J. E., ... & Poffo, D. (2025). Assessing the Impact of Physical Configuration and Lead Time on WRF Forecasting of an Extreme Wind Event. *Journal of Meteorological Research*, 39(1), 154-171.
- Suárez, M., Poffo, D., Pierobon, E., Martina, A., Saffe, J., & Rodríguez, A. (2022). Wind and gust forecasts assessment of Weather Research and Forecast (WRF) model in Córdoba, Argentina. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 16(1), 2021133.
- Van Wagner, C. E. y Pickett, T. L., 1985: Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Forestry Technical Report 33, Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario, 18 pp.

UN PROCESADOR AUTOMÁTICO DE IMÁGENES RGB PARA EL SENSOR ABI

Benjamín Álvarez¹, Sergio Masuelli¹, Elena Lucía Sandalio¹, Gastón Bonfils¹, Denis Poffo¹

smasuelli@unc.edu.ar.

¹Facultad de Matemáticas, Astronomía, Física y Computación (UNC)

Palabras clave: GOES, ABI, productos RGB

1) INTRODUCCIÓN

Los sensores a bordo de satélites geoestacionarios proveen información con alta periodicidad y con baja latencia lo que las hacen muy útil para asistencia para realizar pronósticos meteorológicos de corto plazo. En particular hay una serie de productos visuales denominados genéricamente como RGB que combinan distintas bandas espectrales para generar 3 canales que ayudan a la interpretación visual de pronosticadores meteorológicos (Heidinger, 2020).

Generalmente consisten en un álgebra simple de bandas (por ejemplo una diferencia entre dos bandas) y un realce de tipo Γ , asignado a cada canal RGB. Así las composiciones dan como resultado colores específicos que se asocian a clases determinadas en forma invariante de fácil interpretación para usuarios especializados en pronóstico meteorológico.

Estas técnicas para análisis visual asistido están desarrolladas en varios cursos brindados por agencias espaciales y meteorológicas, por ejemplo EUMETSAT (<https://www.eumetrain.org/eport>). Así mismo existe un paquete open source denominado *GOES-2-go* (Blaylock, 2023) con funciones implementadas en Python para la generación de varios de estos productos.

Por ejemplo, uno de estos productos es el denominado Microfísica Nocturna construido para el sensor ABI como sigue (https://www.star.nesdis.noaa.gov/GOES/documents/QuickGuide_GOESR_NtMicroRGB_final.pdf):

$$\begin{aligned} R &= [(C_{15} - C_{13} - (-6, 7)) / (2, 3 + 6, 7)]^1 \\ G &= [(C_{13} - C_{07} - (-3, 1)) / (5, 2 + 3, 1)]^1 \\ B &= [(C_{13} - (-29, 6)) / (19, 5 + 29, 6)]^1 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde C_{13} significa datos calibrados en temperatura de brillo del Canal 13 de ABI (en °C), los valores consignados son los valores mínimos y máximos de un ajuste lineal (dentro del corchete) y el exponente (1) es el grado del realce gama.

El objetivo de este trabajo es presentar un procesador de imágenes ABI para apoyo visual para pronosticadores, inspirado en el mencionado *GOES-2-go*, que genera imágenes RGB para una zona de interés en un formato GIS compatible (GeoTIFF). Para ello se realizó una mejora en la ingeniería de software para hacerlo más flexible que permite incorporar otros productos del tipo y funcionalidades útiles para los usuarios. Así mismo este procesador estará disponible para su uso operativo por oficinas de pronóstico.

2) MATERIALES Y MÉTODOS

El procesador fue desarrollado en lenguaje Python, estructurado de manera modular para facilitar su mantenimiento y evolución futura. Permite al usuario definir tanto el tiempo de adquisición como una región de interés (ROI) en coordenadas geográficas (latitud y longitud), que se transforma internamente a la proyección nativa del sensor (proyección geoestacionaria). A partir de esta información, el sistema realiza la descarga de productos nivel 1b del sensor ABI (como Radiancia en bandas espectrales específicas) desde un servidor de estos datos configurable, pero por defecto se puede acceder directamente al bucket público de AWS. La descarga es automática y los archivos se almacenan localmente para permitir un procesamiento completamente offline si se desea. En la Figura 1 se muestra un diagrama de flujo del sistema.

Una vez descargadas las bandas requeridas, el procesador realiza la lectura de las mismas y realiza el recorte espacial. El sistema transforma las coordenadas lat/lon ingresadas por el usuario a coordenadas proyectadas. Esta conversión permite determinar los índices de píxeles correspondientes en la grilla original del satélite, realizando un recorte preciso.

El procesador incluye una función de generación de productos RGB personalizados. En esta etapa se aplican transformaciones como realce gamma, escalado, normalización y combinación de bandas.

Una vez generado el producto RGB como un arreglo tridimensional se guarda como GeoTIFF georreferenciado. Se construye la matriz de transformación espacial en base al recorte realizado, asegurando que la georreferenciación sea precisa. Además, se conserva el sistema de proyección geoestacionario original del sensor ABI, aunque también es posible reproyectar si se requiere interoperabilidad.

Este diseño modular permite escalar el sistema con facilidad: se puede extender para incluir nuevos productos RGB, aplicar transformaciones adicionales o integrarse con una interfaz gráfica para uso operativo.

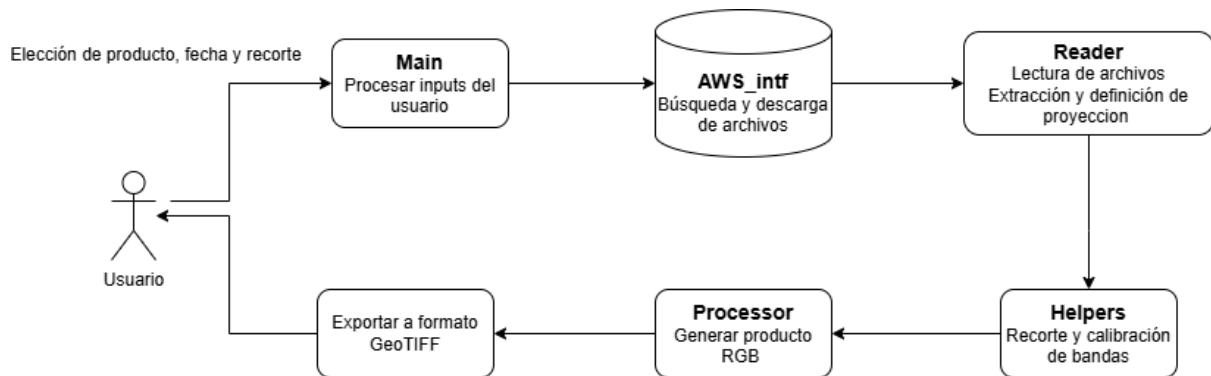


Figura 1: Diagrama de flujo esquemático del sistema

Adicionalmente al sistema de procesamiento, se ofrece un visualizador básico el cual permite superponer capas vectoriales como líneas de costa, límites políticos y grillas de paralelos/meridianos. Se prevé la carga automática de shapefiles desde una carpeta estructurada, lo que permite al usuario agregar capas sin modificar el código.

3) RESULTADOS

En la figura 2 se muestra un recorte de la imagen sobre Argentina para dar un contexto siendo

el resultado del procesamiento la imagen de la derecha. Sobre esta imagen RGB que se libera como GeoTIFF se le han superpuesto capas vectoriales de límites geográficos y de paralelos y meridianos solo a los fines de una mejor visualización pero que no forman parte del imagen producto la cual conserva la información en formato raster original.

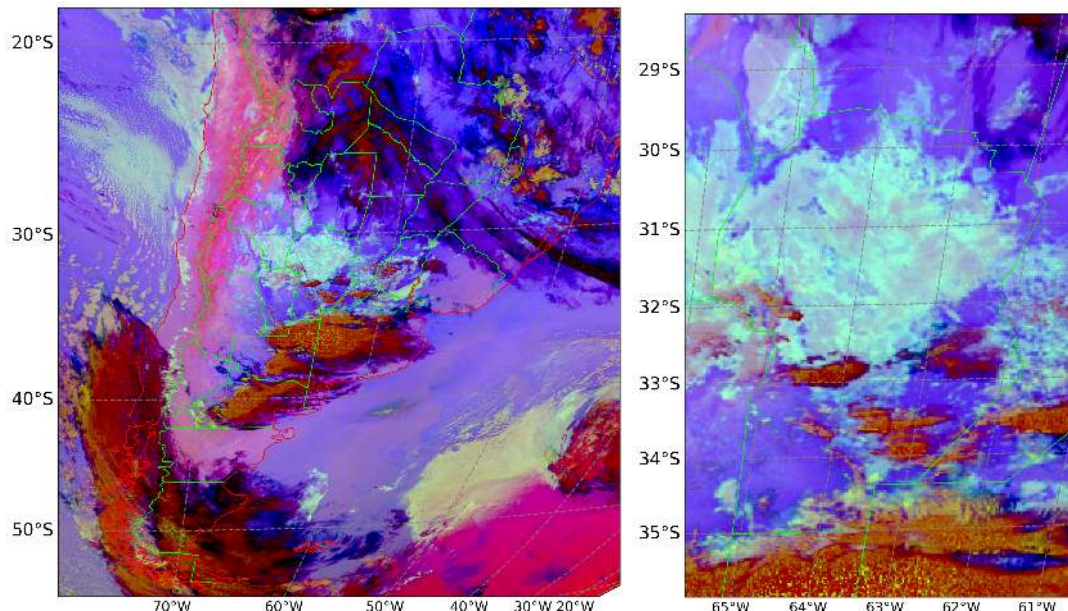


Figura 2: Producto Microfísica Nocturna. fecha y hora. A la izquierda se muestra un recorte de Argentina. A la derecha un recorte que hace el procesador al ingresar las coordenadas de la Provincia de Córdoba. Los colores corresponden a: Rojo nubes de hielo, Amarillo celdas de convección profunda. Celeste nubes bajas/niebla y cálidas, Pastel: nubes medias. Rosa a violeta superficie sin nubes, Rojo/violáceo oscuro cirrus.

4) CONCLUSIONES

El procesador desarrollado genera las imágenes en formato GeoTIFF correctamente. El sistema ha sido concebido para hacer la descarga de las imágenes desde un servidor y así generar las imágenes RGB según las necesidades y especificaciones de un usuario, compatibles con sistemas tipo GIS.

Actualmente se están incorporando y validando nuevos productos RGB de los estandarizados en la literatura al sistema.

5)REFERENCIAS

Blaylock, B., 2023: GOES-2-go, Download and display GOES-East and GOES-West data (Version 2022.07.15) [Computer software]. <https://github.com/blaylockbk/goes2go>

Heidinger, A. K., M. J. Pavolonis, C. Calvert, J. Hoffman, S. Nebuda, W. Straka, A. Walther, S. Wanzong, 2020 . Chapter 6 - ABI Cloud Products from the GOES-R Series. The GOES-R Series, Elsevier, 43-62. ISBN 9780128143278.

DESARROLLO DE UN NUEVO PRODUCTO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL MÍNIMA DE LA TIERRA A PARTIR DEL SENSOR ABI DEL SATÉLITE GOES-16

Cam Cordoba Fradinger¹, Félix Carrasco², Adriana Basualdo², Gonzalo Martin Diaz¹,
Silvana Carina Bolzi¹

ccordoba@smn.gob.ar Cam Cordoba Fradinger.

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA)

Palabras clave: LST, heladas, temperatura mínima

1) INTRODUCCIÓN

Las heladas representan un fenómeno climático de creciente interés, especialmente cuando ocurren fuera del período habitual del invierno. Se denomina helada meteorológica a toda temperatura mínima igual o inferior a 0 °C; y helada agrometeorológica a toda temperatura mínima igual o menor a 3 °C que produzca algún daño sobre el cultivo (Fernández Long y Barnatán, 2013).

Es importante contar con herramientas satelitales que permitan monitorear estos eventos extremos. En este trabajo, se presenta la generación del producto de temperatura superficial mínima de la tierra (LST mínima) realizado con datos del satélite geoestacionario GOES-16 (Geostationary Operational Environmental Satellite). Este es operado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) y constituye el primero de la serie de satélites GOES-R. Proporciona imágenes continuas en tiempo real y de alta resolución de la atmósfera y la superficie terrestre. GOES-16 cuenta con el sensor ABI (Advanced Baseline Imager), que opera en 16 canales espectrales, desde el visible hasta el infrarrojo térmico, y captura imágenes cada 10 minutos en resolución de 2 km para todo el hemisferio y cada 5 minutos para áreas específicas. A partir de este se puede generar el producto de LST mínima. Este resulta de mucha utilidad para el monitoreo de patrones térmicos brindando apoyo a los sectores agrícola y ambiental en la identificación de riesgos potenciales para cultivos y ecosistemas (GOES-R Series Fact Sheet, NASA).

2) DATOS Y METODOLOGIA

Se trabajó con datos e imágenes del sensor ABI a bordo del satélite geoestacionario GOES 16 – Full Disk. El producto utilizado es ABI-L2-LSTF, con una resolución espacial de 10km y una hora de resolución temporal. Se deriva de los canales infrarrojos de onda larga 14 (11,2 μm) y 15 (12,3 μm) con la técnica de split window (Yu et al., 2012). Hay datos disponibles desde el 24 de mayo de 2017.

Los archivos del producto original de LST se presentan en formato netcdf en la plataforma de Amazon Web Services (AWS), con el nombre de OR_ABI-L2-LSTF-M6_G16. Se creó un producto a partir de este donde se muestra la LST mínima que se dio por la noche. Para esto, se adquieren imágenes desde las 00 UTC hasta las 12 UTC del día de interés. Estos archivos netcdf se rasterizan con lenguaje de programación R para luego aplicarles una máscara de calidad del dato, denominada Data Quality Flag (DQF), con un valor igual a cero (0). El valor DQF=0 representa un píxel que pasó la verificación de control de calidad y está etiquetado como “good_pixel_qf” (GOES-R Series Program Office, s. f.). A partir de la unión de las imágenes se toma el valor mínimo de la LST para cada píxel.

Antes de exportar la imagen generada, se realiza un filtro de nubes en el que, sobre un mismo píxel, de las 13 imágenes que lo componen, se decidió la siguiente regla: si sobre un mismo píxel existen más de 9 imágenes con nube, se coloca “sin dato”, mientras que, si hay 9 o menos

imágenes sin nube, se coloca el dato de temperatura mínima superficial. Este número de imágenes se decidió a partir del error cuadrático medio entre la LST mínima y datos de la estación Azul en el sureste de Buenos Aires para distintas cantidades de imágenes disponibles, el cual a partir de 9 imágenes se estabiliza por lo que resulta indistinto tomar 9 o más, ya que se mantiene similar el filtro. Esto no se trata de una máscara de nubes, sino de una decisión que puede tomar el usuario.

El desarrollo en R genera imágenes en formato GeoTIFF y JPG de la LST mínima de Argentina, Sudamérica, una porción del sur de Sudamérica (generado para la Oficina de Riesgo Agropecuario) y de todas las provincias de Argentina.

3) RESULTADOS

Se presentan a continuación ejemplos del producto obtenido para Argentina y el sur de Sudamérica (Figura 1). Se generó una escala de colores con la que se pretende destacar tres rangos de temperaturas: menor a -4°C , entre -4°C y 4°C y mayor a 4°C , resaltando así el rango intermedio donde se presentan las heladas agrometeorológicas.

Al sur del país se repite un patrón sin datos (sur de Santa Cruz y Tierra del Fuego), lo cual se debe a que se trata de datos de menor calidad por lo que el filtro DQF no los tiene en cuenta. A su vez, las regiones que se ven en blanco implican que no hay datos o que fue filtrado por su calidad o por nubosidad.

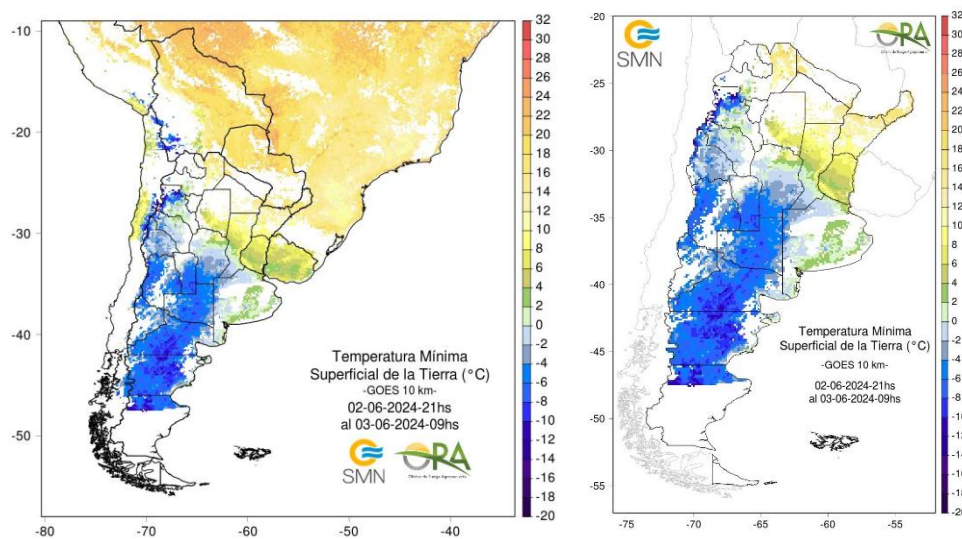


Figura 1. Temperatura Mínima Superficial de la Tierra del sur de Sudamérica (izquierda) y de Argentina (derecha). Fecha del 02-06-24 al 03-06-24

4) CONCLUSIONES

La generación del producto de LST mínima a partir de los datos del satélite GOES-16 representa un avance significativo en el monitoreo de eventos extremos como las heladas, especialmente por su alta resolución temporal. La metodología implementada permite obtener imágenes que reflejan patrones térmicos, destacando áreas de interés crítico para sectores como la agricultura, donde las heladas pueden causar daños severos a los cultivos. Sin embargo, el proceso también enfrenta desafíos, como la influencia de la nubosidad en la calidad y falta de los datos y la necesidad de mejorar los filtros aplicados.

En abril de 2025, GOES-16 dejó de funcionar para dar lugar a GOES-19. Este último utiliza el mismo sensor ABI que el anterior por lo que, por lo pronto, no se han visto diferencias en el

producto de LST mínima. Aún se encuentra en período de validación, aunque ya hay trabajos que demuestran su confiabilidad (NOAA STAR, s.f.).

REFERENCIAS

Fernández Long, M. E. y Barnatán, I., 2013: Adversidades Climáticas: Heladas. En: Murphy, G.M.; Hurtado, R.H. (Eds). Agrometeorología. Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina. 315-341.

GOES-R Series Program Office (s. f.): GOES-R Advanced Baseline Imager Fact Sheet. Recuperado el 19 de noviembre de 2024, de https://www.goes-r.gov/education/docs/Factsheet_ABI.pdf

GOES-R Series Program Office (s. f.): GOES-17 ABI performance. Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Recuperado el 19 de noviembre de 2024, de <https://www.goes-r.gov/users/GOES-17-ABI-Performance.html>

NOAA STAR (s.f.): Inter-sensor LST Comparison (GOES-16 y GOES-19). Disponible en: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/land/comparison.php?product=LST&msat=G16_G19

Yu, Y; Tarpley, D. y Xu, H., 2012: GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document For Land Surface Temperature. Version 2.5. NOAA NESDIS STAR.

REQUERIMIENTOS TÉRMICOS QUE REGULAN EL INICIO DE LA POLINIZACIÓN DEL ALISO DEL CERRO (*ALNUS ACUMINATA* KUNTH) EN DOS TEMPORADAS 2023-2024

Magdalena Reader¹, Gonzalo Torres^{1,2}, Claudio Pérez^{2,3}, Liliana Lupo^{1,2}
magdalenareader@fca.unju.edu.ar

¹Instituto de Ecorregiones Andinas (INECOA), Universidad Nacional de Jujuy-CONICET, San Salvador de Jujuy, Argentina.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), FCEN, UBA, CABA, Argentina.

Palabras clave: Aliso del Cerro, Yungas, Jujuy

1) INTRODUCCIÓN

El Aliso del cerro (*Alnus acuminata* Kunth) es la especie arbórea dominante del bosque montano de las Yungas. Se destaca por su capacidad de fijar nitrógeno, mejorar la estructura del suelo y facilitar la sucesión ecológica. En muchos árboles, el inicio del crecimiento luego de la etapa invernal, depende de requisitos fisiológicos que determinan el inicio del crecimiento. Particularmente *Alnus* requiere cierto número de horas de frío (HF) seguidas de acumulación de energía en forma de grados día (GD) para romper la latencia de las yemas e iniciar la polinización. Los estudios indican que la acumulación HF también afecta la producción de polen de *Alnus* (Weng y otros, 2004; Brunschön y otros, 2010). HF y GD permiten pronosticar el inicio del período principal de polinización (PPP), etapa crítica para la reproducción de la especie. La mayor parte de los estudios sobre HF y GD se refiere a frutales cultivados, pero la información para especies nativas es escasa o nula. Esto limita la capacidad de anticipar los efectos del cambio climático sobre especies silvestres como *A. acuminata*, especialmente en ambientes sensibles como el bosque montano, donde el aumento de las temperaturas podría alterar el ciclo fenológico de la especie. El objetivo de este trabajo es determinar PPP y estimar los requerimientos térmicos (HF y GD) que afectan el PPP de *Alnus acuminata* en las Yungas de Jujuy, Argentina.

2) MATERIALES y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en el Parque Provincial Potrero de Yala (24°06'S; 65°29'O, 2035 msnm, Jujuy, Argentina). La captura de polen se realizó con una trampa tipo Hirst (1952) desde 1/3/23 hasta 31/12/24. El recuento de los granos de polen se realizó por técnicas estándar (Käpylä y Penttinen, 1981). La temperatura del aire se registró con una estación meteorológica automática ubicada junto a la trampa de polen a intervalos de 15 minutos. El PPP se definió con el método de Pathirane (1975), que determina el inicio cuando se acumula el 5 % de la suma total de polen colectado en la estación y el final al alcanzar el 95 %. HF se cuantificó como la cantidad de horas cuya temperatura fue inferior a un valor umbral de 7°C. El cómputo se realizó en el período abril -julio de

2023 y 2024 hasta alcanzar un acumulado de 600 HF de acuerdo con (Raurau, 2012). La fecha en que se alcanza el requerimiento de HF, determina el inicio de la acumulación de GD, para lo cual se utilizó el método de promedio (Zalom y otros, 1983) hasta la fecha de inicio de PPP. Para analizar las condiciones meteorológicas de 2023 y 2024 se calcularon las tasas de enfriamiento mediante regresión lineal y se comparó la información de temperatura registrada en el sitio de estudio corregida con el gradiente empírico de enfriamiento sugerido por (Malicia y otros 2014) de 0.53 cada 10mm de altitud con los valores de las estaciones meteorológicas “Augusto M. Romain” (SMN, 24°12’S; 65°19’O, 1303 msnm, período 1991-2020) y la Estación Biológica Laguna El Rodeo (EBLR, 24°06’S, 65°28’O, 2150 msnm, período 1972 a 1993). Se utilizó el software Originlab para el análisis de datos.

3) RESULTADOS

Periodo principal de polinización de *Alnus acuminata* Kunth

La suma anual alcanzó un total de 30271,6 gr m⁻³ y 3453,7 gr m⁻³ para 2023 y 2024 respectivamente. Las máximas concentraciones diarias se alcanzaron el 7/9 y 6/9 de 2023 y 2024 con valores de 2754 gr m⁻³ y 472,6 gr m⁻³ respectivamente. Las fechas de inicio y fin del PPP para 2023 fueron 10/8 y 20/9 con una duración de 42 días, mientras que en 2024 éstas fueron 2/8 y 5/10 con una duración de 65 días (Fig. 1).

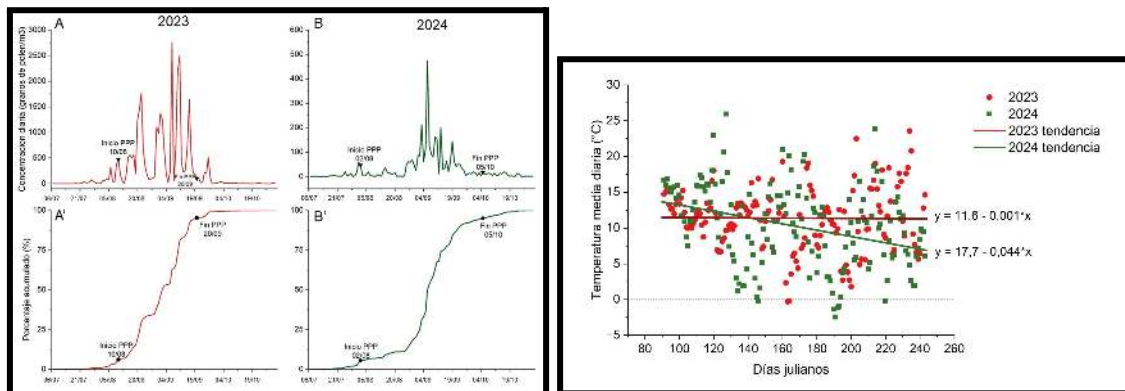
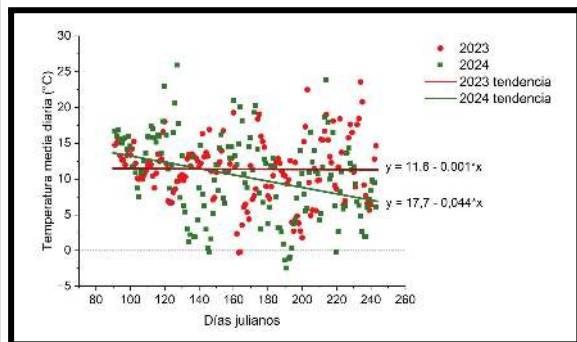


Figura 1: PPP de *Alnus*. Años 2023 (A) y 2024 (B), y determinación del PPP para 2023 (A') y 2024 (B') de acuerdo con Pathirane (1975)

Requerimiento térmico registrado durante los años 2023 y 2024

El requerimiento de HF se alcanzó el 29/7/23 y 6/7/24 luego de un total de 119 y 96 días a partir del 1 de abril. A partir de esas fechas se calcularon la cantidad de GD hasta inicio de PPP con totales de 106 y 103 GD que se completaron en 12 y 27 días en 2023 y 2024 respectivamente. Con respecto a las condiciones meteorológicas, la temperatura media de abril- agosto en Yala corregidas por altura según Malicia y otros (2014), fueron superiores (11,4 (2023) y 10,3°C (2024)) a las de los registros históricos de referencia (9,4 (EBLR1972-1993) y 9,0°C (SMN-UN1991-2020)). La tasa de enfriamiento de 2024 fue superior a la de 2023 en el sitio de estudio (Fig. 2).



4) CONCLUSIONES

Los resultados preliminares de la relación entre los requerimientos térmicos y el inicio del PPP de *Alnus acuminata*, muestran sensibilidad a las variaciones térmicas. Estos resultados confirman patrones observados por Weng y otros (2004), quienes documentaron que *Alnus* ha sido históricamente sensible a episodios de cambio climático. El adelanto de PPP en 2024 respecto a 2023, se relaciona con una acumulación más temprana de HF, en concordancia con las tasas de enfriamiento (Fig. 2). A pesar de la mayor duración de PPP en 2024 (65 vs. 42 días), se registró una marcada reducción en la concentración total de polen (3453,7 vs. 30271,6 gr m⁻³), lo que como señalaron Brunschön y otros (2010), podría atribuirse a condiciones térmicas subóptimas. Además, como advierte Pascale y otros (2001), las temperaturas máximas elevadas podrían comprometer la eficiencia del enfriamiento nocturno, afectando los procesos fisiológicos de especies criófilas como *A. acuminata*. Finalmente, es relevante destacar que este enfoque, más comúnmente aplicado en frutales (Andersen, 1991), resulta igualmente válido para especies nativas.

5) REFERENCIAS

- Andersen, T. B.: 1991.** A model to predict the beginning of the pollen season. Grana 30: 269-275.
- Brunschön, C., Haberzettl, T., y Behling, H.: 2010.** Estudios de alta resolución sobre la sucesión de la vegetación, variaciones hidrológicas, impacto antropogénico y génesis de un lago subreciente en el sur del Ecuador. Historia de la Vegetación y Arqueobotánica 19: 191-206.
- Hirst, J.,: 1952** An automatic volumetric spore trap. Ann. Appl. Biol. 39: 257-265.
- Käpylä, M., Penttinen, A.:1981.** An evaluation of the microscopical counting methods of the tape in Hirst-Burkard pollen and spore trap. Grana 20: 131-141.
- Malizia, L., Bergesio L., Fierro P. 1a ed Eds.: 2014.** Ambiente y sociedad en la comarca de Yala - San Salvador de Jujuy : Editorial de la Universidad Nacional de Jujuy - EDIUNJU, 2014.448 p. ; 24x18 cm. ISBN 978-950-721-489-9
- Pascale, A. J., Damario, E. A., Hurtado, R.: 2001.** Frío invernal disponible para especies criófilas en el noroeste de la Argentina. Rev. Arg. Agrometeorol. 1: 13-21.
- Pathirane, L.: 1975** Graphical determination of the main pollen season.
- Raurau, M.: 2012.** Caracterización de fuentes semilleras para uso sostenible y conservación crea vistas gamificadas e interactivas de recursos forestales de los bosques andinos de Loja, Ecuador.
- Weng, C., Bush, M.B., Chepstow-Lusty, A., Chepstow-Lusty, A.: 2004.** Cambios holocénicos del aliso andino (*Alnus acuminata*) en las tierras altas de Ecuador y Perú. Journal of Quaternary Science 19: 685–691.
- Zalom, F.G., Goodell, P.B., Wilson, L.T., Barnett, W.W., Bentley, W.J.: 1983.** Degree-days: the calculation and use of heat units in pest management. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, Leaflet 21373, pp 10.

MONITOREO DE LA SUPERFICIE CUBIERTA POR NIEVE EN LA CUENCA DEL RÍO CHUBUT MEDIANTE EL NDSI DE MODIS Y DATOS IN SITU DISPONIBLES DURANTE EL INVIERNO DE 2024

Silvana Carina Bolzi¹, Cam Cordoba Fradinger¹, Gonzalo Martin Diaz^{1,2}, María Eugenia Bontempi¹, Carolina Cerrudo¹
cbolzi@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires (DCAO-FCEN-UBA)

Palabras clave: Snow cover, cobertura nivea, teledetección

1) INTRODUCCIÓN

La cubierta de nieve tiene una gran influencia en el ciclo hidrológico durante el invierno y la primavera en gran parte de la superficie terrestre (Dozier y otros, 2008). El alto albedo de la nieve altera el balance de radiación superficial, su baja difusividad térmica aísla el suelo, y la superficie se vuelve húmeda y fría ante los flujos de calor y humedad. La importancia de monitorear la capa de nieve a escala local, regional y global, así como para aplicaciones climáticas e hidrológicas, se ha documentado en numerosos estudios y, para la Patagonia, resulta esencial. El monitoreo diario de la capa de nieve requiere un algoritmo robusto que pueda proporcionar resultados precisos en todas las condiciones espaciales y temporales. El algoritmo y los productos de datos de cobertura de nieve (NDSI NASA) del Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) del satélite TERRA, ya tradicional, se han utilizado ampliamente. En este caso, se estudió la cuenca del Río Chubut y en un futuro extenderlo a todas las cuencas de la región, ya que el deshielo estacional contribuye significativamente al caudal de las mismas.

La cuenca del Río Chubut nace en la región cordillerana de las provincias de Río Negro y Chubut, y luego cruza la provincia de Chubut de oeste a este hasta desembocar en el océano Atlántico, en Bahía Engaño. En su recorrido, se subdivide en numerosos brazos y sus aguas son encauzadas en dos canales principales, Norte y Sur. El agua del río es utilizada para la agricultura, ganadería, minería y para consumo humano, provee a más del 50 % de la población de la provincia de Chubut. Si bien más del 80 % del agua se produce en la cabecera de cuenca, el uso del agua mayoritario se realiza en la parte baja de la cuenca (Pessacg y otros, 2023).

En este trabajo se analizan las imágenes de índice de nieve de diferencia normalizada (NDSI, por sus siglas en inglés) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de ahora en más NDSI SMN, el NDSI NASA de MODIS, los datos disponibles de estaciones in situ de la red del SMN y los datos de almacenaje de agua diario, con el objetivo de encontrar un modelo estadístico que permita completar series in situ a partir de información satelital. Y contribuir a mejorar las técnicas de monitoreo de nieve en regiones del sur de Argentina con escasez de datos in situ.

2) METODOLOGÍA

La nieve suele tener una reflectancia muy alta en el visible (VIS) y una reflectancia muy baja en el infrarrojo de onda corta (SWIR), una característica comúnmente utilizada para detectar la nieve y distinguirla de la mayoría de los tipos de nubes. La capacidad de detectar la capa de nieve se basa en la diferencia normalizada de la reflectancia de la nieve entre el VIS y el SWIR: cuanto mayor sea la diferencia en el VIS-SWIR, mayor será el valor del NDSI. El NDSI para MODIS es:

$$NDSI = \frac{VIS - SWIR}{VIS + SWIR} \quad (1)$$

dónde: VIS es la banda 4 (0.55 μm) y SWIR es la banda 6 (1.6 μm).

El rango teórico del NDSI es de -1.0 a 1.0, entonces se considera que un píxel con un valor de NDSI menor a 0.0 representa una superficie terrestre sin nieve y si el píxel tiene valores mayores o iguales a 0.0 indican presencia de nieve o hielo. El NDSI NASA de MODIS se basa en el NDSI y el algoritmo aplica filtros para reducir las detecciones de nieve erróneas o marcar las detecciones de nieve inciertas. Los valores de NDSI en la variable NDSI_Snow_Cover se escalan al rango de 0 a 100 en el algoritmo, con otras características identificadas por valores de máscara y luego se escriben en la variable (Riggs y otros, 2019). El NDSI SMN se calcula utilizando las reflectancias del producto MOD09GA de MODIS y el NDSI NASA, con el producto MOD10A1 de MODIS; ambos productos tienen una resolución espacial de 500m. Los cálculos se realizan mediante un script en JavaScript utilizando la plataforma Google Earth Engine.

Se analizaron los datos de altura de nieve, frecuencia de días con nieve y tiempo presente de las estaciones meteorológicas que limitan o están dentro de la cuenca del Río Chubut: Bariloche Aero, El Bolsón Aero, Esquel Aero, Paso de Indios, Trelew Aero, Perito Moreno Aero y Comodoro Rivadavia Aero. También se analizaron datos de almacenaje de agua diario calculados de acuerdo con la metodología del Balance Hídrico Operativo para el Agro (BHOA) (Fernández Long y otros, 2012) de las mismas estaciones antes mencionadas.

3) RESULTADOS

Comparando el NDSI SMN con el NDSI NASA (Figura 1) en el procesamiento se pudo corroborar que este último carece de información en la mayor parte de la cuenca o enmascara como nube a la nieve porque la climatología del algoritmo carece de esa información. Se observa en el gráfico correspondiente al mes de julio del 2000 al 2024 que los valores del NDSI SMN son superiores a los del NDSI NASA en prácticamente todos los años. En julio de 2024 nevó en gran parte de la cuenca, el NDSI NASA arroja que un 9 % del total de la superficie de la cuenca estaba cubierta por nieve y el NDSI SMN, un 32 %; lo mismo sucede en 2001, la cuenca estaba cubierta en un 95 % por nieve según el NDSI SMN y el NDSI NASA da un 12%.

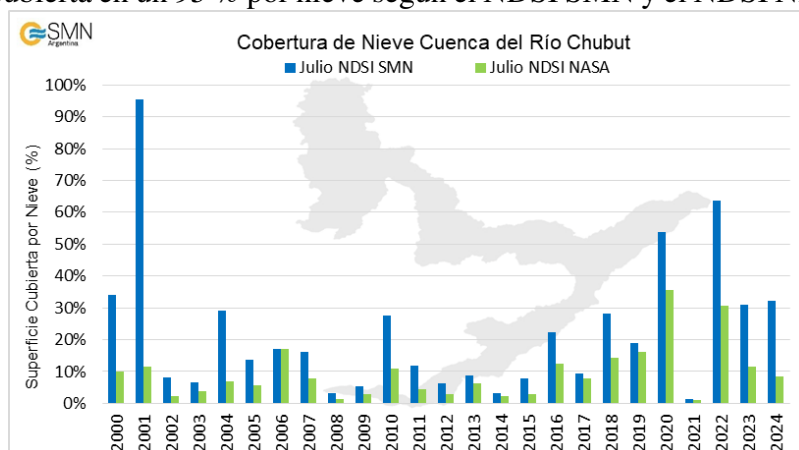


Figura 1. Gráfico comparativo de superficie cubierta por nieve entre el NDSI SMN (barras en azul) y NDSI NASA (barras en verde)

En los mapas de la Figura 2 se muestra el promedio para el mes de julio/2024 de ambos NDSI y se observa que el NDSI NASA no tiene información en el centro-sur de la cuenca, mientras que el NDSI SMN muestra información en toda la cuenca, acorde a la imagen promedio falso color RGB (mapa de la izquierda en Figura 2).

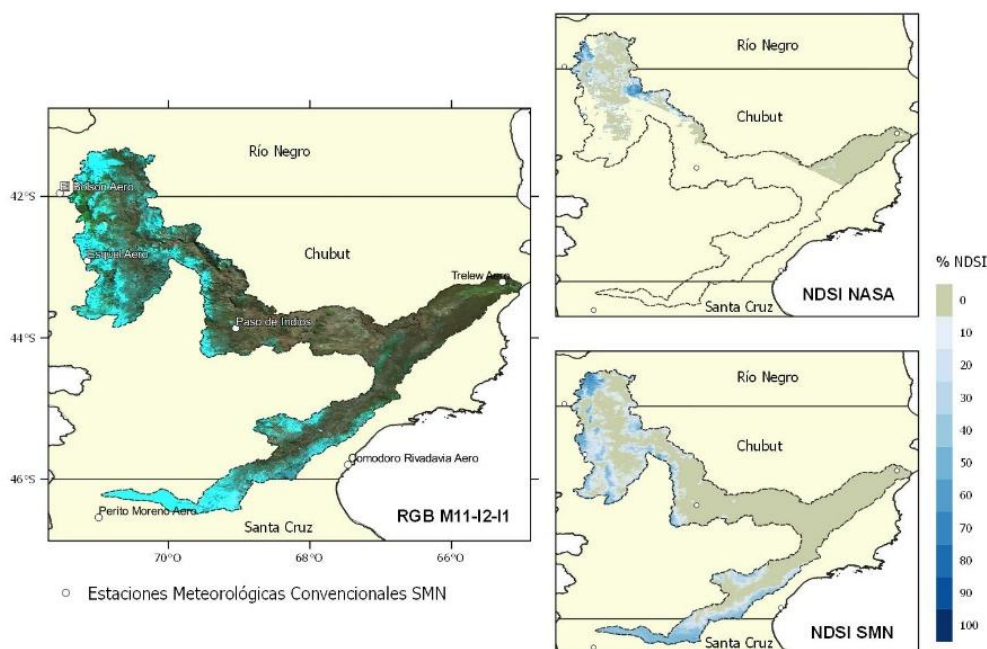


Figura 2. Imagen RGB falso color (izquierda), NDSI NASA (derecha arriba) y NDSI SMN (derecha abajo), correspondientes al promedio de julio de 2024.

El análisis estadístico de la frecuencia de días con nieve en la estación Paso de Indios y Esquel, ambas dentro de la cuenca y con la mejor continuidad en el dato, para los meses de junio, julio y agosto (período invernal) desde el año 2000 al 2024, reveló una correlación baja entre la cobertura de nieve obtenida por satélite (NDSI SMN) y las observaciones terrestres, con un R^2 de 0,23 con Paso de Indios y de 0,35 con Esquel. La correlación entre ambos NDSI fue moderada, con un R^2 de 0,43. Del análisis de los datos de altura de nieve y de almacenaje de agua diario no se obtuvieron resultados relevantes en esta primera instancia.

4) CONCLUSION

Los productos de NDSI NASA de MODIS para la región Patagonia sur y en época invernal se han ido degradando en los últimos años, no brindando información o brindando información errónea, se analizará dar continuidad al producto con los datos de cobertura de nieve del radiómetro de imágenes infrarrojas visibles (VIIRS), conjunto de datos similar a MODIS y datos que han sido revisados significativamente por la NASA desde el año 2012.

REFERENCIAS

- Dozier J., T.H. Painter, K. Rittger, and J.E. Frew, 2008.** Time-space continuity of daily maps of fractional snow cover and albedo from MODIS. *Advances in Water Resources*, 31, 11, 1515-1526.
- Fernández Long M.E., Spescha L., Barnatán I. y Murphy G., 2012:** Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). *Agronomía y Ambiente*, vol. 32, 1-2.
- Pessacg N., Liberoff A., Rimoldi P., Salvadores F., Díaz L., Brandizi L., Alonso Roldán V., Rius P, Kaless G., Flaherty S., Hernández M., Pascual M., 2023:** Grupo técnico del comité de cuenca del Río Chubut: experiencia y aprendizajes, *Libro-resúmenes-CONAGUA2023*, 06, 814-815.
- Riggs George A., Dorothy K. Hall, Miguel O. Román, 2019.** MODIS Snow Products, collection 6.1, user guide, version 1.0, 1-66.

CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA DE SITUACIONES DE ALTA CONCENTRACIÓN DE ALMIDÓN EN EL AIRE DE LA CIUDAD DE CHIVILCOY (BS AS – ARGENTINA)

Soledad Maciel Ramos Mejía¹, Claudio F. Perez^{1,2}, María I. Gassmann^{1,2}, Mauro Covi¹,
Mauricio De Marzi^{2,3,4,5}, Gabriel Tolosa⁴, María J. De Negri⁶
smacielramosmejia@gmail.com.ar.

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – UBA (DCAO)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³ Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (UNLu – CONICET)

⁴ Universidad Nacional de Luján, Departamento de Ciencias Básicas

⁵ FOCIS Center of Excellence - Vaccines and ImmunoTherapies against Infections and Cancers (VITIC)

⁶ Universidad Nacional de Luján, Departamento de Tecnología

Palabras clave: Calidad de aire, aerobiología, bio-aerosoles.

1) INTRODUCCIÓN

El impacto de los bio-aerosoles en los organismos y el medio ambiente los sitúa a la vanguardia de muchos campos de investigación, desde la física atmosférica y la calidad del aire hasta la salud pública y ocupacional. La Aerobiología es un campo de estudio multidisciplinario donde se determinan y cuantifican partículas en suspensión de origen biológico. Tradicionalmente los aerosoles biológicos de mayor interés han sido las esporas de hongos y granos de polen por su impacto sobre la salud humana o los cultivos. Sin embargo, gracias a los avances en las técnicas de muestreo y análisis, en la actualidad se examina desde organismos y células hasta material particulado del tamaño de macromoléculas (Grewling y otros, 2016, 2020). Dentro del último grupo se encuentra el almidón, donde el estudio de su presencia ambiental es incipiente. El almidón es un polisacárido que las plantas producen como sustancia de reserva, se almacena en diversos tejidos en forma de gránulos insolubles a temperatura ambiente cuyos tamaños varían desde menos de 1 a más de 100 μm (Jane 2009; Jane y otros, 1994). Su origen natural es poco conocido mientras que lo usual es que se produzcan por la industria de acopio y procesamiento de cereales. En 2020 iniciamos un programa de investigación para detectar su presencia en el aire de la ciudad de Chivilcoy, para lo cual, instalamos una trampa tipo Hirst en el centro de la ciudad (34.898°S, 60.019°O, Fig.1). Para el presente trabajo se eligieron días con alta concentración de almidón en el aire de Chivilcoy y se buscaron relaciones con los parámetros meteorológicos que pudieran propiciar su presencia en el aire y establecer relaciones con la presencia de molinos harineros ubicados dentro del ejido urbano.

2) METODOLOGÍA

Las partículas recolectadas entre el 12/4 al 14/5/24 ($n = 3052$) se contaron y midieron al microscopio óptico con luz polarizada. La trampa aspira un volumen de aire constante ($0.01 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$) por lo que los recuentos se expresan en valores de concentración horaria (número de partículas m^{-3}). Se consideraron días con alta concentración aquellos cuya concentración superó en más de 2σ el valor medio de concentración para el período. De acuerdo a este criterio los días seleccionados fueron 7 (siete), a saber: 5/5 (6165 gránulos* m^{-3}), 17/4 (3567.4 gránulos* m^{-3}), 16/4 (3123.6 gránulos* m^{-3}), 13/4 (3090.8 gránulos* m^{-3}), 12/5 (3074.2 gránulos* m^{-3}), 15/4 (2794.8 gránulos* m^{-3}) y 7/5 (2712.6 gránulos* m^{-3}). Para caracterizar la situación meteorológica se analizaron el perfil vertical y los campos de 250, 500, 850 y 1000

hPa de los reanálisis del modelo GFS y se compararon las observaciones de una estación meteorológica automática (EMA) de la ciudad de Chivilcoy con datos oficiales del SMN (estación Junín Aero). Sólo se muestran resultados para el día 5/5 de máxima concentración.

3) RESULTADOS

En 4 de los 7 casos analizados se registró máxima concentración de bio-aerosoles en el horario de máximo calentamiento entre las 15 y 17 UTC según se describe en la bibliografía (Pérez y otros, 2001, 2003). En cambio, la marcha diaria para el día 5/5 muestra la máxima concentración a la hora 5 UTC con más de 2000 partículas m^{-3} ; más de 40 veces el valor registrado para el resto de las horas del día (Fig. 2).

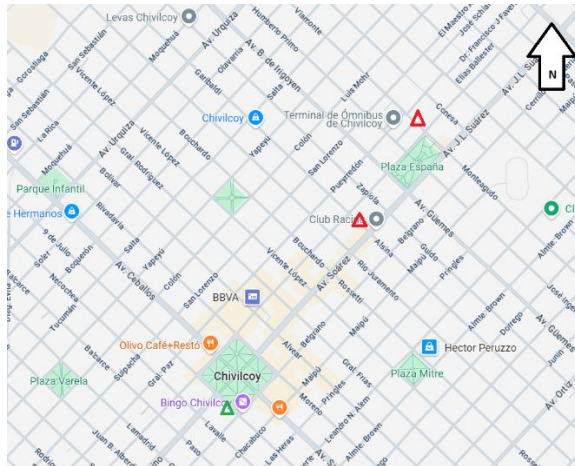


Figura 1: Mapa de la ciudad de Chivilcoy, triángulos rojos: molinos harineros, triángulo verde: muestreo continuo.

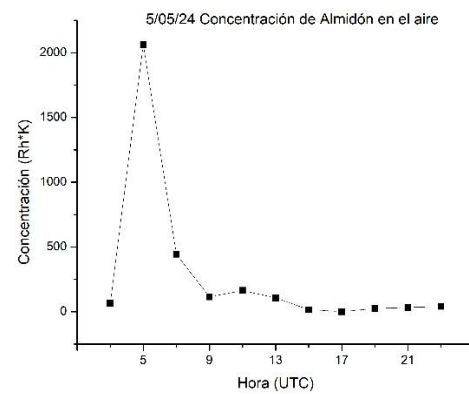


Figura 2: Concentración de gránulos de almidón en función de las horas del día 5/5/24.

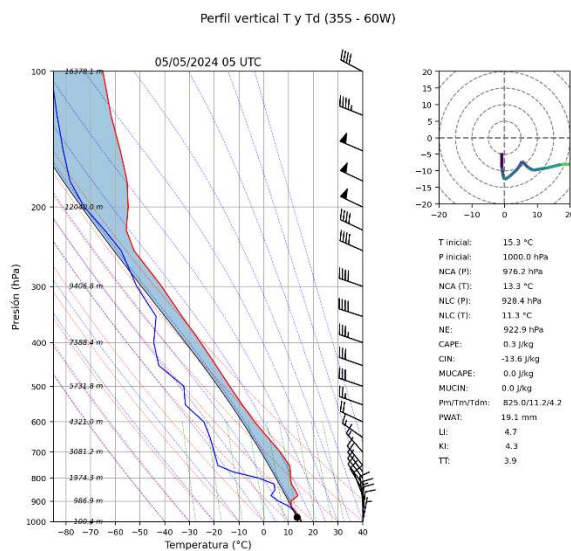


Figura 3: Perfil vertical en Chivilcoy el 5/5/24 a las 05 UTC

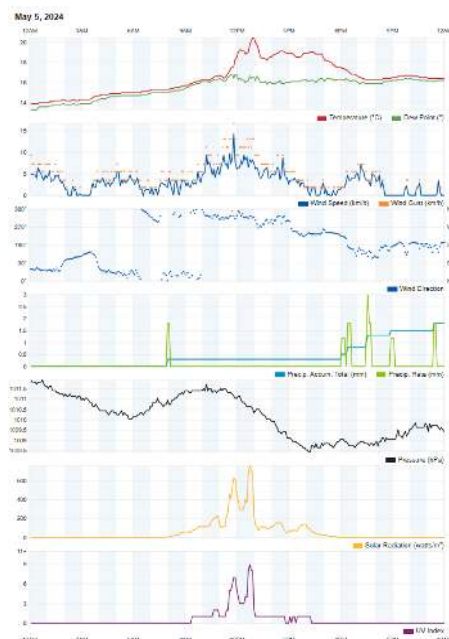


Figura 4: Variables meteorológicas medidas con la EMA

De acuerdo con el perfil vertical (Fig. 3) y los campos de 250, 500, 850 y 1000 hPa de los reanálisis del modelo GFS (no se muestran), se concluyó que en las primeras horas del día 5/5/24 la ciudad de Chivilcoy se encontraba inmersa en una masa de aire cálida y estable, con vientos leves del sector norte en niveles bajos. Aproximadamente a las 18 UTC pasó un frente frío por la ciudad, con rotación del viento al OSO y luego al sector S que no se asocia a un máximo de concentración (Fig. 4).

4) CONCLUSIONES

En los casos analizados se logra relacionar la dirección del viento con un posible transporte de almidón desde los molinos y/o desde los silos de acopio de granos de trigo ubicados al sudeste de la ciudad. Sin embargo, en 3 casos con máximos nocturnos de concentración, el aumento de concentración es puntual y aparentemente no responde a ningún cambio en los parámetros meteorológicos que pudieran haber intensificado el transporte. En consecuencia, se podría inferir que los mismos estarían relacionados con operaciones nocturnas propias del molino, como carga de camiones, limpieza de instalaciones u otras. A la fecha no contamos con información de los horarios de operación y logística de las empresas por lo que esta hipótesis necesita información adicional para su confirmación.

REFERENCIAS

- Grewling, L., Bogawski, P., Jenerowicz, D., Czarnecka-Operacz, M., Šikoparija, B., Skjøth, C.A., Smith, M., 2016:** Mesoscale atmospheric transport of ragweed pollen allergens from infected to uninfected areas. *Int. J. Biometeorol.* 60, 1493–1500.
- Grewling, L., Bogawski, P., Szymńska, A., Nowak, M., Kostecki, L., Smith, M., 2020:** Particle size distribution of the major *Alternaria alternata* allergen, Alt a 1, derived from airborne spores and subspore fragments. *Fungal Biol.* 124: 219–227.
- Jane, J., Kasemsuwan, T., Leas, S., Zobel, H., Robyt, J., 1994:** Anthology of starch granule morphology by scanning electron microscopy. *Starch* 46: 121–129.
- Jane, J., 2009:** Chapter 6 - Structural features of starch granules II. In: BeMiller, James, Whistler, Roy (Eds.), *Food Science and Technology, Starch*, 3rd ed. Academic Press, pp. 193–236.
- Pérez, C.F., Gardiol, J.M., Paez, M.M., 2001:** Comparison of intradiurnal variation of airborne pollen in Mar del Plata (Argentina). Part I. Non-arboreal pollen. *Aerobiologia* 17: 151–163.
- Pérez, C.F., Gardiol, J.M., Paez, M.M., 2003:** Comparison of diurnal variation of airborne pollen in Mar del Plata (Argentina) 2. Arboreal pollen. *Grana* 42: 161–167.

MODELADO REGIONAL DE UN ÍNDICE DE ESTRÉS TÉRMICO EN EL CENTRO Y NORTE DE ARGENTINA UTILIZANDO REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES.

Candela S. Glatstein¹, Rocio Balmaceda-Huarte¹², Maria Laura Bettolli¹²

candeglatstein@gmail.com

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras clave: Estrés térmico, temperatura de bulbo húmedo, redes neuronales convolucionales.

1) INTRODUCCIÓN

La reducción de escala estadística (SD, por sus siglas en inglés) es una herramienta clave para generar información climática de alta resolución, adecuada para los análisis de impacto, especialmente aquellos que se basan en índices climáticos y la superación de ciertos umbrales. En este contexto, las redes neuronales convolucionales (CNNs) se han popularizado como métodos de machine learning prometedores para su uso como técnicas de SD, ya que permiten manejar grandes volúmenes de datos -necesarios para realizar estudios climáticos- y extraer estructuras espaciales relevantes de manera automática para cada sitio. Estas características suponen una ventaja importante frente a técnicas tradicionales de SD, que suelen requerir una selección manual de predictores.

En el sur de Sudamérica (SSA), las CNNs han demostrado ser eficaces para simular temperaturas extremas diarias en condiciones presentes y bajo diferentes escenarios futuros (Balmaceda-Huarte et al., 2024). Sin embargo, la evaluación de diferentes configuraciones de CNN asociadas a su arquitectura, como la elección de la función de activación, son aún un área poco explorada en la región. Más aún, la evaluación de las CNN como técnica de SD para la simulación de índices multivariados de impacto, como los índices de estrés térmico, no se ha llevado a cabo en SSA hasta el momento. Con el fin de abordar estos vacíos, el objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño de las CNNs bajo diferentes configuraciones como técnica de SD para simular un índice de estrés térmico durante el verano en el centro y norte de Argentina.

2) METODOLOGÍA

Para la implementación de las CNNs se utilizaron como variables predictando datos observados de temperatura del aire y temperatura de rocío en las horas principales de los meses de verano (Diciembre-Enero-Febrero, DEF) de 43 estaciones ubicadas en el norte y centro de Argentina en el período 1991-2024. Con el fin de abarcar las condiciones más cálidas del año se consideró el trimestre de verano. Como variables predictoras de gran escala se utilizaron los campos diarios del reanálisis ERA5 de temperatura del aire (t_a), altura geopotencial (z), humedad específica (q), viento zonal y meridional (u y v , respectivamente) en 5 niveles de presión (250, 500, 700, 850 y 1000 hPa) y la presión del nivel medio del mar (msl), en el dominio extendido de 40°–90° W y 14°–60° S. Estas fueron seleccionadas teniendo en cuenta que son representativas tanto de la circulación como de la termodinámica de la atmósfera y que a su vez, poseen la señal de cambio climático (Balmaceda-Huarte and Bettolli, 2022). Con el objetivo de alinear la resolución de los predictores con la de los GCMs, para futuras aplicaciones, estos fueron reescalados de 0.25° x 0.25° a una retícula espacial de 1°, mediante una interpolación bilineal.

Se emplearon cuatro configuraciones distintas de redes neuronales convolucionales (CNN) que varían según tres aspectos (Baño-Medina et al 2020): la función de activación (ReLU o lineal, indicadas como R y L respectivamente), el tamaño del dominio de los predictores considerado como entrada y el diseño de la última capa (tamaño del filtro). En todos los casos, la SD se abordó bajo el enfoque de Perfect Prognosis. Los modelos se entrenaron para simular la temperatura de bulbo húmedo máxima diaria (TWx) considerada como índice de estrés térmico, la cual es calculada a partir de la temperatura máxima diaria (Tx) y la humedad relativa media diaria (HRm).

El entrenamiento de las redes se realizó utilizando un esquema de validación cruzada (CV, por su nombre en inglés) con datos diarios de DEF en el período 1991–2020. Adicionalmente, las redes fueron evaluadas en forma independiente para los veranos 2021, 2022, 2023 y 2024.

A modo comparativo, se aplicó la misma metodología para simular Tx, con el fin de analizar las diferencias en la capacidad de simulación entre ambas variables. En todos los casos, se analizó el valor agregado de las CNNs, comparando los resultados con los datos de superficie de ERA5. La evaluación de desempeño se basó en métricas como el sesgo (BIAS), el percentil 95 (P95) y dos índices de frecuencia: el número de días en las que se superó el P95 (P95p) y el número de días en que se superaron determinados umbrales fijos (35°C para Tx, Tx35p y 25° para TWx, TWx25p).

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presentan boxplots de las métricas evaluadas para las dos variables. Los resultados obtenidos muestran que las CNNs presentan un buen desempeño en la simulación tanto de Tx como de TWx, con errores sistemáticos reducidos y una adecuada representación de los extremos. No obstante, las CNNs simulan TWx con mayor precisión que Tx, mostrando menores valores de BIAS y mejores estimaciones del percentil 95 (P95) en la mayoría de las estaciones.

Al analizar el valor agregado con respecto a ERA5, puede observarse que las CNNs tienen sesgos cercanos a cero para ambas variables, mientras que el reanálisis ERA5 exhibe un sesgo sistemático negativo, especialmente marcado en el caso de TWx. En relación a los extremos, las CNNs representan mejor el valor del P95, con menor dispersión entre estaciones.

Asimismo, al analizar la cantidad de días por verano en que se superan los umbrales fijos (Tx35p y TWx25p) se evidencia que ERA5 tiende a subestimar el número de días en la TWx, mientras que las CNNs se ajustan mejor a las observaciones. Entre las configuraciones

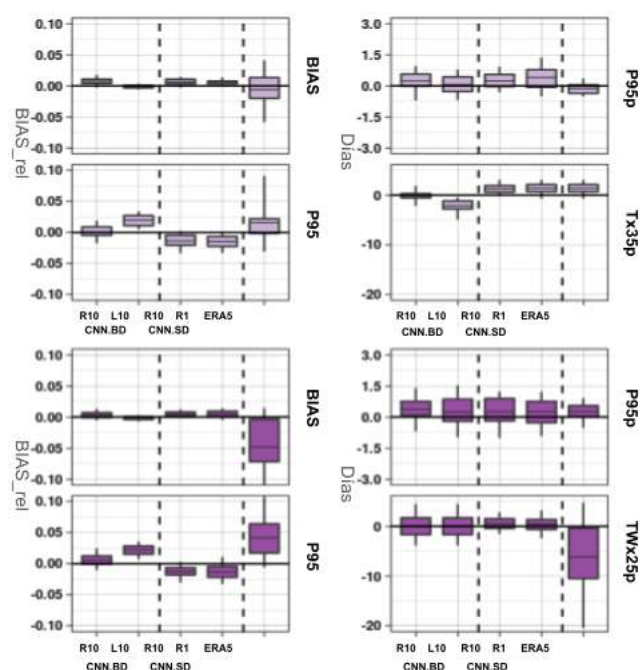


Figura 1: Resultados de la CV para Tx (arriba) y TWx (abajo) para todas las estaciones. Se muestran las 4 configuraciones de CNNs estudiadas y ERA5. En cada caja, la marca central corresponde a la media, y los bordes inferiores y superiores a los percentiles 25 y 75, respectivamente. Los bigotes se extienden al percentil 5 y 95.

evaluadas, los modelos con un dominio espacial móvil más pequeño (CNN.SD) fueron sistemáticamente los más precisos, tanto para Tx como para TWx. Dentro de estos, se observó que la reducción del tamaño del filtro en la última capa (R1) mejora levemente la simulación de Tx. Por otro lado, cuando se utiliza un dominio amplio (CNN.BD), se identifican algunas diferencias entre funciones de

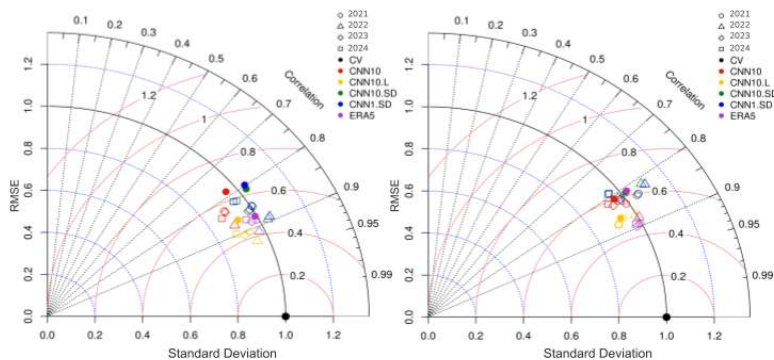


Figura 2: Diagramas de Taylor para Tx (izquierda) y TWx (derecha), para la CV (puntos llenos) y para los veranos estudiados de manera independiente (formas sin relleno). En colores se muestran las distintas CNNs y ERA5 y el punto negro indica la observación como referencia).

activación. En la evaluación de los veranos independientes (Figura 2), las CNNs mantuvieron un desempeño similar al del periodo de CV para ambas variables. De acuerdo con los resultados de CV, la simulación de TWx en los veranos más recientes, mostró un mayor acuerdo entre modelos comparado con Tx, la cual exhibió mayores discrepancias entre configuraciones (nubes de puntos más

dispersas en los diagramas de Taylor de Tx que de TWx).

4) CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio evidencian el potencial de las CNNs como herramienta de reducción de escala estadística para simular variables climáticas de impacto en el centro y norte de Argentina. Las CNNs superan a ERA5 en la representación de los valores medios y los extremos, presentando un mejor desempeño en TWx. En este sentido, los resultados sugieren que las CNNs simulan la TWx con mayor robustez, lo que refuerza su aplicabilidad en evaluaciones de impacto por estrés térmico. Las configuraciones con dominio reducido muestran el mejor desempeño y refuerzan la importancia de la información local, por encima de la arquitectura y la función de activación. En este sentido las CNNs, muestran potencial como herramientas para generar información regional de estrés térmico en el norte de Argentina.

REFERENCIAS

- Balmaceda-Huarte R,** Bettolli ML (2022) Assessing statistical downscaling in Argentina: daily maximum and minimum temperatures. *Int J Climatol*. <https://doi.org/10.1002/joc.7733>
- Balmaceda-Huarte, R.,** Baño-Medina, J., Olmo, M. E., & Bettolli, M. L. (2024). On the use of convolutional neural networks for downscaling daily temperatures over southern South America in a climate change scenario. *Climate Dynamics*, 62(1), 383-397.
- Baño-Medina, J.,** Manzanar, R., & Gutiérrez, J. M. (2020). Configuration and intercomparison of deep learning neural models for statistical downscaling. *Geoscientific Model Development*, 13(4), 2109-2124.
- Casanueva, A.,** Kotlarski, S., Herrera, S., Fischer, A. M., Kjellstrom, T., & Schwierz, C. (2019). Climate projections of a multivariate heat stress index: the role of downscaling and bias correction. *Geoscientific Model Development*, 12(8), 3419-3438.

ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL ESTUDIO DE LA PRECIPITACIÓN EXTREMA DIARIA: ESTIMACIÓN DE PERCENTILES Y REGIONALIZACIÓN DE ÍNDICES EN ARGENTINA SUBTROPICAL

Lorenzo Ricetti^{1,2}, Santiago I. Hurtado², Eduardo Agosta Scarel^{3,4}, Pablo G. Zaninelli⁵
lricetti@fcaglp.unlp.edu.ar Autor/a correspondiente.

1 Grupo de investigación en Clima, Variabilidad y Extremos (CLAVE), Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (FCAG-UNLP), La Plata, Buenos Aires, Argentina

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina

3 Climate Change Research and Advice. Laudato Si' Movement, Roma, Italia

4 Climate Change and Sustainability Section, Carmelite NGO, New Orleans, USA

5 Instituto de Geociencias (IGEO), Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España

Palabras clave: Índices extremos, Agrupamiento, Aprendizaje no supervisado

1) INTRODUCCIÓN

La caracterización de la precipitación extrema es esencial en el contexto del cambio climático, especialmente en países en desarrollo donde las consecuencias de estos eventos son mayores. En estas regiones, la infraestructura suele ser más vulnerable, los sistemas de alerta temprana son limitados y la capacidad de respuesta ante desastres naturales es reducida, lo que incrementa significativamente el riesgo de impactos socioeconómicos graves. Una adecuada caracterización de la precipitación extrema permite no solo mejorar la planificación y gestión del riesgo, sino también desarrollar políticas de adaptación más eficaces y equitativas.

Estos eventos suelen ser estudiados a partir de índices derivados de registros diarios, los cuales pueden clasificarse en dos grandes grupos: índices basados en el marco teórico *block maxima*, y aquellos contruidos en base a registros superando un umbral específico. Este umbral suele corresponder con percentiles altos de la distribución de precipitación, como el 90, 95 y 99. A pesar de la frecuencia con que se encuentran estos índices en la literatura, no existe un consenso acerca del método más exacto para la estimación de estos percentiles poblacionales desconocidos (Ricetti et al., 2025a). Más aún, a menudo este aspecto no es especificado en los trabajos.

Otro aspecto de gran relevancia en la caracterización de los eventos extremos de precipitación es su regionalización. La misma busca definir regiones o grupos con comportamiento coherente en términos espacio-temporales. Esta tarea suele realizarse a través de métodos de reducción de dimensionalidad como PCA y métodos de aprendizaje automático no supervisado como K-means o Ward (Ricetti et al., 2025b). Estos algoritmos parten de la premisa que todos los elementos pueden ser regionalizados, lo cual podría no cumplirse en el caso de la precipitación extrema dada su naturaleza local.

Este trabajo aborda dos aspectos centrales en el estudio de la precipitación extrema diaria i) la determinación óptima de los percentiles utilizados como umbrales para definir estos eventos, y ii) La viabilidad de la regionalización de la precipitación extrema y los métodos más adecuados para tal fin. Para abordar el último punto se utilizó el caso de estudio de Argentina

Subtropical (ArST), un *hotspot* de precipitación extrema a nivel global.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para evaluar la estimación de los percentiles, se simularon 1000 series de precipitación diaria de 30 años de longitud de 5 climas distintos. Luego, se estimaron los percentiles considerando diferentes aspectos y métodos, para luego evaluar su desempeño a partir de métricas conocidas de error. Se estimaron tres percentiles distintos (90, 95 y 99) considerando distribuciones de días húmedos y de todos los días. También se evaluaron métodos considerando solo la distribución del día a estimar o tomando ventanas móviles centradas. Por último, se consideró un post-proceso con varios métodos de suavizado temporal.

Para el análisis de la regionalización de la precipitación extrema, se estimaron tres índices trimestrales basados en percentiles –Acumulado, Frecuencia y DIER– considerando tres percentiles distintos –P90, P95 y P99– y dos usando el marco *Block maxima*: BM1 y BM5. Estos índices fueron regionalizados utilizando los dos métodos más utilizados en la literatura – k-means y Ward– junto con un método stepwise basado en la correlación de las series (HAZ, en adelante), propuesto por Hurtado et al. (2023). Luego se evaluó la coherencia temporal de los clusters definidos a partir de la correlación de Pearson y la coherencia espacial con una métrica construida ad hoc (Figura 1).

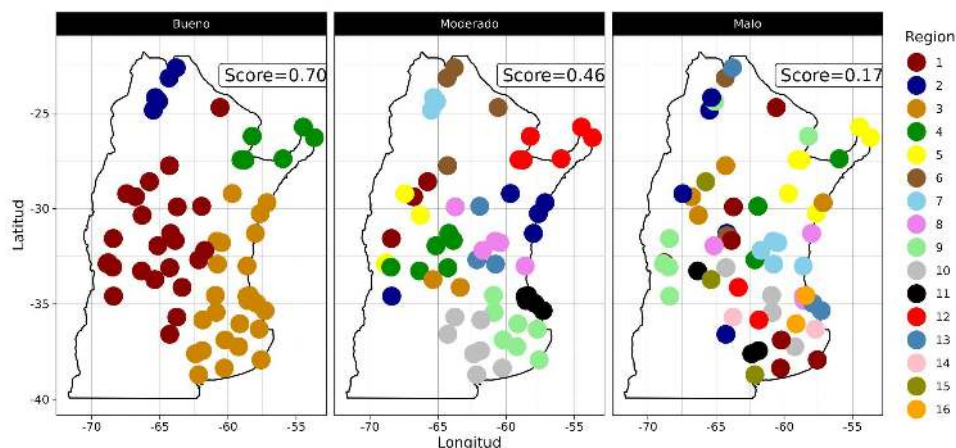


Figura 1. Ejemplos de regionalizaciones con coherencia espacial buena (panel izquierdo), moderada (panel central) y mala (panel derecho). Valor del score espacial en el interior de cada panel.

3) RESULTADOS

En la estimación de percentiles, la inclusión de ventanas móviles superó sistemáticamente los métodos que consideran solo el día a estimar. Asimismo, la inclusión de un método de suavizado temporal mejoró considerablemente la estimación del percentil real, sin importar el desempeño del método (Figura 2). En particular, el suavizado con modelos aditivos generalizados (GAM) mostró el mejor desempeño entre los considerados. Asimismo, cuanto más restrictiva sea la definición de extremo (mayor el percentil considerado), mayores fueron los errores que se cometieron al estimar el percentil real. Por último, no existieron grandes diferencias en los errores entre considerar distribuciones de días húmedos o no hacerlo.

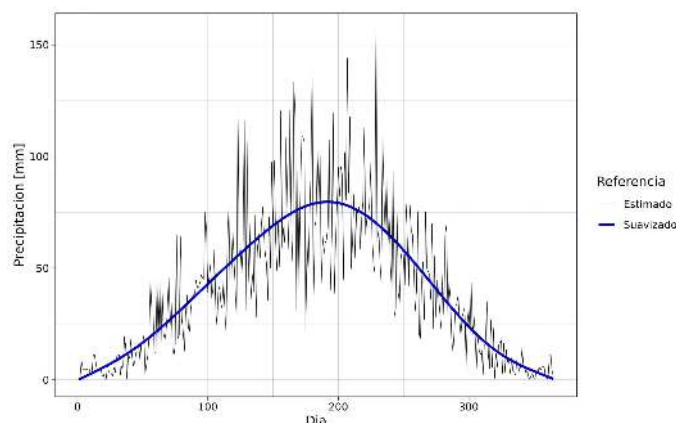


Figura 2. Estimación del ciclo anual del percentil 90 en una simulación de ArST considerando la distribución empírica de días húmedos del día a estimar y su suavizado temporal usando GAM (línea azul).

Respecto a la regionalización, en general los algoritmos de aprendizaje automático no supervisados mostraron una pobre coherencia espacio-temporal. En ese sentido, aquellas con buena coherencia espacial mostraron baja coherencia temporal y viceversa. El método HAZ, superó considerablemente a los métodos convencionales, alcanzando sistemáticamente regiones con buena coherencia espacio-temporal. Asimismo, los índices de intensidad de la precipitación extrema DIER y BM1 mostraron no poder ser regionalizados en ninguna temporada, indicando así un comportamiento local de la intensidad de estos eventos en ArST.

4) CONCLUSIONES

Este trabajo abordó dos aspectos metodológicos en la caracterización de la precipitación extrema: la correcta estimación de los percentiles utilizados como umbrales para definirla, y la metodología más adecuada para regionalizar los índices de precipitación extrema en ArST. Para el cálculo de los percentiles se encontró que la estimación más óptima consiste en dos etapas. Primero, la estimación del percentil utilizando la distribución empírica usando ventanas móviles centradas en el día a estimar. Luego, la aplicación de un método de suavizado temporal, siendo GAM el que mostró mejores resultados. Por otro lado, para regionalizar los distintos índices de precipitación extrema, el método HAZ superó considerablemente los algoritmos no supervisados, generando regiones con buena coherencia espacio-temporal. Estos resultados enfatizan la importancia que tiene el posprocesamiento de las regiones obtenidas con algoritmos de inteligencia artificial.

REFERENCIAS

Hurtado, S. I., Agosta, E. A., & Zaninelli, P. G. (2023). Monthly variations of forcing mechanisms of austral summer precipitation in subtropical Argentina. *Atmospheric Research*, 285, 106609.

Ricetti, L., Hurtado, S. I., Zaninelli, P. G., & Agosta, E. A. (2025a). Determining the percentile threshold of daily extreme precipitation, methods evaluation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-16.

Ricetti, L., Hurtado, S. I., & Scarel, E. A. (2025b). On the spatio-temporal coherence of extreme precipitation indices in subtropical Argentina. *Atmospheric Research*, 320, 108082.

CARACTERIZACIÓN DE ANEMÓMETRO ULTRASÓNICO PARA APLICACIONES MARINAS

J.M. Remotti¹, P. Bos¹², I.S. Prario¹², P. Sayago³, C. Aranda³, S. Sánchez Mérola³

¹ Departamento de Propagación Acústica, Jefatura de Investigación de la Armada

² UNIDEF (MinDef – CONICET), Departamento de Propagación Acústica

³ Coordinación Laboratorio e Instrumental del Servicio Meteorológico Nacional
jmarcosremotti@gmail.com

Palabras clave: monitoreo acústico, adquisición ambiental, sensor ultrasónico

1. INTRODUCCIÓN

El Ruido Ambiente Subacuático es un parámetro acústico característico de una ubicación geográfica y profundidad determinada del océano, mar o ambiente subacuático en general. Conceptualmente, corresponde al ruido de “fondo” remanente, en ausencia de fuentes específicas identificables. Actualmente, como consecuencia de la gran cantidad de actividades antrópicas que introducen ruido submarino, hay gran interés en medir este parámetro en distintas regiones marinas y distintos Organismos Internacionales e Instituciones han elaborado iniciativas, lineamientos y recomendaciones tendientes a estandarizar el monitoreo hidroacústico y las métricas para caracterizar acústicamente los distintos ambientes submarinos (Merchant et. al., 2022).

En particular, la División Acústica Submarina (DAS) de la Armada Argentina diseñó y construyó una boya de superficie en el marco del programa PIDDEF para integrar una Estación Autónoma Marítima para el Monitoreo de Ruido Ambiente (EAMMRA), ver figura 1. Su objetivo es medir el nivel de ruido ambiente submarino (NLa), parámetro crítico en aplicaciones de predicción SONAR y monitoreo ambiental. El viento, junto con el oleaje y las precipitaciones, son forzantes naturales desde la superficie libre del mar que contribuyen a la generación de ruido subacuático, razón por la cual la caracterización precisa de las condiciones de viento en el entorno inmediato de la boya es esencial para interpretar las mediciones acústicas (Wenz, 1962).

El sistema EAMMRA está equipado con sensores meteorológicos, oceanográficos y acústicos, y posee capacidad de transmisión remota de datos. Se encuentra en etapa de integración y validación, y su diseño modular permite adaptar componentes específicos a distintas misiones. La caracterización del viento en superficie permitirá correlacionar datos de ruido ambiente con modelos físicos de generación acústica, y contribuirá a una comprensión más profunda del entorno subacuático.



Figura 1. - Estación de monitoreo EAMMRA

2. ANEMÓMETRO GILL WINDSONIC

El instrumento seleccionado para la medición de viento es el anemómetro ultrasónico de dos ejes WindSonic de Gill Instruments. Este sensor, sin partes móviles, es adecuado para entornos adversos como los que se esperan en operaciones marinas prolongadas. Su principio de funcionamiento se basa en la medición del tiempo de vuelo de pulsos ultrasónicos entre pares de transductores ortogonales, lo cual permite calcular con precisión tanto la dirección como la velocidad del viento. El instrumento dispone de una interfaz RS-232 y opera en modo *polled* mediante comandos definidos por el fabricante. (Gill Instruments Ltd., 2021).



Figura 2 -
Anemómetro y
soporte

Las pruebas iniciales confirmaron la robustez mecánica y electrónica del dispositivo, así como la estabilidad de sus lecturas en condiciones de laboratorio y en exterior.

Para las pruebas de caracterización se fabricó un soporte especial regulable, que se muestra en la figura 2. Este soporte permite ajustar el anemómetro en dos movimientos: un giro de 0 a 360 grados y una inclinación regulable de -45 a +45 grados, con incrementos de 5 grados. Este diseño, detallado por Cisnero et al. (2025), permite posicionar el anemómetro de manera precisa para evaluar su rendimiento en diferentes configuraciones angulares.

Para la integración en la EAMMRA, se desarrollaron rutinas específicas de configuración y adquisición, con capacidad de funcionamiento autónomo y registros en formato CSV (*Comma Separated Values*).

3. ARQUITECTURA DE SOFTWARE Y HARDWARE DE EJECUCIÓN

El software desarrollado se estructura en tres niveles de abstracción:

- *windsonic_LL*: gestiona la comunicación de bajo nivel con el anemómetro (puerto serie, comandos y validación de mensajes).
- *windsonic_fsm*: implementa una máquina de estados finitos que organiza las fases de inicialización, adquisición, espera y cierre controlado.
- *main*: constituye el punto de entrada del programa, definiendo el modo de operación automático o manual según los argumentos del usuario.

Este software corre sobre una computadora industrial *fanless* Kaise KBOX-JB6412 con sistema operativo Ubuntu Server 24.04.2 LTS, elegida por su robustez, eficiencia energética y ausencia de partes móviles. A diferencia de versiones previas, se incorporaron mejoras en modularidad, trazabilidad de errores y configuración mediante archivos externos, (Remotti y Bos, 2024).

4. ENSAYOS DE VALIDACIÓN

Se llevaron a cabo distintas pruebas para validar el funcionamiento integral del sistema, que incluyen ensayos en laboratorio, puesta en marcha en campo y una campaña planificada en un túnel de viento cerrado.

Durante el desarrollo del software se realizaron pruebas de laboratorio que permitieron verificar la estabilidad de la comunicación serie, la adquisición y almacenamiento de datos, y el comportamiento del sistema ante sesiones prolongadas. Estas pruebas de durabilidad se ejecutaron en diferentes plataformas anfitrionas, simulando condiciones operativas reales.

Como parte de la puesta en marcha, se realizaron pruebas en exteriores orientadas a verificar que el anemómetro respondiera a condiciones reales de viento, ver figura 3. Además de validar el correcto funcionamiento del instrumento, se pudo validar el correcto registro de datos reales de velocidad y dirección de viento por parte del sistema de adquisición.



Figura 3 - Ensayos en exteriores y
puesta en marcha del anemómetro.

Actualmente se está planificando la realización de mediciones en el túnel de viento del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que contempla la evaluación del efecto angular por el cabeceo de la boya y la comparación de datos medidos con un anemómetro patrón.

Se utilizará el soporte especialmente diseñado para controlar la inclinación del instrumento respecto al plano horizontal. El objetivo es evaluar cuantitativamente la influencia de la inclinación en las mediciones y contrastar las salidas del WindSonic con instrumentos patrón del SMN, y poder así generar factores de corrección aplicables al entorno operativo marino, donde las oscilaciones de la boya pueden afectar el ángulo de incidencia del viento sobre el sensor.

5. CONCLUSIONES

Se documenta el proceso de integración de un anemómetro ultrasónico WindSonic que brindará mediciones complementarias en un sistema autónomo de monitoreo del ruido ambiente submarino. La medición del viento superficial resulta clave para comprender la dinámica del ruido generado por fenómenos atmosféricos, y mejora la interpretación de las señales acústicas submarinas.

La arquitectura modular del software desarrollado en Python facilita su mantenimiento y permite su adaptación a diferentes entornos de ejecución. Su implementación en una PC industrial Kaise KBOX-JB6412 garantiza robustez y eficiencia energética para aplicaciones prolongadas en el mar.

Las pruebas realizadas en laboratorio y durante la puesta en marcha en campo confirmaron la funcionalidad del sistema y su estabilidad operativa. La campaña prevista en túnel de viento permitirá completar la caracterización instrumental en condiciones controladas y brindar herramientas para mejorar la precisión de las mediciones en escenarios marinos dinámicos.

Este desarrollo representa un avance significativo en la capacidad de adquisición autónoma de datos ambientales, y constituye un paso fundamental hacia la operación integral de la Estación Autónoma Marítima EAMMRA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Claudio Arencibia y Elian Wolfram, pertenecientes a la Coordinación Laboratorio e Instrumental del Servicio Meteorológico Nacional, sin quienes no hubiera sido posible programar una campaña en túnel de viento.

REFERENCIAS

Cisnero, R., Bravo, C., Irusta, A. y Rivolta, S., 2025: Desarrollo de un dispositivo soporte regulable para anemómetro con movimientos predeterminados. Informe interno, División Mecánica, Armada Argentina.

Gill Instruments Ltd., 2021: *WindSonic Ultrasonic Wind Sensor User Manual*, Revision 5. Gill Instruments Ltd., UK.

Merchant, N. D., Putland, R. L., André, M., Baudin, E., Felli, M., Slabbekoorn, H., & Dekeling, R., 2022. A decade of underwater noise research in support of the European Marine Strategy Framework Directive. *Ocean & Coastal Management*, 228, 106299.

Remotti, J.M. y Bos, P., 2024: Rutinas de configuración y adquisición para anemómetro Gill WindSonic. Informe Técnico AS 1/24, División Acústica Submarina, Armada Argentina.

Wenz, G. M., 1962: Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34 (12), 1936–1956.

DESEMPEÑO DEL MODELO REST2 CON DISTINTAS FUENTES DE AEROSOLES EN LA ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL

Anabela Lusi^{1,2}, Facundo Orte^{1,2}, Agustín Laguarda³, Rodrigo Alonso-Suárez⁴, Juan Pallotta¹, Raúl D'Elia², Elian Wolfram⁵
anabelalusi@gmail.com

¹Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones (DEILAP), UNIDEF (CITEDEF-CONICET), IRL-IFAECI-CNRS-3351, Villa Martelli (B1603), Buenos Aires, Argentina.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290 (C1425FQB) CABA, Argentina

³Laboratorio de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, Udelar, Montevideo, Uruguay

⁴Laboratorio de Energía Solar, CENUR Litoral Norte, Udelar, Salto, Uruguay

⁵Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en productos y servicios, (C1425GBE), CABA, Argentina

Palabras clave: REST2, AOD, Irradiancia solar

1) INTRODUCCIÓN

Los modelos de cielo claro permiten estimar la irradiancia solar que alcanza la superficie terrestre en ausencia de nubosidad, siendo fundamentales para aplicaciones como el diseño de sistemas solares, el control de calidad en series de medida y la generación de productos satelitales de irradiancia. Entre estos modelos, REST2 (“Reference Evaluation of Solar Transmittance”, dos bandas) (Gueymard 2008) se destaca por su precisión al considerar múltiples variables atmosféricas, incluyendo ozono, vapor de agua y aerosoles. REST2 está basado en una parametrización del modelo de transferencia radiativa SMARTS2.

La profundidad óptica de aerosoles (AOD) es uno de los parámetros más relevantes, ya que permite caracterizar la cantidad y el tipo de partículas presentes en la atmósfera. Parámetros de entrada de alta calidad, como los de la red de fotómetros solares AERONET (Holben et al. 1998), mejora significativamente el desempeño del modelo REST2, pero su disponibilidad es limitada a ciertas ubicaciones. Por esta razón, resulta de interés evaluar el impacto en el desempeño del modelo REST2 al utilizar distintas fuentes de información de aerosoles.

El objetivo de este trabajo es comparar el desempeño del modelo REST2 utilizando datos de AERONET y datos de reanálisis de MERRA-2 (Gelaro et al. 2017). La evaluación se realiza a escala temporal de un minuto para la Irradiancia Global Horizontal (GHI) en condiciones de cielo claro, comparando con mediciones terrestres durante los años 2019 y 2020 en Villa Martelli, Buenos Aires, y Pilar, Córdoba.

2) METODOLOGÍA

La información de GHI utilizada para validar el modelo se obtuvo con una frecuencia minutal durante los años 2019 y 2020 en Villa Martelli, Buenos Aires (VMA) (34,58°S, 58,48°O, 25 m s.n.m.) y Pilar, Córdoba (PIL) (31,68°S, 63,87°O, 330 m s.n.m.). Los datos se registraron con piranómetros Kipp&Zonen CMP-21 en el rango de onda corta en un plano horizontal con un tiempo de adquisición de un minuto. La detección de los minutos claros se realizó siguiendo la metodología propuesta por Reno y Hansen (Reno and Hansen 2016), con ventanas móviles de 30 minutos.

Las variables de entrada del modelo REST2 se obtuvieron de la base de datos de OMI/Aura (columna total de ozono, u_o) (Levelt et al. 2006), de la base de datos de la National Solar

Radiation Data Base (NSRDB) (albedo de dispersión terrestre para la banda 1 y 2; ρ_1, ρ_2) (Sengupta et al. 2018), de la base de datos de reanálisis MERRA-2 ($\beta, \alpha_1, \alpha_2$), de la red de fotómetros solares AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>) en el nivel 2.0 (parámetros de turbidez, β ; exponentes de Ångström, α_1, α_2), de mediciones de parámetros meteorológicos en el sitio (presión, p) y, además, otros parámetros se estimaron o se utilizaron valores por defecto (ángulo cenital solar, θ_z ; contenido de dióxido de nitrógeno, u_n ; p).

El coeficiente de turbidez de Ångström se calculó utilizando la ecuación de Ångström: $\beta = \text{AOD} \cdot \lambda^{-\alpha}$ (Ångström 1929). Los datos de MERRA-2 se obtuvieron a nivel horario con una resolución espacial de $0.5 \times 0.625^\circ$ y se interpolaron linealmente para obtener estimaciones minutales comparables con AERONET. Para MERRA-2, se utilizó el AOD a 500 nm para el cálculo de β , y los exponentes de Ångström entre 470 y 870 nm, asumiendo $\alpha_1 = \alpha_2$. En el caso de AERONET, se utilizó el AOD a 870 nm para calcular β , y los exponentes de Ångström se obtuvieron para longitudes de onda entre 440 y 675 nm (α_1), y 500 y 870 nm (α_2).

Para evaluar el desempeño, se utilizaron métricas clásicas como el sesgo relativo (rMBD), el error cuadrático medio relativo (rRMSD) y la desviación absoluta relativa (rMAD).

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presentan los resultados de las dispersiones entre las estimaciones del modelo REST2 (W/m^2) y las muestras de cielo claro detectadas en las mediciones del sitio.

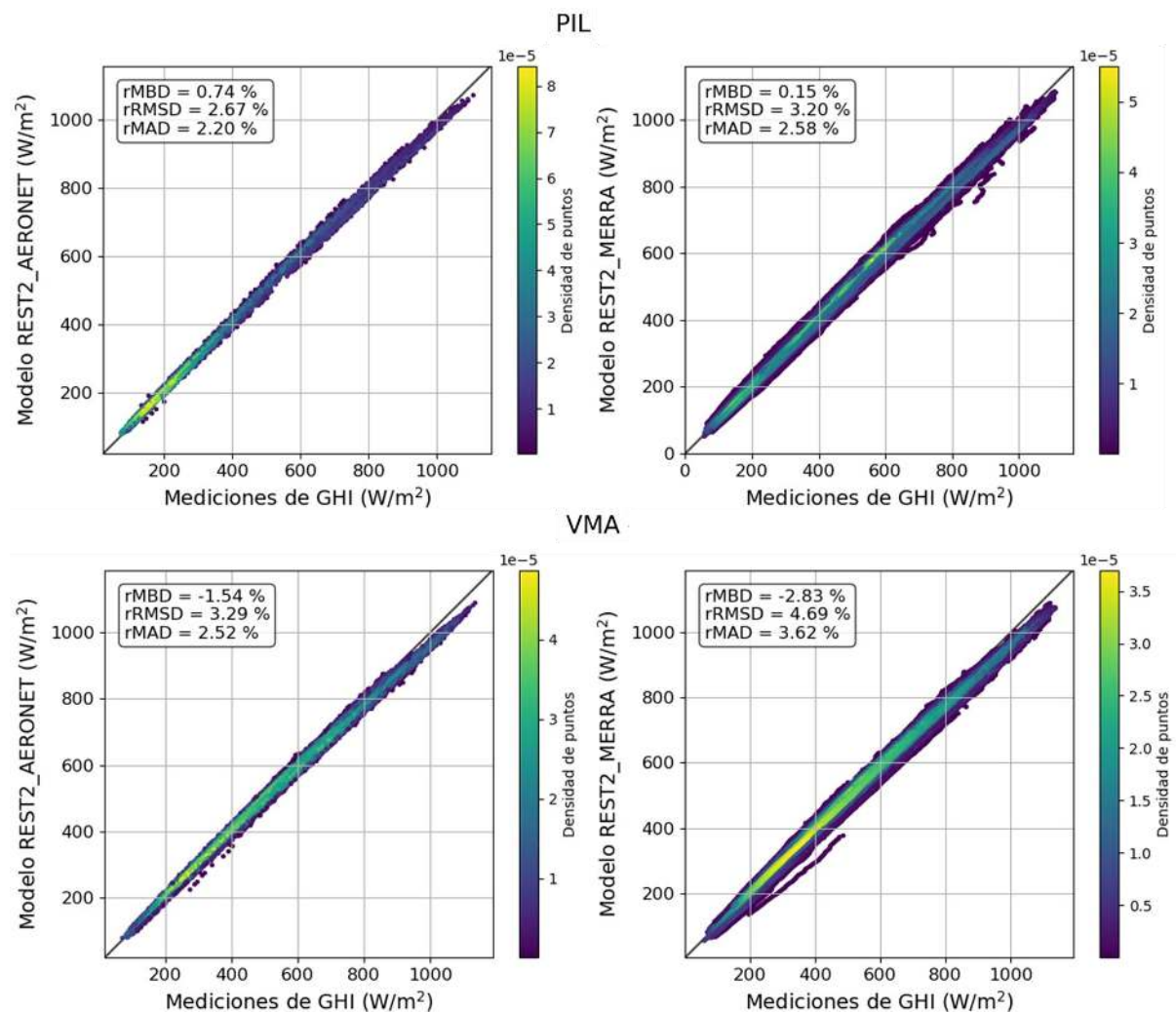


Figura 1: Desempeño del modelo REST2 en los sitios de PIL (arriba) y VMA (abajo) para distintas fuentes de información atmosférica; AERONET (izquierda) y MERRA (derecha)

En PIL, se obtuvieron los mejores indicadores de desempeño utilizando datos de AERONET, con un rMBD de 0,74%, rRMSD de 2,67% y rMAD de 2,20%. Con datos de MERRA, los resultados fueron de 0,15%, 3,20% y 2,58% para el rMBD, rRMSD y rMAD, respectivamente. En VMA, los mejores indicadores también se obtuvieron con datos de AERONET, con un rMBD de -1,54%, rRMSD de 3,29% y rMAD de 2,52%. Al utilizar datos de MERRA, los valores fueron de -2,83%, 4,69% y 3,62% para el rMBD, rRMSD y rMAD, respectivamente. A partir de los resultados obtenidos, se observa que el desempeño del modelo REST2 fue superior al alimentar el modelo utilizando mediciones de aerosoles de AERONET respecto de datos de reanálisis de MERRA-2, aunque en ambos casos el modelo presenta un buen desempeño. Este comportamiento es consistente con lo esperado, dado que AERONET es una red de medición de alta precisión, mientras que MERRA-2 es un producto de reanálisis global con menor resolución espacial y temporal. Por otro lado, el uso de MERRA-2 permite obtener estimaciones de irradiancia con métricas dentro de los rangos reportados en estudios previos para la región (Russo et al. 2022). Esto es particularmente relevante en sitios donde no se dispone de información local de la atmósfera, destacando a MERRA-2 como una alternativa viable para aplicaciones que requieren información de aerosoles de forma continua en el tiempo.

REFERENCIAS

- Ångström, A., 1929:** On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air. *Geogr. Ann.*, **11**, 156–166, <https://doi.org/10.1080/20014422.1929.11880498>.
- Gelaro, R., y Coauthors, 2017:** The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.
- Holben, B. N., y Coauthors, 1998:** AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66**, 1–16, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5).
- Reno, M. J., y C. W. Hansen, 2016:** Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements. *Renew. Energy*, **90**, 520–531, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.031>.
- Russo, P., A. Laguarda, G. Abal, e I. Piccioli, 2022:** Performance of the REST2 model for 1-minute clear-sky solar irradiance with MERRA-2 atmospheric inputs. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar 2022*, <https://doi.org/10.59627/cbens.2022.1100>.
- Gueymard, C., 2008:** REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation – Validation with a benchmark dataset. *Sol. Energy*, **82**, 272–285, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.008>.
- Levelt, P. F., van den Oord, G. H. J., Dobber, M. R., Malkki, A., Visser, H., Vries, J. de, Stammes, P., Lundell, J. O. V., y Saari, H., 2006:** The ozone monitoring instrument. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44**, 1093–1101, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333>.
- Sengupta, M., Y. Xie, A. Lopez, A. Habte, G. Maclaurin, y J. Shelby, 2018:** The National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **89**, 51–60, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003>.

ANÁLISIS DE CALIDAD DE DATOS MENSUALES DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN ESTACIONES COSTERAS ARGENTINAS

Valentina Rabanal¹, Silvina Righetti^{1,2}, Natalia Pessacg³
valenrabanal@gmail.com

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

² Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO, FCEyN-UBA)

³ Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales (IPEEC CONICET)

Palabras clave: Observaciones, valores atípicos, datos faltantes

1) INTRODUCCIÓN

Las áreas costeras de Argentina se extienden a lo largo de un amplio gradiente latitudinal, desde el estuario exterior del Río de la Plata hasta el extremo sur del país. A lo largo de estos 20 grados de latitud, las condiciones climáticas varían notablemente, desde climas húmedos en el norte hasta ambientes áridos en el sur, lo que configura una gran diversidad de características ambientales (Pessacg, 2022).

En el contexto de calentamiento global, resulta fundamental contar con una caracterización climática precisa de estos entornos costeros. Para ello, se recopilieron datos observados de temperatura y precipitación proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), abarcando un período de 60 años. El objetivo principal de este trabajo es presentar y discutir el análisis de calidad realizado sobre estas observaciones climáticas, como paso previo indispensable para su uso en estudios de tendencias, variabilidad y cambio climático en las zonas costeras del país.

2) METODOLOGÍA

Se analizaron las series mensuales de temperatura y precipitación acumulada, desde 1961 a 2020, de 22 estaciones provistas por el SMN. En este trabajo se identificaron en primer lugar los datos faltantes en las series mensuales de cada variable. En el caso que alguna estación presentara extensos periodos sin datos, superando el umbral del 30%, se descartó automáticamente siguiendo las recomendaciones de Penalba et al. (2014).

Por otro lado, se identificaron los outliers (valores atípicos), considerando aquellos valores que fueran mayores o iguales a 2 desvíos, en el caso de temperatura media mensual, y mayores o iguales a 4 desvíos, para los acumulados mensuales de precipitación. Una vez identificados los outliers, se buscó analizar la veracidad de los mismos a partir de distintas técnicas. Si se concluía que el dato era un valor posible, se lo conservó, y si se determinaba que era un valor erróneo (por ejemplo, por un mal tipeo del número), se lo descartó.

Para analizar la validez de un outlier X_o , en primera instancia, se localizó la estación más cercana (radio <200 km) y se comparó X_o con el valor de ese mes en la estación vecina. Para los datos de temperatura, si en ambas estaciones el comportamiento del registro mensual era similar (es decir, ambos valores por encima o por debajo de sus propias medias), el outlier X_o se consideró un valor posible y se lo mantuvo en la serie, en caso contrario se lo descartó. En el caso de la precipitación, si en ambas estaciones sus acumulados se encontraban por encima de sus propias medias, el dato se conservó, en caso contrario se lo deseó.

Para los datos de precipitación, donde no existe una estación vecina (o la misma no tuviera dato), se observaron los acumulados diarios de ese mes, para así detectar los días de mayor contribución. Por otra parte, para la temperatura, se graficaron las series medias diarias u horarias para analizar el comportamiento durante todo el mes. En el caso que una serie de

temperatura media diaria contara con más de 4 días consecutivos con valores mayores al outlier positivo o menores al outlier negativo, no se consideró al valor mensual como sospechoso. Para casos puntuales de outliers recientes de precipitación, los récords se confirmaron o rechazaron a partir de información de medios o notas técnicas publicadas.

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar los datos faltantes de las series, las estaciones de Villa Gesell y Puerto Santa Cruz se descartaron automáticamente. Los porcentajes de faltantes fueron de 53% y 43% para la temperatura y precipitación de Villa Gesell, mientras que para la localidad santacruceña los datos faltantes alcanzaron el 68% y 72%, respectivamente. Luego de este descarte inicial, se siguió trabajando con 20 estaciones.

En las Figuras 1 a) y b) se muestran la cantidad de datos disponibles para cada estación de temperatura y precipitación, respectivamente. Se puede apreciar que la mayor cantidad de datos faltantes se encuentran en los primeros años de las series para ambas variables, mientras que para fin del período prácticamente todas las estaciones analizadas presentan observaciones. Las series que presentan un periodo blanco extenso al comienzo se deben a que la fecha de inicio de mediciones es posterior a 1961. Esto se puede observar en San Julián (1963), Tres Arroyos (1965), La Plata (1967), Viedma (1970), Benito Juárez (1981), Las Flores (1988) y Puerto Madryn (1991).

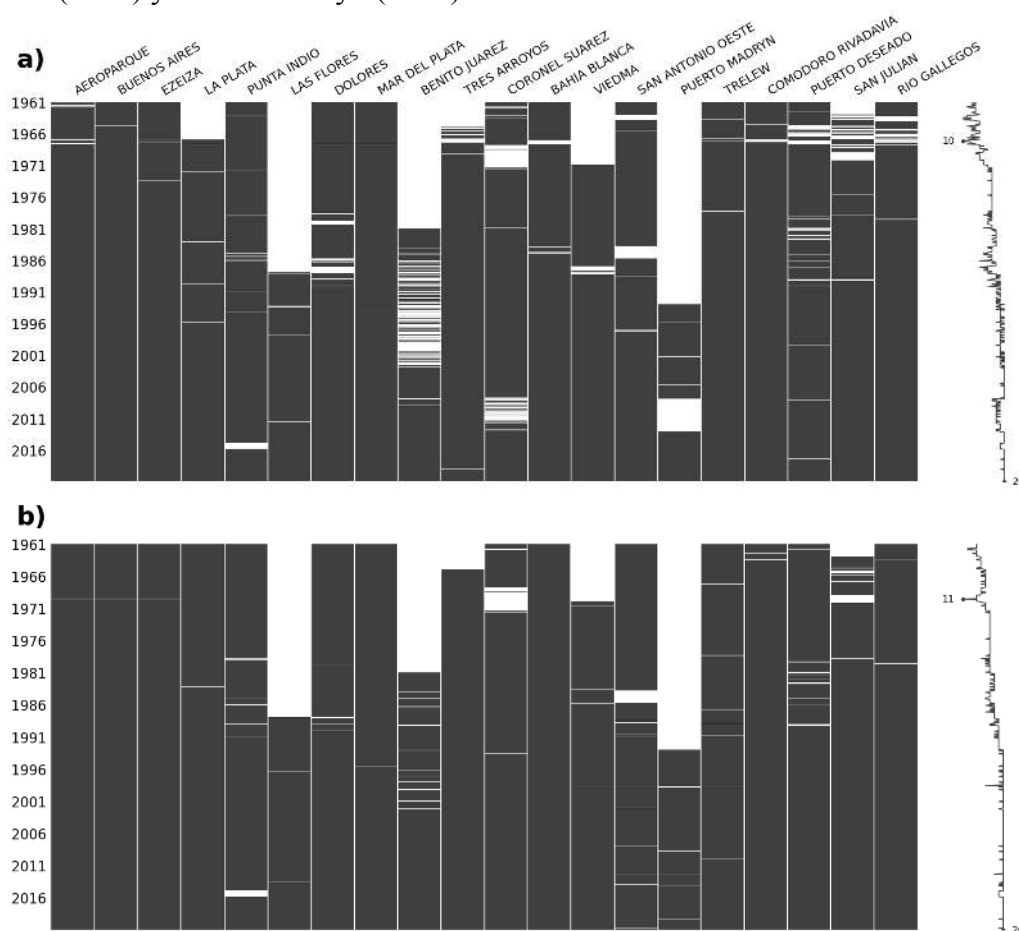


Figura 1: Cantidad de datos de a) temperatura media mensual y b) acumulados mensuales de precipitación. En el eje vertical se encuentran los meses, desde enero 1961 hasta diciembre 2020, mientras que en las columnas se presenta cada una de las estaciones. Las zonas grises indican la presencia de un dato y el blanco refiere a la ausencia. El gráfico de línea continua a la derecha indica la cantidad de datos para cada mes, integrando todas las estaciones.

Al comparar las Figuras 1 a y b, se ve que los mayores faltantes se encuentran en las series de temperatura media mensual. Sin embargo, la cantidad de datos faltantes de precipitación no incluye a los meses incompletos (es decir, aquellos en que no se midió todos los días). Un caso llamativo es el de Benito Juárez, donde en la Figura 1 a se observa una gran cantidad de datos faltantes (29%), mientras que en la Figura 1 b no se aprecia este comportamiento (menos del 5% de faltantes). No obstante, al analizar la cantidad de meses incompletos, esto totaliza el 32% de las observaciones registradas. Quedará para un análisis posterior determinar si se descarta o no a esta estación.

Respecto a los outliers, se identificaron 39 casos para temperatura y 40 para precipitación (Tabla 1). Se observa que 17 estaciones registraron al menos un outlier de temperatura, con San Antonio Oeste y San Julián como las localidades con mayor cantidad de valores que superan el criterio utilizado (6 y 5, respectivamente). En el caso de la precipitación, son 2 las estaciones que tienen más de 5 outliers, Puerto Madryn (6) y Trelew (8).

Luego de aplicar las técnicas descriptas en la metodología, se determinó que los 79 casos analizados eran posibles y no se los descartó de las series de estudio. Los datos finales que se considerarán para la caracterización climática de los entornos costeros (Tabla 1) abarcan más del 95% de los datos de precipitación, mientras que para temperatura se utilizarán más del 90% de los datos en todas las estaciones, excepto en Puerto Madryn, Benito Juárez y Coronel Suárez, donde los porcentajes de datos preservados es inferior.

En síntesis, este análisis permitió evaluar la calidad de las series climáticas disponibles, garantizando una base de datos robusta y confiable que servirá para la caracterización climática de los entornos costeros en estudios posteriores.

ESTACIÓN	TMP		PP		ESTACIÓN	TMP		PP	
	OUT	DAT (%)	OUT	DAT (%)		OUT	DAT (%)	OUT	DAT (%)
AEROPARQUE	1	720 (99)	0	720 (99)	CNEL. SUAREZ	1	720 (87)	0	720 (96)
BUENOS AIRES	1	720 (99)	0	720 (99)	B. BLANCA	1	720 (98)	3	720 (100)
EZEIZA	1	720 (99)	1	720 (99)	S. A. OESTE	6	682 (95)	5	686 (95)
LA PLATA	3	648 (99)	0	720 (99)	VIEDMA	3	600 (94)	2	612 (96)
PUNTA INDIO	1	720 (96)	0	720 (97)	PTO. MADRYN	2	336 (79)	6	360 (96)
DOLORES	0	720 (95)	0	720 (99)	TRELEW	2	720 (99)	8	720 (99)
LAS FLORES	1	396 (97)	1	408 (97)	C. RIVADAVIA	4	720 (99)	5	720 (99)
BENITO JUAREZ	0	480 (71)	0	480 (95)	PTO. DESEADO	1	720 (94)	5	720 (97)
MAR DEL PLATA	3	720 (99)	1	720 (99)	SAN JULIÁN	5	696 (90)	3	696 (94)
TRES ARROYOS	0	684 (96)	0	672 (98)	RÍO GALLEGOS	3	720 (96)	0	720 (99)

Tabla 1: Cantidad de outliers (OUT) y de datos (DAT) (y porcentajes) por estación.

REFERENCIAS

Penalba, O. C., J. A. Rivera, Pántano V. C. (2014). The CLARIS LPB database: constructing a long-term daily hydro-meteorological dataset for La Plata Basin, Southern South America. 1, 20–29, <https://doi.org/10.1002/GDJ3.7>

Pessacg, N., Blázquez, J., Lancelotti, J., Solman, S. (2022). Climate Changes in Coastal Areas of Patagonia: Observed Trends and Future Projections. In: Helbling, E.W., Narvarte, M.A., González, R.A., Villafañe, V.E. (eds) Global Change in Atlantic Coastal Patagonian Ecosystems. Natural and Social Sciences of Patagonia. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86676-1_2

VARIABILIDAD DEL ÍNDICE DE CONFORT TÉRMICO UNIVERSAL UTCI: ESTUDIO EXPLORATORIO EN 3 CIUDADES ARGENTINAS

Esteban Zuccaro¹, Mariana Barrucand^{2,3}, Agustina López Ramírez^{2,3}
ezuccaro@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO FCEN UBA)

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras clave: estrés térmico - verano - viento

1) INTRODUCCIÓN

El UTCI es un índice de confort térmico que resume el efecto de la temperatura ambiental, la velocidad del viento, la humedad y los flujos radiativos de onda larga y onda corta sobre el cuerpo humano. Fue desarrollado a modo de indicador universal, lo cual lo convierte en una herramienta versátil para distintos tipos de clima, aplicaciones biometeorológicas e incluso estudios epidemiológicos. Este trabajo analiza la climatología del UTCI en los meses de verano (diciembre-enero-febrero) de tres ciudades argentinas (Buenos Aires, Rosario y Córdoba) durante el período 1981-2020 en distintas horas del día, considerando tres preguntas principales: a) ¿Cómo ha variado el UTCI en las últimas décadas? b) ¿Difiere la variabilidad del índice de confort térmico respecto de la variación de la temperatura en sí misma? c) ¿Podemos identificar cambios en alguna variable meteorológica que esté influyendo en la variabilidad del UTCI, especialmente bajo condiciones de estrés severo?

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos horarios de temperatura, humedad relativa, intensidad y dirección del viento y nubosidad provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), correspondientes a la estación OCBA (Buenos Aires), Rosario (Santa Fe) y Córdoba AERO (Córdoba) en 5 horas diurnas (6, 9, 12, 15 y 18 hora local) del período 1981-2020. A partir de esta información, y luego de un análisis de consistencia de datos, se calculó el índice climático térmico universal UTCI utilizando el programa RayMan pro (Matzarakis y otros, 2010).

Se analizó la variabilidad del UTCI a lo largo de las 4 décadas del período de estudio, identificando las principales medidas de posición de los datos (media, mediana, intervalo intercuartil y extremos). Luego se analizó su variabilidad interanual, en relación a la variabilidad de la temperatura del aire en cada una de las horas y localidades estudiadas. Para ello se calcularon las tendencias de las series de diferencias entre ambas variables y se evaluó su significancia a través del test de Mann-Kendall.

Finalmente, se exploraron cambios en la dirección del viento (variable que no es considerada para el cálculo del UTCI) que pudieran explicar las tendencias observadas en el índice.

RESULTADOS

Variabilidad del UTCI de verano

El UTCI, al igual que la temperatura, exhibe un ciclo diurno marcado (Figura 1). A las 15 hs., las tres localidades registran más del 75% de los días de verano con condiciones de estrés moderado o severo. En Buenos Aires y Rosario, en particular, se registran condiciones de estrés moderado en el 50% de los casos (o incluso porcentajes superiores) ya desde las 9 hs.

Al analizar la variabilidad a lo largo de las distintas décadas bajo estudio, se destaca una baja en los valores del UTCI durante el período 1991-2000, y luego un aumento sostenido de los valores del índice en las décadas subsiguientes, en todas las horas analizadas. Esto se refleja especialmente en la ciudad de Buenos Aires y, en menor medida, en Rosario

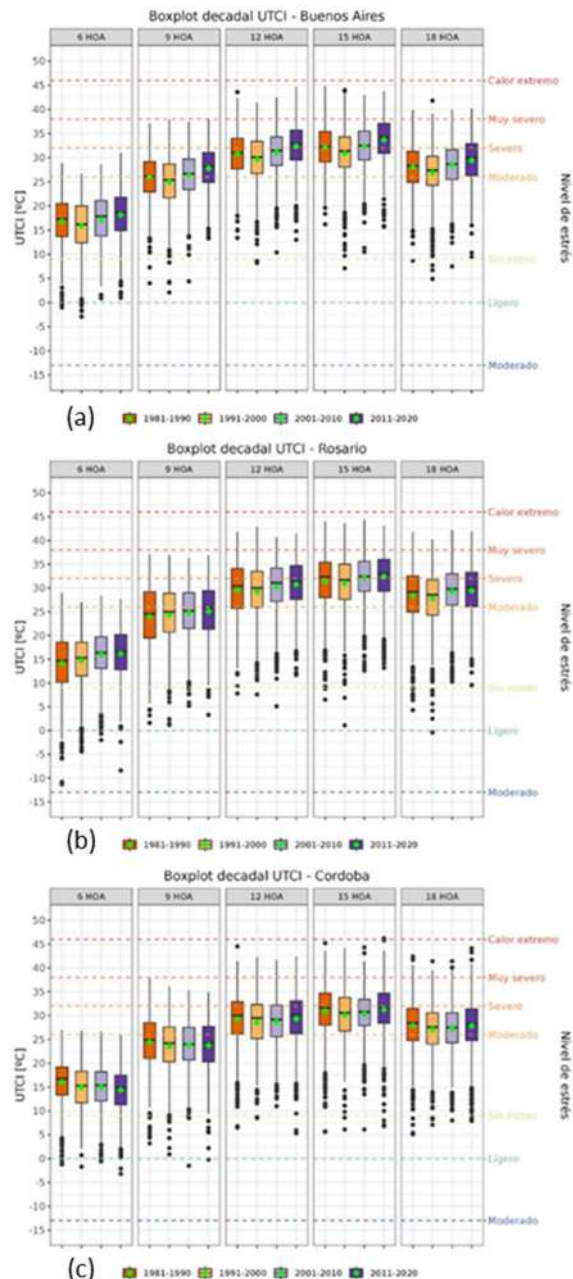


Figura 1: Valores medios (rombos), mediana, cuartiles y extremos del UTCI (en diagrama de caja) para distintas horas y décadas del período 1981-2020 a) Buenos Aires b) Rosario c) Córdoba

Complementariamente se calcularon las tendencias del UTCI en período total, encontrándose tendencias positivas significativas en todas las horas analizadas (no mostrado). La estación meteorológica de Córdoba refleja otro tipo de comportamiento, en el que se destaca una disminución de los valores de UTCI a la hora 6.

Cambios del UTCI en relación a la temperatura del aire

El análisis de las diferencias entre el UTCI y la temperatura del aire evidenció un cambio de signo entre las 6 y las 9 hs. El UTCI resultó menor a la temperatura del aire a las 6 hs, pero mayor a las 9 hs y en el resto de las horas analizadas. Esto indica que las personas experimentan un cambio en la sensación térmica mucho mayor al cambio de la temperatura del aire en las primeras horas de la mañana. En lo que respecta a la variabilidad de estas diferencias a lo largo del tiempo, en términos generales se encontraron tendencias positivas y significativas en Buenos Aires y Rosario. Esto implica una reducción, en términos absolutos, en las diferencias entre el UTCI y la temperatura del aire a las 6 hs, y un aumento en el resto de las horas analizadas. La figura 2 muestra estas características para la ciudad de Buenos Aires para las 6 y las 15 hs. La ciudad de Córdoba, en cambio, se destaca por tener una tendencia negativa de las diferencias a las 6 hs, ampliándose la brecha con la temperatura del aire en los últimos años del período.

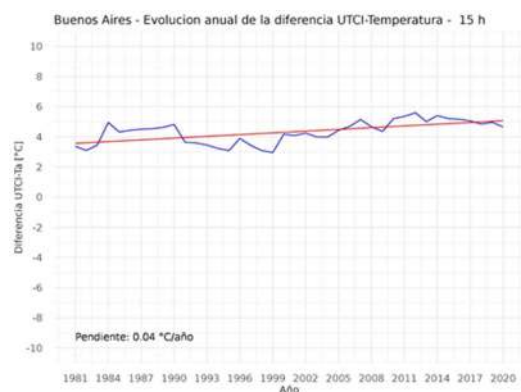
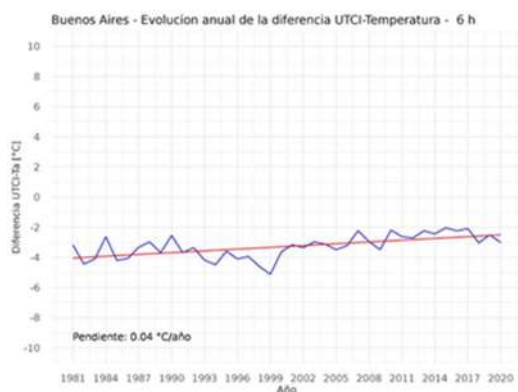


Figura 2: Variabilidad interanual de la serie diferencia UTCI-Temperatura del aire de la ciudad de Buenos Aires para las 6 hs (a) y las 15 hs (b). Se indica línea de tendencia y su respectiva pendiente en cada caso.

Cambios del UTCI y su asociación con cambios en la dirección del viento

Se analizaron las direcciones de viento prevalentes en cada una de las localidades para los meses de verano, y se las comparó con las registradas bajo condiciones de estrés severo.

Al destacarse una fuerte disminución de la componente sur del viento en estos casos, se analizó la variabilidad de la ocurrencia de esta dirección del viento a lo largo del tiempo. La ciudad de Buenos Aires registró una disminución significativa de la componente sur en la mayoría de las horas estudiadas, siendo esto consistente físicamente con el aumento del UTCI registrado en la localidad. La figura 3 muestra, a modo de ejemplo, la variabilidad de la frecuencia de la componente sur del viento para la ciudad de Buenos Aires a las 15 hs.



Figura 3: Frecuencia de ocurrencia de la componente sur del viento en la Ciudad de Buenos Aires a las 15 hs. Período: 1981-2020. Recta de regresión (línea roja) Pendiente -0.226 días/año.

3) CONCLUSIONES

En las últimas décadas se ha incrementado la frecuencia de días con estrés térmico moderado y severo en la Ciudad de Buenos Aires y Rosario, en distintas horas del día. La tasa de cambio del UTCI es mayor que la de la temperatura del aire en sí misma. Al considerar posibles factores que hayan contribuido a esta variabilidad, se encontró una disminución de la componente sur del viento en la Ciudad de Buenos Aires que es físicamente consistente con los cambios encontrados en la sensación térmica.

AGRADECIMIENTOS: Esta investigación fue financiada por los proyectos PICT2019-2019-02933, CONICET PIP 0333 (2021-2023), UBACyT 20020220200111BA

REFERENCIAS

Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2010: Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. Int. J. Biometeorol. 54, 131–139

VALIDACIÓN DE ESTIMACIONES SATELITALES DE TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA EN EL SUR DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Adriana Basualdo, Félix Carrasco Galleguillos, Cam Cordoba Fradinger¹
adrianabbasualdo@gmail.com

¹ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: temperatura mínima, estimación satelital, agricultura.

1) INTRODUCCIÓN

Las heladas que mayor daño causan en la producción agropecuaria no son las que se producen durante el período normal de ocurrencia de este fenómeno, sino las que aparecen fuera del mismo: heladas tempranas y tardías. Debido a los perjuicios que eventualmente causan, existe gran interés de los productores agropecuarios por un seguro capaz de compensar las pérdidas.

El inconveniente es la falta de densidad geográfica adecuada de la red de estaciones meteorológicas oficiales, que no permite representar las temperaturas extremas locales.

Se desarrolló un método para estimar la temperatura mínima diaria a partir de un producto satelital de temperatura de superficie de frecuencia horaria. Los resultados se validaron para el sur de la provincia de Buenos Aires, donde las heladas tempranas o tardías causan importantes daños en los cultivos extensivos, especialmente en trigo y cebada.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Área de estudio: Corresponde a los 46 partidos de la provincia de Buenos Aires al sur del paralelo 36°S. Según las estadísticas oficiales publicadas por la Dirección de Estimaciones Agrícolas de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (<https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/>), en las últimas 5 campañas el promedio de superficie sembrada de trigo en estos 46 partidos fue de 1.457.857 ha, mientras que la de cebada fue de 1.112.895 ha. Como se desea hacer foco en las temperaturas mínimas fuera del periodo normal de heladas, el estudio consideró los meses de octubre a abril del periodo 2018-2024.

Datos satelitales: Se utilizó el producto satelital Land Surface Temperature (LST), producido por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en función de imágenes suministradas por el satélite GOES-R. Este producto ofrece cada hora una estimación de la temperatura de superficie (NOAA NESDIS STAR, 2020). Esta resolución temporal es esencial para poder estimar la temperatura mínima del día. La resolución espacial del producto LST es de 10km. Productos similares con menor tamaño de pixel no proveen la frecuencia temporal requerida para la estimación de temperatura mínima diaria.

Datos de estaciones: Se consideraron series de temperatura mínima diaria correspondiente a las 16 estaciones meteorológicas convencionales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en el área de estudio. La ubicación de las estaciones se puede ver en el mapa de la Figura 1.

Determinación de temperatura mínima diaria: A partir del producto LST horario se consideró el valor mínimo de LST entre las 00Z y las 12Z, siempre que estuvieran disponibles al menos 4 de los 13 valores de LST de ese intervalo. Se eligió esta cantidad mínima en función del error cuadrático medio hallado para días con diferente cantidad de valores de LST horarios

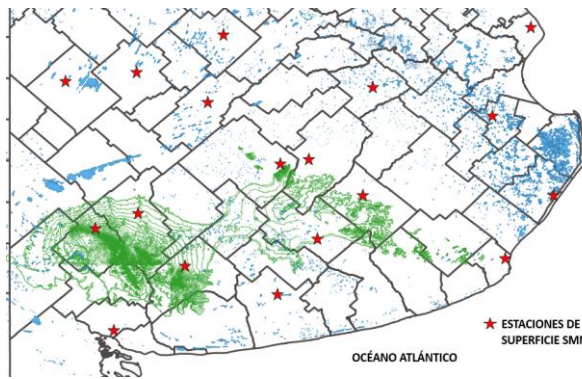


Figura 1. Área de estudio y ubicación de estaciones

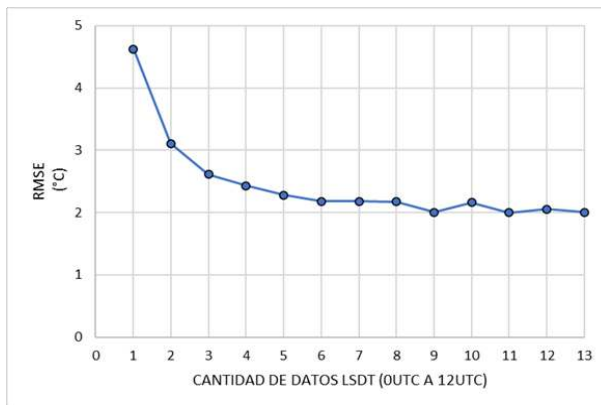


Figura 2. Disminución del error de la estimación con la cantidad de imágenes LST disponibles (00Z-12Z)

disponibles. Considerando todas las estaciones y todos los días analizados, se vio que el error cuadrático medio (RMSE) de la estimación se estabiliza en 2°C a partir de 4 valores de LST disponibles (Figura 2).

Validación: Consistió en hallar la correspondencia entre pares de datos “medido en la estación” vs. “estimado en el pixel”, para todos los casos en que esto fue posible, entre el 01/01/2018 y el 30/04/2024. Para cada estación se utilizaron estos pares de datos para obtener una regresión lineal:

$$Tmin_LST = A * Tmin_SMN + B$$

En la ecuación, Tmin_SMN es la temperatura mínima medida en la estación y Tmin_LST es la temperatura mínima estimada para el mismo día en el pixel correspondiente. El ajuste entre las estimaciones y las mediciones resulta óptimo cuando A se acerca a 1 y B se acerca a 0, además de que el coeficiente de correlación R sea lo más cercano a 1 posible.

3) RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

El Cuadro 1 muestra los parámetros asociados a las regresiones lineales obtenidas entre los valores de temperatura mínima medidos en las estaciones y las estimaciones satelitales en los pixeles en los que se ubica cada estación. También se muestra el coeficiente de correlación (R), la varianza explicada (R2) y el error cuadrático medio (RMSE) de la predicción. Todos los R resultaron significativos al 99.5%.

Solo para Mar del Plata y Villa Gesell se obtuvieron coeficiente de correlación menores que 0.93 en la regresión. Todas pendientes son muy cercanas a 1, con excepción de las dos estaciones mencionadas, las únicas para las cuales el error en la predicción supera los 2°C y la ordenada al origen es mayor que 2. Queda claro que para estaciones costeras esta estimación satelital de temperaturas mínimas es menos eficiente: la cercanía al mar se suma a la mayor cantidad de nubosidad o nieblas, lo que se evidencia en la menor cantidad de puntos disponibles para determinar la regresión lineal (N).

Se tienen además dos estaciones para las cuales el valor absoluto de la ordenada al origen es mayor que 1. En Tandil (B = 1.076), la temperatura mínima del pixel es sistemáticamente mayor que la de la estación. Si bien la estación se halla en un aeródromo (ámbito rural), la ciudad se ha extendido en esa dirección, aumentando su influencia dentro del pixel (isla de calor). Contrariamente, en Trenque Lauquen (B = -1.677), la temperatura mínima del área del píxel es sistemáticamente menor que la de la estación ubicada en algún punto dentro del mismo.

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	REGRESIÓN LINEAL					
	N	A	B (°C)	R	R2	RMSE (°C)
AZUL	876	0.972	0.503	0.940	88.4%	1.7
B. BLANCA	880	0.976	0.798	0.947	89.6%	1.8
B. JUAREZ	841	0.964	0.661	0.943	89.0%	1.7
BOLÍVAR	872	1.017	0.307	0.935	87.4%	1.9
CNEL. PRINGLES	856	0.966	0.425	0.951	90.5%	1.5
CNEL. SUAREZ	876	1.005	-0.018	0.953	90.9%	1.6
DOLORES	868	0.944	0.440	0.935	87.4%	1.8
LAS FLORES	869	0.940	-0.052	0.936	87.6%	1.9
MAR DEL PLATA	570	0.868	2.560	0.824	67.9%	3.2
OLAVARRÍA	865	0.999	0.374	0.945	89.3%	1.6
PEHUAJÓ	893	1.035	-0.690	0.949	90.0%	1.6
PIGUE	872	1.012	0.516	0.947	89.6%	1.7
TANDIL	831	0.975	1.076	0.949	90.1%	1.8
T. LAUQUEN	721	1.091	-1.913	0.940	88.3%	1.8
TRES ARROYOS	841	1.025	-0.938	0.952	90.6%	1.7
V. GESELL	294	0.737	9.053	0.757	57.3%	7.5

Cuadro 1: Comparación de temperaturas mínimas medidas en estaciones meteorológicas y temperaturas mínimas estimadas en los pixeles que las contienen.

En este caso la estación está inmersa en el área urbana, mientras que el resto del pixel corresponde a áreas rurales. En la Figura 3 se pueden ver las ubicaciones de las estaciones Tandil y Trenque Lauquen y sus alrededores. La ubicación de las estaciones meteorológicas está señalada con círculos rojos.

Conclusión: La correlación entre la temperatura medida en la estación en abrigo meteorológico (2m) con la estimada a partir del producto LST horario (superficie) es muy significativa en el área analizada, aunque el ajuste es menor para áreas costeras. Si bien se trata de un producto óptico, es decir, no disponible en presencia de nubosidad, se verificó que raramente esto ocurre en noches frías.



Figura 3: Ubicación de las estaciones meteorológicas Tandil (izquierda) y Trenque Lauquen (derecha) y recorte de imagen satelital del entorno de cada una de ellas.

REFERENCIAS

NOAA NESDIS STAR, 2020: GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document For Land Surface Temperature. Center for Satellite Applications and Research <https://www.goes-r.gov/products/baseline-LST.html>

GENERACIÓN DE SERIES HISTÓRICAS DE TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA EN EL SUR DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Félix Carrasco Galleguillos y Adriana Basualdo

felix.marcial@gmail.com

Palabras clave: temperatura mínima, estimación satelital, agricultura.

1) INTRODUCCIÓN

Las heladas que mayor daño causan no son las que se producen durante el período normal de ocurrencia de este fenómeno, sino las que aparecen fuera del mismo. Debido a los daños que eventualmente causan, existe gran interés por estudiar el comportamiento histórico y su alcance en zonas productivas. En este sentido, las estimaciones satelitales de temperatura superficial permiten abarcar zonas de monitoreo que no cuentan con estaciones. Sin embargo aparecen algunos inconvenientes con este tipo de productos: i) En satélites de órbita polar, con buena resolución espacial depende mucho la hora en la que pasa por la región, ya que puede estar alejado. Algo que satélites geoestacionarios como GOES compensa. ii) El registro histórico de los datos GOES abarca datos desde 2018, por lo que estudios históricos para analizar cambios en el comportamiento se dificultan.

En este trabajo se plantea una metodología para generar una serie histórica en un sector del sur de la provincia de Buenos Aires a partir de los resultados encontrados en la comparación de estaciones meteorológicas y los datos de temperatura superficial de GOES.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El área de estudio elegida corresponde a los partidos de la provincia de Buenos Aires con mayor superficie al sur del paralelo 36°S. Se trata de los 46 partidos que se pueden ver en color verde en la Figura 1, a los cuales también se colocan las estaciones y los píxeles considerados.

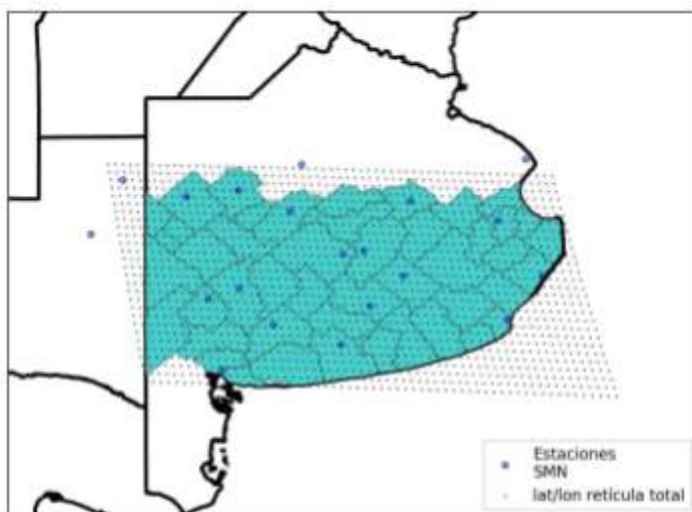


Figura 1: Área de estudio del trabajo, donde en puntos azules están las estaciones meteorológicas y los puntos negros chicos son los píxeles de la estimación satelital.

Dadas las excelentes relaciones lineales halladas (Basualdo et al, 2025), es posible reconstruir series históricas de temperatura mínima en cada píxel en función de las medidas en la estación meteorológica más cercana. Así, se procede a la generación de series de temperatura mínima diaria en cada píxel entre 01/01/2004 y el 31/12/2023 para los meses de octubre hasta abril (20 años). Estas series estarán conformadas por estimaciones satelitales (posteriores a 2018) y por valores reconstruidos en función de la regresión hallada

entre el píxel y la estación más cercana (entre 2004 y 2017) y también en aquellos lugares donde hubo datos faltantes satelitales, en los cuales se reemplaza por la estimación a partir de la estación más cercana.

Los datos utilizados en este trabajo corresponden al producto satelital Land Surface Temperature (LST), producido por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en función de imágenes suministradas por el satélite GOES-R (NOAA NESDIS STAR, 2020). La resolución espacial es de 10km y la temporal es de una hora, esencial para estimar la temperatura mínima del día. Además se consideran datos de temperatura mínima diaria registrados en las 16 estaciones meteorológicas convencionales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en el área de estudio. El trabajo de Basualdo et al, (2025) encuentra una relación lineal entre las estimaciones satelitales y el dato de temperatura mínima con buenas correlaciones dado por la fórmula:

$$Tmin_LST = A * Tmin_SMN + B$$

A partir de esto, para aquellos años donde no hay estimación satelital, pero sí medición de la estación, se utiliza para cada píxel del área de estudio los valores de A y B de la estación más cercana para reconstruir su valor. Además para que no queden faltantes se llega hasta la cuarta estación más cercana al píxel para reconstruir dicho valor.

3) RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

A continuación se muestran las correlaciones y la distancia de cada píxel a su estación más cercana, donde podemos ver mayoritariamente en la zona valores sobre 0.9 incluso para píxeles donde la distancia a su estación más cercana supera los 75 km (Figura 2).

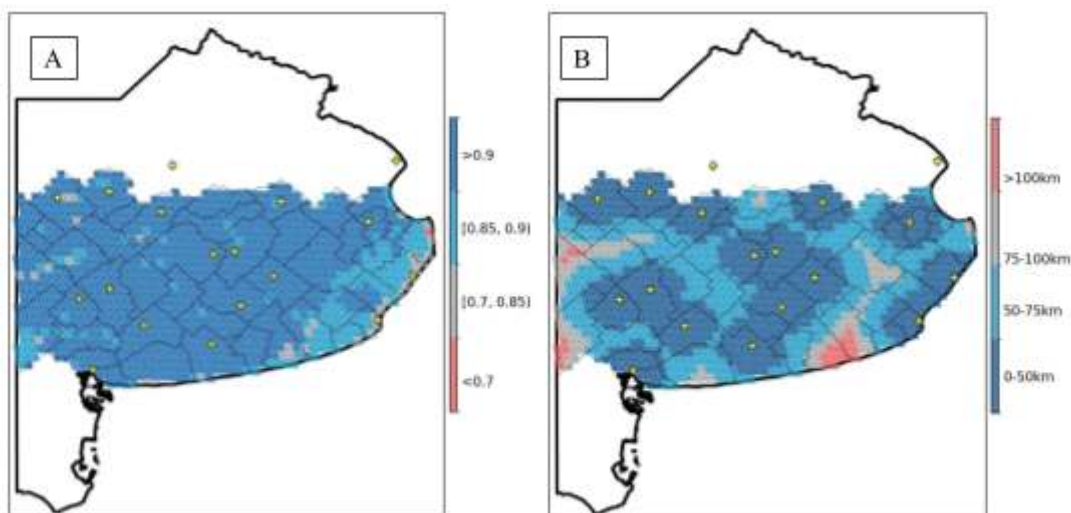


Figura 2: Mapas con las estaciones meteorológicas (cruz amarilla) y A) Coeficiente de correlación para cada píxel: estimación satelital vs. medición en estación; B) Distancia del píxel a su estación más cercana.

Para hacer una revisión de los resultados se muestra el gráfico de boxplot (Figura 3) de los resultados de Tmin en la estación Azul y también el de la serie reconstruida en el píxel más cercano a Azul.

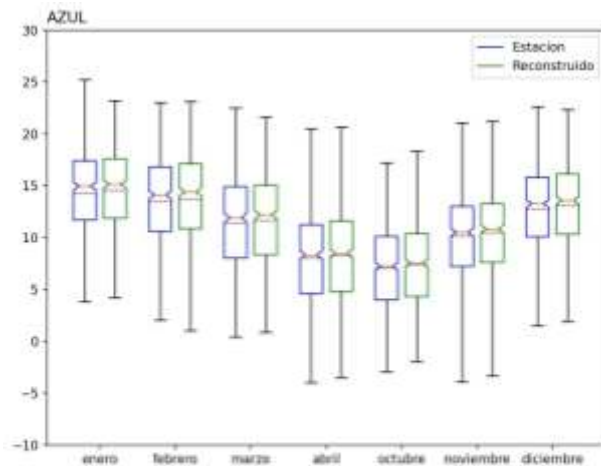


Figura 3: Boxplot para los datos de la estación Azul del SMN (en color azul) y los datos del pixel más cercano a la estación Azul reconstruido. Se consideran datos entre 2003 a 2017.

Donde se pueden apreciar pocas diferencias entre ambas distribuciones de datos para cada uno de los meses considerados.

Por último, aprovechando que ahora se tiene un registro de 20 años en la zona, utilizamos los datos de temperatura mínima reconstruida para calcular la frecuencia de heladas agronómicas ($T_{min} < 3^{\circ}\text{C}$) para los distintos meses. En este caso la Figura 4 muestra dicha frecuencia para la primera y segunda quincena del mes de octubre. En este caso, se colocan los valores de frecuencia absoluta y relativa.

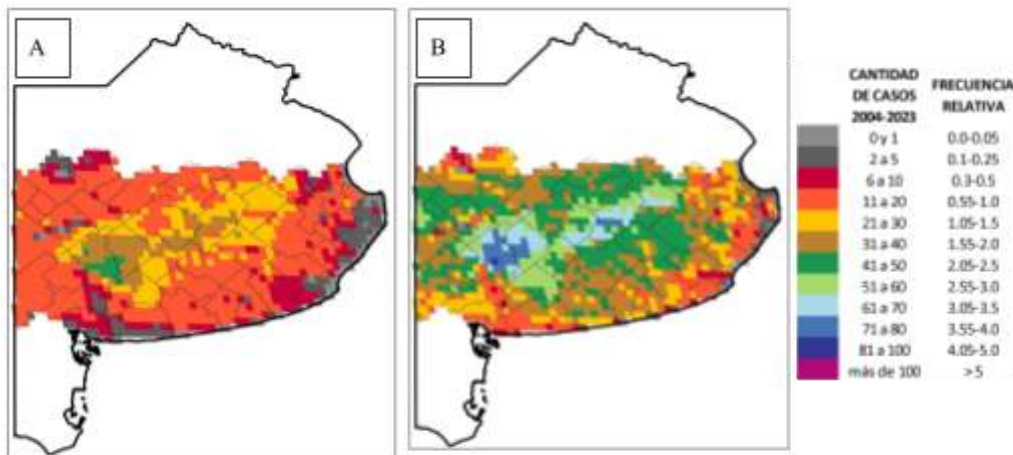


Figura 4: Mapas de frecuencia de heladas agronómicas ($T_{min} < 3^{\circ}\text{C}$) en el área de estudio para A) 1-15 de octubre y B) 16-31 de octubre.

Como conclusión, fue posible generar un set de datos con distribución espacial a partir de la relación entre los datos de temperatura mínima medida en las estaciones y los datos estimados por el satélite GOES-R en la región. Con esta serie histórica es posible estimar las frecuencias de heladas agronómicas, un dato relevante a la hora de hacer evaluaciones de posibles impactos y cambios en el tiempo y también aplicaciones para seguros de cobertura por heladas.

REFERENCIAS

Adriana Basualdo, Félix Carrasco Galleguillos, Cam Cordoba Fradinger, 2025: Validación de estimaciones satelitales de temperatura mínima diaria en el sur de la provincia de Buenos Aires. Resumen Congremet 2025.

NOAA NESDIS STAR, 2020: GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document For Land Surface Temperature. Center for Satellite Applications and Research <https://www.goes-r.gov/products/baseline-LST.html>

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA SERIE PLUVIOGRÁFICA DE JUJUY 1987-2022

Karina Flores
kflores@smn.gob.ar

Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: pluviografía, tendencia.

1) INTRODUCCIÓN

La precipitación medida en períodos inferiores al diario responde a una demanda creciente de información en alta resolución. Más aún, contar con series históricas que abarquen décadas de estas mediciones también es altamente valorado e involucra mayores esfuerzos que se enmarcan en proyectos de rescate de datos históricos. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) cuenta con un gran volumen de esta información. La digitalización y, posteriormente, caracterización y verificación de estas series históricas es una herramienta que permite a la ciencia monitorear la variabilidad climática y, a los tomadores de decisión, diseñar infraestructuras hidrológicas y desarrollar políticas de mitigación y adaptación a eventos extremos.

La estación meteorológica Dr. Augusto M. Romain (Jujuy Un.) se encuentra en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Jujuy. Ubicada en la región del Noroeste Argentino, las precipitaciones son favorecidas en verano, siendo escasas o nulas durante el invierno (SMN, 2024). La precipitación media del verano (1991-2020) supera los 400 mm, siendo máxima en enero (191.5 mm).

Los objetivos del presente trabajo son caracterizar estadísticamente la serie de datos pluviográficos de la estación, y analizar las tendencias en la frecuencia de eventos extremos y en los máximos anuales de precipitación acumulada en distintos intervalos de tiempo.

2) METODOLOGÍA

Las fajas pluviográficas fueron digitalizadas con recursos aportados por el grupo de trabajo de la Universidad Nacional del Litoral a través del concurso: Fondos Complementarios para la Investigación con Impacto en el Territorio Argentino (2022), en relación con el trabajo “Elaboración de curvas IDF en región centro-noreste de Argentina basadas en datos de precipitación de productos satelitales”, financiado por la Fundación Williams⁽¹⁾. La digitalización de las fajas pluviográficas se realizó con la metodología desarrollada en el SMN (Flores, 2025) para obtener los datos de precipitación acumulada cada 5 minutos. Se analizaron 3202 fajas pluviográficas, que datan desde agosto de 1987 hasta diciembre de 2022. A partir de la serie de 5 minutos se calcularon, para cada faja, las series de máximos de precipitación en intervalos de 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 180, 240, 360, 720, 960 y 1440 minutos. Además, se cuenta con la serie de precipitación diaria del pluviómetro de la estación, la cual se acumula entre las 12Z de cada día (serie *pvm*). Además, se calculó la serie pluviográfica de precipitación acumulada por día pluviométrico, con el fin de computar la cantidad de datos faltantes y las diferencias con el dato de pluviómetro.

Los parámetros estadísticos básicos (media, el desvío estándar, el valor máximo y el percentil 90) se calcularon sobre la serie de máximos por faja. Para cuantificar la variabilidad temporal

de los eventos extremos se calcularon las precipitaciones acumuladas máximas para cada intervalo y para cada año hidrológico. Para esto último, se tomó como inicio del año hidrológico el mes de julio, finalizando en junio y asignándolo al año de inicio. Así, por ejemplo, el año 1987 corresponde al periodo abarcado entre julio de 1987 y junio de 1988. Para cada año hidrológico, también, se computó la cantidad de eventos que superan el percentil 90 de la serie, es decir, se analizó la distribución temporal del 10% de los eventos más intensos de cada una de los intervalos. Se evaluó la existencia de tendencias lineales tanto en las series de máximos anuales como en las series de frecuencias anuales de eventos extremos, y se usó la prueba de Mann Kendall al 95 % de significancia.

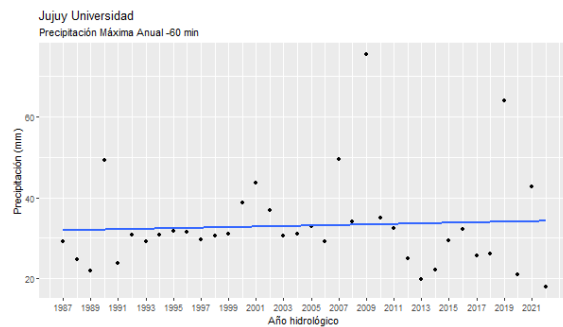


Figura 1: Máximo anual de precipitación acumulada en 60 minutos, para cada año hidrológico. En línea azul, el ajuste lineal.

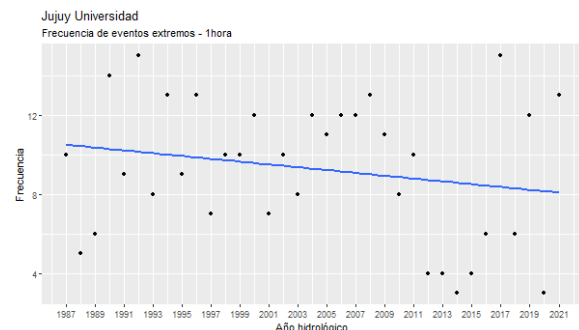


Figura 2: Frecuencia anual de eventos de 1 hora que superan el percentil 90. En línea azul, el ajuste lineal.

3) RESULTADOS

Se considera dato faltante a aquella fecha en la que se registró precipitación en el pluviómetro, pero no hay registro de faja pluviográfica digitalizada. Los años hidrológicos con mayor porcentaje de faltantes son 1989, 1988, 2015, con 24, 22, y 21 % respectivamente. El resto de los años muestran entre 5 y 15 % de datos faltantes. Estos valores son más que aceptables para series pluviográficas, donde generalmente el porcentaje de faltantes suele ser mucho mayor. Con respecto a las diferencias entre los valores registrados por cada instrumento, se computaron estas diferencias para el 10% de los eventos más extremos, la pluviografía subestima los valores del pluviómetro y estas diferencias promedian el 11% (no mostrado). Los parámetros estadísticos básicos se muestran en la Tabla I, para algunos intervalos aunque se calcularon para todos.

Intervalo	Media	Desvío Estándar	Máximo	Percentil 90
10	1.8	2.7	25.2	5.6
60	4.4	6.6	75.3	12.2
90	5.0	7.4	82.0	13.5
120	5.4	8.0	91.9	14.7
180	6.1	8.8	94.1	16.1
360	7.2	10.4	98.7	18.9
1440	8.4	11.8	102.6	21.7
Pvm	8.5	12.7	107.0	22.7

Tabla I. Parámetros estadísticos de cada intervalo de la serie pluviográfica y de la serie pluviométrica (pvm) en el periodo 1987 – 2022. Los intervalos están expresados en minutos y los valores de los parámetros en mm.

En todos los casos el desvío estándar supera a la media, dando cuenta de la gran dispersión existente. Del análisis de los máximos anuales para cada intervalo, surge que para las duraciones menores a 40 minutos las tendencias de los valores suelen ser negativas, mientras que para las duraciones de 40 a 360 las tendencias son positivas o neutras y para duraciones mayores vuelven a ser negativas. Sin embargo, las tendencias resultaron no significativas. Con respecto a la distribución anual de la frecuencia de eventos que superan el percentil 90, se analizaron únicamente las duraciones de 1, 3 y 6 horas y la serie de pvm. Se encontró que las 4 series muestran tendencias negativas, aunque no significativas. Se muestran en las Figuras 1 y 2 los resultados para la precipitación en 1 hora.

4) CONCLUSIONES

El tratamiento de los datos pluviográficos requiere un exhaustivo análisis de calidad que permita inferir resultados confiables. Lo analizado para el caso de la estación Dr. Augusto M. Romain (Jujuy Un.) en el periodo 1987-2022 da cuenta de una calidad aceptable en lo que respecta a la cantidad de datos faltantes y a la representatividad de los valores de precipitación acumulada. Las tendencias negativas encontradas en los valores de máximos de precipitación también fueron encontradas en el trabajo de Alabar y otros (2020), donde se analizaron las tendencias de distintos índices de precipitación, encontrándose, en ese caso para Jujuy Aero, una tendencia negativa en la precipitación diaria máxima anual en el periodo 1987-2018. Con respecto a la frecuencia de eventos extremos, se encontraron tendencias negativas y no significativas para las duraciones de 1, 3 y 6 horas. Estos resultados coinciden con los encontrados para la estación de Salta Aero en el periodo 1981-2014 (Flores y otros, 2016). Por último, se requieren estudios más exhaustivos para encontrar, si existe, alguna señal de mayor escala que pueda explicar los cambios encontrados.

AGRADECIMIENTOS

A Sol Zoé Guerra, Martina Luciani y Milagros Cano Hidalgo del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la Universidad de Buenos Aires por el trabajo de digitalizar las fajas pluviográficas. Al Dr. Leandro Sgroi de la Universidad Nacional del Litoral por facilitar los recursos necesarios.

REFERENCIAS

Alabar , F., Hurtado, R., Valdiviezo Corte, M., Moreno, C., 2020: Análisis Temporal de Índices Climáticos de Precipitación de las Provincias de Jujuy y Salta. Revista Científica de la facultad de Ciencias Agrarias, 13, 2, 7-13.

Flores, K., Marcora, M. G., Ferreira, L., 2016: Evaluación Estadística y Climatológica de Series Pluviográficas en Argentina. V ° Taller sobre Diseño Hidrológico “Salta-2016”

Flores, K., 2025: Generación y Procesamiento de Datos Pluviográficos en el SMN: desarrollo de método de digitalización. Nota Técnica SMN 2025-194.

Servicio Meteorológico Nacional, 2024: Atlas Climático de Argentina - Período 1991-2020. SMN, 129 pp.

⁽¹⁾ <https://fundacionwilliams.org.ar/wp-content/uploads/2023/03/Proyectos-seleccionados-Fondos-Complementarios-para-la-Investigacion-2022-2DA-TANDA.pdf>

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS EXTREMAS DE UN EVENTO CONVECTIVO DESTRUCTIVO EN EL CENTRO DE ARGENTINA: 16–17 DE DICIEMBRE DE 2023

Matias Ballarin¹, Paola Salio^{1,2,3}, Ramón de Elia⁴, Marcos Saucedo⁴, Hernán Bechis^{1,2,3}
matidorrego02@gmail.com

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina

²CONICET - Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina

³CNRS - IRD - CONICET - UBA. Instituto Franco-Argentino para el estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina

⁴Servicio Meteorológico Nacional. Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: Eventos extremos, viento destructivo, índice de intensidad de vaguadas.

Introducción

Durante el 16 y 17 de diciembre de 2023 se desarrollaron eventos convectivos sobre la región centro de Argentina que provocaron grandes daños y pérdidas humanas. El sistema convectivo más importante comenzó a formarse en las cercanías de Bahía Blanca en horas de la tarde del día 16 y luego se desplazó hacia el noreste, llegando a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) en la madrugada del día 17. El temporal tuvo su mayor impacto en estos dos conglomerados urbanos, aunque los daños se observaron en todo el trayecto que une ambas ciudades. Más tarde, el sistema comenzó a disiparse sobre el centro de Uruguay. Este evento se caracterizó por eventos de vientos muy destructivos, dando lugar a numerosas caídas de árboles, daños en infraestructura urbana y viviendas. En Bahía Blanca sucedió el hecho más trágico de todos donde los fuertes vientos provocaron la caída del gimnasio del club Bahiense del Norte dejando un saldo de 13 muertos. Videos en redes sociales registran como aviones que estaban estacionados en el Aeroparque Jorge Newberry (CABA) se desplazan y giran a causa del viento. Dada la extensión e impacto del evento, es razonable considerar la posibilidad de que se haya tratado de un "derecho". Una descripción detallada de este evento se encuentra en Saucedo y otros (2024). El objetivo de este estudio es analizar el entorno dinámico y termodinámico que favoreció el desarrollo de este evento tan destructivo, identificando parámetros que puedan explicar las características extremas de esta situación.

Metodología

Se utilizaron datos de reanálisis ERA5 proporcionados por el ECMWF cada 6 horas (00, 06, 12 y 18 UTC) durante el periodo 1991-2023 (Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al., 2020). Las principales variables utilizadas fueron geopotencial en 500 hPa, dirección y magnitud del viento en 800 y 750 hPa y agua precipitable en toda la vertical.

A fin de analizar el entorno termodinámico se tuvieron en cuenta los sondeos de Santa Rosa Aero a las 12 UTC (que es la estación más cercana a Bahía Blanca, aproximadamente a 290 km de distancia) correspondientes a los meses de verano del periodo 1991–2020.

A fin de analizar el entorno dinámico, se buscó un parámetro que permitiera analizar la ubicación y la intensidad de la vaguada situada sobre el Pacífico Sur (ver figura 1), para ello se consideró la metodología propuesta por Bradbury et al. (2002), considerando el Trough Axis Index (TAI) y Trough Intensity Index (TII). Estos índices se aplicaron de forma diaria a lo largo de todo el periodo estudiado, lo que permite comparar nuestro caso con una climatología de referencia.

El TAI se calculó para un dominio comprendido entre 65°W, 110°W, 30°S y 50°S. Para llevar a cabo este índice se calcula en qué longitudes se da el mínimo de geopotencial en las siguientes 5 latitudes: 30, 35, 40, 45 y 50°S. Luego se promedian esas longitudes para obtener un valor de referencia y así obtener la ubicación de la vaguada:

$$TAI = \frac{1}{5} \sum_{30^{\circ}S}^{50^{\circ}S} Lon[H_{Min}] \quad (1)$$

Sí hay más de 10° grados diferencia entre dos mínimos consecutivos no se calcula el TAI. Tampoco se calcula sí alguno de los mínimos coincide con los bordes laterales (en este caso 65°W o 110°W) ya que esto introduciría un cierto bias en el cálculo de la ubicación de la vaguada.

Para todos aquellos casos que contaban con un valor de TAI, se procedió a calcular el TII. Este índice, como se comentó más arriba, da cuenta de la intensidad de la vaguada. Se calcula como una diferencia entre 3 puntos a una latitud constante (40°S). Para dicho índice se tiene en cuenta el mínimo de geopotencial entre 65 y 110°W y el valor del geopotencial 30° más al este y oeste de la ubicación de dicho mínimo.

$$TII_{40^{\circ}S} = - \left\{ [(H_{Min})_i - H_{i+30^{\circ}}] + [(H_{Min})_i - H_{i-30^{\circ}}] \right\} / 2 \quad (2)$$

Cabe resaltar que el subíndice i es el valor de la longitud donde se encuentra el mínimo de geopotencial en 40°S.

Resultados y Conclusiones

El campo de geopotencial en 500 hPa del 16/12/2023 (promedio diario con datos cada 6 h) indica la presencia de una vaguada intensa en el Pacífico Sur (Figura 1). Esta vaguada favorece los movimientos verticales cuasigeostróficos sobre la región centro de Argentina. Uno de los objetivos de este trabajo es estudiar qué tan extrema fue esta vaguada, no solo para esta época del año (verano) sino también para otras estaciones. En la figura 2, podemos ver la distribución de los valores de TII para el periodo 1990-2023. El bin en rojo indica en donde se ubica el valor de TII correspondiente a nuestro caso de estudio (430 mgp). Cuanto mayor sea el valor de TII mayor será la intensidad de la vaguada. El valor de TII de nuestro caso se encuentra en la cola de la distribución, superando el percentil 95. De hecho, al clasificar estos valores según la estación del año obtenemos que el valor de TII para el 16/12/2023 supera el percentil 95 para todas las estaciones, incluso invierno (no se muestra).

En cuanto a la inestabilidad, el valor de MUCAPE (en Santa Rosa Aero) para el evento en cuestión fue de 3124 J/kg. Para evaluar cuán extremo es este valor, se consideraron todos los valores disponibles de MUCAPE correspondientes a los veranos del periodo 1991-2020. La figura 3 muestra la distribución de todos estos valores.

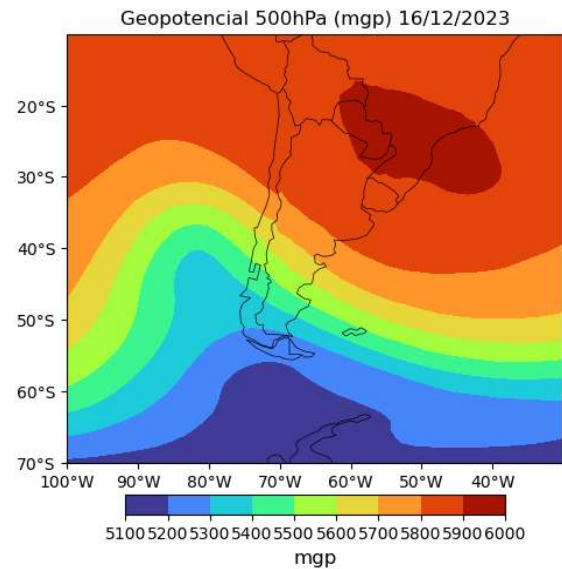


Fig 1. Geopotencial en 500 hPa (mgp) válido para el 16/12/2023 (promedio de 4 tiempos)

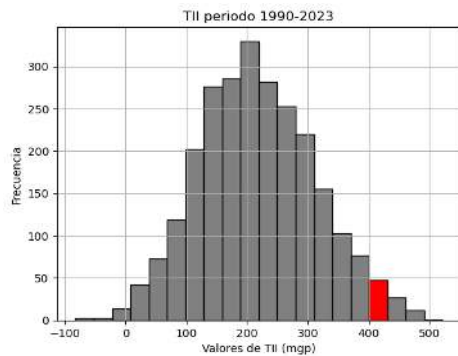


Fig 2. Distribución de los valores de TII (mcp) durante el periodo 1990-2023. El bin en rojo indica donde se ubica el TII correspondiente al 16/12/2023 (430 mcp)

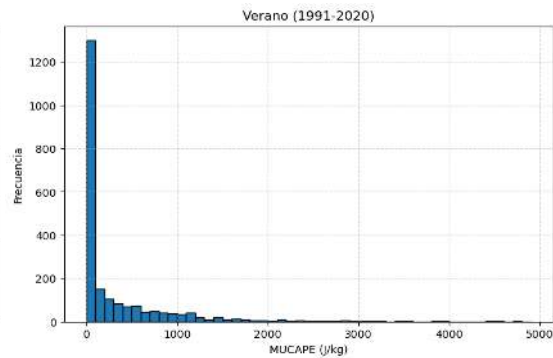


Fig 3. Distribución de los valores de MUCAPE (J/kg) durante los veranos del periodo 1991-2020

El valor de MUCAPE correspondiente para nuestro evento supera el percentil 99 en la distribución. Aun así, si sólo consideramos los valores de MUCAPE mayores 100 J/kg se supera el percentil 98 en la distribución (no se muestra). Una limitación al usar sondeos observados radica en que no todos los días existen sondeos disponibles. Y aun así, cuando tenemos sondeos disponibles no siempre los datos son correctos ya que existen errores de medición, dando lugar a valores de MUCAPE negativos o extremadamente grandes. Para solucionar este problema, para futuros trabajos se propone usar el MUCAPE del reanálisis para el punto de grilla más cercano a Bahía Blanca, incluso no solo a las 12 UTC sino en horas de la tarde cuando la inestabilidad alcanza su máximo.

La inestabilidad presente en la atmósfera en estas latitudes puede ser atribuida a un flujo del norte en niveles bajos que se dio en forma persistente durante el día 16 (no se muestra). A partir del criterio de Bonner (1968) se puede identificar un Low Level Jet (LLJ) que llegó hasta latitudes altas ($\approx 40^\circ\text{S}$). Este LLJ promovió la advección cálida y húmeda desde latitudes bajas (25°S) hasta regiones adyacentes a Bahía Blanca. Del análisis dinámico y termodinámico de esta situación es posible concluir que este tipo de situación se encuentra en los extremos climatológicos para la región.

Agradecimientos: Proyecto SNF SPIRIT: “UnWeather Vizard: Visualización e Interpretación de la Incertidumbre en Pronósticos Numéricos de Alta Resolución”

Referencias

- Bonner, W. D., 1968: Climatology of the Low Level Jet. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 833–850, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1968\)096<0833:COTLLJ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096<0833:COTLLJ>2.0.CO;2).
- Bradbury, J. A., B. D. Keim, and C. P. Wake, 2002: U.S. East Coast Trough Indices at 500 hPa and New England Winter Climate Variability. *J. Climate*, **15**, 3509–3517, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<3509:USECTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<3509:USECTI>2.0.CO;2).
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.*; 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Saucedo, M., R. de Elía, L. Vidal, C. Matsudo, S. Righetti, A. Cejas, D. Diaz, N. Pérez, P. Hobouchian, R. Vasques Ferro, C. Ribero, M. Patanella, P. Irurzun, H. Bechis, D. D’Amen, P. Salio, Y. García Skabar, S. Pérez, C. Sánchez, C. Fiol, R. Vidal, 2024: Evento de vientos destructivos sobre el centro de Argentina durante el 16 y 17 de diciembre de 2023. Nota Técnica SMN 2024-19, <https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/2889>

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE TRANSPORTE QUÍMICO PARA ESTIMAR LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN EL AIRE DEL AMBA CON RESOLUCIÓN DE 1 KM

Luque Solange¹, Pineda Rojas Andrea L¹, Fita Lluís¹, Borge Rafael²

solange.luque@cima.fcen.uba.ar. Autora correspondiente

¹Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), UBA-CONICET-CNRS-IRD IFAECI, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

²Departamento de Ingeniería Química Industrial y del Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, España.

Palabras claves: Calidad del aire, escala urbana, desempeño

1) Introducción

La calidad del aire en áreas urbanas es un problema de creciente interés en el mundo debido a la combinación de altas emisiones de contaminantes con efectos adversos para la salud y a la alta densidad poblacional en estas zonas. Para su estudio, se recomienda el uso de modelos en alta resolución debido a la gran variabilidad espacial de las concentraciones de contaminantes. En el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) existen estudios de la calidad del aire utilizando modelos semi-empíricos simples (e.g., Mazzeo y Venegas, 1991; Pineda Rojas y Venegas, 2013; Venegas et al., 2014; Pineda Rojas et al., 2016). Sin embargo, la implementación de modelos complejos o de transporte químico, como el sistema Weather Research and Forecasting Model - Community Multiscale Air Quality Model (WRF-CMAQ), está comenzando a desarrollarse. Este tipo de modelos incluye distintas opciones para representar los procesos de transporte y dispersión, transformaciones químicas, procesos de depósito, etc., y por lo tanto permiten estudiar el rol de otros procesos y fuentes que no es posible estudiar con modelos simples. Entre las limitaciones de los modelos de transporte químico se encuentran la alta demanda computacional, por lo cual generalmente se usan para simular periodos cortos (de unas pocas semanas) cuando se utilizan en alta resolución espacial. Recientemente se implementó el sistema de modelado WRF-CMAQ en el AMBA. En este trabajo, se presentan los primeros resultados de la evaluación de su desempeño para reproducir las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂) en tres estaciones de monitoreo del AMBA.

2) Metodología

El sistema de modelado WRFv4.2.1 – CMAQv5.4 se aplica en el AMBA durante dos meses, uno en invierno y otro en primavera del año 2012. Ambos periodos consideran dos días de spin up. Se utilizan cuatro dominios anidados con resoluciones horizontales de 45 km², 15 km², 3 km² y 1 km², con el dominio más grande cubriendo toda Argentina y los países vecinos y el más chico cubriendo todo el AMBA. Las configuraciones del modelo se basan en estudios previos de sensibilidad tanto de WRF (Luque et al. 2024a) como de CMAQ (Luque et al. 2024b), y se encuentran explicadas en detalle en esos trabajos. Para el dominio interior, se utiliza un inventario de emisiones local de alta resolución (1 km, 1 h) desarrollado para el AMBA por Venegas et al. (2011), mientras que para los demás dominios se emplea el inventario de EDGAR HTAPv2 (Janssens-Maenhout et al., 2015) y el modelo MEGANv3.2 (Guenther et al., 2012) para la estimación de las emisiones biogénicas. Asimismo, se incluyen las emisiones provenientes de las centrales eléctricas que se encuentran sobre la costa, utilizando datos del informe de JICA (2002).

Para evaluar el desempeño del sistema de modelado WRF-CMAQ, se analizan las variaciones horarias y diarias de NO₂ modeladas y se comparan con las observaciones disponibles en los sitios de monitoreo de la ciudad de Buenos Aires (APrA), analizadas exhaustivamente en Pineda Rojas et al., (2020), y en un sitio de ACUMAR. Se calculan los estadísticos recomendados para este tipo de estudios por Hanna and Chang (2011): sesgo fraccional (fb), error cuadrático medio normalizado (nmse) y fracción de concentraciones modeladas que se encuentran dentro de un factor 2 de las observadas (fa2).

3) Resultados

En la figura 1 se muestran las variaciones horarias observadas y modeladas de NO₂ durante el 25/7 y el 21/7 en los sitios de monitoreo CEN y LB respectivamente. En general, el modelo reproduce adecuadamente las variaciones horarias de la concentración de NO₂ en ambos sitios y períodos. Las mayores diferencias entre las observaciones y los valores modelados generalmente ocurren en situaciones de baja velocidad del viento cuando los errores en la dirección del viento pueden ser considerables (Luque et al., 2024a). Los vientos provenientes del SE tienden a estar asociados con sobreestimaciones en LB durante el mes de primavera, sugiriendo una sobreestimación de las emisiones de las centrales termoeléctricas durante ese período.

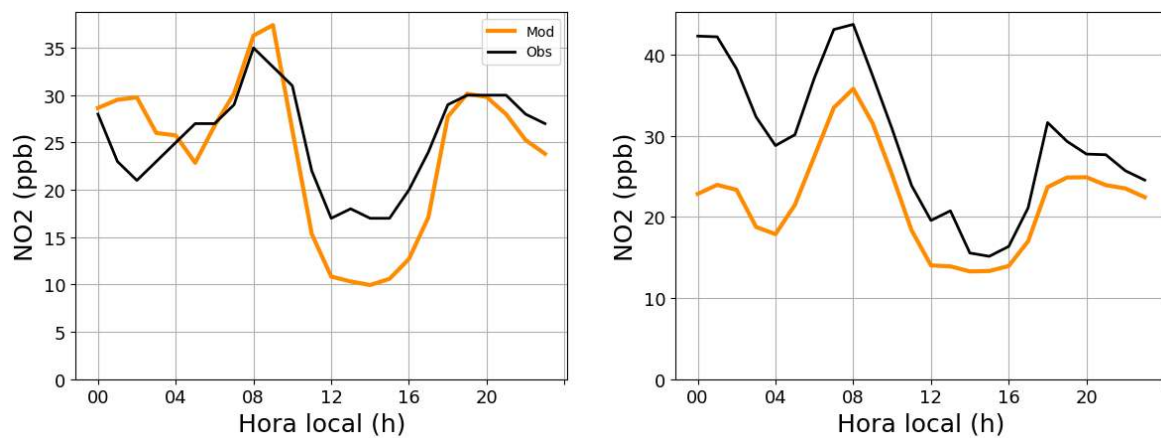


Figura 1: Variaciones horarias medias durante el 25/7 en CEN (izquierda) y durante el 21/7 en LB (derecha).

Tabla I: Métricas de desempeño (fb, nmse y fa2) obtenidas para los valores horarios de NO₂ en cada sitio de monitoreo.

Sitio	fb		nmse		fa2	
	<i>Invierno</i>	<i>Primavera</i>	<i>Invierno</i>	<i>Primavera</i>	<i>Invierno</i>	<i>Primavera</i>
<i>CEN</i>	-0.13	-0.09	0.23	0.35	0.92	0.73
<i>LB</i>	0.36	0.31	0.41	0.61	0.76	0.72
<i>ACU</i>	0.19	—	0.22	—	0.80	—

Las métricas de desempeño obtenidas, tanto para las concentraciones horarias como para las diarias (no mostrado), se encuentran dentro de los rangos recomendados para este tipo de estudios (Hanna and Chang, 2011), lo que sugiere un desempeño aceptable del modelo durante los períodos analizados.

4) Conclusiones

El sistema de modelado WRF-CMAQ reproduce adecuadamente las concentraciones horarias y diarias de NO₂ en los sitios de monitoreo durante los dos meses analizados, utilizando el inventario de emisiones local. Estas primeras pruebas sugieren que WRF-CMAQ puede ser una herramienta valiosa para el análisis de la calidad del aire en el AMBA, más aún teniendo en cuenta la limitada cantidad de observaciones disponibles. Futuras mediciones en más sitios permitirán evaluar la capacidad del modelo para estimar las variaciones espaciales de las concentraciones de NO₂.

REFERENCIAS

- Guenther, A.B., Jiang, X., Heald, C.L., Sakulyanontvittaya, T., et al.,** 2012: The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, 5: 1471-1492
- Hanna, S., Chang, J.,** 2011. Setting Acceptance Criteria for Air Quality Models. In: Steyn, D., Trini Castelli, S. (eds) *Air Pollution Modeling and its Application XXI*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht.
- Luque, S.E., Fita, L. y Pineda Rojas, A.L.,** 2024a: Performance evaluation of the WRF model under different physical schemes for air quality purposes in Buenos Aires, Argentina. *Atmósfera* 38, 235–262.
- Luque, S.E., Pineda Rojas, A.L., Borge, R.,** 2024b: Impact of boundary and initial conditions on NO_x, NO₂ and O₃ concentrations in WRF-CMAQ simulations over the Metropolitan Area of Buenos Aires, Argentina. *Proceedings of the ‘22th international conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes (Harmo22)’*, 10–13 June 2024, Parnu-Estonia, Estonia, H22–070, 5pp. Available at: <https://www.harmo.org/conference.php?id=22>.
- Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., et al.,** 2015: HTAP_v2.2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 11411-11432.
- JICA** (2002). Estudio o línea de base de concentración de gases contaminantes en atmósfera en el área de Dock Sud en Argentina. Informe Final. Agencia de Cooperación Internacional del Japon en Argentina. Secretaría de Desarrollo Sustentable y Política Ambiental. 13 pp.
- Pineda Rojas, A.L., Borge R., Mazzeo N.A., et al.,** 2020: High PM₁₀ concentrations in the city of Buenos Aires and their relationship with meteorological conditions. *Atmospheric Environment* 241, 117773.
- Pineda Rojas, A.L., Venegas, L.E. y Mazzeo, N.A.,** 2016: Uncertainty of modelled urban peak O₃ concentrations and its sensitivity to input data perturbations based on the Monte Carlo analysis. *Atmospheric Environment* 141, 422-429.
- Venegas, L.E., Mazzeo, N.A. y Dezzutti M.C.,** 2014: A simple model for calculating air pollution within street canyons. *Atmospheric Environment* 87, 77-86.
- Venegas, L.E., Mazzeo, N.A. y Pineda Rojas, A.L.,** 2011: Chapter 14: Evaluation of an emission inventory and air pollution in the Metropolitan Area of Buenos Aires in *Editorial In-Tech, Air Quality-Models and applications*, 261-288 pp.

ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN UTILIZANDO SENSORES REMOTOS Y SIMULACIONES NUMÉRICAS MEDIANTE REDES NEURONALES

Ezequiel Geslin¹, Juan José Ruiz^{1,2}, Sergio Hernán González^{1,2}, Luciano Vidal³, Pablo Negri⁴
ezezeslin@gmail.com

¹ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

² Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-UBA)

³ Servicio Meteorológico Nacional

⁴ Instituto de Ciencias de la Computación (CONICET-UBA)

Palabras clave: Satélites, Aprendizaje Automático, Pronóstico Numérico.

1) INTRODUCCIÓN

La precipitación es una componente esencial del ciclo hidrológico y es sumamente importante para la planificación y gestión de los recursos hídricos, la gestión del riesgo de desastres y la agricultura. Estimar la tasa de precipitación a nivel regional con alta resolución espacial y temporal es un desafío científico y tecnológico. Los sensores infrarrojos a bordo de los satélites geoestacionarios proveen información útil para la estimación de precipitación con una amplia cobertura espacial (ej. Hobouchian et al., 2017). Recientemente, los modelos de machine learning han sido aplicados a la estimación de precipitación en base a sensores remotos (Wang et al., 2023). Una de las ventajas de estos métodos es que permiten combinar de manera flexible diferentes fuentes de información.

Los modelos numéricos globales proveen una fuente de información que resulta complementaria a la información medida por los satélites meteorológicos. A pesar de los avances en estimación de precipitación mediante sensores remotos y modelos de aprendizaje automático, son relativamente pocos los estudios que se han focalizado sobre escalas de tiempo cortas y en la combinación de datos de sensores remotos con información proveniente de modelos numéricos.

En este trabajo se propone desarrollar, entrenar y validar un modelo basado en redes neuronales profundas para estimar la tasa de precipitación en superficie en escalas de tiempo cortas (del orden de los minutos) a partir de datos de temperatura de brillo en el rango del infrarrojo obtenidos a partir de satélites geoestacionarios y pronósticos numéricos globales.

2) Datos y Metodología

Para el entrenamiento supervisado del modelo se utilizaron las tasas instantáneas de precipitación estimadas por el radar de doble frecuencia DPR a bordo del satélite GPM (Pfreundschuh et al., 2022). Como variables de entrada se emplearon las temperaturas de brillo (TB) en el rango del infrarrojo, obtenidas a partir del satélite GOES-16 y simulaciones numéricas de agua precipitable provistas por el Global Forecasting System (GFS). El dominio espacial está centrado en Sudamérica y sus océanos adyacentes. La muestra total cuenta con cerca de 10.000 imágenes entre enero de 2020 y junio de 2021, de las cuales el 80% se destinó al entrenamiento y el 20% a la validación. El conjunto de testeo está constituido por los datos obtenidos durante los meses de enero y junio de 2021, con el fin de analizar el desempeño del modelo tanto en condiciones estivales como invernales.

El modelo implementado se basa en una arquitectura de tipo U-Net (Ronneberger et al. 2015). Para incluir los datos de las simulaciones numéricas, estos datos son primero procesados por una red de tipo encoder y posteriormente concatenados a los datos satelitales en el bottleneck de la red U-Net. Del cual, ambos conjuntos de datos son procesados en conjunto a través del decodificador. Para el entrenamiento, se utilizó como función de pérdida el error cuadrático medio (MSE); como optimizador se empleó ADAM, con una tasa de aprendizaje inicial de $1e^{-3}$ y con lotes de 64 imágenes. Se utilizó una técnica de early stop

para reducir el riesgo de overfitting. Como función de activación se utilizó Leaky ReLU, con una pendiente negativa de 0.01.

Para evaluar el impacto del agua precipitable y posibles formas de combinarla con la temperatura de brillo, se entrenaron 3 versiones diferentes del modelo. Una en donde el input del modelo es solamente la temperatura de brillo, otra en donde se agrega como input la distribución del agua precipitable en una región de 1000 x 1000 km centrada en la imagen del target y otra donde el agua precipitable está disponible solamente en la región donde se estima la precipitación.

3) Resultados

Los modelos desarrollados fueron evaluados utilizando el conjunto de testeo y calculando el RMSE, el BIAS y la correlación lineal de Pearson (CORR) entre las predicciones generadas por las redes y las tasas de precipitación observadas por el DPR. Cada configuración fue entrenada con 5 inicializaciones independientes con el objetivo de obtener una mayor robustez en las métricas reportadas. Los resultados obtenidos habiendo promediado las 5 inicializaciones se resumen en la Tabla I.

INPUTS	DOMINIO SIMULACIÓN	RMSE	BIAS	CORR
TEMPERATURA DE BRILLO		1.53	0.11	0.21
TEMPERATURA DE BRILLO Y AGUA PRECIPITABLE	1000 Km x 1000 Km	1.52	0.10	0.24
TEMPERATURA DE BRILLO Y AGUA PRECIPITABLE	Interpolación al dominio del DPR	1.51	0.07	0.23

Tabla I. Métricas correspondientes a la comparación de la precipitación estimada por diferentes versiones del modelo con respecto a la tasa de precipitación provista por el DPR en el conjunto de testeo

Si bien el modelo entrenado únicamente con TB tiene resultados satisfactorios, que indican una capacidad adecuada para estimar la tasa de precipitación en superficie, al compararlo con las redes entrenadas con la inclusión del agua precipitable, estas últimas producen un error cuadrático medio y un bias menor y una mayor correlación, sugiriendo que el agregado de las simulaciones mejora el rendimiento del modelo. Respecto a las dos variantes evaluadas para la incorporación del agua precipitable, no se notó una diferencia significativa entre ambas.

En la Figura 1, se presenta una imagen del sensor DPR correspondiente al conjunto de testeo junto con las predicciones generadas por dos de los modelos. En ella, se puede observar cómo la inclusión del agua precipitable le permitió al modelo representar valores más extremos de precipitación con una mayor precisión espacial.

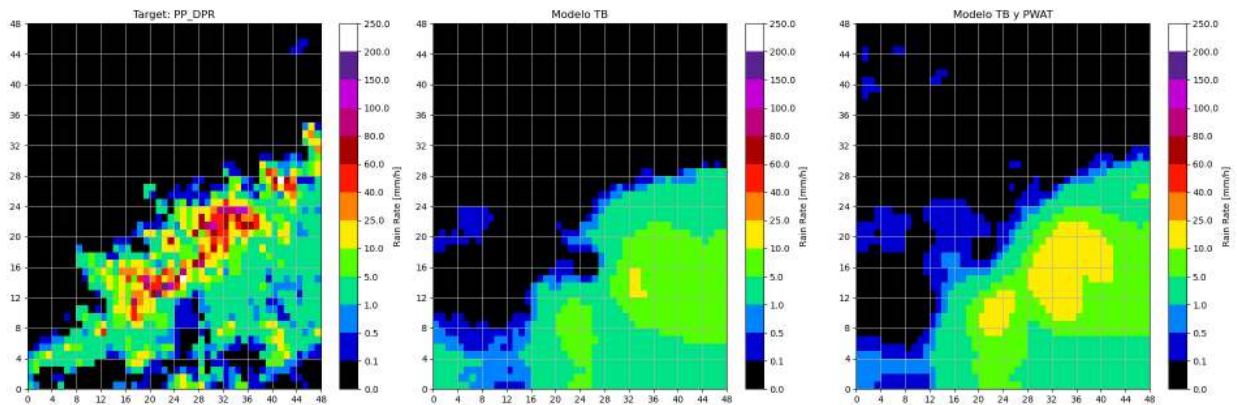


Figura 1. Ejemplo de un caso correspondiente al conjunto de testeo imagen DPR (izquierda), predicción del modelo entrenado con TB (centro) y predicción del modelo entrenado con TB y agua precipitable (PWAT) para el dominio interpolado (derecha)

4) Conclusiones

En este trabajo se implementó una red neuronal convolucional para estimar la precipitación a partir de la temperatura de brillo del canal 13 del GOES-16. Además, se incorporaron simulaciones numéricas de agua precipitable como variable adicional con el objetivo de evaluar su impacto en el rendimiento del modelo. Los resultados obtenidos muestran que, si bien la red entrenada exclusivamente con TB obtuvo resultados satisfactorios, la inclusión del agua precipitable como variable de entrada mejora el desempeño de la red, reduciendo tanto el error cuadrático medio (RMSE) como el bias, y aumentando la correlación con las tasas de precipitación estimadas por el sensor DPR. La mejora se evidencia también en la capacidad del modelo para identificar correctamente las lluvias más intensas, de particular interés por su posible impacto social y económico.

Además, se observó que introducir el agua precipitable en dominios más grandes que el correspondiente a las imágenes del DPR no introdujo un beneficio en el rendimiento de la red, sino que mantuvo resultados similares.

Como líneas futuras de investigación, se propone explorar distintas formas de integrar la variable simulada en la arquitectura del modelo. Asimismo, se analizará el efecto de incorporar nuevas variables provenientes del modelo numérico, tales como tasa de precipitación, energía potencial convectiva disponible (CAPE), energía inhibitoria de la convección (CINE), viento y altura geopotencial en distintos niveles, entre otras.

5) Referencias

- Hobouchian, M. P., García Skabar, Y., Barrera, D., Vila, D., & Salio, P. (2017).** Estimación de precipitación por satélite aplicando la técnica Hidroestimador en su versión para Sudamérica. Servicio Meteorológico Nacional. <http://hdl.handle.net/11336/178710>
- Pfreundschuh, S., Ingemarsson, I., Eriksson, P., Vila, D. A., and Calheiros, A. J. P.**: An improved near-real-time precipitation retrieval for Brazil, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 6907–6933, <https://doi.org/10.5194/amt-15-6907-2022>, 2022.
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015).** U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015* (pp. 234–241). https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
- Wang, F., Tian, D., & Carroll, M. (2023).** Customized deep learning for precipitation bias correction and downscaling. *Geoscientific Model Development*, 16, 535–553. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-535-2023>

SERIES TEMPORALES HOMOGÉNEAS DE ZTD E IWV, DERIVADOS DE DATOS GNSS EN SUDAMÉRICA Y APLICACIONES

Guillermina P. Anasimele^{1,2}, Luciano P. O. Mendoza^{1,2}, María Eugenia Dillon^{2,3}, Yanina García Skabar³

ganasi@fcaglp.unlp.edu.ar. Anasimele Guillermina.

¹ Centro de Meteorología espacial, Atmósfera terrestre, Geodesia, Geodinámica, diseño de Instrumental y Astrometría (MAGGIA), Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina

³ Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Buenos Aires, Argentina

Palabras clave: GNSS-GB, Vapor de agua, Sensoramiento remoto.

1) INTRODUCCIÓN

El Retardo Cenital Total (ZTD, zenith total delay), el Retardo Cenital Húmedo (ZWD, zenith wet delay) y el Vapor de Agua Integrado (IWV, integrated water vapour) pueden ser calculados a partir de señales de Global Navigation Satellite Systems (GNSS-GB, ground-based) y observaciones meteorológicas en superficie. Los mismos proporcionan información valiosa sobre el contenido de humedad de la atmósfera y por lo tanto representan parámetros de suma utilidad para la determinación del pronóstico del tiempo. En particular, pueden ser incorporados a modelos de pronóstico numérico (NWP, numerical weather prediction) mediante procesos de asimilación de datos (Bonafoni et al., 2019), con el fin de mejorar la condición inicial del mismo.

El sistema GPS comenzó a estar disponible para libre uso civil y científico a fines de la década de los 80, y el sistema GLONASS aproximadamente desde el 2000, de manera que es posible obtener series temporales, de algunas décadas, de estos parámetros atmosféricos. Sin embargo, es un desafío obtener series homogéneas, teniendo en cuenta los cambios en la infraestructura de la redes. Gracias a los productos de reprocesamiento del International GNSS Service (IGS) hoy es posible obtener series temporales homogéneas de alrededor de 20 a 25 años. Éstas resultan muy útiles, en especial cuando se trata del IWV, ya que el análisis de las tendencias en estos períodos pueden complementar análisis climatológicos indicando la variabilidad a largo plazo del vapor de agua.

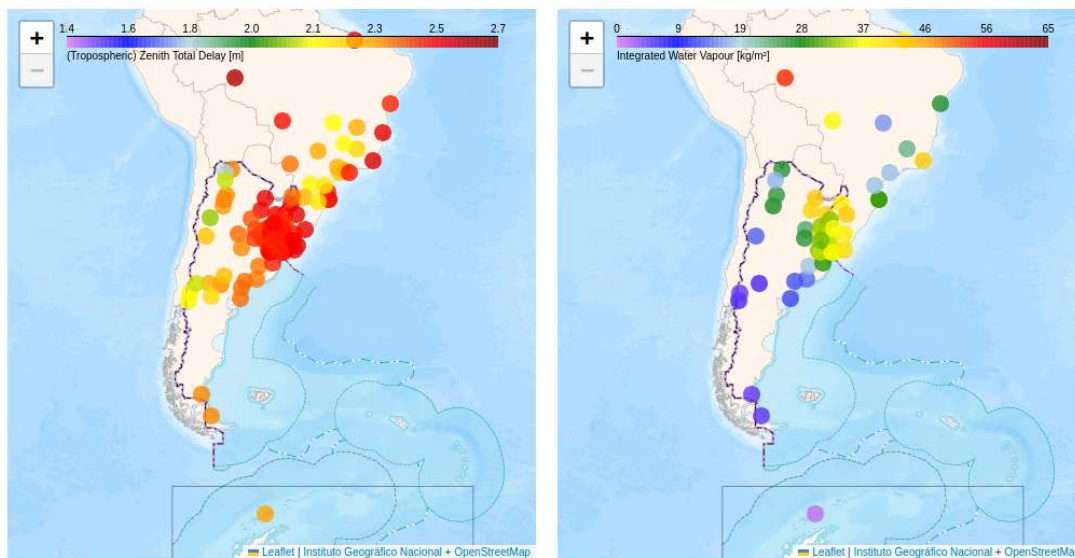
El Centro MAGGIA (Meteorología espacial, Atmósfera terrestre, Geodesia, Geodinámica, diseño de Instrumental y Astrometría, FCAG, UNLP) administra un sistema de provisión IWV y ZTD troposféricos a tiempo real (NRT, near real time) para Sudamérica (Aragón Paz et al., 2023). Si bien el IWV estimado a partir de observaciones GNSS-GB ya es considerado como el valor real a la hora de evaluar otras técnicas de observación, la precisa cuantificación de la exactitud alcanzable, así como la magnitud de los errores sistemáticos introducidos, siguen siendo temas de estudio, sobre todo debido a las diversas metodologías utilizables para su cómputo.

Mientras que el sistema de monitoreo troposférico NRT operado actualmente emplea el método GNSS diferencial DGNSS (differential GNSS), el método GNSS de posicionamiento puntual preciso (PPP, precise point positioning) tiene significativas ventajas. Por ejemplo, la

economía de cálculo y su independencia de los marcos de referencia materializados en la corteza (e.g., resistencia a eventos sísmicos de gran magnitud, algo importante aquí en Sudamérica). En este contexto, el objetivo de este trabajo es avanzar en la producción de series temporales de ZTD, e IWV, multi-decadales (de 2003 a 2023), homogéneas, aplicando el método PPP, focalizando en el análisis de las series de un caso de estudio para experimentos de asimilación en NWP.

2) SISTEMA DE MONITOREO DE ZTD E IWV

La cobertura geográfica del sistema NRT se extiende desde el centro de Brasil hasta la Península Antártica, incluyendo Argentina y Uruguay. El procesamiento de las observaciones satelitales, completamente automatizado, combina streams de datos GNSS de las estaciones de rastreo con observaciones sinópticas de estaciones meteorológicas cercanas mediante el método DGNSS. En la Fig. 1 se muestra, a modo de ejemplo, los datos de ZTD e IWV disponibles en tiempo real públicamente (<https://wilkilen.fcaglp.unlp.edu.ar/tro/latest.html>, accedido el 27/05/2025).



Last update @ 2025-05-27 14:40 UTC; ZTD @ 87 sites; IWV @ 49 sites; ZTD/IWV latency between 0.7 and 4.7 hours; Run by L. Mendoza; Operational and open access ZTD/IWV data repository [here](https://wilkilen.fcaglp.unlp.edu.ar/tro/latest.html); GNSS orbits and clocks by [CODE](#) (ultra rapid, Germany & Switzerland); Software: [BNC](#) & [Bernese GNSS Software](#); GNSS and METEO observations providers: [BKG](#) (Germany), [IBGE](#) (Brazil), [IGM](#) (Uruguay), [IGN](#) (Argentina), [NASA](#) (USA), [SMN](#) (Argentina). Documentation [here](#) and [here](#).

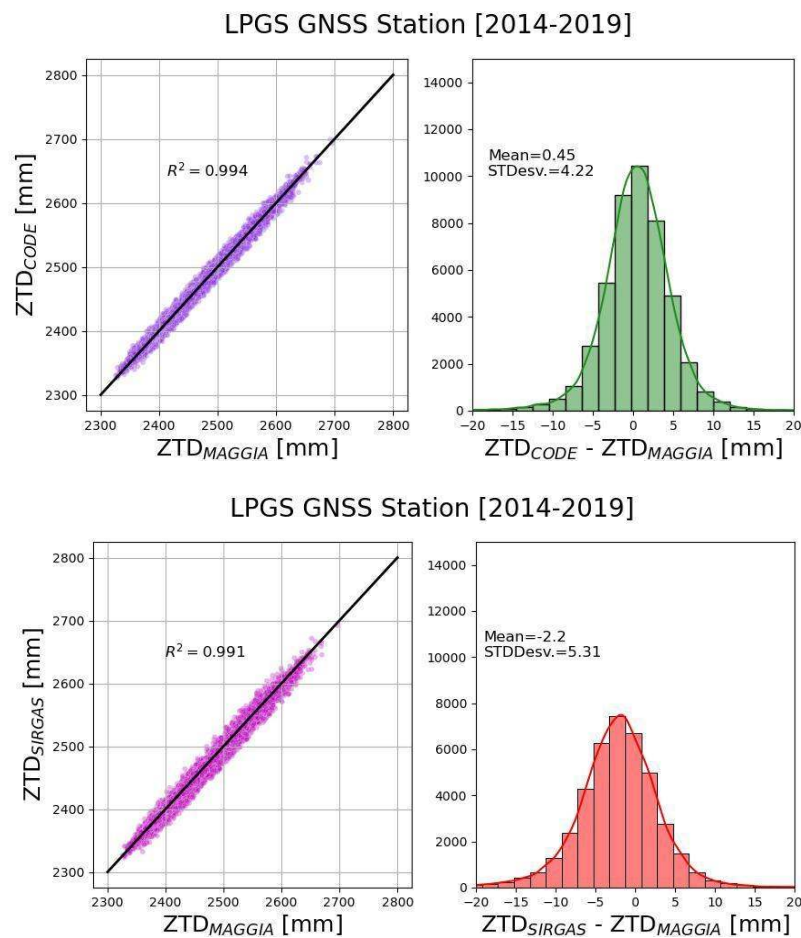
Figura 1: Ejemplo de mapas web activos de ZTD e IWV, provistos cada una hora, a partir de las observaciones GNSS-GB regionales.

3) SERIES TEMPORALES DE ZTD E IWV DERIVADOS DE MÉTODO PPP

Para generar la nueva base de datos, que permitirá estimar series multi-decadales, se recopilaron observaciones para más de 700 estaciones GNSS, entre 2003 y 2023. A partir de esta base de datos, y con el objetivo de evaluar los productos, se generaron series temporales homogéneas regionales de ZTD e IWV para estaciones seleccionadas en un período de al menos cinco años, y con una frecuencia de estimación de una hora.

En primer lugar, se realizó una comparación exhaustiva para evaluar los estimadores de ZTD derivados con PPP respecto de productos GNSS-GB independientes estimados a partir del método DGNSS, provistos por el IGS (International GNSS Service) y por SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas). En la Fig. 2 se observan algunos resultados, mostrando correlaciones lineales de 0.99 (0.99) entre ZTDMAGGIA y ZTDCODE

(ZTDSIRGAS) para una estación. En segundo lugar, se compararon los productos ZTD estimados con otros productos ZTD derivados de datos de Radiosondeos (RS) provistos por la Universidad de Wyoming. Por último, las series homogéneas de IWV fueron contrastadas con datos vapor de agua integrado estimados a partir de los mismos radiosondeos (no mostrado). Estas comparaciones permiten afirmar que los métodos y modelos empleados son adecuados. Adicionalmente, se calculó el contenido medio de vapor de agua y las tendencias de cambio decadales en algunas estaciones seleccionadas.



Una vez evaluada la calidad de los productos, y con el objetivo de generar datos de entrada para experimentos futuros de asimilación de ZTD en NWP, se generaron series de ZTD e IWV de algunos días con una frecuencia de una estimación cada cinco minutos (ZTD) o cada una hora (IWV). Las estimaciones se realizaron en todas las estaciones GNSS disponibles en el período (aproximadamente 370 estaciones) alrededor de un día antes y un día después del período de la tormenta, para algunos eventos seleccionados de precipitación intensa. Se realizó además un análisis de las series de IWV teniendo en cuenta datos de precipitación del SMN.

Figura 2: Comparación de nuevos productos ZTDMAGGIA, estimados con PPP, en 1 estación GNSS Universidad de La Plata (LPGS) para el periodo 2014-2019. Arriba: con productos DGNSS del CODE (Center for Orbit Determination in Europe). Abajo: con productos DGNSS de SIRGAS.

REFERENCIAS

Aragón Paz, J. M., Mendoza, L. P. O., Fernández, L. I., 2023: Near-real-time GNSS tropospheric IWV monitoring system for South America. *GPS Solutions*, 27(2), 1-13.

Bonafoni S., Biondi R., Brenot H., Anthes R., 2019: radio occultation and ground-based GNSS products for observing, understanding and predicting extreme events: A review. *Atmos Res*, 230.

EVALUACIÓN DE LA DETECCIÓN DE TRAZAS DE TORNADOS MEDIANTE TELEDETECCIÓN ÓPTICA

Facundo Gorr¹, Juan Pablo Zbrun Luoni¹ y Facundo Martins Meira¹

¹Universidad Nacional de los Comechingones, Merlo (San Luis)
fgorr@alumnos.unlc.edu.ar

Palabras Claves: Teledetección óptica, Tornados, Sentinel-2

Resumen

Este estudio analiza el potencial de la teledetección óptica para la identificación y caracterización de las cicatrices dejadas en la superficie por eventos tornádicos, mediante el procesamiento de imágenes multiespectrales del satélite Sentinel-2. Se aplicaron diversos índices espectrales (NDVI, NDBI, MSAVI, EVI y TrueColor) sobre los casos analizados, utilizando pares temporales previos y posteriores al evento. Las diferencias espectrales generadas fueron comparadas con las trazas oficiales provistas por la NOAA, a fin de evaluar la correspondencia espacial entre los daños detectados in situ y los identificables por medios remotos. Se encontro una correlacion entre los indices analizados y la traza dejada por tornados estudiados, aunque seran necesarios mas analisis de estas características para poder verificar la eficacia del metodo propuesto.

1 Introducción

Tradicionalmente, la evaluación de áreas afectadas se ha basado en relevamientos terrestres, los cuales, si bien permiten una inspección detallada, presentan limitaciones logísticas vinculadas al tiempo, la disponibilidad de recursos humanos y la accesibilidad al terreno. En este marco, la teledetección óptica —mediante imágenes satelitales de alta resolución espacial y temporal— surge como una herramienta complementaria de alto valor, al posibilitar el análisis multitemporal de grandes superficies afectadas por tornados (Jedlovec et al. [2006]; Molthan et al. [2020]).

Diversos estudios han demostrado la utilidad de índices espectrales como NDVI y composiciones RGB para detectar alteraciones abruptas en la vegetación y el entorno construido, asociadas al paso de un tornado (Myint et al. [2008]; Burow et al. [2020]; Kingfield and de Beurs [2017]). Particularmente, el satélite Sentinel-2 ha probado ser efectivo para este tipo de análisis gracias a la resolución del sensor a bordo multiespectral - MSI con cuatro bandas de 10 metros y su frecuencia de revisita, permitiendo evaluar tanto la magnitud del daño como su distribución espacial (Molthan et al. [2014]; Womble et al. [2018]). El presente trabajo constituye una aproximación al estudio de la detección de trazas tornádicas mediante teledetección óptica, con énfasis en la identificación de los índices más adecuados para cada situación y en la evaluación de los factores que condicionan su precisión.

2 Datos y Metodología

Para este análisis se escogió un evento tornádico ocurrido el día 21 de Mayo de 2024 en el Suroeste del Estado de Iowa, Estados Unidos (ver Figura 1). El mismo produjo en total 8 tornados de diferentes categorías (2 EF0, 3 EF1, 1 EF2, 1 EF3

y 1 EF4). La selección de este caso en particular se centró en la amplia gama de intensidad de los tornados generados y lo acotado del área afectada por los mismos. Las trayectorias, intensidades y características de los eventos fueron obtenidas a partir del relevamiento oficial del *Storm Prediction Center* (SPC) del *Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos* (NOAA), el cual proporciona información detallada sobre la localización geográfica, la categoría EF (Enhanced Fujita) y la extensión de los daños observados en campo. Las imágenes satelitales empleadas fueron adquiridas por el sensor óptico MSI (Multispectral Instrument) a bordo del satélite Sentinel-2, con resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 metros, según la banda espectral utilizada. A partir de estas imágenes se generaron seis productos distintos, correspondientes a los siguientes índices espectrales:

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): indicador del vigor y cobertura de la vegetación.

NDBI (Normalized Difference Built-up Index): útil para identificar áreas construidas y disturbios en zonas urbanizadas.

MSAVI (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index): optimizado para reducir la influencia del suelo en áreas con vegetación dispersa.

EVI (Enhanced Vegetation Index): diseñado para mejorar la sensibilidad en áreas de alta biomasa.

TrueColor: composición RGB (Bandas 4, 3, 2) para análisis visual cualitativo.

Para cada evento, se procesaron imágenes correspondientes a fechas previas (18 de Mayo) y posteriores al tornado (23 de Mayo), generando para cada índice dos capas espectrales (pre-evento y post-evento). Posteriormente, se aplicó una operación de diferencia (post – pre) por píxel, con el fin de generar imágenes diferenciales que resaltarán los cambios abruptos en la cobertura superficial.

Complementariamente, se realizó un análisis cualitativo visual de las composiciones TrueColor, a fin de identificar patrones de daño no capturados por los índices espectrales y validar visualmente los cambios abruptos en la vegetación, infraestructura y uso del suelo.

3 Resultados y Discusión

A partir de los resultados se puede inferir que los tornados de categoría EF-1 o superior fueron identificados por al menos un índice en algún tramo de su trayectoria (véase 2). Se destaca como excepción el tornado EF-1 con identificador “4”, cuya traza no fue detectada, probablemente debido a su corta longitud y la falta de afectación a áreas detectables por satélite.

En la 3 se presentan los distintos índices y la combinación de bandas "TrueColor", superpuestos con las trazas oficiales del evento analizado. Los mapas muestran la resta pixel a pixel de cada índice, destacando en rojo intenso las áreas donde ocurrieron cambios significativos en el terreno (ya sea vegetación, suelo desnudo o zonas urbanizadas). De manera ilustrativa, se han superpuesto las trazas de los tornados sobre estas áreas. Para el análisis, cada mapa fue revisado detalladamente en QGIS, con el objetivo de evaluar la efectividad de cada índice.

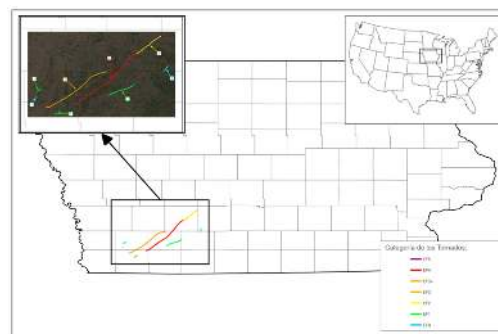


Figura 1: Localización de la zona estudiada e identificación de las diferentes trazas de tornado. Fuente: elaboración propia.

Tornado_ID	Categoría	Distancia Recorrida (Kilómetros)				
		Oficial	NDVI	NDBI	MSAVI	EVI
1	EF-0	1,11	N/D	N/D	N/D	N/D
2	EF-1	4,74	N/D	3,94	3,91	2,6
3	EF-3	55,74	50,91	15,4	51,01	N/D
4	EF-1	5,26	N/D	N/D	N/D	N/D
5	EF-4	69,32	53,22	59,8	51,36	41,09
6	EF-2	23,92	3,51	3,21	2,75	12,43
7	EF-1	20,64	N/D	10,41	N/D	4,76
8	EF-0	6,38	N/D	N/D	N/D	N/D

Figura 2: Resultados del Análisis Realizado

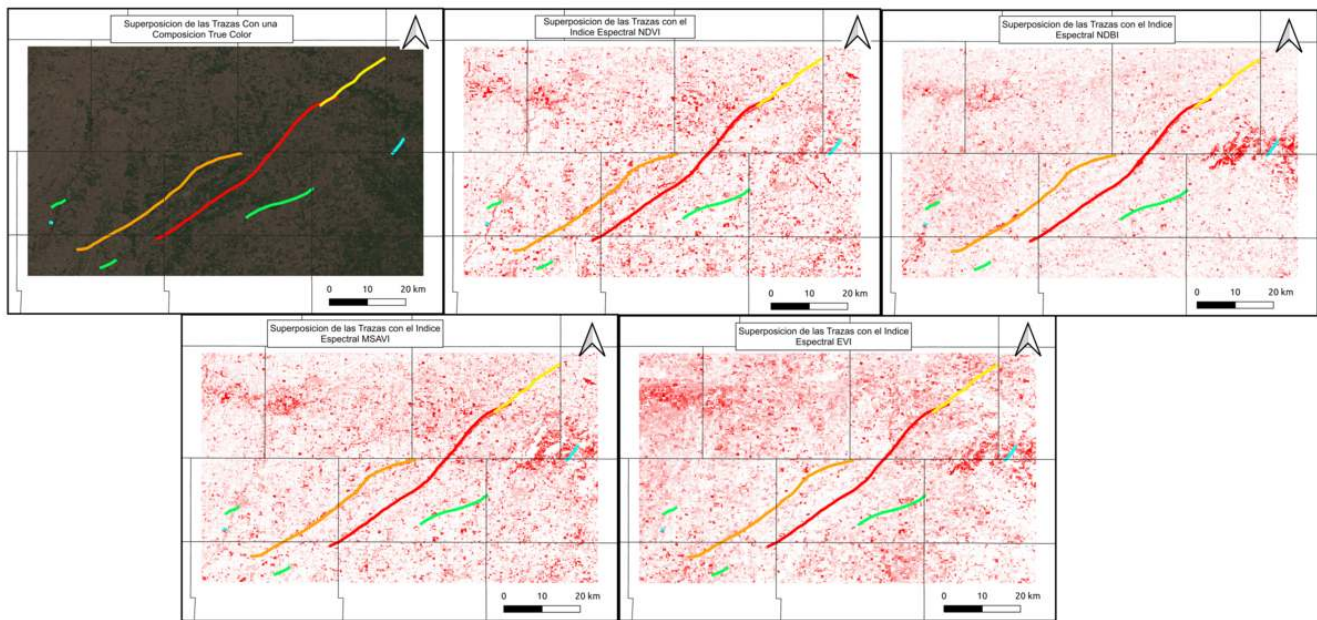


Figura 3: Resultado del análisis de las trazas aplicando los índices NDSVI, NDBI, MSAVI y EVI. Elaboracion propia

4 Conclusión

Dado que el objetivo principal de este trabajo es identificar el paso de tornados mediante distintos índices derivados de imágenes satelitales multiespectrales, se observó que todos los índices analizados mostraron indicios de la ocurrencia de tornados en diversas secciones de las trazas estudiadas. Esto permitió estimar con mayor precisión la extensión real de la traza dejada por el fenómeno, ya que cada índice está diseñado para responder de manera óptima a las distintas coberturas del terreno afectadas por un tornado.

No obstante, se reconoce que este análisis es preliminar y limitado en cuanto al número de eventos. Para fortalecer la validez de esta metodología, será necesario ampliar la base de casos evaluados y explorar sus limitaciones, pensando en implementar esta técnica en regiones donde los métodos tradicionales de detección in situ son difíciles de aplicar.

Bibliografía

- C. Burow, D. M. Schultz, and M. A. Magsig. Using sentinel-2 to detect tornado tracks in vegetated terrain. *Remote Sensing*, 12(8):1287, 2020. doi: 10.3390/rs12081287.
- G. J. Jedlovec, A. L. Molthan, and G. T. Stano. Satellite detection of tornado tracks using modis data. *Weather and Forecasting*, 21(6): 890–904, 2006. doi: 10.1175/WAF998.1.
- D. M. Kingfield and K. M. de Beurs. Assessing damage tracks of 2013 moore and el reno, oklahoma tornadoes using landsat imagery. *Remote Sensing*, 9(5):433, 2017. doi: 10.3390/rs9050433.
- A. L. Molthan, G. J. Jedlovec, and W. M. Lapenta. Modis data for damage assessment of severe storms and tornadoes. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1):084699, 2014.
- A. L. Molthan, J. E. Burks, J. L. Case, et al. Evaluation of satellite-based tornado damage detection with high-resolution commercial imagery. *Journal of Operational Meteorology*, 8(3):43–62, 2020.
- S. W. Myint, C. P. Giri, and M. C. Wimberly. Detection of tornado damage tracks using remote sensing and gis. *Geocarto International*, 23 (1):3–18, 2008.
- A. J. Womble, A. L. Molthan, et al. Application of sentinel-2 satellite data for tornado damage assessment. *Remote Sensing Letters*, 9(2): 113–122, 2018.

APLICACIÓN DE MODELOS DE MACHINE LEARNING CON VARIABLES EPIDEMIOLÓGICAS Y METEOROLÓGICAS PARA LA PREDICCIÓN DE CASOS DE LA ENFERMEDAD DEL DENGUE

Gonzalo M. Díaz^{1,4}, Anahí Chiavetta¹, Julieta Siches², Lorena Ferreira¹, Federico Santoro², Dalila Rueda², Silvina Moisés², Cecilia Cappa³, Cecilia González Lebrero², Lucía Maffey², Gladys Fattore², M. Eugenia Utgés³, Mariana Manteca Acosta³
gdiaz@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Ministerio de Salud de la Nación (MSAL)

³Centro Nacional de Diagnóstico e Investigación en Endemoepidemias (CeNDIE). ANLIS – Malbrán

⁴Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires (DCAO-FCEN-UBA)

Palabras clave: dengue, machine learning, predicción, MSAL, CeNDIE

1. INTRODUCCIÓN

Una de las misiones fundamentales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) consiste en brindar información a las autoridades y la sociedad que permita desarrollar herramientas para prevenir y/o combatir adversidades en las que se encuentren involucrados factores meteorológicos. En el marco de este objetivo, dicho Organismo ha sido convocado por el Ministerio de Salud de la Nación y el CeNDIE – ANLIS Malbrán para llevar adelante un plan de predicción de casos de Dengue; una enfermedad viral que se encuentra en aumento en los últimos años y que puede generar desde síntomas gripales hasta cuadros potencialmente mortales. A partir de mesas de trabajo realizadas entre los tres organismos se analizaron distintos enfoques y se pusieron en común distintos conocimientos en el ámbito meteorológico y salud para una óptima implementación de modelos de predicción de casos de dengue, siendo las variables meteorológicas los predictores más relevantes para explicar el comportamiento del mosquito portador del virus (*Aedes aegypti*). Este trabajo consiste en la aplicación de modelos simples de Machine Learning para la detección de casos de dengue, incorporando tanto datos meteorológicos como epidemiológicos y de vectores, impulsando la sinergia entre las instituciones.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos utilizados para este trabajo fueron datos meteorológicos (precipitación, temperatura mínima, humedad relativa), de balance hídrico (almacenaje de agua en el suelo, evapotranspiración real y potencial) obtenidos del modelo operativo BHOA del SMN (Fernández Long y otros, 2012) y de epidemiología (brindados por el Ministerio de Salud de la Nación). Principalmente, los datos relacionados a la meteorología y el BHOA se encontraban en escala diaria y fueron procesados a escala de semana epidemiológica, escala en la cual se registran los casos positivos de dengue. Asimismo, otros parámetros vinculados a la detección de larvas de mosquito por unidad de vivienda (vectores) fueron utilizados como variable predictora de los modelos. Se utilizaron modelos simples de Machine Learning para la detección de casos de dengue: Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) y Regresión Lineal Múltiple (RLM). Con el fin de lograr modelos de predicción, las variables

predictoras fueron desfasadas dos semanas con la variable respuesta (casos positivos autóctonos de dengue). Los modelos fueron forzados con datos meteorológicos, del BHOA y de vectores, para un período de entrenamiento (Figura 1).

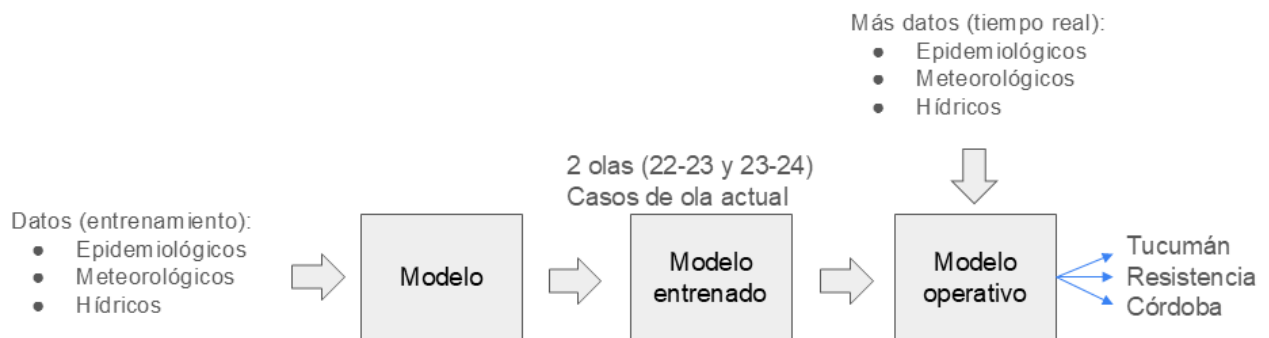


Figura 1: Esquema representativo de la forma de trabajo con los modelos.

Se utilizaron datos epidemiológicos, meteorológicos e hídricos (estos últimos en referencia al BHOA) para forzar los modelos y entrenarlos para la ola o temporada 22-23 (en este entrenamiento, una de las variables predictoras a utilizar también fue la de los casos totales, incluyendo autóctonos e importados). Se realizaron varias pruebas de combinación de parámetros y según la ciudad analizada (San Miguel de Tucumán, Resistencia o Córdoba) se alcanzaron distintos niveles de ajuste. Finalmente, el modelo entrenado se encuentra ejecutándose de forma operativamente experimental en el SMN para ir analizando su performance semana a semana (Figura 1).

3. DISCUSIÓN

La mejor combinación de variables predictoras varía por modelo y según la ciudad analizada. Para cada modelo de RF, SVM y RLM se eligieron dos combinaciones distintas de variables que fueron las mejores obtenidas en función a varias pruebas de combinaciones. La Figura 2 en su panel principal muestra para Córdoba la predicción de cada grupo de modelos y se indica con línea negra la evolución real de casos de dengue para esas semanas epidemiológicas. Para la predicción de la semana 10 y 11 de la temporada 24-25 los mejores modelos que representaban la evolución de casos de dengue eran los asociados a RF (barras celestes y azules en Figura 2). Los modelos RLM también muestran un aumento de casos para esas dos semanas con la salvedad de que el valor absoluto se observa desplazado hacia casos superiores (barras naranjas y rojas en Figura 2). Por último, los modelos asociados a SVM, para esas dos semanas, muestran un pequeño aumento o un decaimiento, manteniendo los casos casi constantes entre semana y semana (barras verdes y violetas en Figura 2). Vale destacar que los modelos deben continuar su mejora y optimización ya que en varios momentos presentan casos de falsas alarmas, como se observa entre la semana 50/2024 y 02/2025, en donde RF registra casos y en las observaciones no se detectan (Figura 2).

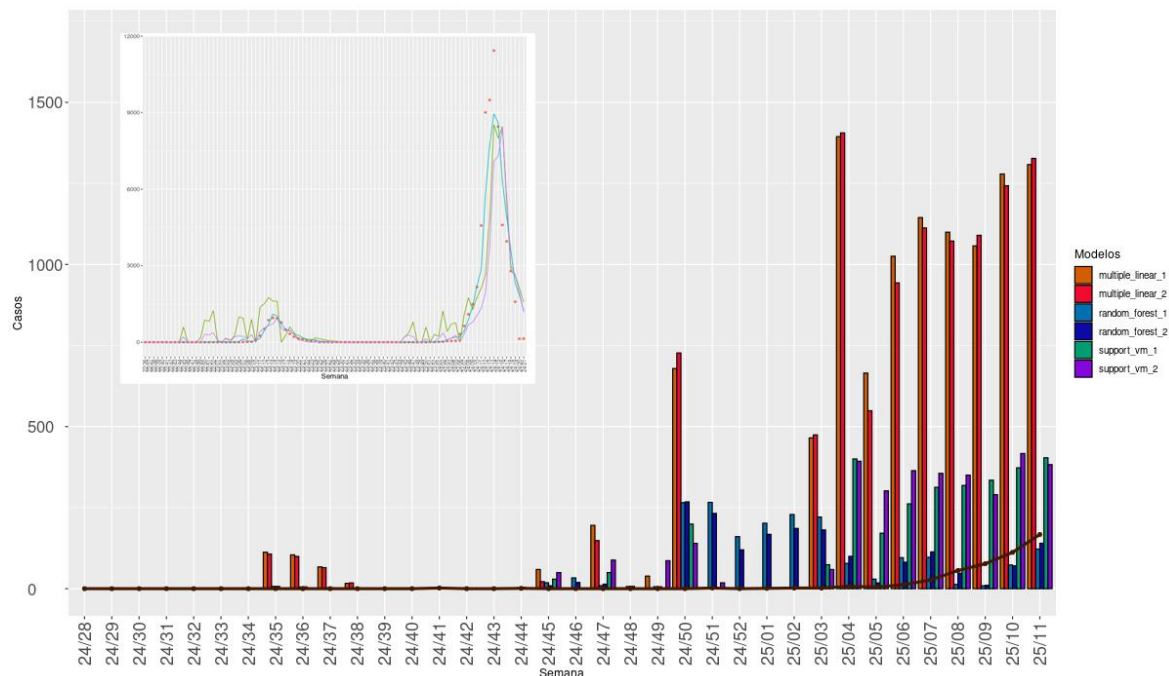


Figura 2: Panel superior, período de entrenamiento para los modelos RF (línea celeste), SVM (línea violeta) y RLM (línea verde). Panel principal, período de la temporada actual para los dos tipos de: modelo RF (barras celestes y azules), modelo SVM (barras verdes y violetas) y modelo RLM (barras naranjas y rojas). En línea negra la cantidad real de casos autóctonos de dengue. Ambas figuras representan el caso de Córdoba.

Los modelos fueron entrenados con las dos temporadas anteriores, siendo ambas temporadas muy distintas en comportamiento (Figura 2 panel superior izquierdo). Considerar estas dos temporadas como entrenamiento, tenía como fin que los modelos pudieran aprender situaciones tan distintas, y así obtener una mejor performance para el período actual. Sin embargo, vale destacar que la temporada actual, también tuvo un comportamiento muy diferente de las anteriores y esto dificultó que los modelos puedan detectar comportamientos específicos en la presente temporada.

Finalmente, la implementación de modelos de Machine Learning tiene como objetivo contribuir al fortalecimiento del sistema de salud mediante el desarrollo de herramientas aplicables a distintas proyecciones de riesgo o favorabilidad de brotes de dengue, con un nivel de desagregación jurisdiccional a escala nacional. Se espera que los resultados obtenidos permitan la generación de una capa SIG (Sistema de Información Geográfica), integrable al análisis espacial y gestión del riesgo, brindando soporte a la toma de decisiones sanitarias informadas.

4. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Bach. Eugenia Bontempi del Servicio Meteorológico Nacional por el procesamiento realizado de los datos del modelo BHOA operativo del SMN para su aplicación a los modelos de Machine Learning.

5. REFERENCIAS

Fernández Long M.E., Spescha L., Barnatán I. y Murphy G., 2012: Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). *Agronomía y Ambiente*, vol. 32, num. 1-2.

Monitoreo y control de los datos de observación de superficie para la mejora de los pronósticos numéricos. Acercamiento regional

Martina Suaya¹, Lucas Berengua¹, Mauricio Gatto¹, Osvaldo Urrutty y Claudia Lanzani¹
msuaya@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Observaciones, calidad, pronóstico numérico.

1) INTRODUCCIÓN

La incorporación de observaciones de superficie impacta significativamente la precisión de los pronósticos, especialmente en áreas con escasa cobertura de datos. Existe un alto impacto de las observaciones de superficie, especialmente cuando se despliegan en áreas con escasez de datos. A pesar de ser menos numerosas en comparación con los datos satelitales, las observaciones de superficie tienen una fuerte influencia en la precisión de los pronósticos en muchas regiones (Pauley 2022). Además, las observaciones de superficie generan beneficios locales, regionales y globales. Cuando se utiliza una nueva observación, su impacto será, inicialmente, local, pero a medida que los sistemas meteorológicos se desplazan, el impacto se desplaza con ellos, de modo que cada día aumenta el área que se beneficia de la observación original.

El Centro Regional WIGOS (CRW, por sus siglas en inglés) del Sistema Mundial de Observación Integrada es una iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para mejorar la calidad y la accesibilidad de los datos meteorológicos, hidrológicos y climáticos. El Sistema Mundial Integrado de Sistemas de Observación de la OMM (WIGOS) constituye el nuevo marco general para todos los sistemas de observación. Los desafíos globales actuales exigen una modernización y ampliación significativa a nivel mundial de las observaciones. Los Centros Regionales Wigos desempeñan un papel fundamental en el avance de la implementación del WIGOS en su Región o subregión, proporcionando coordinación regional y apoyo técnico a los países. Las principales funciones de los Centros Regionales Wigos se pueden traducir en evaluar la calidad de las observaciones, su disponibilidad y oportunidad en el marco de la cadena de valor entre observaciones y pronósticos numéricos globales del tiempo. La gestión involucra tanto la observación como los metadatos que la acompañan.

El SMN adhirió a esta iniciativa en mayo 2020 pasando por distintas etapas de implementación hasta obtener el status de Operativo en 2024. El CRW Argentina realiza funciones esenciales como la gestión de metadatos, la evaluación y la gestión de incidentes con respecto a las observaciones meteorológicas. La región dentro del mandato geográfico del CRW incluye Brasil, Bolivia, Chile, Paraguay, Perú y Uruguay y la Antártida. Además, se realizan asesoramientos y capacitaciones extendidas para todos los miembros de habla hispana de Centroamérica, Sudamérica y Caribe.

Tabla 1: evolución de número de estaciones operativas de intercambio global. En general los países han aumentado los puntos de observación y han compartido libremente las mismas. El Centro Regional Wigos de Argentina contribuye a la integración de esta información en forma exitosa.

País	abr-22	abr-23	abr-24	abr-25
Argentina	89	117	125	119
Bolivia	31	30	32	31
Brasil	519	692	712	585
Chile	31	67	112	117
Paraguay	20	20	19	17
Perú	28	47	51	59
Uruguay	15	19	23	27
Total de estaciones	733	992	1074	955

2) RESULTADOS

La implementación del CRW en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina comenzó en

2020 acompañando la implementación de Wigos en la región. Durante este tiempo los países de la región de Sudamérica comenzaron a ampliar y/o sustituir sus redes de observación “oficiales” con observaciones de estaciones automáticas propias o de organismos asociados (Tabla 1). Mientras se avanza hacia la automatización y reducción de observaciones manuales es necesario mantener el flujo de información hacia el mundo y atendiendo las obligaciones de los países como socios de la Organización Meteorológica Mundial, y como beneficiarios mismos de los sistemas globales de monitoreo del tiempo y el clima.

La OMM implementó una serie de herramientas para la implementación de Wigos. Ellas son Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR) para la declaración de metadatos; Wigos Data Quality Monitoring System (WDQMS) para el monitoreo de la calidad y disponibilidad de las observaciones; y el Incidente Management System para la gestión de incidentes. Cómo operar y gestionar estas herramientas por parte de los CRWs se describen en la Guía Técnica para los Centros Regionales Wigos y la Guía de Wigos.

Se muestra en Figuras 1 la herramienta de monitoreo de la OMM, llamada Wigos Data Quality Monitoring System (WDQMS), basado en los resultados del proceso de asimilación de datos (en este caso presión de superficie) de los Centros Globales de Pronóstico Numérico. Esta herramienta nos muestra la cantidad de observaciones recibidas y procesadas por los Centros para analizar la cantidad, como así también la diferencia entre el valor observado con el valor esperado. Los distintos colores que se muestran en las figuras dan cuenta de una correspondencia con los metadatos declarados en OSCAR. Cada punto representa una estación sinóptica de superficie “operativa”. La meta es que todos los puntos se muestren en verde dando cuenta que no se pierden observaciones, que las mismas se realizan y llegan en tiempo real a todo el mundo, y que además hay una correspondencia entre lo que el país “declara” y realmente se intercambia. Con respecto a la calidad de los datos la meta es que la diferencia O-B se encuentra acotada en promedio en menos de 1 hPa y se muestra en mapas análogos.

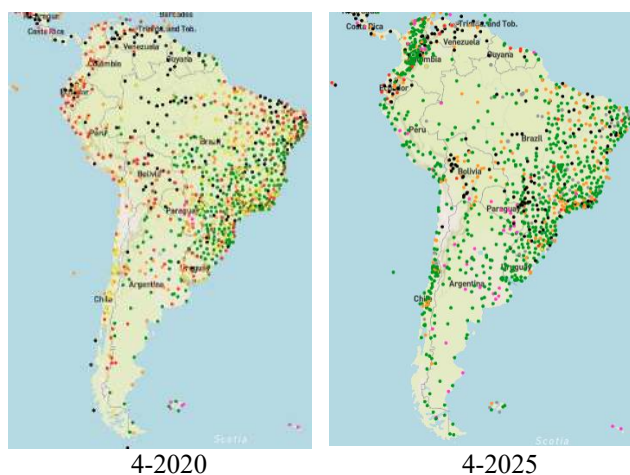


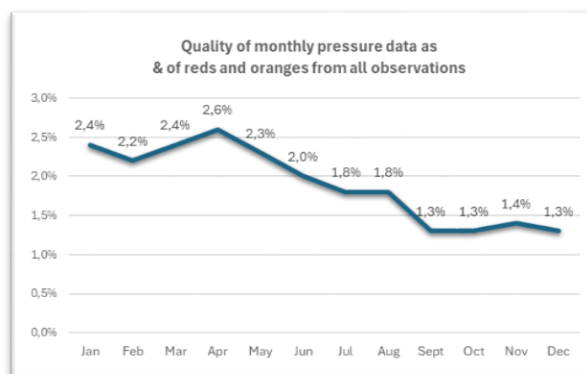
Figura 1: El sistema WDQMS (wdmqms.int) permite revisar la evolución de la disponibilidad de observaciones de superficie desde 2020. Cada punto representa una estación sinóptica de superficie. En verde se indican aquellas observaciones que se recibieron como se esperaban durante el mes en cuestión, y los demás colores indican algún tipo de problema en la recepción de los datos por parte de los centros mundiales de pronóstico. Por ejemplo: el color negro indica que la observación está ausente, y el color rojo que se recibieron menos del 30% de los datos según se esperaban. La meta en la gestión de metadatos es que los puntos del mapa sean verdes.

Los países publicamos la información de las observaciones que gestionamos y a su vez disponibilizamos a través de los sistemas globales de comunicaciones meteorológicas. La gestión de metadatos se realiza a través de Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR/Surface), la comunicación a través de Wmo Information System (WIS), y el monitoreo de la calidad (y disponibilidad) a través del sistema de calidad del Wigos Data Quality Monitoring System (WDQMS). Las observaciones diseminadas en tiempo real son monitoreadas automáticamente por los centros de pronóstico globales que contribuyen a este proyecto. Actualmente NCEP, ECMWF, JMA y DWD. La gestión de los “incidentes” la realizan los Centros Regionales Wigos.

Los resultados de las gestiones que realiza el Centro Regional Wigos comprende el monitoreo de calidad y disponibilidad en forma diaria (Figura 2), emisión y seguimiento de incidentes a través de un sistema de tickets (hasta la fecha más de 400 tickets generados), reuniones mensuales con los países en forma grupal, y reuniones anuales y seguimiento con países en particular. Se muestran a continuación algunos

indicadores de la gestión del CRW de Argentina para obtener hoy en día una situación de más observaciones y de mejor calidad.

a) Calidad de la presión de superficie mensual



b) Disponibilidad de mensual

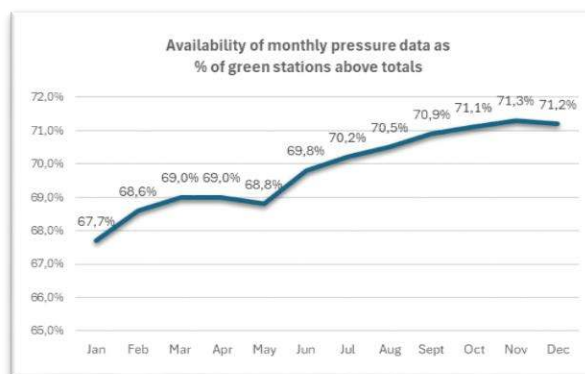


Figura 2: Indicadores de control del Centro Regional Wigos del año 2024 de: a) Calidad de la presión de superficie mensual: Mide la performance de la gestión del CRW con respecto la variable presión. La meta es que menos del 2,7% de las estaciones monitoreadas con errores gruesos en la observación; b) Disponibilidad de la presión de superficie mensual. La meta es mantener las observaciones disponibles en un porcentaje >65%

3) CONCLUSIONES

Un intercambio de más datos al mundo de calidad y oportunidad son fundamentales para avanzar en mejores pronósticos (y reanálisis) y comenzar una cadena de valor hacia la entrega de servicios más precisos. Los Centros Regionales Wigos constantemente monitoreamos la calidad de los datos y gestionamos incidentes con los países para contribuir a su solución. La disponibilidad de herramientas para conocimiento de dónde hay observaciones como OSCAR, y de cómo es la calidad de estas observaciones, como WDQMS, posibilitan acciones con resultados inmediatos y concretos para el fin que estos sistemas de observación procuran: entregar un conjunto de observaciones de calidad para afianzar la cadena de valor del sistema de observación, pronóstico y servicios meteorológicos.

Por otro lado, el Centro Regional Wigos de Argentina acompaña a los países en la ampliación de sus redes, proceso de automatización de las observaciones, utilización de herramientas Wigos para que estas nuevas observaciones cumplan con las formas, hacen a este Centro un eslabón necesario en la implementación exitosa de Wigos en la región.

El foco en este trabajo se dio en las aplicaciones relacionadas el pronóstico numérico del tiempo a escala global y las posteriores reanálisis que realizan los Centros Mundiales de Pronóstico, pero herramientas similares y análogas también se están desarrollando para otro tipo de observaciones y dominios (climáticas, marinas, hidrológicas y otros).

4) BIBLIOGRAFÍA

Guide to the WMO Integrated Global Observing System, WMO-No. 1165, World Meteorological Organization (WMO), 2024, ISBN 978-92-63-11165-4, <https://library.wmo.int/idurl/4/55696>

Pauley P, Ingleby B (2022) Assimilation of in-situ observations. In: Park SK, Xu L (eds) Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. IV). Springer. Pages 293-371 in <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-77722-7>

Technical Guidelines for Regional WIGOS Centres on the WIGOS Data Quality Monitoring System, World Meteorological Organization (WMO), 2018, ISBN 978-92-63-11224-8, <https://library.wmo.int/idurl/4/56347>

IMPACTO DE LOS EVENTOS EXTREMOS EN EL PERSONAL DE SALUD DE UN HOSPITAL PÚBLICO DEL ÁREA DE LA CUENCA MATANZA RIACHUELO, BUENOS AIRES

**Silvia Fontán¹, María Daniela Rímoli Schmidt¹, Patricia Cruzate¹, Dana Zoe Watson¹,
Aldana Pica¹, Sofía González de Quevedo¹, Matilde Rusticucci²**

sfontan@unlam.edu.ar

¹Departamento de Ciencias de la Salud (UNLaM)

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (UBA/CONICET)

Palabras clave: Temperatura, Precipitación, Situaciones de salud

1) INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las sociedades y de las personas está en estrecha relación con las condiciones del ambiente. El clima resulta determinante ya que juega un rol importante: La relación entre la salud y los eventos extremos de clima son una preocupación ya que tiene un impacto significativo en la salud de las poblaciones, afectando áreas como la seguridad alimentaria hasta la propagación de enfermedades. La adaptación y la mitigación son esenciales para reducir estos impactos y fortalecer la resiliencia de las comunidades ante los escenarios de cambio climático. (Organización Panamericana de la Salud, 2023). El Área Metropolitana de Buenos Aires es el conglomerado urbano más grande del país, con casi 15.000.000 de personas con altos niveles de desigualdad en las condiciones de vida. En la Cuenca Matanza Riachuelo (CMR) viven 4.706.533 personas (INDEC, 2025), esto es más del 10% de la población argentina, con una alta densidad poblacional. Teniendo en cuenta que la variabilidad climática es un fenómeno regional, sin embargo, su impacto se percibe en el espacio local y considerando también que los efectores de salud locales son los actores de quienes se espera medidas de anticipación, respuesta y rehabilitación frente a un evento inesperado. El objetivo del presente trabajo fue relevar el impacto de los eventos extremos en el personal de salud de un hospital público de la CMR) entre 2015-2024.

2) METODOLOGÍA

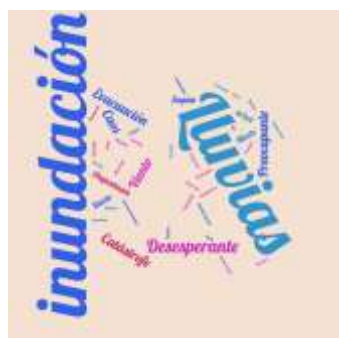
El enfoque metodológico fue cuali-cuantitativo. La información fue relevada mediante entrevistas semi-estructuradas, a una muestra no representativa de personal del sistema de atención y cuidados a la salud de un efector de salud del área de la Cuenca Matanza Riachuelo. El protocolo fue aprobado por el Comité de Ética de la Investigación en Salud del hospital en donde se desarrolló el trabajo. Las entrevistas se llevaron a cabo en encuentros presenciales. Se utilizó un instrumento de recolección que contó con preguntas de respuesta cerradas y abiertas, lo que favoreció el enriquecimiento de la información sobre los cursos de acción, enfoques y sentido que los actores asignan a su acción. Fueron incluidas personas mayores de 18 años que realizaran tareas profesionales, administrativas o técnicas en alguno de los servicios de salud. Las dimensiones de análisis que se indagaron fueron: Visibilidad de los impactos de temperaturas y precipitaciones extremas en años anteriores; descripción de vivencias personales en esos eventos extremos; enfermedades y eventos de salud atendidos que pudieran estar relacionadas con eventos extremos; efectos a nivel psicológico o emocional reconocidos en los grupos afectados. Para el análisis de los datos, las respuestas cerradas se sistematizaron en una base de datos en Microsoft Excel y, luego, analizadas con el programa IBM SPSS Statistics. Las respuestas abiertas, se codificaron y, posteriormente, se crearon nubes de palabras con un programa de código abierto.

3) RESULTADOS



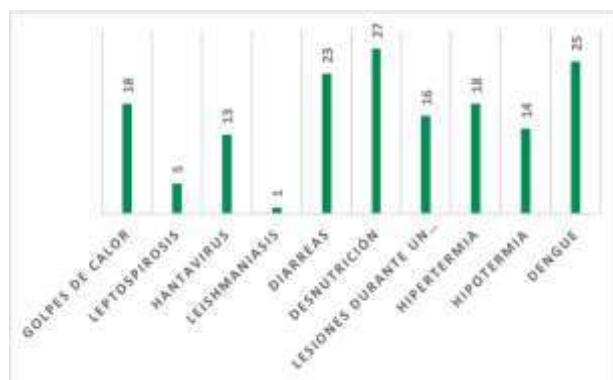
El 89,7% de los participantes recordaron la ocurrencia de eventos extremos de temperatura mientras trabajaba en el hospital. Entre quienes recuerdan eventos extremos de temperatura, 22 mencionaron los eventos de calor durante el verano en los años 2022 (7), 2023 (10) y 2024 (5); 1 recordó un evento extremo en primavera y 5 recordaron eventos extremos de frío en invierno durante los años 2023 (2) y 2024 (3). Las palabras más utilizadas para describir cómo los participantes vivenciaron los eventos extremos fueron “sofocante”, “calor”, “incendios” y “extremo” (Figura 1).

Figura 1. Palabras que describen los eventos extremos de temperatura.



El 87,2% de los participantes recordaron la ocurrencia de eventos extremos de precipitación mientras trabajaba en el hospital. Al indagar sobre el recuerdo de eventos extremos de precipitación, 1 entrevistado afirmó recordarlos durante el año 2013; 9 entrevistados, en 2023; 16 entrevistados, en el año 2024 y 13 entrevistados respondieron desconocer o no contestaron. Las palabras más frecuentes para describir las vivencias en los eventos extremos de precipitación fueron “lluvias” e “inundación” y se muestran en la Figura 2.

Figura 2. Palabras que describen los eventos extremos de precipitación.



Al consultar a los participantes sobre si atendieron enfermedades y problemáticas de salud que puedan tener relación con eventos extremos, se mencionaron: casos de desnutrición (27), dengue (25), diarreas (23), golpes de calor (18) e hipertermia (14), entre otras (Figura 3)

Figura 3. Situaciones de salud atendidas por el personal del hospital.



En cuanto a los efectos a nivel psicológico o emocional reconocidos en los grupos afectados, los entrevistados afirman haber reconocido dichos efectos en los pacientes y los describieron con palabras como “angustia”, seguida de “ansiedad” y “preocupación”, de acuerdo a la Figura 4.

Figura 4. Efectos a nivel psicológico o emocional de los grupos afectados.

4) CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio evidencian que el personal de salud del hospital en el que se desarrolla este trabajo, percibe de manera significativa el impacto de los eventos extremos de temperatura y precipitación. La mayoría de los participantes recordaron la ocurrencia de dichos eventos durante su labor en la institución, con una particular remembranza de olas de calor en los veranos recientes y episodios intensos de precipitación en los últimos dos años. Estas vivencias se asocian con descripciones como "sofocante" para el calor e "inundación" para las lluvias, reflejando la intensidad de los fenómenos.

Es fundamental destacar que el personal de salud no sólo es testigo de estos eventos, sino que atiende directamente sus consecuencias en la salud de la población. Se registró una frecuencia considerable en la atención de casos de desnutrición, dengue, diarreas, golpes de calor, hipotermia, lesiones y otras afecciones que los profesionales vinculan con estos extremos climáticos. Esto sugiere una presión adicional sobre los servicios de salud, que debe dar respuesta a eventos de salud exacerbados o directamente causados por condiciones meteorológicas adversas. Además, el estudio revela que los entrevistados identifican efectos emocionales y psicológicos negativos en los pacientes afectados por estos eventos, señalando términos como "angustia", "ansiedad" y "preocupación", lo que indica que el impacto de los eventos extremos trasciende lo físico, afectando también la salud mental de la comunidad.

En un área con alta densidad poblacional, fuerte actividad productiva y niveles de desigualdad social como la Cuenca Matanza Riachuelo, estos hallazgos son cruciales. Subrayan la necesidad de integrar la perspectiva del cambio climático en la planificación sanitaria, fortaleciendo la capacitación del personal, los sistemas de alerta temprana y las estrategias de respuesta y adaptación del sistema de salud. Considerar estos impactos permitirá desarrollar intervenciones más efectivas para proteger la salud de la población y aumentar la resiliencia de las comunidades y el sistema de salud frente a la creciente variabilidad y cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Al hospital en el cual se llevaron a cabo las entrevistas.

REFERENCIAS

Organización Panamericana de la Salud, 2023: Cambio climático y salud. Recuperado de <https://www.paho.org/es/temas/cambio-climatico-salud>

INDEC, 2025: Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. Recuperado de https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/poblacion/censo2022_ipmh.pdf

SIMULACIÓN DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA DE OLAS CON EL MODELO WRF APLICADO A UN CASO DE BÚSQUEDA Y RESCATE DE PERSONAS EN EL MAR

Gabriel Rossi¹, Lucas Zapata^{1,2}
garossi@fcaglp.unlp.edu.ar

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG-UNLP)

² Grupo de Modelado Numérico de la Atmósfera FCAG-UNLP

Palabras clave: Modelado numérico, SAR, océano Atlántico sur.

1) INTRODUCCIÓN

El modelado numérico de la atmósfera constituye una herramienta fundamental para la simulación de variables meteorológicas y su interacción con el océano, permitiendo analizar eventos extremos y su impacto en la seguridad marítima. En este trabajo se implementó el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para simular el comportamiento del viento durante los días previos y posteriores a un evento de búsqueda y rescate de personas en el mar (SAR) ocurrido en noviembre de 2017 en el océano Atlántico. A partir de los campos de viento generados por WRF, se estimó la altura significativa de ola (SWH), comparando los resultados con los datos de reanálisis ERA5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF).

Conocer con precisión la SWH es esencial para evaluar el estado del mar y su peligrosidad, especialmente durante operaciones navales, de búsqueda y rescate, o navegación en zonas de alta exposición. Esta variable resume estadísticamente la energía del oleaje y permite anticipar condiciones adversas que podrían comprometer la seguridad náutica. En el contexto de eventos SAR, una representación adecuada del oleaje puede ayudar a comprender los factores ambientales que condicionan los accidentes en la región y, en consecuencia, aportar herramientas para la prevención o mitigación de riesgos en futuras situaciones similares. El objetivo principal de este trabajo fue inferir la SWH para el periodo comprendido entre el 14 al 17 de noviembre de 2017 mediante simulaciones utilizando el modelo WRF.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para las simulaciones correspondientes al periodo comprendido entre el 14 y el 17 de noviembre de 2017, se utilizó el modelo WRF, forzado con datos de análisis del Global Forecast System (GFS) del NCEP, con una resolución horizontal de 0.5°. La simulación se estructuró en dos dominios anidados: un dominio externo D01 con resolución espacial de 10 km, y un dominio interno D02, de mayor resolución (3.3 km), centrado en la región del evento SAR sobre el Atlántico Sur (Figura 1).

La configuración física del modelo utilizada en las simulaciones (Skamarock y otros, 2019) se detalla en el siguiente cuadro:

mp_physics	ra_lw	ra_sw	sf_sfclay	sf_surface	bl_pbl	cu_physics
[6] WSM6	[4] RRTMG	[4] RRTMG	[1] MM5	[2] Noah	[1] Yonsei University	[1] Kain-Fritsch (solo D01)

La estimación de SWH se basó en una formulación empírica cuadrática propuesta por Rossby

y Montgomery (1935), bajo la hipótesis de mar completamente desarrollado. Esta formulación aparece como la ecuación (202) en el trabajo original y se expresa como:

$$SWH = \frac{G}{g} U^2$$

donde G es una constante adimensional, g es la aceleración de la gravedad y U es la velocidad del viento a 10 metros de altura.

En este trabajo se adoptó un valor de $G = 0.24$, compatible con estudios anteriores (Holthuijsen, 2007) realizados para condiciones oceánicas similares. Esta relación supone que la energía del oleaje ha alcanzado un equilibrio con el viento local, es decir, no se incrementará salvo que aumenten la velocidad del viento o el fetch. Como referencia para la verificación de resultados, se utilizaron datos de reanálisis ERA5, una base de datos proporcionada por el ECMWF que ofrece estimaciones horarias de un amplio rango de variables atmosféricas, terrestres y oceánicas, con una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Se seleccionaron las siguientes variables: presión a nivel medio del mar (mslp), componentes zonal y meridional del viento a 10 metros (u y v) y altura significativa de olas (SWH).

El parámetro SWH en ERA5 representa la altura media del tercio más alto de las olas superficiales, considerando tanto el mar de viento generado localmente como el oleaje propagado desde otras regiones. Si bien se reconocen las limitaciones asociadas a tomar el reanálisis como "verdad observada", su alta resolución espacial y frecuencia temporal lo convierten en una fuente confiable para evaluar el desempeño del modelo WRF en la estimación del oleaje.

El análisis se enfocó específicamente en el Atlántico Sur, en la región próxima al evento SAR, con el objetivo de evaluar la capacidad de la metodología propuesta para representar condiciones de mar relevantes para operaciones de búsqueda y rescate.

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la Figura 2 se presentan los campos de SWH correspondientes al 15 de noviembre de 2017 a las 03 UTC, según ERA5 (panel a) y WRF D02 (panel b). Se observa que el modelo WRF es capaz de reproducir de forma razonable la ubicación general del máximo SWH al este de Tierra del Fuego y al norte de las Islas Malvinas, en concordancia con la circulación ciclónica intensa evidenciada en la Figura 3. Si bien en las figuras 2a y 2b se puede ver el máximo de SWH en una región circundante, WRF lo posiciona ligeramente desplazado hacia el noreste en comparación con ERA5.

Por otra parte, la Figura 3 muestra un campo de presión coherente con un sistema de baja presión que se profundiza en el transcurso del día.

El modelo WRF (Figura 2b) presenta vientos más intensos en la región del evento, posiblemente como resultado de diferencias en la representación del forzante térmico o de los



Figura 1: Configuración de dominios del modelo WRF.

esquemas físicos. Esta sobrestimación de viento influye directamente en una estimación mayor de los valores de SWH, con máximos que superan los 5 metros, lo que se condice con el supuesto de mar completamente desarrollado.

Si bien se observan diferencias en la magnitud y extensión de las áreas con SWH elevado, la distribución espacial general muestra una estructura más o menos similar. La simulación con WRF tiende a sobreestimar los valores máximos de SWH en comparación con ERA5. Cabe destacar que la formulación empleada para estimar SWH, aunque sencilla, resultó útil para capturar los patrones principales del oleaje asociado a este evento.

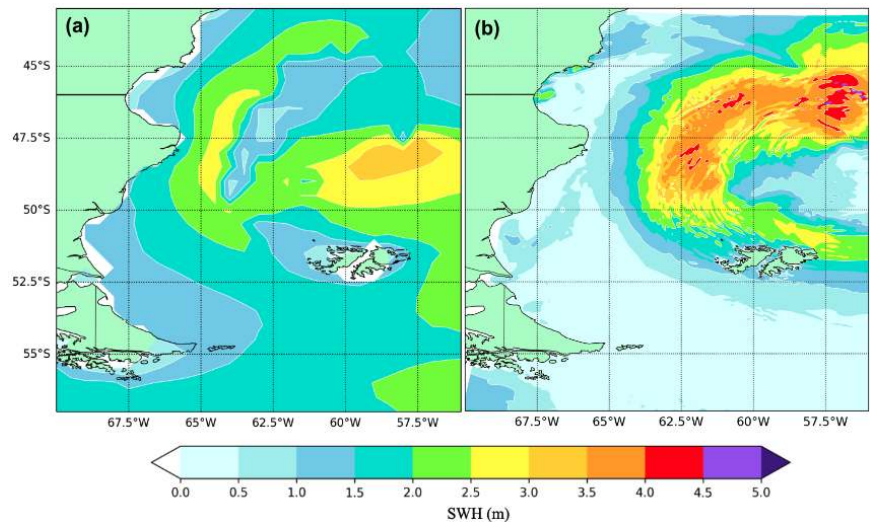


Figura 2: Campo SWH. 15/11/17 03 UTC. Reanálisis ERA5 (a) y WRF D02 (b).

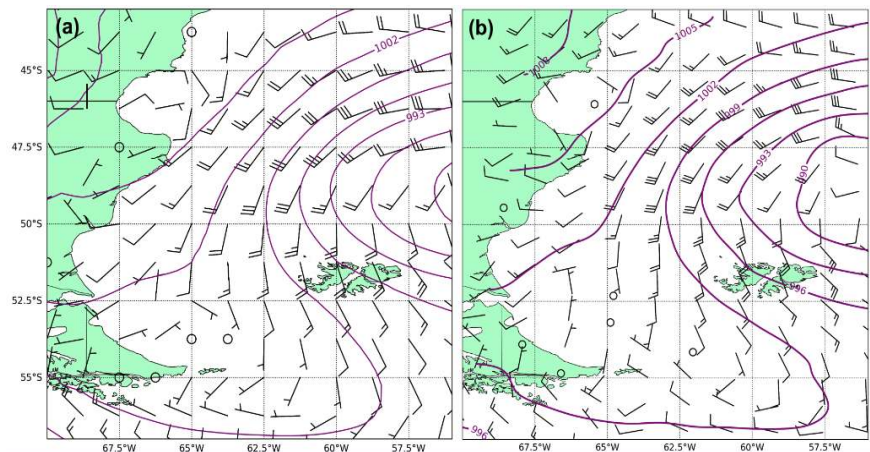


Figura 3: Campo de presión a nivel del mar y viento a 10m para el 15/11/17 03 UTC. Reanálisis ERA5 (a) y WRF D02 (b).

RECONOCIMIENTOS

Los resultados del presente estudio fueron realizados como parte de los trabajos prácticos del curso de Modelado Numérico de la Atmósfera dictado en la FCAG en 2024.

REFERENCIAS

Holthuijsen LH, 2007: Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press. 145-196. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>

Rossby, C. G., y Montgomery, R. B., 1935: The layer of frictional influence in wind and ocean currents. *Papers in Physical Oceanography and Meteorology*, 3(3), 1–101.

Skamarock W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J. y otros, 2019: A description of the advanced research WRF version 4. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.

ANÁLISIS TOPOLÓGICO DE LA DINÁMICA SUBESTACIONAL DEL JET SUBPOLAR SOBRE SUDAMÉRICA

Marco E. Micieli^{1,2}, Marisol Osman^{1,2,3}, Denisse Sciamarella^{1,2,4}
marco.micieli@cima.fcen.uba.ar. Autor correspondiente.

¹CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

²CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

³Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

⁴CNRS – Centre National de la Recherche Scientifique, 75016 Paris, France.

Palabras clave: *Weather Regimes*, Homologías Persistentes, Topología del Caos.

1) INTRODUCCIÓN

El jet subpolar (*Polar-Front Jet*, PFJ) es una estrecha banda de aire de máxima intensidad de viento en altura resultado del fuerte contraste térmico extratropical y representa una parte fundamental de la circulación atmosférica de gran escala. En la escala subestacional, esta circulación es abordada frecuentemente mediante el enfoque de los regímenes meteorológicos (*Weather Regimes*, WRs), un conjunto reducido de patrones recurrentes, persistentes y cuasi-estacionarios asociados a la dinámica del flujo de gran escala. Sin embargo, habitualmente se utilizan diversas técnicas estadísticas para identificarlos que conllevan a resultados ambiguos, impidiendo una definición física robusta. Estas limitaciones motivaron el uso de Homologías Persistentes (*Persistent Homology*, PH), una técnica topológica que permite estudiar la estructura subyacente de una nube de puntos analizando la presencia de “agujeros en diferentes dimensiones”. En particular, Strommen y otros (2023) propusieron que los WRs del PFJ sobre la región del Océano Atlántico Norte durante los meses de invierno estarían representados por las componentes conexas o 0-agujeros significativos de las regiones más densas en el espacio de estados reconstruido del sistema. Sin embargo, bajo esta hipótesis, sólo obtienen dos de los tres regímenes esperados dado el comportamiento trimodal documentado previamente por Woolings y otros (2010). En nuestro trabajo, redefinimos esta estrategia en forma más robusta para analizar la dinámica subestacional del PFJ en las inmediaciones de Sudamérica y el Océano Atlántico Sur durante los meses de invierno, incluyendo un análisis sobre las regiones menos densas del espacio de estados e incorporando conceptos recientes de Topología del Caos (Sciamarella y Charó, 2024).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos medios diarios de viento zonal en niveles bajos (800-950 hPa) del reanálisis del centro europeo ERA5 (Hersbach y otros, 2020), con una resolución de 2.5° x 2.5° en la región 25-85°S 25-85°W y para el período 1980-2019. Esta elección se basa en el carácter cuasi-barotrópico que presenta el PFJ por la acción de los *eddies* transientes.

Como parte del pre-procesamiento de los datos, se filtró el ciclo estacional a partir de una climatología para cada día del año suavizada con un promedio móvil centrado de 60 días, seguido de la aplicación del filtro de Lanczos con una ventana móvil de 60 días y una frecuencia de corte de 10 días para retener la variabilidad de más baja frecuencia de la escala

subestacional. Por último, se removió la tendencia a largo plazo mediante una regresión lineal cuya pendiente fue ajustada con el estimador no paramétrico de Sen.

Para la definición de los WRs del PFJ se aplicó *K-means* en el espacio de estados estandarizado, reteniendo 3 *clusters* en base a los resultados de distintas métricas de validación del agrupamiento (no se muestran). Para la asignación diaria a un WR se exigió una correlación lineal mayor o igual a 0,5 con el patrón medio del *cluster*, ponderada por la latitud. Los días que no cumplieron esta condición quedaron sin asignación.

Siguiendo a Strommen y otros (2023), se trabajó con un espacio de estados tridimensional. La primera coordenada es un índice diario para capturar la latitud del PFJ (*Jet Latitude Index*, JLI; Woolings y otros, 2010), mientras que la segunda y tercera coordenada son las componentes principales (*Principal Components*, PC) asociadas a las primeras dos Funciones Ortogonales Empíricas (*Empirical Orthogonal Functions*, EOFs) que mayor varianza explican sobre las anomalías subestacionales de viento zonal en niveles bajos, normalizadas por la desviación estándar media, ponderada por la latitud, de todo el dominio para cada día del año suavizada con un promedio móvil centrado de 60 días. Esto permite darle el mismo peso a todas las estaciones, aunque para el análisis sólo se retendrán los meses de invierno (junio-julio-agosto).

Para el análisis topológico, se aplicó PH en el espacio de estados estandarizado sobre la nube original y aquellas que se obtienen luego de aplicar un filtro por mayor y menor densidad de puntos, a partir de la versión multidimensional de la Estimación de Densidad de Kernel (*Kernel Density Estimation*, KDE). Se analizó la estructura asociada en el espacio de estados y la relación con los WRs de los 0-agujeros (H_0) de las regiones más densas y de los 1-agujeros (H_1) o huecos superficiales de las regiones menos densas significativamente persistentes en términos homológicos.

3) RESULTADOS PRINCIPALES

En la Figura 1, se muestran las composiciones de anomalías subestacionales normalizadas de viento zonal en niveles bajos para los días asignados en cada uno de los tres regímenes hallados (J_S , J_C , J_N). En particular, J_S está caracterizado por tener las máximas anomalías desplazadas hacia regiones polares y J_N hacia el Ecuador. J_C , en cambio, está asociado a máximas anomalías en la región de los *stormtracks*. Estos regímenes generan además cambios significativos en la temperatura superficial y la precipitación (no se muestran).

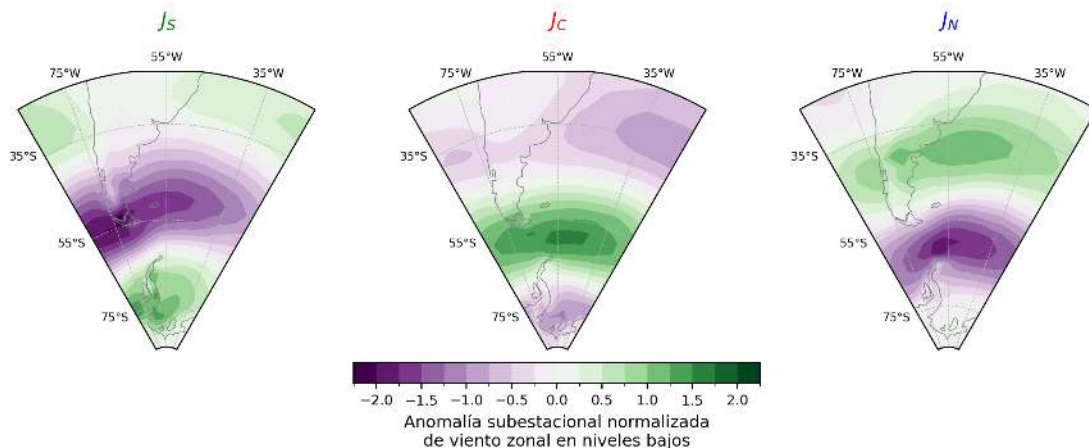


Figura 1: Composiciones de anomalías subestacionales normalizadas de viento zonal en niveles bajos para los campos diarios asignados en cada WR del PFJ (columnas).

La Figura 2a revela, en el espacio de estados, una región central de máxima densidad y de dos estructuras huecas de mínima densidad en los laterales. Las Figuras 2b y 2c muestran que dicha región más densa corresponde al 0-agujero más persistente, vinculado a J_C , mientras que las estructuras huecas están representadas por el primer y segundo 1-agujero más persistentes, vinculados a J_S y J_N respectivamente. Los resultados para otros umbrales cercanos de densidad son similares (no se muestran).

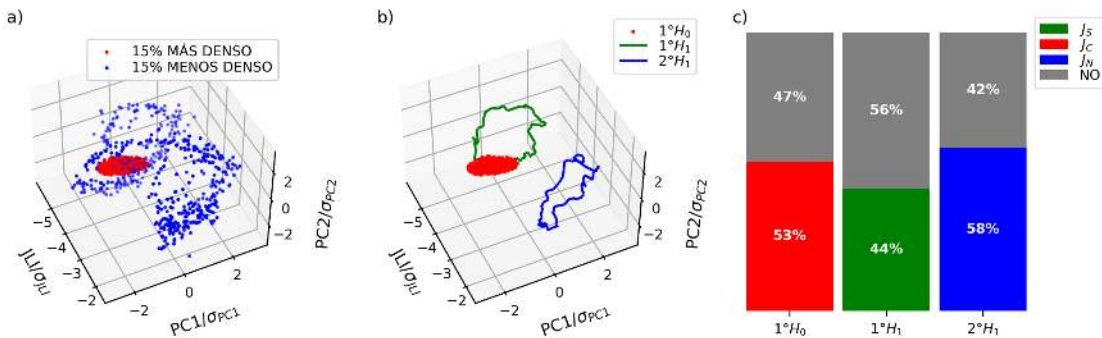


Figura 2: (a) Nube de puntos asociada al 15 % más denso (rojo) y al 15 % menos denso (azul) en el espacio de estados estandarizado. (b) Para estas nubes filtradas, puntos asociados al primer 0-agujero ($1^\circ H_0$, rojo) y a los dos primeros 1-agujeros ($1^\circ H_1$, verde; $2^\circ H_1$, azul) homológicamente más persistentes. (c) Para estas características topológicas, contribución porcentual de cada WR y de los puntos sin asignación (gris).

4) CONCLUSIONES

Se encontraron tres WRs bien definidos para el PFJ que se distinguen principalmente por la variabilidad en su ubicación latitudinal. El análisis topológico revela que identificar las homologías de orden cero de las regiones más densas del espacio de estados con los WRs no es correcto: es indispensable explorar también las homologías de orden uno de las regiones menos densas. Según nuevos conceptos en Topología del Caos, estos 1-agujeros se asocian a modos de variabilidad no lineales, conectados a través de zonas de juntas representadas por 0-agujeros de la parte más densa.

REFERENCIAS

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M. y Thépaut, J.-N., 2020: The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146, 730, 1999-2049.

Sciamarella, D. y Charó, G. D., 2024: New elements for a theory of chaos topology. Topological Methods for Delay and Ordinary Differential Equations: With Applications to Continuum Mechanics, Vol. 51, Amster, P. y Benevieri, P. (eds), Birkhäuser.

Strommen, K., Chantry, M., Dorrington, J. y Otter, N., 2023: A topological perspective on weather regimes. Climate Dynamics, 60, 1415-1445.

Woollings, T., Hannachi, A. y Hoskins, B., 2010: Variability of the North Atlantic eddy-driven jet. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 136, 856-868.

EVALUACIÓN DE UNA VERSIÓN ITERATIVA DEL FILTRO DE KALMAN POR ENSAMBLES EN UN CONTEXTO IDEALIZADO

Leonel Cabello¹, Jorge Gacitúa Gutiérrez^{1, 2}, Juan Ruiz^{1, 2, 3}

leonelcabello07@hotmail.com

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina

² CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina

³ CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: Filtro de Kalman por ensambles, no linealidad, asimilación de datos de radar

1) INTRODUCCIÓN

Los métodos de asimilación de datos (DA) deben reconciliar los pronósticos del modelo con las observaciones, a menudo bajo condiciones donde los supuestos de linealidad y distribución gaussiana no se cumplen. Esto es particularmente relevante para la DA en escala convectiva, donde variables como la reflectividad de radar son fuertemente no lineales y espacialmente discontinuas, o la relación con el modelo es no lineal. LETKF, un esquema de asimilación de datos por ensambles ampliamente utilizado, puede verse afectado por estas no linealidades (Carrasi et al., 2018).

En este trabajo se implementa una versión del LETKF (LETKF-T, Kurosawa y Poterjoy 2021) en un sistema unidimensional con física simplificada, lo que permite un análisis detallado de su comportamiento bajo diferentes configuraciones. Esto sirve como base para comprender mejor el desempeño del método antes de aplicarlo en entornos más complejos. A partir de este análisis se busca construir un marco experimental simplificado basado en simulaciones realizadas con el modelo de mesoescala WRF para investigar el comportamiento de los esquemas LETKF y LETKF-T bajo operadores de observación (H) altamente no lineales. Nuestro objetivo es evaluar la técnica en escenarios relevantes para la asimilación de datos de radar, sentando las bases para mejoras que puedan ser implementadas en los sistemas de pronóstico operativos.

2) METODOLOGÍA

En una primera instancia, se utiliza un sistema unidimensional sin evolución temporal que representa la concentración de condensado, siendo la misma observada indirectamente a través de una cantidad que asemeja la reflectividad de radar. En este sistema se asume conocido el estado verdadero a partir del cual se generan observaciones

sinfnticas con un error observacional (R). Esta configuraci3n permite analizar de manera controlada el desempefio del LETKF-T el cual introduce progresivamente las observaciones mediante un incremento del error observacional en cada iteraci3n, con el objetivo de reducir el impacto negativo de la no linealidad en la estimaci3n de las variables de estado.

Para caracterizar el desempefio del LETKF-T con respecto al LETKF en este escenario simple, se llevan adelante experimentos de asimilaci3n bajo diferentes condiciones, variando, entre otras cosas, la distancia entre la media del ensamble y el estado verdadero del sistema, el valor del estado verdadero, el error observacional, la dispersi3n del ensamble, la cantidad de miembros en el ensamble y la forma en la que se distribuye la informaci3n de las observaciones en las diferentes iteraciones. Para comparar la performance de ambos filtros, para cada escenario se realizan 1000 asimilaciones, variando la realizaci3n del error aleatorio de la observaci3n.

3) RESULTADOS

En el caso unidimensional, se observa una mejora en la raiz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en ingl3s) en el LETKF-T con respecto al LETKF (Figura 1), en particular en los escenarios donde la media del ensamble, que representaría el contenido medio de hidrometeoros, se encuentra en un rango bajo de la escala evaluada (valores entre 4 y 6 en una escala de 1 a 15), que es, en este caso, donde se produce la transici3n entre valores de reflectividad nulos a positivos. Esta mejora es m3s evidente a medida que aumenta la distancia entre el estado verdadero y la media del ensamble, ya que en estos casos la no linealidad de la relaci3n entre el condensado y la reflectividad produce un impacto m3s significativo.

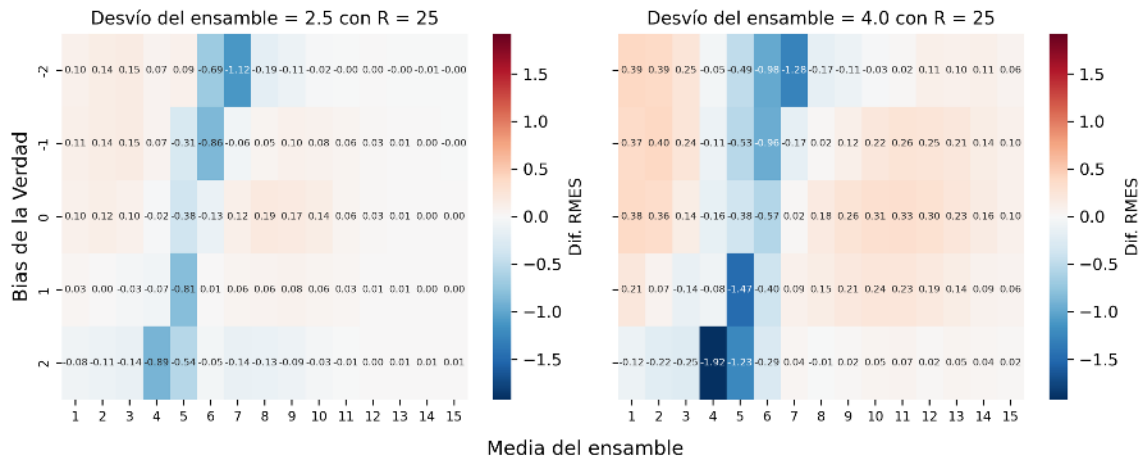


Figura 1: Diferencia entre los RMSE obtenidos con los métodos LETKF y LETKF-T. Cada panel corresponde a un valor distinto de dispersi3n del ensamble. Se utilizaron 20 miembros y un $R=25$.

La Figura 1 muestra cómo el desempeño relativo del LETKF y del LETKF-T depende de la magnitud de la dispersión del ensamble. Cuando la dispersión del ensamble es pequeña, la performance de ambas técnicas es similar. Cuando la dispersión es mayor, aparecen escenarios en donde la performance del LETKF es superior al LETKF-T (por ejemplo, cuando los valores de condensado son relativamente altos y el error del forecast es bajo).

4) DISCUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que, si bien el LETKF-T presenta ventajas respecto al LETKF, estas no ocurren en todos los escenarios. Esto motiva hacer una exploración más profunda de las condiciones que determinan que el método iterativo, que tiene asociado un mayor costo computacional, pueda representar una ventaja, de manera tal de poder diseñar una estrategia en donde, en función de las condiciones, se decida aplicar uno u otro método. Por otro lado, los resultados son alentadores en términos de las potenciales ventajas del método iterativo para la asimilación de observaciones como las de radar y satélite.

En el congreso se mostrará el resultado de aplicar un enfoque similar utilizando el modelo WRF (Skamarock et al., 2019) configurado para un evento convectivo en el centro de Argentina, donde se observó un sistema convectivo de mesoescala. En este caso se utilizará un ensamble de simulaciones en alta resolución y uno de los miembros del ensamble será utilizado como el verdadero estado del sistema y a partir del mismo se simularán observaciones de radar, las cuales serán asimiladas con la técnica de LETKF y LETKF-T utilizando los miembros restantes. Los resultados preliminares indican que este escenario más realista permite confirmar las ventajas del método iterativo.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se desarrolla en el marco del Proyecto SNF SPIRIT: “UnWeather Vizard: “Visualización e Interpretación de la Incertidumbre en Pronósticos Numéricos de Alta Resolución” y en el marco del proyecto PREVENIR dentro del programa de Investigación en Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Sostenible (SATREPS), financiado conjuntamente por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) y la Agencia de Ciencia y Tecnología de Japón (JST).

REFERENCIAS

- Carrassi, A., et al. (2018).** Data assimilation in the geosciences: An overview. *WIREs Climate Change*, 9(5), e535.
- Kurosawa, K., & Poterjoy, J. (2021).** Data assimilation challenges posed by nonlinear operators: A comparative study. *Monthly Weather Review*, 149, 2369–2389.
- Skamarock et al. (2019).** A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR TN-556+STR.

RELACIÓN ENTRE LA DURACIÓN DEL MOJADO FOLIAR Y LA HUMEDAD RELATIVA EN ENTRE RÍOS

Emanuel Melgares¹, Ana Beatriz Wingeyer^{1,2}, Emmanuel Adrian Gabioud¹, Roberto Javier Crespo¹

Emanuel.melgares@inta.gob.ar

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; ²Conicet

Palabras clave: Humedad Relativa, Mojado Foliar

1) INTRODUCCIÓN

La duración del mojado foliar (LWD, Leaf Wetness Duration) es una variable crítica para la evaluación de condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades fúngicas en los cultivos (Formento et al. 2010). La medición de LWD se realiza comúnmente mediante sensores específicos instalados en estaciones meteorológicas, sin embargo, su disponibilidad es aún limitada y muchas veces se restringe a pocos sitios de monitoreo (Zito 2020). La implementación de sistemas de alerta de enfermedades por parte de distintos organismos ha puesto de foco en la necesidad de datos de LWD de fácil acceso, que normalmente no están disponibles en las redes oficiales de estaciones meteorológicas (Rowlandson 2015). Esto plantea la necesidad de desarrollar metodologías alternativas que permitan estimar de manera indirecta esta variable a partir de otros datos meteorológicos frecuentemente registrados, como la humedad relativa del aire (Zito 2020).

La disponibilidad de datos de horarios de humedad relativa (HR) y mojado foliar, junto con otras variables podría permitir establecer modelos de ajuste local para estimar LWD a partir de mediciones más comunes como la HR. En el presente trabajo se relacionaron distintos umbrales de humedad relativa ($HR \geq 75\%$, 85% y 95%) con LWD con el objetivo de establecer un indicador indirecto para estimar la duración del mojado foliar.

2) MATERIALES Y METODOS

Para el presente estudio se utilizaron datos horarios de HR (sensor ROTRONIC Hygromer® IN-1) y mojado foliar desde 1/1/2010 al 31/12/2014 pertenecientes a una estación automática IMETOS® (Pessel Instruments) ubicada en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Paraná (coordenadas). El sensor de humedad de las hojas funciona midiendo la conductividad en un papel de filtro, que se mantiene entre dos electrodos de acero inoxidable en un soporte transparente.

Se estimó la duración de la humedad foliar (DHF) mediante el modelo de umbral (Sentelhas et al. 2008):

$$DHF = \sum_{h=1}^{24} RHh \geq RHI \quad (1)$$

Donde DHF es el número de horas (h) del día en que la humedad relativa horaria (RHh) es mayor o igual al umbral establecido (HRI). Se aplicaron tres umbrales de humedad relativa (HR) como criterios para estimar DHF: 75%, 85% y 95%. Para cada registro horario, se asignó un valor de 1 cuando la HR fue igual o superior al umbral considerado, y 0 en caso contrario. Posteriormente, se sumaron los valores horarios diarios para obtener la duración estimada del mojado foliar en horas para cada día.

Simultáneamente, se calcularon los valores reales de LWD para el mismo periodo como la sumatoria diaria de minutos de mojado foliar medidos por el sensor correspondiente a un intervalo mayores o iguales a 5 minutos.

La comparación entre DHF y LWD se realizó mediante regresión lineal simple para cada umbral. Se evaluó el desempeño de cada modelo a través de las métricas de R^2 , Error Absoluto Medio (MAE) y Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE). Adicionalmente, se evaluó la capacidad de detección del mojado foliar mediante el uso de métricas de clasificación binaria:

Exactitud: proporción de días correctamente clasificados, tanto de mojado como de no mojado.

$$\text{Exactitud} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (2)$$

Sensibilidad: proporción de días con mojado correctamente detectados.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

Especificidad: proporción de días sin mojado correctamente identificados.

$$\text{Especificidad} = \frac{TN}{TN+FP} \quad (4)$$

Donde:

TP (True Positives): días con mojado correctamente detectados,

FN (False Negatives): días con mojado que no fueron detectados,

FP (False Positives): días sin mojado que fueron erróneamente clasificados como mojados,

TN (True Negatives): días sin mojado correctamente clasificados.

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el período analizado, el año 2012 fue el que registró la mayor cantidad de horas de LWD a nivel anual, con un total de 1581 horas. En cambio, el año 2013 presentó el menor acumulado anual, con 1277 horas de LWD. El mes con menor cantidad de horas fue diciembre de 2011, con un total de 33 horas de LWD. En contraste, mayo de 2010 registró la mayor acumulación mensual de horas de LWD, alcanzando un total de 250 horas.

En la Tabla 1 se presentan los resultados estadísticos para las relaciones entre LWD y DHF de cada uno de los umbrales analizados. En la misma se observa que a medida que valor del umbral de HR aumenta, el valor de R^2 mejora progresivamente, acompañado por un menor MAE y menor RMSE, lo cual indica una mayor precisión en la estimación a medida que los valores de HR superan el 75%.

Tabla 1. Ajuste de umbrales de humedad relativa: $HR \geq 75\%$, $HR \geq 85\%$ y $HR \geq 95\%$, durante el período 2010–2014 en función del mojado foliar real.

Umbral de HR (%)	R2	MA	RMSE	Exactitud	Sensibilidad	Especificidad
75	0,53	6,51	8,31	0,63	1,00	0,27
85	0,60	4,79	6,70	0,71	0,99	0,43
95	0,72	2,39	4,07	0,83	0,93	0,74

Respecto a las métricas binarias, el modelo con $HR \geq 75\%$ presenta la máxima sensibilidad (1,00), es decir, detecta casi todos los casos reales de mojado foliar. Sin embargo, esta alta sensibilidad se logra a costa de una muy baja especificidad (0,27), lo que refleja una importante sobreestimación (falsos positivos). En los otros dos umbrales analizados, la especificidad aumenta (hasta 0,74), reduciendo los falsos positivos, aunque con una leve pérdida de sensibilidad.

En la figura 1 se presenta la relación entre DHF diaria estimada para los tres umbrales de HR ($HR \geq 75\%$, $HR \geq 85\%$ y $HR \geq 95\%$) y LWD diaria del sensor durante el período 2010–2014. En la misma se observa una tendencia clara a sobreestimar las horas de mojado foliar. Se destaca un alto número de días con estimaciones superiores a 15 horas que no se corresponden con lo medido por el sensor, en concordancia con la alta dispersión de puntos observada y los valores de especificidad obtenidos en la tabla 1. Al emplear un umbral de $HR \geq 85\%$, la sobreestimación disminuye en comparación con el umbral anterior, aunque aún se mantiene por encima de la relación esperada.

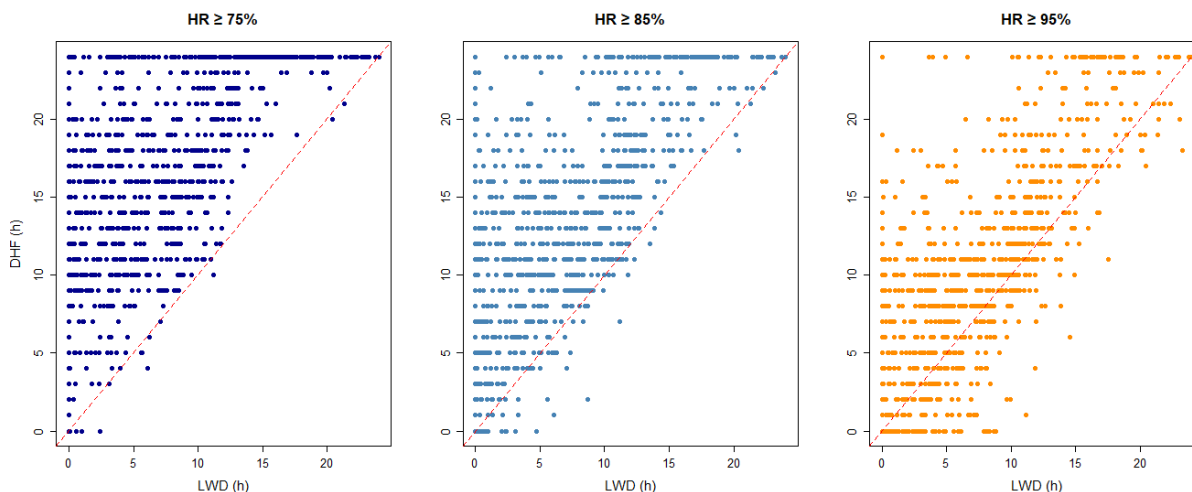


Figura 1. Comparación entre horas de mojado foliar estimadas y medidas para los 3 umbrales de humedad relativa

Al elevar el umbral a $HR \geq 95\%$, la nube de puntos tiende a alinearse con un mejor ajuste que en los

casos anteriores a lo largo de la diagonal (línea 1:1) coincidiendo también con los valores de R2 y RMSE obtenidos en la tabla 1, especialmente en el rango de 0 a 15 horas. Además, se reduce la “saturación” de valores cercanos al máximo.

Los umbrales de humedad relativa menores al 85% se podrían considerar demasiado permisivos, ya que tienden a detectar horas de mojado que en realidad no ocurrieron. En cambio, el umbral de $HR \geq 85\%$ representa una mejora, especialmente en los días con mayor duración de mojado. Esta tendencia se observa aún más al utilizar un umbral de $HR \geq 95\%$, lo cual es esperable desde un punto de vista físico: a medida que la humedad relativa se aproxima al 100%, es mucho más probable que se produzca condensación sobre las superficies de las hojas, favoreciendo la permanencia del agua en su superficie.

Sentelhas et al. (2008) indicaron que el valor de umbral de 85% permite simular LWD con la mayor precisión. Según el presente estudio dicho umbral podría ser utilizado para la región, pero se debería profundizar en un modelo para poder ajustar mejor la LWD. Esto se podría realizar a partir de la incorporación de otras variables importantes y de fácil acceso tales como el viento o la radiación (Garrant 1998).

4) CONSIDERACIONES FINALES

La estimación de la duración del mojado foliar a partir del método de umbrales de humedad relativa puede ser una herramienta simple y efectiva para aproximarse al comportamiento observado por el sensor real.

La inclusión de los valores de exactitud, sensibilidad y especificidad son herramientas que permiten evaluar los modelos propuestos.

Para futuros estudios se planea trabajar en la incorporación de otras variables meteorológicas como la radiación solar o el viento, con el objetivo de refinar aún más la estimación de LWD a partir de la HR.

REFERENCIAS

- Garratt, J. R., and Segal, M. 1988. On the contribution of atmospheric moisture to dew formation. *Bound. Layer Meteorol.* 45:209-236.
- Magarey, R. D., Seem, R. C., Weiss, A., and Gillespie, T. J. 2005. Estimating surface wetness on plants. Pages 199-226 in: *Micrometeorology in Agricultural Systems*. J. L. Hatfield and J. M. Baker, eds. American Society of Agronomy, Madison, WI
- OMM, 2014: Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, OMM-Nº 8. Organización Meteorológica Mundial, Suiza.
- Rowlandson, T., Gleason, M., Sentelhas, P., Gillespie, T., Thomas, C., Hornbuckle, B., 2015. Reconsidering Leaf Wetness Duration Determination for Plant Disease Management. *Plant Dis.* 99 (3), 310–319. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-14-0529-FE>.
- Sentelhas, P.C., Dalla Marta, A., Orlandini, S., Santos, E.A., Gillespie, T.J., Gleason, M.L., 2008. Suitability of relative humidity as an estimator of leaf wetness duration. *Agric For Meteorol* 148 (3), 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.011>.
- Zito, S., Castel, T., Richard, Y., Rega, M., Bois, B., 2020. Optimization of a leaf wetness duration model. *Agric. For. Meteorol* 291, 108087. <https://doi.org/10.1016/j.Agrformet>
- Formento, A.N., Velazquez, P.D., Carmona, M.A., Scandiani, M. 2012. Manifestación de las enfermedades foliares del maíz (*Zea mays*) según diferentes ambientes- 2011/12. XIV Jornadas Fitosanitarias Argentinas. Potrero de los Funes, San Luis, 3, 4 y 5 Octubre 2012. <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/19253>

ANÁLISIS DE ÍNDICES ESPECTRALES (NDVI, NDMI, MNDWI, NDPI) EN UN CASO DE INUNDACIÓN EN EL TRAMO INFERIOR DEL RÍO URUGUAY DURANTE MAYO DE 2024.

Analía Pereyra¹, Agustina Carranza¹.

anapereyra.met@gmail.com. Autora correspondiente

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: inundación, río Uruguay, índices espectrales.

1) INTRODUCCIÓN

Durante el mes de abril y la primera semana de mayo de 2024 se produjeron intensas precipitaciones al sur de Brasil y en la provincia de Misiones, Argentina. Esto llevó a un importante aumento del caudal en el tramo inferior del río Uruguay llegando a niveles de alerta y evacuación de cientos de personas en diversas localidades ribereñas del litoral, siendo Concordia, Entre Ríos, una de las más afectadas. Frente a este contexto, se analizó el cambio en la humedad del suelo y los cuerpos de agua en regiones aledañas al tramo inferior del río Uruguay a partir de observaciones satelitales. Para ello, se compararon cuatro índices espectrales: el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI), Índice de agua modificado de diferencia normalizada (MNDWI) y el Índice de Diferencia Normalizada de Polarización (NDPI). Finalmente, a partir de la información obtenida de los índices NDMI y MNDWI se determinaron umbrales que permitieron identificar píxeles como zonas inundadas para comparar su variación.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

En este trabajo se eligieron dos fechas para representar la situación antes y durante la inundación a partir de productos de nivel de agua del Instituto Nacional del Agua (INA) en Concordia, informes del INA (Boletín de Perspectivas Hidroclimáticas en la Cuenca Del Plata, junio 2024, INA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Boletín climatológico mensual, junio 2024, SMN), y noticias en distintos medios de comunicación. Se seleccionó el día 8 de mayo como el *día no inundado* para estudiar los índices antes de la inundación debido a que presenta un menor nivel de agua y caudal en el periodo estudiado, y el día 15 de mayo como el *día inundado* ya que se observa un máximo en el nivel de agua y caudal. Además, para la selección se consideró que ambas fechas presenten cielos despejados en horas diurnas en la región de estudio.

Se utilizaron datos captados por el sensor Advanced Baseline Imager (ABI) del satélite GOES-16 para calcular los índices NDVI, NDMI, y MNDWI, y datos del radiómetro GPM Microwave Imager (GMI), a bordo del satélite GPM Core Observatory, para calcular el índice NDPI.

El índice NDVI (Rouse et al., 1973) se define en la Ecuación 1, donde RED y NIR corresponden a las bandas 2 (0.65 μm) y 3 (0.86 μm) respectivamente.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad (1)$$

El índice NDMI (Gao, 1996) se define en la Ecuación 2, donde SWIR corresponde a la banda 5 (1,61 μm).

$$\text{NDMI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad (2)$$

El índice MNDWI (Xu, 2006) se define en la Ecuación 3, siendo GREEN la banda centrada en 0.55 μm . Dado que el sensor ABI no tiene esta banda, esta fue generada mediante la Ecuación 4 (Bah et al., 2018) donde donde BLUE corresponde a la banda 1 (0.47 μm).

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{GREEN} - \text{SWIR}}{\text{GREEN} + \text{SWIR}} \quad (3)$$

$$\text{GREEN} = 0,45 \cdot \text{RED} + 0,10 \cdot \text{NIR} + 0,45 \cdot \text{BLUE} \quad (4)$$

El índice NDPI (Paloscia et al., 1988) combina mediciones de temperaturas de brillo con diferentes polarizaciones dentro del espectro de las microondas. Se define en la Ecuación 5, donde TB_V y TB_H corresponden a la temperatura de brillo de la polarización vertical y horizontal respectivamente para una determinada frecuencia. En este trabajo fue calculado para las frecuencias 10.65 GHz y 18.70 GHz.

$$\text{NDPI} = \frac{TB_V - TB_H}{0,5 \cdot (TB_V + TB_H)} \quad (5)$$

3) RESULTADOS

En primer lugar se analizaron las diferencias calculadas entre el día inundado y el día no inundado de los índices NDVI, NDMI y MNDWI (Figuras no mostradas) para estudiar sus cambios en la región del río. Se observó una disminución del índice NDVI, debido al aumento del caudal y a los posibles daños ocasionados en la vegetación por la inundación, y un aumento en los índices NDMI y MNDWI ante el incremento de humedad en el suelo y contenido de agua, consistente con los registros del SMN-INA. El análisis de histogramas de estos índices para el día con y sin inundación permitió identificar valores extremos y un aumento en sus frecuencias, lo que indica condiciones más húmedas en la región del río. Esta información fue utilizada para caracterizar regiones inundadas. Se procedió a identificar los píxeles del área de estudio a partir de umbrales definidos para los índices NDMI y MNDWI. Para el índice NDMI se consideraron valores mayores a 0.4 asociados a suelo sin estrés hídrico o suelo inundado (Agricolus, 2019) y para el índice MNDWI se consideraron valores mayores a cero para indicar superficies con presencia de agua (Xu, 2006).

En la Figura 1, se identificaron los píxeles donde el $\text{NDMI} \geq 0.4$ con círculos azules y donde el $\text{MNDWI} \geq 0$ con círculos rojos. Por consiguiente, los píxeles donde ocurren ambas condiciones, círculos violetas, fueron considerados como indicativo de inundación ya que se cumple que existe un alto contenido de agua en el suelo y que hay presencia de cuerpo de agua.

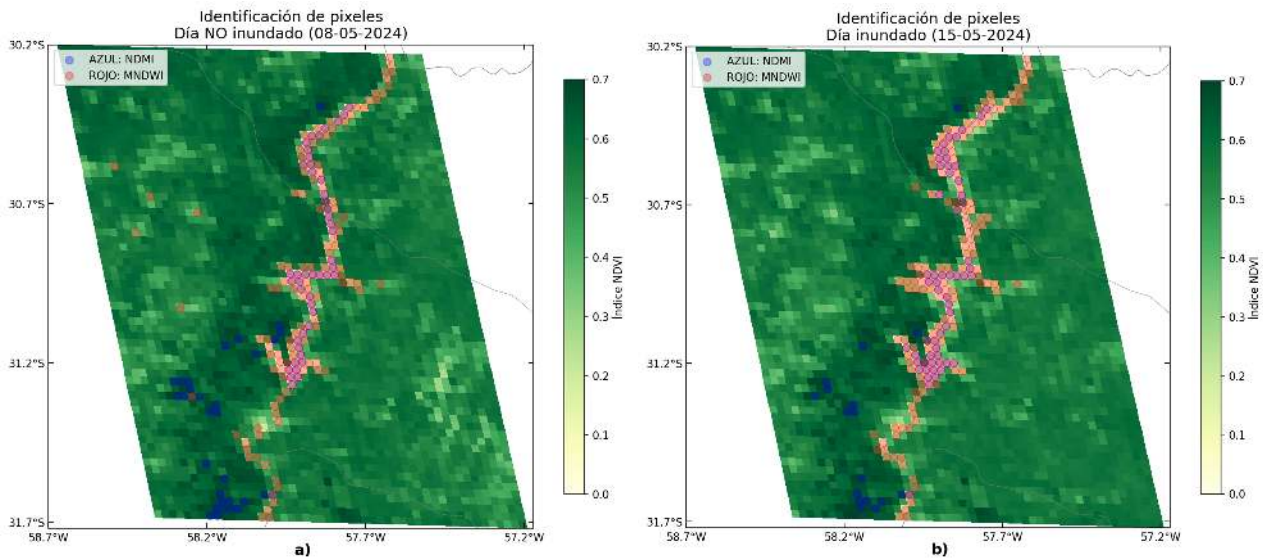


Figura 1: Identificación de humedad del suelo (NDMI) con círculos azules y cuerpos de agua (MNDWI) con círculos rojos, sobre el campo de NDVI para a) día no inundado y b) día inundado.

Se observó en ambos días que tanto los círculos azules como los círculos rojos se concentran a lo largo del río Uruguay. En el día inundado se identificó una mayor cantidad de píxeles asociados con presencia de cuerpos de agua principalmente en los márgenes del río indicando una mayor extensión del cuerpo de agua, consistente con el desborde del río. Los píxeles asociados a humedad

del suelo predominan a lo largo del río donde se superponen con los píxeles asociados a cuerpos de agua (círculos violetas). Por lo tanto, la cantidad de píxeles identificados como inundación a partir de los umbrales definidos (círculos violetas) aumentó un 21.8% entre los días elegidos.

Por último se comparó el índice NDPI del día no inundado con el inundado en las frecuencias 10.65 GHz y 18.70 GHz observándose valores más altos para el día inundado en el entorno del río (Figuras no mostradas). Esto se debe a una mayor diferencia de emisividades en la superficie inundada entre la polarización vertical y horizontal que se traduce en una mayor diferencia de temperaturas de brillo, produciendo un aumento del índice.

4) CONCLUSIONES

A través de los índices espectrales se identificaron cambios en la extensión de los cuerpos de agua y humedad del suelo debido a la inundación alrededor del río Uruguay. La disminución detectada en el índice NDVI en esta zona puede atribuirse a los daños ocasionados en la vegetación por la inundación y a la mayor presencia de agua. Mientras que los aumentos del MNDWI, NDMI y NDPI están relacionados al aumento del contenido de agua en el suelo y a una mayor presencia de cuerpos de agua. Se encontró una consistencia en la región de estudio entre lo obtenido con los índices espectrales calculados con información del sensor ABI del satélite GOES-16 y el índice calculado con información del radiómetro GMI del satélite GPM Core Observatory. Por último, los umbrales establecidos de NDMI y MNDWI permitieron observar un aumento del 21.8% en los píxeles identificados con presencia de cuerpos de agua y suelos húmedos entre los días analizados.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el contexto de la materia de grado “Sensoramiento Remoto para el Sistema Terrestre 1” dictado por el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Las autoras agradecen a las docentes Paola Salio y Maite Cancelada por la enseñanza de los contenidos aplicados, así como por sus correcciones y el acompañamiento brindado durante la realización del trabajo.

REFERENCIAS

- Agricolus, 14 de diciembre de 2018:** “NDVI and NDMI vegetation indices: instructions for use” <https://www.agricolus.com/en/vegetation-indices-ndvi-ndmi/>
- Bah, M. K., Gunshor, M. M., Schmit, T. J., 2018** Generation of GOES-16 true color imagery without a green band. *Earth and Space Science*, 5, 549–558.
- Gao, Bo-Cai., 1996:** "NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space." *Remote Sensing of Environment* 58, 257–266.
- Instituto Nacional del Agua y Servicio Meteorológico Nacional, 14 de junio de 2024:** Boletín de Perspectivas Hidroclimáticas en la Cuenca Del Plata. https://www.ina.gov.ar/archivos/alerta/boletin_hidroclim_2024_06.pdf
- Paloscia, S., Pampaloni, Paolo., 1988:** Microwave Polarization Index for Monitoring Vegetation Growth. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 26, 617-621.
- Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, et al., 1974:** Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (NASA Conference Paper PAPER-A20). NASA Goddard Space Flight Center. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- Servicio Meteorológico Nacional, junio 2024:** Boletín Climatológico mensual. Boletín de vigilancia del clima en la Argentina., XXXVI (5), 4-6. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/2840>
- Xu, H., 2006:** Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033.

Intercomparación de métodos de ajuste de sesgo para su aplicación en índices multivariados de estrés térmico en el sureste de Sudamérica

Rocio Balmaceda-Huarte¹, Ana Casanueva², María Laura Bettolli¹
rbalmaceda@at.fcen.uba.ar.

¹ Dept. de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Universidad de Buenos Aires, Argentina - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina.

² Dept. Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación, Universidad de Cantabria, Santander, España - Grupo de Ciencia de Datos para el Clima (CD-Clim), Unidad Asociada al CSIC, Santander, Spain.

Palabras clave: índices de impacto, modelos climáticos regionales, cambio climático

1) INTRODUCCIÓN

Según el último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el continente sudamericano se encuentra altamente expuesto, vulnerable y fuertemente impactado por el cambio climático (IPCC, 2022). En esta región, el calentamiento global se refleja no solo en las tendencias al alza detectadas de temperaturas extremas (Balmaceda-Huarte y otros, 2022) sino también en diferentes amenazas climáticas y su creciente frecuencia. Entre ellos, episodios de olas de calor persistentes que afectan directamente el confort y la salud humana, así como la productividad laboral (Casanueva y otros, 2020). Concretamente, el estrés térmico surge como consecuencia del efecto combinado de altas temperaturas con altas humedades relativas, y se ve favorecido por otras variables meteorológicas como la radiación solar y la ausencia de viento, siendo entonces un problema multivariante. Algunos de los índices que se utilizan actualmente para cuantificar el estrés térmico son utilizados en los sistemas de alerta de calor de diferentes países del mundo (Burgstall y otros 2019) o para definir umbrales críticos en las normas internacionales de salud laboral (ISO 2017). Sin embargo, en el sur de Sudamérica, estos índices han sido muy poco estudiados, y en la mayoría de los países de la región los sistemas de alerta por calor están basados únicamente en umbrales de temperatura.

Los Modelos Climáticos Regionales (RCMs, por sus siglas en inglés) son herramientas valiosas capaces de proporcionar información climática a escala local, lo cual resulta particularmente relevante en regiones como el sur de Sudamérica (SSA), donde la topografía compleja y el contraste tierra-océano influyen fuertemente en el clima. No obstante, los RCMs, presentan errores sistemáticos, los cuales deben ser corregidos para su adecuado uso en estudios que a menudo dependen de la superación de ciertos umbrales (como por ejemplo, los índices de estrés térmico). En estos casos, los métodos de corrección o ajuste de sesgos (BA por sus siglas en inglés, “bias adjustment”) son típicamente aplicados (Casanueva y otros 2020). Numerosos métodos de BA con diferentes características pueden encontrarse en la literatura, que van desde métodos simples a técnicas estadísticas complejas, métodos empíricos o paramétricos, métodos multivariados o univariados, entre otras variantes. Sin embargo, en Sudamérica el potencial de estas técnicas no se ha explorado de manera tan sustancial ni tan sistemática como en otras regiones del mundo. Ni menos aún para su aplicación en cálculo de índices de impacto multivariados como los indicadores de estrés térmico. En este sentido, el presente estudio busca evaluar diferentes métodos de BA en el sureste de Sudamérica (SESA) con especial foco en la estimación de índices multivariados de estrés térmico.

2) METODOLOGÍA

Se consideraron como indicadores de estrés térmico dos índices basados en la temperatura del aire y la humedad: la temperatura de bulbo húmedo (wbt) y la versión simplificada de la temperatura del globo húmedo (swbgt). Con el fin de capturar las condiciones diarias de mayor estrés térmico, ambos índices fueron estimados a partir de datos diarios de temperatura máxima (Tx) y humedad relativa mínima diaria (RH), esta última aproximada a partir de la humedad específica media diaria (SH) y la Tx. Para este análisis, se incluyeron únicamente los días correspondientes al verano austral (diciembre-enero-febrero).

Los métodos BA se calibraron utilizando las simulaciones históricas de los RCM pertenecientes a la iniciativa CORDEX y CORDEX-CORE para el dominio de Sudamérica (SA), tomando como referencia la base de datos observacional Multi-Source Weather (MSWX). Todas las simulaciones y los datos de MSWX fueron llevados a una retícula espacial común de $\sim 0.2^\circ$.

La evaluación de los métodos de BA consideró: a) dos estrategias de ajuste para la estimación de los índices corregidos por sesgo (directo e indirecto); b) comparación de métodos de BA univariados y multivariados; c) evaluación de métodos que preservan la tendencia y que no la preservan. En todos los casos, se implementó un esquema de validación cruzada, utilizando dos subconjuntos temporales de años consecutivos (1981–1992 y 1993–2004) para el entrenamiento y la validación de los métodos. Este procedimiento se aplicó de forma individual para cada simulación de RCM, para cada índice y para las variables climáticas involucradas en los cálculos de los índices.

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

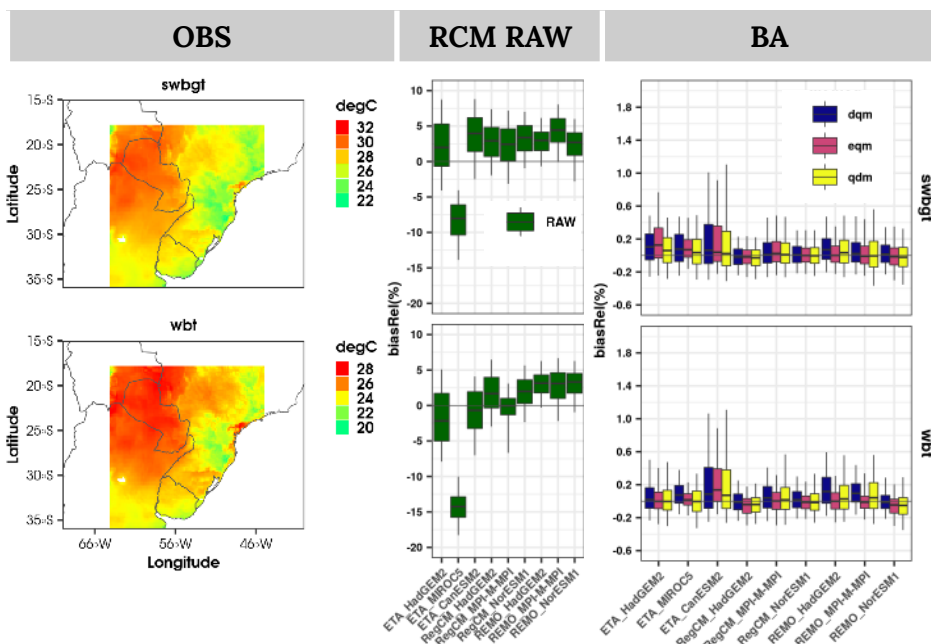


Figura 1. (Col 1) Campos espaciales del Percentil 90 (P90) para los índices de estrés térmico en las observaciones (OBS). (Col 2-3). Diagrama de Boxplot del sesgo en el P90 en cada punto de retícula: para las simulaciones sin ajustar (RAW) de los RCMs (Col 2); y para las simulaciones ajustadas por sesgo en el modo directo, coloreadas según el método de BA aplicado (Col 3). En cada caso el biasRel (%) se calcula como la diferencia entre la simulación y la observación, pesado por el valor observado. En cada boxplot, la marca central corresponde a la media, y los bordes inferior y superior a los percentiles 25 y 75. Los bigotes se extienden hasta los percentiles 5 y 95.

La *Figura 1* muestra los resultados del percentil 90 (P90) para las simulaciones sin ajuste por sesgo, y para las simulaciones ajustadas de forma directa, es decir, aplicando los métodos de BA sobre los índices para la región de estudio SESA.

En general, las simulaciones RAW presentan errores del orden del 5 % al 10 % respecto de las observaciones, con resultados similares entre ambos índices, aunque algunas simulaciones, como ETA-MIROC5, evidencian errores notablemente mayores. La aplicación de los métodos de BA bajo el enfoque directo reduce sustancialmente estos errores, mejorando la representación del P90 de los índices en las simulaciones. En particular, no se observan diferencias claras entre los distintos métodos de ajuste utilizados.

Análogamente, al aplicar el enfoque indirecto —esto es, ajustando por separado las variables que componen el índice—, todos los métodos univariados mostraron desempeños similares, sin diferencias marcadas entre aquellos que preservan la tendencia y los que no. Sin embargo, los errores bajo este enfoque fueron en general mayores. En este contexto, los métodos multivariados mejoraron considerablemente la representación de los índices térmicos, evidenciando un valor agregado frente a los univariados. Esta mejora fue evidente en las simulaciones RegCM4.7, donde la estimación de los índices utilizando las variables ajustadas individualmente amplificó los errores subyacentes de las simulaciones.

Este estudio proporciona información valiosa sobre la idoneidad de los métodos BA para estimar índices térmicos multivariados en SESA y subraya la importancia de una evaluación cuidadosa de estos métodos previo a su uso. Este estudio asimismo contribuye sentando las bases para futuras evaluaciones de las condiciones de estrés térmico en Sudamérica.

REFERENCIAS

Burgstall A., Casanueva, A., Kotlarski, S. y Schwierz, C., 2019: Heat Warnings in Switzerland: Reassessing the Choice of the Current Heat Stress Index. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 2684. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152684>.

Balmaceda-Huarte, R., y Bettolli, M. L., 2022: Assessing statistical downscaling in Argentina: Daily maximum and minimum temperatures. *International Journal of Climatology*, 42(16), 8423-8445.

Casanueva, A., Kotlarski, S., Fischer, A. M., Flouris, A. D., Kjellstrom, T., Lemke, B., ... y Liniger, M. A., 2020: Escalating environmental summer heat exposure—a future threat for the European workforce. *Regional Environmental Change*, 20, 1-14.

IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

ISO, 2017: Hot environments - Ergonomics of the thermal environment—assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index. ISO standard 7243. ed. International Standards Organization, Geneva.

VALIDACIÓN DE MÉTODOS DE CORRECCIÓN DE SESGO Y PROYECCIONES FUTURAS DE PRECIPITACIÓN EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES

Ana Belén Sánchez Schütze^{1,2,3*}, Malena S. Lozada Montanari^{1,2,3}, Inés Camilloni^{1,2,3},
Rafael Seoane⁴

*Contacto: anii.sanchez@hotmail.com

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

²CONICET-Universidad de Buenos Aires, Centro de Investigaciones del Mar y de la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (UMI 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

⁴Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Veterinarias, Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua (CETA). Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: proyecciones futuras, cambio climático, área metropolitana de Buenos Aires, lluvias extremas.

1) INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los problemas ambientales más relevantes que el mundo está experimentando en los últimos tiempos. Se estima que el aumento de la temperatura global podría alcanzar 2°C entre 2030 y 2052 (IPCC, 2021), generando alteraciones en los ecosistemas, el ciclo hidrológico y los patrones de precipitación. El proceso de urbanización está estrechamente ligado con el cambio climático ya que impacta en las ciudades de maneras múltiples. Este proceso ha introducido importantes alteraciones en los sistemas naturales como la reducción de la cobertura vegetal y el aumento de la impermeabilización del suelo a través del uso de materiales como el asfalto, el cemento y el hormigón. Estas transformaciones disminuyen la capacidad de infiltración del agua y aumentan considerablemente el escurrimiento superficial, incrementando el riesgo de inundaciones.

Buenos Aires, una de las ciudades más pobladas del mundo, ha experimentado en las últimas décadas un aumento en el riesgo de inundaciones y anegamientos pluviales (Barros et al. 2008; Nabel, et al, 2008). Esta problemática se relaciona tanto con factores demográficos, como el crecimiento urbano y los cambios en el uso del suelo, como con factores climáticos, entre los que destaca el incremento de eventos de lluvia extrema. Comprender cómo podría evolucionar la precipitación en las próximas décadas resulta fundamental para anticipar los posibles impactos del cambio climático y diseñar estrategias de adaptación y planificación urbana. Sin embargo, las proyecciones de los modelos climáticos globales (MCGs) presentan sesgos sistemáticos debido a su baja resolución espacial y simplificaciones en la representación de procesos físicos, lo que limita su aplicación directa a escala local (François et al., 2020). Por ello, es necesario aplicar métodos de corrección de sesgo en los datos de modelos climáticos (Brighenti et al. 2023, Sharma et al., 2007). Este estudio evalúa el desempeño de distintos enfoques de corrección, que posteriormente se utilizan para generar proyecciones de precipitación bajo distintos escenarios de cambio climático (SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5) en el Área Metropolitana de Buenos Aires. Las proyecciones se realizaron para tres horizontes temporales: futuro cercano (2025–2049), futuro medio (2050–2074) y futuro lejano (2075–2099).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Para el análisis de corrección de sesgo, se utilizaron datos diarios de precipitación observada de dos estaciones meteorológicas (OCBA y Ezeiza), así como simulados por cuatro MCG (ACCESS-ESM1-5, EC-Earth3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR), tomando como referencia un

único punto correspondiente a las coordenadas de cada estación. En el caso de los datos simulados, se empleó el método de "nearest neighbor" (NN), para asignar la información de precipitación del punto de retícula más cercano a las coordenadas de las estaciones. Luego, se evaluaron seis métodos de corrección de sesgo (EQM, QDM, Scaling, ISIMIP3, LOCI y PTR) en el periodo histórico 1965-2014 que se aplicaron de forma individual a los cuatro MCGs, y posteriormente se realizó el ensamble de los modelos según el método de corrección aplicado. En el análisis se consideraron dos periodos de 25 años cada uno (1965-1989 y 1990-2014) con el objetivo de realizar validación cruzada, es decir, aplicar la corrección de sesgo en un periodo y validarlo en el otro. Para evaluar el desempeño de cada método de corrección de sesgo, se analizaron cuatro indicadores de precipitación: Precipitación acumulada anual (AA), Número de días con lluvia por año (ND), Intensidad promedio de los eventos de precipitación (I), Máximo diario anual de precipitación (MD).

3) RESULTADOS

3.1) Validación de métodos de corrección de sesgo

Para evaluar objetivamente el desempeño de cada método de corrección, se elaboró un ranking basado en el RMSE, asignando el puesto 1 al más preciso y 6 al menos preciso para cada indicador por periodo y estación. Si dos métodos obtenían el mismo RMSE, compartían posición. Luego, se calculó un promedio ponderado asignando 30% al acumulado anual, 50% a los máximos diarios, y 10% a la cantidad de días con lluvia y a la intensidad. Las Tablas I y II muestran los rankings y promedios ponderados por subperiodo y en total.

OCBA											
1965-1989						1990-2014					Promedio Total
	AA	ND	I	MD	P1	AA	ND	I	MD	P2	
EQM	5	1	2	1	2,3	4	1	1	4	3,4	2,9
QDM	4	3	1	3	3,1	2	3	3	5	3,7	3,4
Scaling	1	5	3	1	1,6	1	5	5	2	2,3	2,0
ISIMIP3	2	2	1	2	1,9	3	2	2	1	1,8	1,9
LOCI	6	6	3	4	4,7	6	6	6	3	4,5	4,6
PTR	3	4	2	5	4,0	5	4	4	6	5,3	4,7

Ezeiza											
1965-1989						1990-2014					Promedio Total
	AA	ND	I	MD	P1	AA	ND	I	MD	P2	
EQM	5	1	1	2	2,7	3	1	1	3	2,6	2,7
QDM	4	3	1	3	3,1	3	3	3	5	4,0	3,6
Scaling	1	5	3	1	1,6	1	5	5	1	1,8	1,7
ISIMIP3	2	2	1	2	1,9	2	2	2	2	2,0	2,0
LOCI	6	6	3	4	4,7	5	6	4	4	4,5	4,6
PTR	3	4	2	5	4,0	4	4	3	6	4,9	4,5

Tablas I y II: Ranking de los métodos de corrección de sesgo en la representación de los distintos indicadores de precipitación en OCBA y Ezeiza.

En función de estos resultados, los tres métodos seleccionados como los más adecuados para representar el régimen de precipitación en esta región fueron Scaling, ISIMIP3 y EQM.

3.2) Proyecciones futuras de precipitación

La figura I muestra las proyecciones de los cuatro indicadores de la precipitación.

En cuanto a los AA se evidencia una clara diferencia (de entre un 15 y 20%) entre ambas estaciones, con mayores acumulados en la estación urbana y menores en la rural. En los escenarios SSP1-2.6 y SSP2-4.5 se proyecta un aumento en los acumulados hacia el futuro medio, seguido por una disminución hacia finales de siglo. Bajo SSP5-8.5, el incremento es continuo a lo largo del siglo.

En cuanto a los días con lluvia, se descartó el método Scaling por sobreestimar esta variable. Usando EQM e ISIMIP3, el escenario SSP1-2.6 muestra un aumento hacia el futuro medio, seguido de estabilidad o leve alza. En contraste, SSP2-4.5 y SSP5-8.5 proyectan una disminución gradual. La intensidad promedio, se calcula como el cociente entre el acumulado anual y la cantidad de días con lluvia, por lo que si los AA aumentan y los ND disminuyen esto resulta en un aumento en la intensidad de los eventos de precipitación. Este incremento es del 12% para el SSP5-8.5, del 4% en el SSP2-4.5, mientras que en SSP1-2.6 se observa una leve disminución de entre el 1 y 2 %. Respecto al máximo diario anual, SSP1-2.6 proyecta una disminución en ambas estaciones hacia fin de siglo, mientras que SSP5-8.5 indica un incremento.

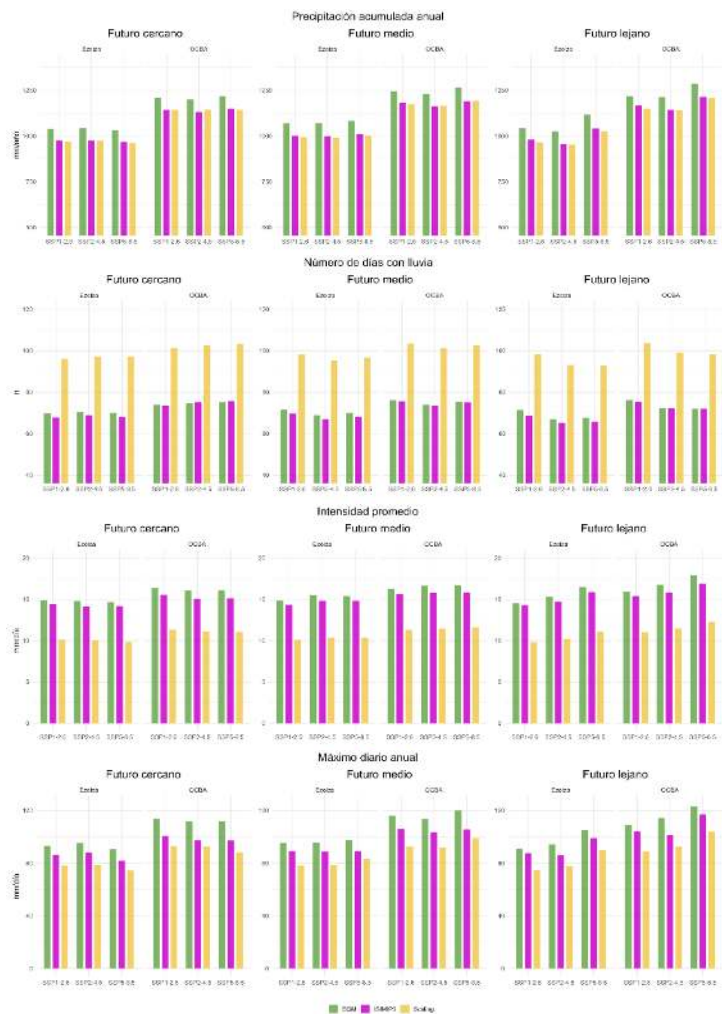


Figura I: Proyecciones de precipitación AA, ND, I y MD para el futuro cercano, medio y lejano en las estaciones OCBA y Ezeiza, según los distintos métodos de corrección de sesgo.

4) CONCLUSIONES

Las proyecciones muestran que, bajo el escenario más optimista, se prevé una disminución en los acumulados anuales, en los máximos diarios y en las intensidades para finales de siglo. En cambio, para el escenario más pesimista, los acumulados anuales aumentarían mientras que los días con lluvia se reducirían. Esto implica una mayor concentración de la precipitación en menos eventos, lo que se traduce en intensidades mayores. En conclusión, en un contexto de calentamiento más pronunciado, las precipitaciones tenderán a ser más intensas o torrenciales.

REFERENCIAS

- Barros, V.R., Doyle, M.E., & Camilloni, I.A. (2008):** Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 93(1), 19-33.
- Brighenti, T. M., Gassman, P. W., Gutowski Jr, W. J., & Thompson, J. R. (2023).** Assessing the influence of a bias correction method on future climate scenarios using SWAT as an impact model indicator. *Water*, 15(4), 750.
- François, B., Vrac, M., Cannon, A. J., Robin, Y., & Allard, D. (2020).** Multivariate bias corrections of climate simulations: which benefits for which losses?. *Earth System Dynamics*, 11(2), 537-562.
- IPCC, 2021:** Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32.
- Nabel, P. E., Caretti, M., & Becerra Serial, R. (2008).** Incidencia de aspectos naturales y antrópicos en los anegamientos de la ciudad de Buenos Aires.
- Sharma, D., Das Gupta, A., & Babel, M. S. (2007).** Spatial disaggregation of bias-corrected GCM precipitation for improved hydrologic simulation: Ping River Basin, Thailand. *Hydrology and Earth System Sciences*.

SOBRE LA DETECCIÓN DEL EFECTO DE RADOMO MOJADO EN RADARES Y SU APLICACIÓN EN UN CONTROL DE CALIDAD OPERACIONAL DEL PROYECTO PREVENIR

Martin Rugna¹, Luciano Vidal¹, Federico Renolfi², Daichi Kitahara³, Maite Cancelada⁴
mrugna@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²INVAP S.A.U.

³Osaka University/Keio University, Japon

⁴Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA

Palabras clave: atenuación, ruido, corrección.

1) INTRODUCCIÓN

Los radares meteorológicos son utilizados principalmente para detectar los hidrometeoros presentes dentro de las nubes siendo vitales para el pronóstico a muy corto plazo de forma cualitativa y cuantitativa. Dependiendo de la frecuencia de transmisión del radar, el pulso enviado y su posterior recepción serán en mayor o menor medida susceptibles a la presencia de lluvia intensa o granizo. En los radares de banda C, que conforman la mayoría de los instalados en Argentina, este fenómeno llamado “atenuación” se observa en imágenes como una disminución artificial muy fuerte de la intensidad observada hacia atrás de las tormentas (ver Aldana y otros (2025) y las referencias allí mencionadas). Más aún, cuando precipita en el sitio del radar se da un evento de atenuación severa conocido como “efecto de radomo mojado” que potencialmente puede atenuar todo el campo de visión del radar (Germann, 1999). Este efecto se puede observar en la Figura 1 donde, con una diferencia de 10 minutos entre imágenes, la situación meteorológica (es decir, la extensión espacial de las tormentas y su intensidad máxima) se podría pensar como invariante. Sin embargo, la intensidad máxima que se observa en, por ejemplo, las celdas que se encuentran sobre el sur de la Ciudad de Buenos Aires y el Río de la Plata disminuyen alrededor de 20 dBZ.

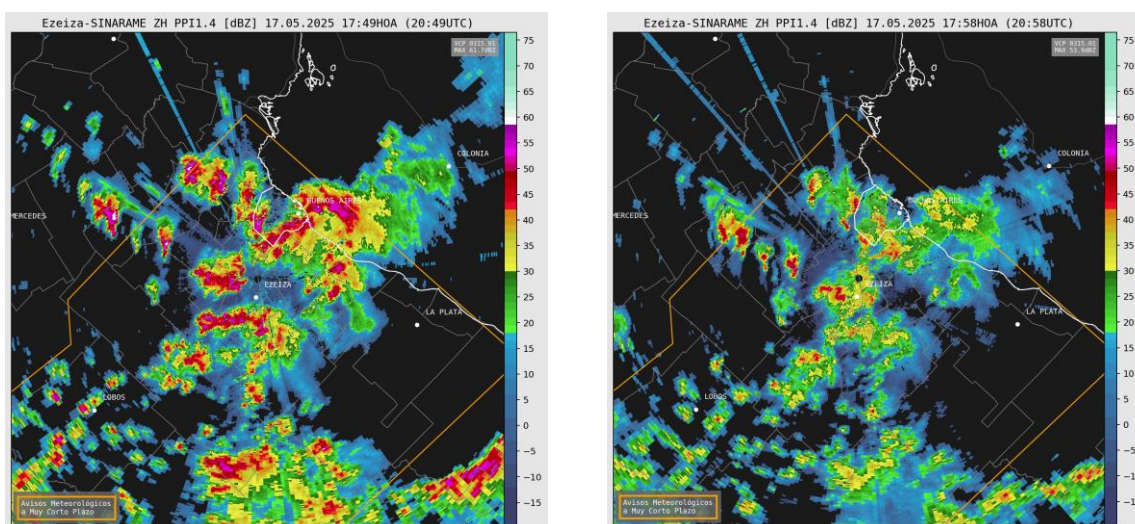


Figura 1: Recorte del producto PPI para la elevación de antena de 1,4° del radar RMA2-Ezeiza. A la izquierda la imagen del 17/05/2025 a las 20:49 UTC y a la derecha para el mismo día a las 20:58 UTC.

Existen trabajos iniciados por Thompson y otros (2012) que, asumiendo que el agua en el radomo y las tormentas son emisores de energía radiante, describen un monitoreo del piso de ruido en zonas muy alejadas del radar donde se puede asumir que no existen ecos

meteorológicos (más de 20 km de altura). En Schmid (2021) se realiza un análisis sobre la variable SNR (relación señal a ruido) y se realizan series temporales del nivel medio de ruido a alturas entre 60 y 70 km utilizando elevaciones de antena mayores a 30°. Estos trabajos muestran que una metodología similar puede combinarse con otros enfoques. Por ejemplo, en Cancelada y otros (2024) se realiza un análisis de la variable reflectividad horizontal en los primeros 20 km de rango y se determina la presencia de lluvia en las cercanías del radar. Finalmente, en una extensión del trabajo realizado por Kitahara y otros (2023) se presenta una corrección de la reflectividad para casos de radomo mojado utilizando una estimación de precipitación con el diferencial de fase.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizarán datos del radar RMA2-Ezeiza entre el 15 y 18 de mayo de 2025, en particular las variables SNR y reflectividad sin filtrar para adaptar la metodología de Schmid (2021) en las elevaciones de antena de 20° y 30° y combinar tanto la detección de Cancelada y otros (2024) como la propuesta por Kitahara y otros (2023). El objetivo es generar una serie temporal de las condiciones encontradas por cada una de las metodologías que se pueda consultar como metadato y escribir una variable en los archivos indicando si el volumen se encuentra o no afectado por atenuación por radomo mojado. Finalmente, se comprobará la velocidad de ejecución en tiempo real del enfoque multivariable para mejorar la corrección por atenuación que se encuentra en el sistema de control de calidad implementado actualmente en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

3) CONCLUSIONES

La detección automática del efecto de radomo mojado es deseable para poder incorporar en los archivos e informar a los usuarios que ese volumen debe ser tratado de forma particular. Por ejemplo, en los sistemas de asimilación de datos para modelos numéricos de pronóstico se puede incurrir en una subestimación muy grande de la intensidad de las tormentas llevando, por lo tanto, a subestimar la intensidad de la lluvia pronosticada. O bien se podría suponer que el sistema precipitante se está debilitando cuando no es así y afectar el pronóstico a muy corto plazo de este. Es necesario entonces en un primer paso realizar la detección y posteriormente utilizar esta información para lograr una más adecuada corrección de la reflectividad horizontal que es la principal variable utilizada en los sistemas de radar. Este trabajo se enmarca en el proyecto PREVENIR que aborda el reto de la alerta temprana de inundaciones urbanas repentinas mejorando, entre otros, la estimación cuantitativa de precipitación multisensor y su pronóstico a muy corto plazo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha realizado en el marco del Proyecto PREVENIR (prevenir.smn.gob.ar). Se agradece a la Subsecretaría de Recursos Hídricos por proveer los datos especializados del radar RMA2.

REFERENCIAS

Aldana, M., Pulkkinen, S., von Lerber, A., Kumjian, M. R. y Moiseev, D., 2025: Benchmarking KDP in rainfall: a quantitative assessment of estimation algorithms using C-band weather radar observations, *Atmos. Meas. Tech.*, 18, 793–816, <https://doi.org/10.5194/amt-18-793-2025>.

Cancelada, M., Kitahara D., Salio P., Vidal L., Rugna M., Ushio T., Miyoshi T., Ruiz J. y García Skabar Y., 2024: Development of an operational system for quantitative precipitation estimation from C-band polarimetric radars in the framework of the PREVENIR project in Argentina. 12th European Conference on Radar in meteorology and hydrology (ERAD 2024).

Germann, U., 1999: Radome attenuation — a serious limiting factor for quantitative radar measurements? Meteorologische Zeitschrift Vol. 8 No. 3 (1999), p. 85 – 90.

Kitahara D., Arruti A., Cancelada M., Rugna M., Salio P., Vidal L., Wada Y., Yoshikawa E., Chandrasekar V. y Ushio T., 2023: KDP Estimation Based on Spline Smoothing with the Self-Consistency Principle. 40th AMS Conference on Radar Meteorology.

Schmid, P., 2021: Characterization of background noise during dry and wet radome conditions. 3rd Calibration and Monitoring Workshop (WXRCALMON 2021).

Thompson, R., Illingworth, A., Darlington, T. y Ovens, J., 2012: Correcting attenuation in operational radars from both heavy rain and the radome using the observed microwave emission. 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2012).

ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN MULTISENSOR UTILIZANDO REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES

Sergio González^{1,2,3,4}, Luciano Vidal⁴, Pablo Negri^{5,6}, Juan Ruiz^{1,2,3}
sergio.gonzalez@cima.fcen.uba.ar

¹ Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA, CONICET-UBA)

² Instituto Franco-Argentino sobre Estudios del Clima y sus Impactos
IRL-IFAECI/IRD-CNRS-UBA-CONICET

³ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

⁴ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

⁵ Instituto de Ciencias de la Computación (ICC, CONICET-UBA)

⁶ Departamento de Computación (FCEyN, UBA)

Palabras clave: Estimación de precipitación satelital, Aprendizaje profundo, Sensores remotos.

1) INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de complementar las escasas observaciones de pluviómetros en superficie, se han desarrollado diversas metodologías para aprovechar el potencial de los sensores remotos. Los datos satelitales en infrarrojo (IR) proporcionan información sobre las características del tope de las nubes, mientras que los destellos de actividad eléctrica ubican las regiones donde la intensidad de la convección es mayor. Los datos de microondas, disponibles en satélites de órbita baja, pueden penetrar y capturar la estructura interna de las nubes, que permite estimaciones de precipitación (ECP) más precisas, pero su frecuencia y cobertura de observación son limitadas debido a su tiempo de revisita y ancho de escaneo.

El objetivo del trabajo es el desarrollo de modelos de estimaciones de precipitación satelitales mediante redes neuronales convolucionales. Se propone utilizar un modelo de aprendizaje profundo que estime la precipitación a partir de la ECP del satélite GOES-16 y evaluar su desempeño incluyendo datos en infrarrojo y actividad eléctrica.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Como input de los modelos se utiliza el algoritmo de ECP del satélite GOES-16 (RRQPE, Kuligowski, R. J., 2020), derivado de datos en infrarrojo; la temperatura de brillo (TB) del canal 13 (10,3 μm) del sensor Advance Baseline Imager (ABI); y del sensor óptico Geostationary Lightning Mapper (GLM, Goodman, et al., 2013) la variable Flash Extent Density (FED). La TB y el RRQPE poseen una resolución espacial y temporal de 2 km (punto nadir) y de 10 minutos respectivamente. Los datos del GLM son provistos en pares de datos latitud/longitud con una resolución temporal de 20 segundos. Por lo tanto, se utilizó la herramienta de GLMTools (CSPP Geo., 2022) para proyectar los datos al reticulado del sensor ABI y en acumulados de un minuto. Posteriormente se utilizó el acumulado de 10 minutos para que todas las variables posean igual temporalidad. El algoritmo de estimación de precipitación en superficie del sensor Dual-frequency Precipitation Radar (DPR, Iguchi et al., 2021) del satélite de órbita baja Global Precipitation Measurement (GPM) constituye el target del modelo. Esta estimación está basada en datos de radar (en microondas activas), pero con un periodo de revisita de 1 o 2 días, con un ancho de sensado de 245 km² y una resolución espacial de 5 km.

El modelo implementado es un modelo de redes neuronales convolucionales con una

arquitectura U-Net. El propósito de la arquitectura U-Net es codificar la información de entrada a un espacio de mínima dimensión, la cual posteriormente es decodificada en conjunto con la información del mismo nivel de codificación. Para el entrenamiento de la red, se utiliza una función de costo de error cuadrático medio y un optimizador ADAM, con una tasa de aprendizaje inicial de 0.001, reduciendo en un orden de magnitud en dos épocas fijas (30 y 75), un tamaño de batch size de 128 y un máximo de 120 épocas de entrenamiento.

Los datos utilizados comprenden el periodo de enero 2020 a junio 2021 inclusive, sobre la región de Sudamérica (90°O - 30°O | 50°S - 10°N). Se excluyen los meses de enero y junio de 2021, los cuales se utilizan como período de testeo. Las muestras de entrenamiento son seleccionadas mediante los siguientes criterios: que la diferencia temporal entre las imágenes sea menor a 5 minutos; que la imagen cuente con al menos 10% de los píxeles con PP mayor a 0.1 mm^{-1} del PP-DPR, y que dichos píxeles posean una correlación espacial con el RRQPE de al menos el 0.2. Mediante este criterio se obtuvieron un total de 6158 muestras de entrenamiento. Para entrenar y definir la cantidad de épocas de entrenamiento óptimas para los modelos, se utilizó el algoritmo de validación cruzada de K-Fold con 5 conjuntos.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la Figura 1 se observa un caso de ejemplo para el conjunto de testeo. En la primera fila se observan todos los inputs (RRQPE, TB, FED), seguido por el target correspondiente al DPR. En la fila de abajo se poseen las diferentes salidas del modelo U-Net utilizando el RRQPE como predictor (exp-R), e incluyendo la TB (exp-TR) y el FED (exp-RF) por separado, y en conjunto (exp-TRF).

En el modelo exp-R, el objetivo es ajustar las tasas de precipitación estimadas por el RRQPE (basadas en IR) a las del DPR, derivadas estas últimas de un radar en el rango de microondas activas. Se puede observar que este modelo reproduce una parte de la región precipitante del DPR, particularmente en el área más intensa. No obstante, la predicción es considerablemente más suave en comparación con el DPR.

En el exp-TR, se incluye la temperatura de brillo (TB) además del RRQPE. Al añadir la información de la TB, que provee datos del tope de las nubes y, por ende, permite determinar las regiones de nubes más profundas, es de esperar que este modelo mejore la precisión de la predicción en comparación con el exp-R. De hecho, la salida del exp-TR es muy similar a la del exp-R en las áreas principales de precipitación, pero con un enfoque más marcado en las regiones de nubosidad profunda.

Por su parte, el exp-RF incorpora la densidad de flashes extendida (FED) al RRQPE. El FED puede indicar la presencia de actividad convectiva fuerte, lo cual podría ayudar a identificar áreas de precipitación intensa. Efectivamente, la salida del exp-RF también es consistente con el campo de precipitación del DPR y captura la zona de mayor intensidad.

Finalmente, el exp-TRF representa el modelo más completo, ya que utiliza las tres entradas disponibles: TB, RRQPE y FED. Al combinar toda esta información, se anticipa que este modelo ofrecerá la predicción más precisa y robusta. La salida del exp-TRF es la que mejor se ajusta a la posición e intensidad del área precipitante del DPR. Esto sugiere que, si bien el RRQPE es un predictor que introduce una fuerte señal por sí mismo en las salidas, la incorporación de la TB y el FED puede ofrecer beneficios adicionales en términos de capturar la complejidad y la distribución de la precipitación con mayor fidelidad.

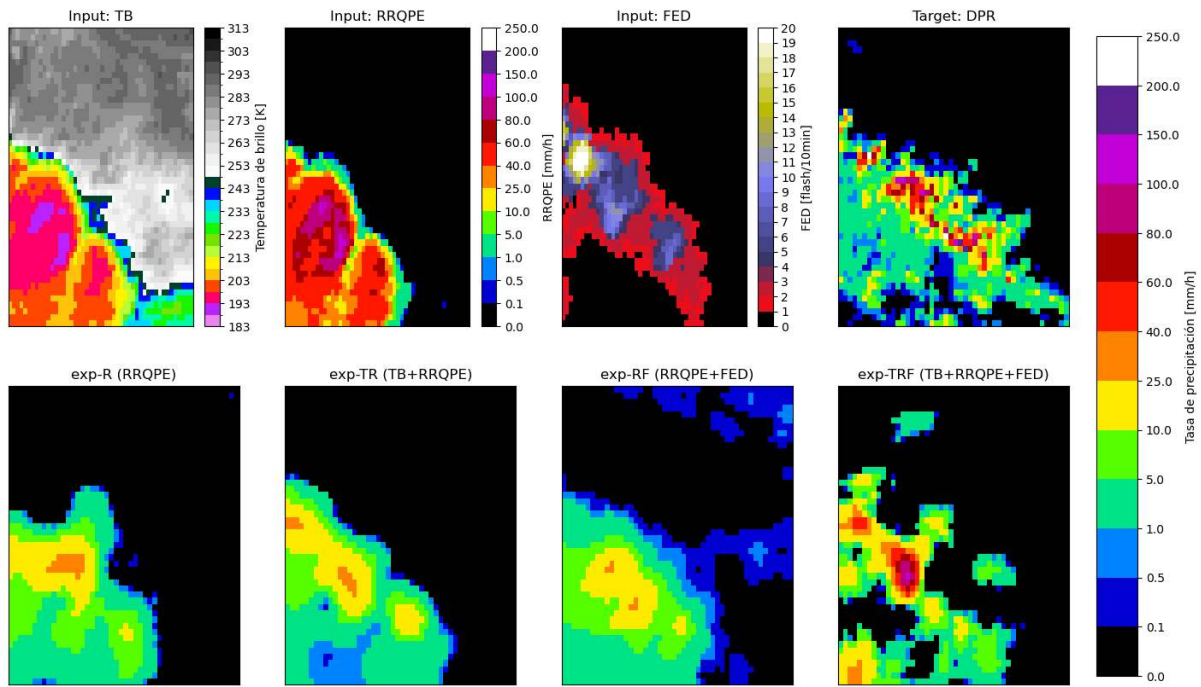


Figura 1: Ejemplo de aplicación del modelo propuesto. Se muestran los datos de entrada (temperatura de brillo - TB, estimación de precipitación del GOES - RRQPE, densidad de extensión de flashes - FED) y el target (estimación de precipitación del DPR). Las salidas de la U-Net se presentan con configuraciones de entrada: RRQPE (exp-R); RRQPE+TB (exp-TR); RRQPE+FED (exp-RF); y todas las variables (exp-TRF).

Como línea de trabajo futuro se explorará la incorporación de más canales del sensor ABI de frecuencias ampliamente utilizadas en la estimación de precipitación que han demostrado un buen desempeño. Otro aspecto a explorar es el uso de funciones de costo pesadas que estén enfocadas en resaltar aquellos valores asociados a los extremos de precipitación, un aspecto que no es representado en funciones clásicas como el MSE.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha contado con el apoyo parcial del proyecto [PREVENIR](#).

REFERENCIAS

- Kuligowski, R. J., 2020:** GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document For Rainfall Rate (QPE) Retrieved June 7, 2024, from https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/documents/ATBDs/Enterprise/ATBD_Enterprise_Rainfall_Rate_v3_2020-07-10.pdf
- Goodman, S. J., Blakeslee, R. J., Koshak, W. J., Mach, D., Bailey, J., Buechler, D., Carey, L., Schultz, C., Bateman, M., McCaul, E., y Stano, G., 2013:** The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM). Atmospheric Research, 125-126, 34-49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006>
- CSPP Geo., 2022:** Gridded GLM Software version 1.0. Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin-Madison. Retrieved from [CSPP Geo, CIMSS](#)
- Iguchi, T., Seto, S., Meneghini, R., Yoshida, N., Awa-Ka, J., Le, M., Chandrasekar, V., Brodzik, S., Kubota, T., & Takahashi, N., 2021:** GPM/DPR Level-2 Algorithm Theoretical Basis Document. https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2022-06/ATBD_DPR_V07A.pdf

EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA PARA LA PLANIFICACIÓN DEL RIEGO EN CASA DE PIEDRA (LA PAMPA)

Marisa Cogliati,² Carolina Aumassanne,¹ Dardo Fontanella¹
marisa.cogliati@fahu.uncoma.edu.ar. Autor/a correspondiente.

¹Agencia de Ext. Rural 25 de mayo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (INTA)

²Depto de Geografía. Fac. de Humanidades. Universidad Nacional del Comahue (UNCo)

Palabras clave: FAO 56, riego, MOD10A2, Evapotranspiración.

1) INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente del recurso hídrico en la agricultura es un desafío clave en zonas bajo riego, especialmente en contextos de creciente presión sobre las fuentes de agua. Este desafío se vuelve aún más crítico en regiones áridas y semiáridas, donde la escasez hídrica limita severamente la producción agrícola y exige una planificación precisa del riego (Méndez Jocik et al., 2023). En este marco, la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) resulta fundamental para el diseño y manejo de los sistemas de riego (Allen et al., 1998). En este trabajo se presenta un análisis de la evapotranspiración de referencia estimada mediante la metodología FAO 56, (Allen et al., 1998), y de la evapotranspiración potencial obtenida a partir de datos satelitales MODIS, y su subproducto MOD16A2 (Mu et al., 2011).

Este trabajo presenta el análisis en el área cercana a Casa de Piedra (ALV), donde se practica agricultura intensiva bajo riego. La información generada permitirá orientar prácticas de manejo agronómico y decisiones de política hídrica, relevantes en contextos de escasez o variabilidad climática. Este área forma parte del oasis productivo del margen medio del río Colorado, donde se ha desarrollado un sistema agrícola bajo riego que aprovecha el agua derivada del embalse de Casa de Piedra lo que ha permitido la expansión de cultivos frutales no tradicionales en la región árida, como la vid, pistachos, olivos y frutos secos.

La metodología propuesta por la FAO, ha sido adoptada ampliamente a nivel global por su solidez física y adaptabilidad a distintos climas (Allen et al., 1998). El modelo CROPWAT 8.0, permite adaptar estos cálculos a condiciones locales, integrando información meteorológica, de cultivos y de suelos (FAO, 2009).

El objetivo del trabajo es estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) en la zona de Casa de Piedra mediante la metodología FAO 56 y analizar la relación con la evapotranspiración potencial obtenida de satélites MODIS para su posterior aplicación a la promoción de una agricultura más resiliente y eficiente relevante ante el escenario de cambio climático y la creciente competencia por los recursos hídricos.

2) METODOLOGÍA

El trabajo presenta datos meteorológicos de la estación Aliviadero (ALV), en cercanía de Casa de Piedra, La Pampa (ver Figura 1). Desde 2013, la zona ha experimentado un marcado crecimiento en la productiva, la superficie cultivada con vid aumentó significativamente, pasando de 5 has a más de 100 has en menos de una década. Sin embargo, esto ha estado condicionado por la disponibilidad hídrica. La región atravesó una prolongada sequía entre 2011 y 2023, con reducción del caudal del río Colorado y el volumen útil del embalse de Casa de Piedra, afectando la seguridad hídrica para riego. En 2023, el aumento de la precipitación en la cuenca alta permitió una recuperación parcial del embalse, restableciendo en parte la

capacidad de distribución de agua para los sistemas bajo riego.



Figura 1: Área de estudio. Casa de Piedra (CDP), estación meteo. Aliviadero (ALV) y área bajo riego (ABR). Imagen Google Earth.

El trabajo presenta el análisis ETo mensual obtenida de datos diarios entre 2000 y 2023 en la estación Aliviadero (ALV) (Ente Ejecutivo Casa de Piedra, Figura 1) calculada con la ecuación de FAO - Penman-Monteith con el modelo CROPWAT 8.0 (FAO N°57, Allen et al., 1998), con datos diarios de humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento a 2 m y la evapotranspiración potencial (ETP), cada 8 días obtenida de los productos MODIS. ETP_{MODIS} es la evapotranspiración máxima posible sin restricciones hídricas, en función del tipo de vegetación y condiciones climáticas actuales cada 8 días (producto MOD16A2), mientras que la ETo es calculada con datos de superficie y con una cubierta de referencia (pasto bien regado y en crecimiento activo) ambas representan el potencial máximo de ET bajo condiciones óptimas de agua, las variables no son equivalentes pero ambas son útiles para evaluar la demanda atmosférica de agua (Navas et al., 2021; Mu et al., 2011).

3) RESULTADOS

En la Tabla 1 se presenta ETo mensual (mm/día), para distinta probabilidad de excedencia (50% a 90%) para escenarios promedio y conservadores. Se observa un patrón estacional, con

	50%	60%	70%	80%	90%
Ene	9.1	9.2	9.3	9.5	9.7
Feb	7.8	8.0	8.1	8.2	8.3
Mar	5.6	5.7	5.8	5.9	5.9
Abr	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3
May	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4
Jun	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9
Jul	1.7	1.7	1.8	1.9	2.0
Ago	2.6	2.8	2.8	2.9	3.0
Sep	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3
Oct	5.8	5.9	6.0	6.1	6.4
Nov	7.6	7.8	7.9	8	8.2
Dic	9.1	9.2	9.4	9.6	9.7

máximo en verano (diciembre a febrero), mayor a 9 mm/día, y mínimo en invierno (junio y julio), menor a 2 mm/día. Esta variabilidad estacional refleja la demanda atmosférica de la región árida bajo riego. ETo se utiliza en la planificación del riego, los valores al 80 % o 90 %, aseguran que se cubra la mayoría de las situaciones de demanda promedio, 50% o 60% se utilizan para casos más optimistas o escenarios promedio, y para un manejo adaptativo, para adaptar los calendarios de riego y prever años de mayor o menor presión hídrica.

Tabla 1: Evapotranspiración de referencia mensual (ETo, mm/día), para distintos niveles de probabilidad de excedencia (50% a 90%).

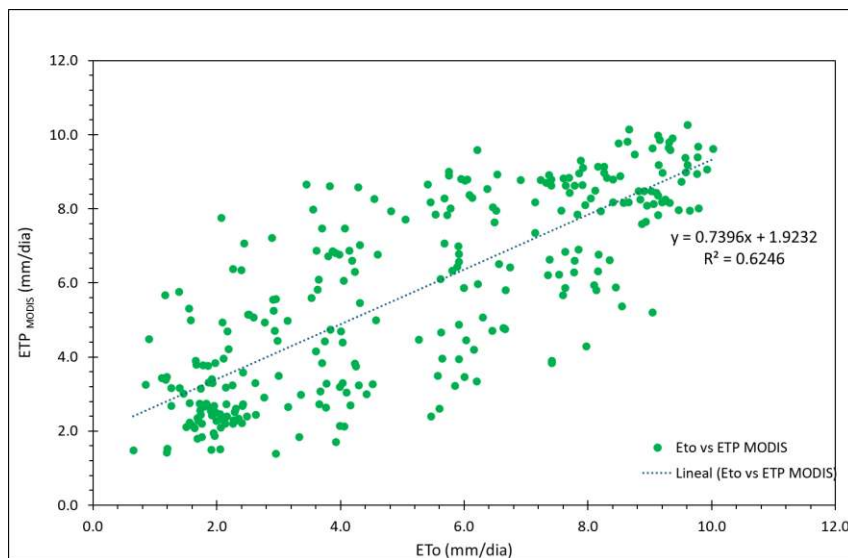


Figura 2: Diagrama de dispersión entre la ETo obtenida en la estación ALV y la ETP obtenida de MODIS entre 2000 y 2023.

La Figura 2 muestra la relación entre ETo y ETP MODIS. Se observa una tendencia lineal creciente que indica que MODIS capta adecuadamente la variabilidad temporal general de la ETo., con alta dispersión. La

relación indica que ETP MODIS tiende a subestimar los valores altos de ETo, y sobreestimar los valores bajos. Se observa una correlación positiva entre ambas variables, con una tendencia lineal creciente que indica que MODIS capta adecuadamente la variabilidad temporal general de la ETo. La pendiente de la regresión lineal (0,74) sugiere que MODIS tiende a subestimar los valores altos de ETo, y el término independiente (1,92) indica una sobreestimación en los valores bajos. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0,62$) refleja una asociación moderada, aunque con una dispersión considerable, lo cual evidencia la necesidad de aplicar una corrección empírica para ajustar los valores satelitales a las condiciones locales de la región.

4) CONCLUSIONES

ETo mensual presenta un patrón estacional, con máximo en verano mínimo en invierno asociados a la demanda atmosférica de la región árida bajo riego. ETP MODIS y ETo, presentan una asociación moderada con una dispersión considerable, lo cual evidencia la necesidad de aplicar una corrección empírica para ajustar los valores satelitales a las condiciones locales de la región. Estos resultados sugieren que, si bien MODIS constituye una herramienta útil para estimaciones regionales de la demanda hídrica, su aplicación en la planificación del riego requiere calibración local y validación con datos observados.

5) CITAS Y REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO.

Mu, Q., Heinsch, F. A., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Products (MOD16A2) User Guide. University of Montana.

FAO. (2009). *CROPWAT 8.0 for Windows: User Guide*. Land and Water Development Division. Rome: FAO.

Méndez Jock, A., Vargas-Rodríguez, P., & González-Robaina, F. (2023). Evapotranspiración en Cuba con imágenes satelitales MODIS 16 y Google Earth Engine. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 32(4). <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1782>

Navas, R., Tiscornia, G., Berger, A., & Otero, A. (2021). Assessing MODIS16A2 actual evapotranspiration across three spatial resolutions in Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 25(2), e429.

ANÁLISIS DE ZH y ZDR DURANTE UN EVENTO DE CONVECCIÓN INTENSA USANDO INFORMACIÓN DE RADARES POLARIMÉTRICOS EN BANDA C Y S

Emanuel Alfie¹, Esteban Semino¹,
emanuelalfie@hotmail.com, esti.semino@hotmail.com

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina

1) INTRODUCCIÓN

En la región de Sudamérica hay distintas redes de radares meteorológicos, los cuales son una herramienta capaz de proveer información sobre las características internas de las nubes, como las especies de hidrometeoros presentes, sus formas y tamaños para intervalos de tiempo breve sobre grandes extensiones. En particular en Argentina, actualmente la red de radares del Sistema Nacional de radares Meteorológicos (SiNaRaMe) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) administran 18 radares de doble polarización de banda C. Asimismo, en la región de Brasil existen numerosos radares principalmente de banda S y en la región del AMBA se encuentra el radar del SIVIGHILA administrado por el gobierno de la Ciudad de Buenos Aires.

Los radares polarimétricos transmiten radiación horizontal y verticalmente polarizada simultáneamente, por lo que al comparar las señales recibidas de ambas componentes se puede obtener información acerca del tamaño, la forma y orientación de los blancos dentro del volumen de atmósfera iluminado por el radar (Kumijan 2013). Dependiendo de la longitud de onda a la que transmite el radar, la radiación electromagnética interactúa de forma distinta con los posibles blancos que se puede encontrar el haz en su trayectoria. Los tamaños de hidrometeoros para los cuales los radares sufren de efectos como la atenuación diferencial o resonancia dependerá de la longitud de onda de la radiación a la que transmite. En particular, los radares de banda S cumplen la suposición de dispersión de Rayleigh para una variedad de tamaños mayor que los radares de banda C (Rauber and Nesbitt, 2018).

Sobre el noreste argentino y sudeste de Brasil los radares operativos en banda C (RMA5, Bernardo de Irigoyen, Misiones, Argentina) y otro de banda S (Cascavel, Paraná, Brasil) presentan un área de superposición permitiendo distinguir el comportamiento de las distintas bandas ante diversas situaciones de precipitación. El presente trabajo analiza las diferencias entre distintas variables polarimétricas derivadas de ambos radares, para un evento de actividad convectiva profunda intensa durante el 24 de octubre de 2024.

2) METODOLOGÍA

Se generó un Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI) para los primeros 10 km sobre la superficie a partir de los volúmenes de ambos radares medidos a las 18:45 UTC del 24/10/2024, horario en el cual el sistema convectivo se encontraba aproximadamente entre la posición de ambos sensores. Estas interpolaciones se generaron respecto del mismo punto geográfico, lo cual garantiza que sea válida la comparación punto a punto las variables polarimétricas de ambos volúmenes de datos interpolados en una retícula tridimensional. El análisis se focalizó en el factor de reflectividad horizontal (ZH) y la reflectividad diferencial (ZDR).

Posteriormente, se generó una máscara para filtrar aquellos datos de ZH y ZDR que corresponden a puntos de la malla que presentaban valores del coeficiente de correlación co-polar (CC o RHOHV) menores a 0.8, ya que esto asegura que los datos analizados contengan únicamente ecos meteorológicos, filtrando ecos no-meteorológicos no deseados en el análisis.

3) RESULTADOS

En la Figura 1 se observan gráficos de dispersión entre ZH y ZDR de ambos radares a 10 km de altura con una máscara de $CC > 0.8$. A esta altura hay seguridad de que la única fase presente es hielo (probablemente copos de hielo), ya que según el sondeo observado, la isoterma de -40°C en este día se encontraba aproximadamente a ese nivel. Se sabe que el radar de Cascavel estaba correctamente calibrado, debido a que el CAPPI a 10 km mostró valores de ZDR prácticamente nulos para todo el dominio, para distintos valores de ZH. En la Figura 1 b), se observa que, para todo el rango de valores de ZH, ZDR es cercano a cero. Esto indicaría que todas las partículas de hielo presentes son más bien esféricas, lo cual es razonable.

Por otro lado, se observó que el radar de banda C estaba descalibrado, ya que en la Figura 1 se muestran sistemáticamente valores de ZDR cercanos a 2 dBZ en posiciones donde el radar de Cascavel presentó valores prácticamente nulos. En el panel c) de la Figura 1 se observa que no todas las partículas de hielo presentes cumplen la suposición de dispersión en el régimen de Rayleigh, debido a la presencia de atenuación diferencial (valores negativos de ZDR). Las partículas de hielo que sí deberían cumplir esta suposición deberían encontrarse a lo largo del eje $ZDR = 0$.

En la figura 1 a), se observa que los ZH de Irigoyen son menores respecto de los de Cascavel, lo cual muestra claramente la atenuación que sufre el radar de banda C.

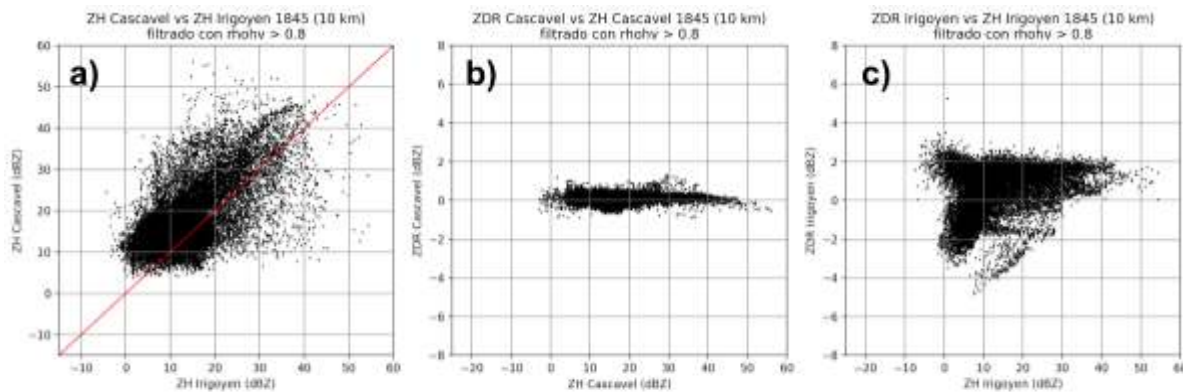


Figura 1: gráfico de dispersión ZH Cascavel vs ZH Irigoyen (a), ZDR Cascavel vs ZH Cascavel (b) y ZDR Irigoyen vs ZH Irigoyen (c) para 10km de altura. A todos los paneles se le aplica una máscara de $CC > 0.8$.

La figura 2 muestra el campo de ZH y ZDR de ambos radares a 3 km de altura. En el campo de ZDR de Irigoyen, se observa una zona con atenuación diferencial al sudeste del dominio (elipse roja en el panel b). Por otro lado, en el campo de ZDR de Irigoyen se observan regiones con efecto de resonancia (valores máximos dentro de la elipse verde en el panel b), las cuales no se condicen con el campo de ZDR del radar de Cascavel. La figura 3 ilustra este comportamiento.

La figura 3 es similar a la figura 1 pero para 3 km de altura. En la figura 3 a) se evidencia la atenuación diferencial de la misma manera que en el panel a) de la figura 1, ya que los ZH de Cascavel son mayores respecto de los ZH de Irigoyen.

En la figura 3 b) se observa que valores de ZH cada vez mayores se corresponden con ZDR también más grandes, es decir, en este nivel probablemente haya gotas grandes con mayor dimensión en la horizontal respecto de la vertical.

La figura 3 c) muestra que para ZH en el rango de 30 a 50 dBZ hay efecto de resonancia (elipse azul). Por otro lado, hay una gran cantidad de valores de ZDR por debajo de cero (rectángulo fucsia), lo cual implica atenuación diferencial.

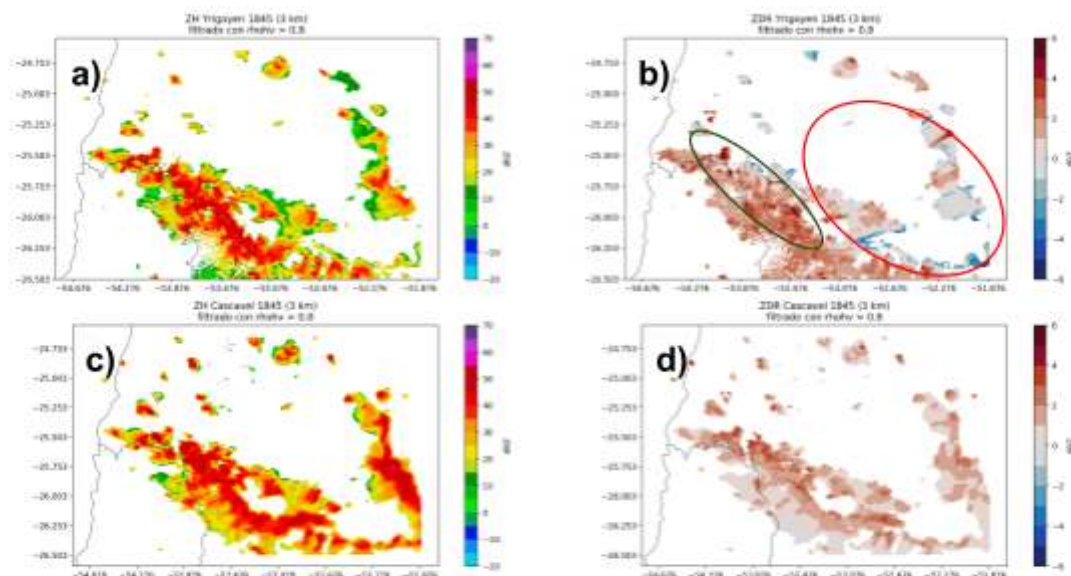


Figura 2: ZH Irigoyen (a), ZDR Irigoyen (b), ZH Cascavel (c) y ZDR Cascavel (d) para 3km de altura. A todos los paneles se le aplica una máscara de CC > 0.8.

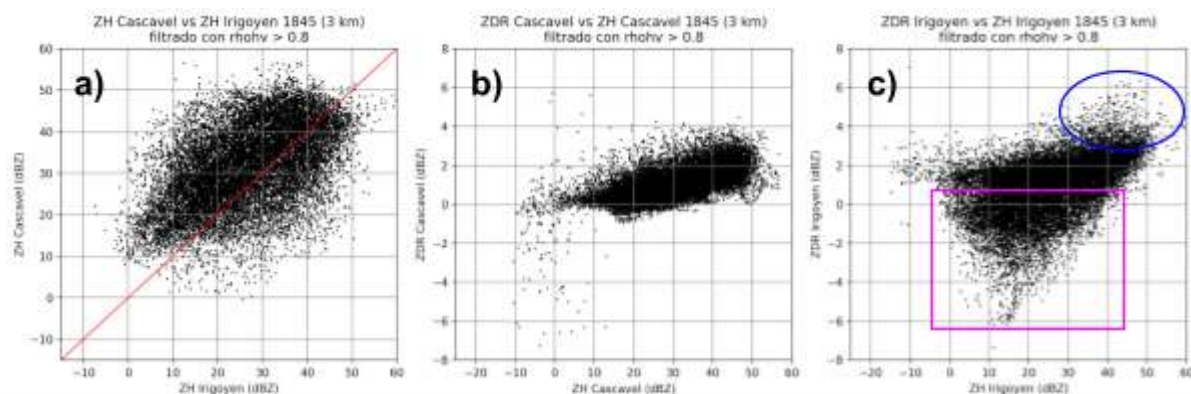


Figura 3: gráfico de dispersión ZH Cascavel vs ZH Irigoyen (a), ZDR Cascavel vs ZH Cascavel (b) y ZDR Irigoyen (c) para 3km de altura. A todos los paneles se le aplica una máscara de CC > 0.8.

4) CONCLUSIONES:

Ante el interés regional por contar con un producto que integre la información de todos los radares disponibles en Sudamérica, el análisis del caso convectivo seleccionado revela la necesidad de avanzar en la corrección operativa de la reflectividad y la reflectividad diferencial en banda C. Esto se debe a la atenuación causada por hidrometeoros intensos, los cuales pueden generar diferencias significativas entre bandas y conducir a errores en la interpretación de la información de radar.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo se realizó en el contexto de la materia Sensoramiento del Sistema Terrestre 2. Agradecemos a las docentes por las sugerencias realizadas para llegar a este trabajo. Agradecemos a SIMEPAR por suministrar la información del radar del Cascavel para el presente análisis, así como al SINARAME por la información del RMA5.

5) REFERENCIAS

Kumjian, M. R. (2013). Principles and Applications of Dual-Polarization Weather Radar. Part I: Description of the Polarimetric Radar Variables. *Journal of Operational Meteorology*, 1.

<http://dx.doi.org/10.15191/nwajom.2013.0119>

Nesbitt, S. W., & Rauber, R. M. (2018). *Radar meteorology: A first course*. John Wiley & Sons.

<https://doi.org/10.1002/9781118432662>

INTERACCIÓN HUMEDAD DEL SUELO RADICULAR - NIVEL FREÁTICO DURANTE LA ÚLTIMA SEQUÍA EN EL SUDESTE DE CÓRDOBA

Ruscica, R.C.^{1,2,3}; Salvia, M.^{4,5}; Cappelletti, L.M.⁶; Lozza, H.⁷; Pulido, M.^{4,8}; Obregón, F.M.^{4,8}; Jobbágy, E.⁹
ruscica@cima.fcen.uba.ar

¹ UBA, FCEyN. ² CONICET – UBA, CIMA. ³ CNRS – IRD – CONICET – UBA, IFAECI.

⁴ CONICET

⁵ Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, CONICET-UBA)

⁶ Fundar, Buenos Aires

⁷ Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)

⁸ Universidad Nacional del Nordeste, FaCENA, Corrientes

⁹ Grupo de Estudios Ambientales (IMASL), UNSL, CONICET, San Luis

Palabras clave: modelado numérico, estimaciones satelitales, asimilación

1) INTRODUCCIÓN

El sudeste de Sudamérica sufrió una sequía socioeconómica importante durante el periodo 2019-2023. La localidad agroproductiva de Marcos Juárez y alrededores, padeció el fenómeno principalmente al final del periodo, con fuerte impacto social y económico (IDECOR, 2023). En esta zona, los agroecosistemas están fuertemente ligados al nivel freático (NF), que se encuentra cercano a la superficie (e.g. Giacobone et al. 2023). En ausencia de precipitaciones, la interacción entre la humedad del suelo (HS) en la zona radicular y el NF es crucial para sostener rendimientos y producción. Sin embargo, explorar dicha interacción es compleja, en principio porque la información regional observada y disponible es limitada. Para contar con información de HS radicular a escala regional/global se asimilan estimaciones satelitales de HS superficial y se aplican forzantes atmosféricos en modelos numéricos de suelo/hidrológico (1) o cultivo (2); o se emplean modelos más simples, del tipo ‘cubo de agua’ (3). En cualquier caso, cada herramienta propaga la información superficial hacia las capas más profundas. Aquí exploramos la interacción entre la HS radicular (en productos del tipo 1, 2 y 3), y el NF observado durante la última sequía.

2) MATERIALES Y METODOLOGÍA

El NF proviene de las estaciones pertenecen a la empresa OMIXOM¹. Estas son: Marcos Juárez (MJ), Monte Buey (MB), Justiniano Posse (JP), Ordóñez (Ord), Wenceslao Escalante (Wen), Chilibroste (Chi), Noetinger (Noe) y Gral. Roca (Roca). Los productos de HS son los globales SMAP-L4 (Reichle y otros, 2022) y SMOS-CATDS (CATDS, 2022), y los locales VST-CONAE (Lozza y otros, 2024) y NOAA-SMAP (Obregón y otros, 2024) (Tabla I). Se utilizaron series de anomalías mensuales de HS radicular, entendida como la HS integrada en el primer metro de suelo, en el periodo máximo común junio 2018 - diciembre 2023.

	SMAP L4	SMOS-CATDS	VST-CONAE	NOAH-SMAP
Tipo modelo	Hidrológico CLSM	bucket model + filtro exponencial estadístico	cultivo, DSSAT	suelo Noah-MP
Asimila en superficie	Temperatura de brillo de SMAP	No. Deriva del producto superficial SMOS L3	Humedad superficial SAOCOM	Humedad superficial SMAP L3
Forzante atmosférico	Sistema GEOS-5 FP	no utiliza	Estaciones meteorológicas	MERRA-2
Integración 1 m	Salida directa	Promedio ponderado primeras 3 capas	Promedio ponderado primeras 7 capas	Promedio ponderado primeras 3 capas
Resolución	9 km	25 km	Polígonos	12 km

Tabla I: Características principales de los productos de humedad del suelo radicular empleados.

¹ <https://cordoba.redesclimaticas.com>, último acceso 9/8/24.

3) RESULTADOS

Se encontraron tendencias negativas significativas (test Mann-Kendall) en todos los sitios para el NF y HS radicular en SMAP y SMOS, y en casi todos los sitios para HS en VST y NOAH. La Tabla II muestra la respuesta en magnitud y signo de las anomalías de HS radicular para NF cercanos (o no) a la superficie, junto con la condición de que el NF ascienda o descienda entre meses consecutivos. Para NF superficiales (<2m), las anomalías de HS son positivas y para niveles profundos (>2m) son negativas (salvo NOAH-Noe con ascenso de NF), tanto si el NF sube o baja, independientemente del producto o del sitio. En otras palabras, NF altos (bajos) se asocian a suelos húmedos (secos) respecto a su valor medio en el periodo. Con NF elevados (<2 m) si este asciende de un mes a otro, la anomalía positiva de HS se torna mayor (o igual) que cuando el NF desciende (salvo 2, de 14, casos: SMOS en Noe y NOAH en Chi). Es decir, para que el NF suba, es necesario que la HS sea realmente alta. En cambio, por debajo de los 2 metros, la anomalía de HS es aún más negativa (o igual) cuando el NF desciende que cuando asciende (salvo 1 caso de 14: VST en JP). Es decir, para que el NF descienda, la HS debe ser realmente baja.

Asc NF, NF>2m	Desc NF, NF>2m
Asc NF, NF<2m	Desc NF, NF<2m

Tabla II: Mediana de las anomalías mensuales de HS sobre los meses que presentaron ascenso/descenso del NF, según esté por arriba/abajo que los 2 metros (color indica la condición). Casillas grises indican casos no encontrados y con guiones no significativas. Noe-VST no dispone de datos confiables.

	SMAP		SMOS		VST		NOAH	
MJ	+0.03	+0.02	+0.03	+0.03	+0.06	+0.03	+0.04	+0.03
	-	-0.02	+	-0.02	+	-0.04	-	-0.02
MB		+0.09		+0.08		+0.08		+0.09
	-	-	-	+	-0.02	-	+	-
JP	-	-	+	+	-	+0.01	+0.02	+0.02
	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.04	-0.03	-0.02	-0.03
Ord	+	-	+0.03	+	+0.06	-	+0.03	+0.02
	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.04	-0.03	-0.03
Wen	+0.01	+	+0.02	+0.01	+0.03	+0.02	+0.02	+0.02
	-0.02	-	-0.02	-0.01	-0.01	-0.03	-0.01	-
Chi	-	+	+0.02	+0.01	+0.03	+0.01	+0.01	+0.02
	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03	-0.03	-0.04	-0.02	-0.03
Noe	+0.07	+0.06	+0.04	+0.06			-0.01	+
	-0.02	-0.02	-	-0.02			+0.02	+
Roca								
	-0.01	-	-	+	-0.03	-	-0.02	-0.01

Para cuantificar la interacción HS radicular - NF, se calculó la correlación no lineal (*Spearman*) entre sus anomalías mensuales (habiendo removido la tendencia lineal), para distintos desfases (Fig. 1). *Lags* positivos (negativos) implican que la serie de anomalías de HS (NF) se antecede 1, 2 o 3 meses a la de NF (HS). Esta se observa mayoritariamente positiva para los *lags* positivos, lo que es coherente con la dinámica principal descendente del agua en el suelo, donde la HS antecede al NF (Giacobone et al. 2023). Mirando la correlación de las series promediadas (primera fila dentro de cada box), estas son positivas, con valores significativos para *lags* 0 y 1 en todos los productos, maximizando en *lag* 1.

4) CONCLUSIONES

Observamos que las anomalías de HS radicular de todos los productos logran detectar las condiciones (estado y derivada) de NF observado en casi todos los sitios analizados. La correlación no lineal entre las anomalías mensuales de ambas variables es positiva y se ve acentuada cuando la HS precede en un mes al NF, en casi todos los sitios y productos.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto Interinstitucional en Temas Estratégicos: SOCIOECOSISTEMA FLUVIAL PARANÁ-PARAGUAY: ESTUDIO ARGENTINO EN EL ESCENARIO DE CAMBIOS GLOBALES; PICTs [2021-I-A-01097, 2019-03639]; CONICET [PIP-112-2020-010214CO].

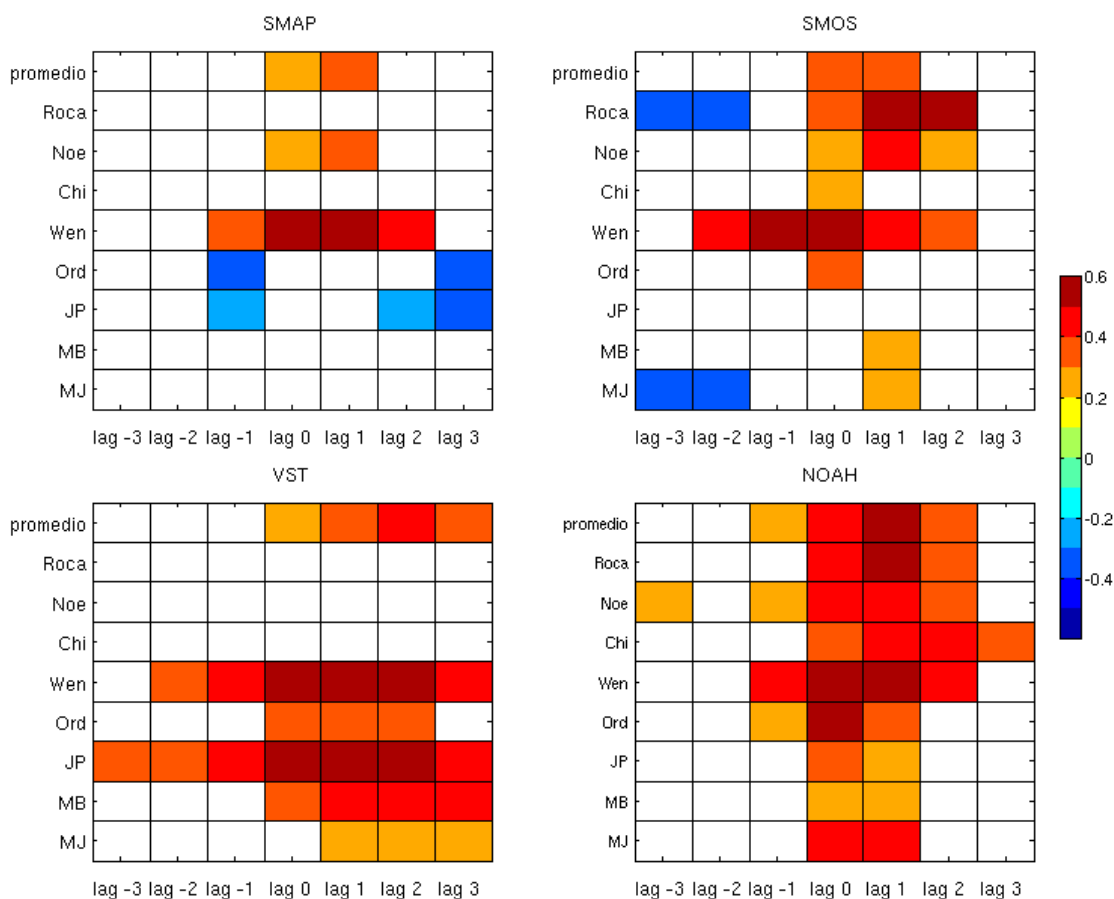


Figura 1. Correlaciones simultáneas (*lag 0*) y desfasadas entre las anomalías mensuales sin tendencia lineal de NF y de HS, para cada sitio y producto. Valores en blanco indican correlaciones no significativas al 95%, salvo en VST - Noe por descartarse la serie de datos correspondiente

REFERENCIAS

CATDS-PDC L4SM RZSM - 1 day global map of root zone soil moisture values from SMOS satellite. CATDS (CNES, IFREMER, CESBIO).
<https://doi.org/10.12770/316e77af-cb72-4312-96a3-3011cc5068d4>

Giacobone, D. y otros, 2023. Contexto regional y local de recarga de acuíferos en la planicie fluvio-eólica de Marcos Juárez; Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Argentino; Revista Argentina de Hidrogeología; 2; 11-2023; 58-80.

IDECOR, 2023. Mapa de Área Sembrada, Rindes y Producción de Soja y Maíz, Campaña 2022/2023, Provincia de Córdoba. Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba, INTA Centro Regional e IDECOR. Octubre de 2023. Acceso noviembre 2024.

Lozza, H. y otros, 2024. VST - Visor de series temporales de la humedad en el perfil de suelo. Manual de usuario de productos. SAOCOM, CONAE.
https://catalogos5.conae.gov.ar/humedad_serie/docs/CONAE_MOD_MHS_DSS_VST_ManualUsuarios_e01.pdf

Obregón, F. M., Pulido, M., & Lucini, M. (2024, September). Soil Moisture Estimation in the Argentinian Pampas Using Data Assimilation of SMAP and SMOS Retrievals. In 2024 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON) (pp. 1-8). IEEE.

Reichle, R.H. y otros. 2022. SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Geophysical Data, Version 7.

CÁLCULO DE TRAYECTORIAS DE MATERIAL PARTICULADO PM10 CON WRF Y HYSPLIT: CASO DE ESTUDIO EN LA CUENCA MATANZA RIACHUELO

Alejandra Cecilia García, Lucas Zapata, Mariana Dezzutti
alecegar@gmail.com

Grupo de Modelado Numérico de la Atmósfera (MNA)
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - Universidad Nacional de La Plata

Palabras clave: Contaminación, fuente emisora, modelado numérico.

1) INTRODUCCIÓN

El material particulado constituye una de las principales fuentes de contaminación de la atmósfera. Se trata de partículas sólidas y líquidas, de origen natural o antropogénico, cuyo reducido tamaño hace que puedan ser absorbidas por el cuerpo ocasionando problemas para la salud (Pope y Dockery, 2005). Por este motivo, resulta fundamental el monitoreo y control de sus concentraciones en el aire.

Se disponen de datos de concentración de PM10 (partículas inhalables con diámetro menor o igual a 10 micrones) de la estación ME3 (situada en Virrey del Pino, partido de La Matanza) que integra la red de monitoreo de calidad de aire de la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR).

Entre el 9 y el 14 de julio de 2024 se registraron concentraciones elevadas de PM10 (Figura 1), superando ampliamente el valor límite diario de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (promedio 24 horas) establecido en la Resolución 02/2007 de ACUMAR.

El objetivo del presente trabajo es evaluar si dichos valores pueden estar asociados a emisiones provenientes de una fuente emisora cercana. Para ello, se realizó una simulación utilizando el modelo Advanced Research Weather Research and Forecasting (WRF-ARW) con alta resolución espacial y temporal.

Las salidas generadas por este modelo se emplearon luego como forzantes del modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT), con el fin de calcular trayectorias y retrotrayectorias del material particulado y así analizar su posible origen.

El uso combinado de WRF y HYSPLIT presenta una ventaja significativa frente a la ejecución de HYSPLIT de manera independiente, ya que permite forzar las trayectorias con campos meteorológicos de mayor resolución espacial y temporal. Esto resulta útil en estudios locales, donde las condiciones atmosféricas pueden no estar bien representadas con los datos de menor resolución que utiliza HYSPLIT por defecto.

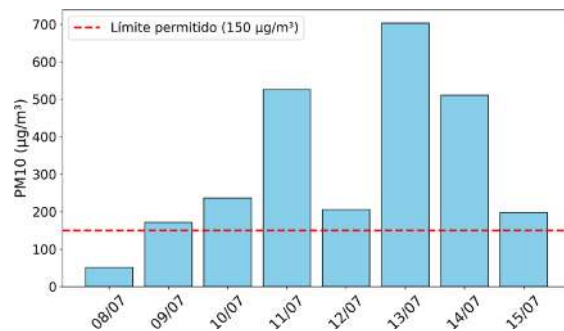


Figura 1: Concentración de PM10 (24h) medida en la estación ME3 de ACUMAR.

2) METODOLOGÍA

Para el presente estudio se realizó una simulación con el modelo WRF versión 3.9 (Skamarock y otros, 2008), compilado en los servidores del grupo de Modelado Numérico de la Atmósfera (MNA) de la FCAG-UNLP. Las condiciones iniciales y de borde fueron obtenidas de los análisis del modelo Global Forecast System (GFS) del National Centers for Environmental Prediction (NCEP), con resolución horizontal de $0,5^\circ$ y salidas cada 6 horas.

Se configuraron dos dominios anidados con resoluciones de 9 km y 3 km, respectivamente, diseñados para cubrir adecuadamente la región de interés. Además, se estableció una frecuencia de salida de 5 minutos para obtener un mayor nivel de detalle al calcular las trayectorias.

Posteriormente, una vez finalizadas las simulaciones con WRF, se convirtieron las salidas al formato requerido por el modelo HYSPLIT (archivos ARL), que fue utilizado para calcular trayectorias (forward trajectories) y retrotrayectorias (backward trajectories) de partículas.

Para cada día del período de estudio se generaron trayectorias horarias. Las trayectorias directas se calcularon desde la fuente emisora mencionada anteriormente, mientras que las retrotrayectorias se calcularon hacia la estación de monitoreo ME3.

Para visualizar las trayectorias generadas y compararlas con los registros de la estación ME3, se importaron los archivos KML resultantes del modelo HYSPLIT en el software Google Earth Pro.

3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Si analizamos los resultados del día 8 de julio (Figuras 2 y 3), en el cual se registraron valores moderados de PM₁₀ en la estación ME3 (Figura 1), se puede observar que las trayectorias provenientes de la fuente emisora y las trayectorias inversas hacia la estación de monitoreo tienen direcciones opuestas. Análogamente, en el resto de los días con concentraciones moderadas, cercanas al límite permitido (días 9, 10, 12 y 15 de julio), se obtuvieron resultados similares.

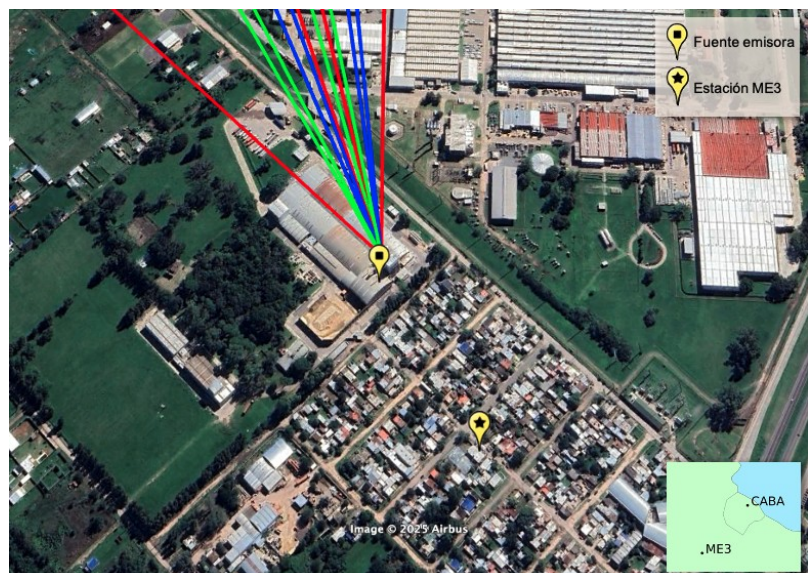


Figura 2: Trayectorias desde la fuente emisora para el día 8/7/24.

Para el día 13 de julio (Figuras 4 y 5), el máximo de concentración de PM₁₀ podría estar vinculado a la fuente emisora, ya que las trayectorias directas llegan al entorno de la estación ME3 y las retrotrayectorias de ésta provienen de la zona de dicha fuente. Algo similar sucede en los días 11 y 14 de julio.

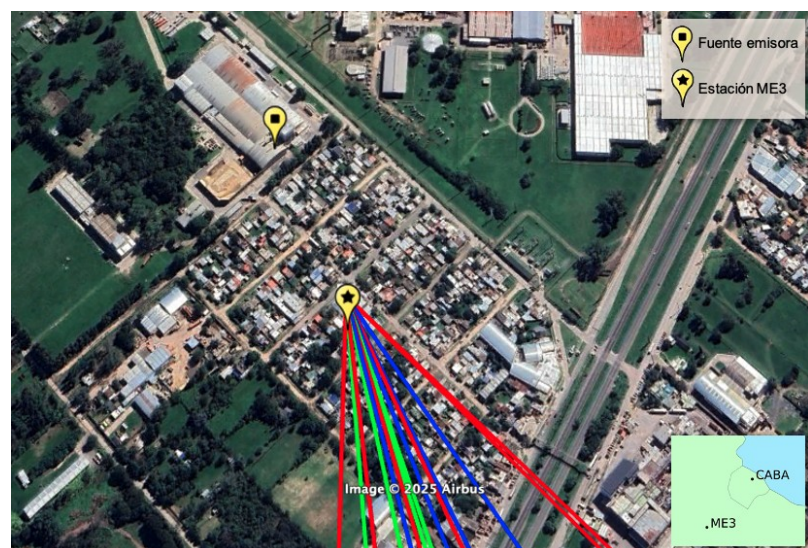


Figura 3: Retrotrayectorias hacia estación ME3 para el día 8/7/24.

En base a este estudio, se concluye que los máximos de concentración de PM₁₀

registrados por la estación ME3 podrían atribuirse en buena medida a la fuente emisora analizada.

Como trabajo a futuro, se propone ampliar el análisis a otros períodos en los que se registren en la estación ME3 valores de PM10 significativamente superiores al límite permitido ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con el objetivo de evaluar si la relación con la fuente emisora identificada en este estudio se mantiene.

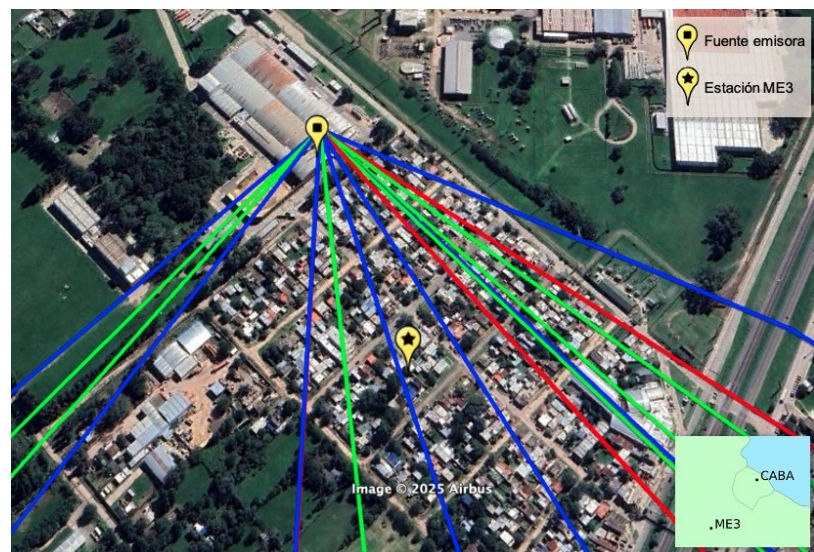


Figura 4: Trayectorias desde la fuente emisora para el día 13/7/24.



Figura 5: Retrotrayectorias hacia estación ME3 para el día 13/7/24.

RECONOCIMIENTOS

Los resultados del presente estudio fueron realizados como parte de los trabajos prácticos del curso de Modelado Numérico de la Atmósfera dictado en la FCAG en 2024.

REFERENCIAS

Pope, C. y Dockery, D. (2005): Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of Air & Water Management Association*. 56. 709-742.

Skamarock W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J. y otros, 2019: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. University Corporation for Atmospheric Research. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>.

EVALUACIÓN DE BASES RETICULADAS DE PRECIPITACIÓN EN CUENCAS DE ARGENTINA: CORRELACIÓN CON DATOS HIDROMÉTRICOS

Agustina Carranza^{1*}, Analía Pereyra¹, Ezequiel A. Callegari¹, Marco E. Micieli^{2,4}, Carla Viazzo³, Gonzalo Díaz^{1,5}, Carla N. Gulizia^{1,2,4}, Mariano Re⁶

*agustina.cza@gmail.com. Autora correspondiente

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³CONICET – Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

⁴CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina

⁵Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

⁶Instituto Nacional del Agua (INA)

Palabras clave: Cuencas hídricas, Argentina, bases de precipitación, datos in situ

1) INTRODUCCIÓN

En Argentina existe una gran diversidad de cuencas hídricas con diferencias en la morfología del terreno, el uso y la cobertura de suelo. Estas características pueden llevar a respuestas hidrológicas muy distintas ante eventos de precipitación. Por lo tanto, resulta trascendente evaluar el desempeño de diferentes bases reticuladas para representar la evolución de la precipitación y su relación con datos hidrométricos (caudal o altura) del cauce principal cerca del punto de cierre, en cada caso particular. No obstante, esta tarea se ve frecuentemente limitada por la escasa cobertura espacial y temporal de datos provenientes de estaciones meteorológicas e hidrológicas. En este trabajo se presenta una recopilación sistemática de datos *in situ* de altura del río y precipitación en diversas cuencas de Argentina ubicadas al norte de los 40°S con el objetivo de validar de forma ordenada y robusta un conjunto de bases reticuladas de precipitación.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El análisis se realizó sobre cuatro cuencas hídricas de Argentina: Corriente, Desaguadero, Bermejo y Carcarañá (Figura 1). Se utilizaron datos *in situ* de altura diaria del cauce principal, cerca del punto de cierre de cada cuenca, y de precipitación diaria de estaciones de la Red Hidrológica Nacional (RHN) ubicadas dentro de la cuenca. Las fuentes de precipitación acumulada mensual fueron MSWEP (Beck y otros, 2019) e IMERG (Huffman y otros, 2014), con resolución 0.1° x 0.1°, y ERA5 para precipitación acumulada diaria (Hersbach y otros, 2020), con resolución 0.25° x 0.25°. En todos los casos, se trabajó con acumulados mensuales de precipitación y valores medios mensuales de altura en el período 2001-2020, descartando aquellas series de datos con más de un 20% de datos mensuales faltantes.

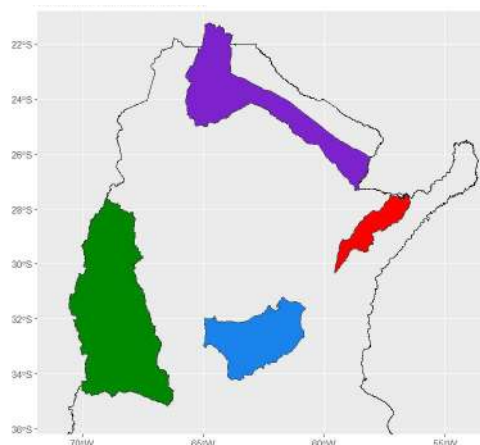


Figura 1: Ubicación de las cuencas hídricas analizadas: Corriente (rojo), Desaguadero (verde), Bermejo (violeta) y Carcarañá (azul).

Para la validación de las fuentes de información se utilizaron datos *in situ* de precipitación acumulada mensual. Se identificó el punto de retícula más cercano a cada estación perteneciente a la RHN en las bases de precipitación, y se calculó un promedio espacial considerando los puntos circundantes ubicados a menos de 0.5° de distancia en latitud y longitud. Finalmente, se calculó el sesgo porcentual y la raíz del error cuadrático medio (PBIAS y RMSE, por sus siglas en inglés,

respectivamente) entre la serie temporal del promedio espacial y la correspondiente a cada estación, para cuantificar el error sistemático y la dispersión asociados a cada base reticulada.

La relación entre la altura máxima del cauce principal cerca del punto de cierre y la precipitación sobre cada cuenca se analizó a través del coeficiente de correlación lineal de Pearson, con un nivel de significancia del 5% a partir de un test t-Student. Este coeficiente se calculó entre la serie de precipitación acumulada mensual asociada a cada punto de retícula y la serie observada de altura del río. A partir de este procedimiento se obtuvieron campos de correlación para cada cuenca entre la altura del río y la precipitación derivada de cada base reticulada.

3) RESULTADOS

En la Figura 2 se presentan los indicadores PBIAS y RMSE utilizados para analizar el desempeño de cada base reticulada con los datos in situ de precipitación. Los resultados obtenidos indican un mejor desempeño de las bases de precipitación en las cuencas Desaguadero y Carcarañá ya que tanto PBIAS como RMSE tienden a valores cercanos a cero, excepto en el caso del PBIAS de ERA5 para cuenca Desaguadero. Al analizar estas métricas individualmente, los valores de PBIAS indican que ERA5 y MSWEP representan mejor a los datos in situ en las cuencas Corriente y Bermejo. En Desaguadero, todas las bases tienden a sobreestimar la precipitación observada, mientras que en el caso de Carcarañá esa sobreestimación se presenta únicamente en IMERG, con subestimación del resto de las bases. Por su parte, la métrica RMSE presenta una mayor disparidad entre las cuencas. Los resultados sugieren un mejor desempeño de MSWEP en Corriente y Bermejo, IMERG en Desaguadero, y ERA5 en Carcarañá. En cuanto a las cuencas Corriente y Bermejo, si bien el PBIAS indica un menor sesgo en las bases ERA5 y MSWEP, el RMSE muestra a MSWEP como la base con menor error. Entonces, al considerar ambos indicadores, MSWEP puede categorizarse como la base con mejor desempeño general en estas dos cuencas.

La Figura 3 muestra los campos de correlación entre la altura del río y la base reticulada de precipitación para cada cuenca. Los resultados muestran que las cuencas de menor tamaño (Corriente y Carcarañá) presentan correlaciones positivas significativas en toda su extensión, aunque en mayor medida cerca del punto de cierre. Esto sugiere una relación directa entre la altura del

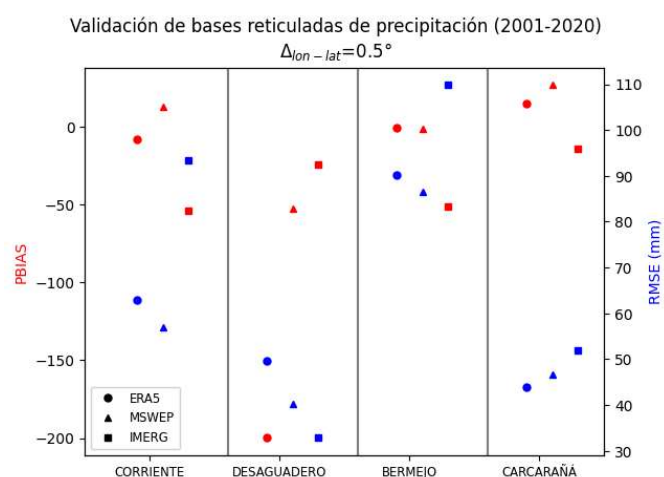


Figura 2: Comparación entre las bases reticuladas de precipitación y estaciones in situ de la RHN en el período 2001-2020. Se presentan los indicadores PBIAS (eje izquierdo) y RMSE en mm (eje derecho), calculados a partir de las series temporales de precipitación acumulada mensual. ERA5, MSWEP e IMERG, se representan mediante círculos, triángulos y cuadrados respectivamente.

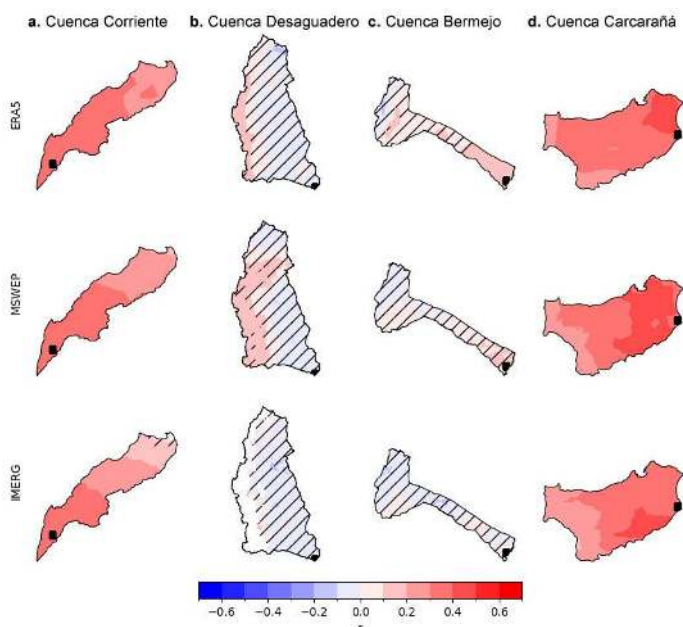


Figura 3: Campos de correlación entre las series temporales de cada fuente de información de precipitación (ERA5, MSWEP e IMERG) y la altura del río en la estación cercana al punto de cierre (cuadrado negro) para las cuencas: a. Corriente, b. Desaguadero, c. Bermejo y d. Carcarañá. Se indica con líneas las correlaciones no significativas ($\alpha = 5\%$).

río en el punto del cierre y la precipitación en la cuenca. En la cuenca Corriente, el gradiente de correlación en dirección noreste-suroeste indicaría una mayor influencia de las precipitaciones ocurridas en las zonas cercanas al punto de cierre sobre los niveles del río. Respecto a Carcarañá, se observan diferencias entre las bases en cuanto a la región con mayor correlación, aunque también se identifica un gradiente de correlación, en este caso con orientación oeste-este. Por otro lado, las cuencas de Desaguadero y Bermejo presentan correlaciones positivas y negativas no significativas en gran parte de la cuenca. En el caso de Desaguadero las correlaciones positivas significativas están ubicadas al oeste de la región para las bases ERA5 y MSWEP, en esta región de montaña no hay información disponible de IMERG. En la cuenca Bermejo hay correlaciones positivas significativas cerca del punto de cierre para la base ERA5, mientras que las correlaciones negativas no significativas se ubican en la parte alta de la cuenca.

4) CONCLUSIONES

El presente trabajo analizó cuatro cuencas en Argentina utilizando la misma metodología y período de estudio con el objetivo de comparar los resultados obtenidos para cada área. Se encontró que las cuencas Desaguadero y Carcarañá fueron las que presentaron una mejor relación entre los datos de precipitación estimados por las bases reticuladas y los datos in situ. En la cuenca Carcarañá, las bases de precipitación mostraron correlaciones positivas significativas en toda su extensión. En cambio, en Desaguadero, si bien en general las correlaciones no resultaron significativas y se observaron diferencias en el signo de la correlación según la base reticulada utilizada, se lograron identificar correlaciones positivas significativas al oeste en las bases MSWEP y ERA5. La base MSWEP fue la que mejor representó la precipitación en las cuencas Bermejo y Corriente. En Bermejo, las correlaciones resultaron positivas significativas únicamente en la cercanía del punto de cierre, mientras que para Corriente, las correlaciones fueron positivas significativas en toda la extensión de la cuenca. Finalmente, la precipitación cercana al punto de cierre resultó ser, en la mayoría de los casos, relevante para la altura del río.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO/FCEN-UBA) por la posibilidad de ofrecer el dictado de la materia optativa “Recursos Hídricos y Clima”, la cual permitió vincular a alumnos/as de grado con profesionales, no solo del ámbito académico, sino también de organismos de Ciencia y Técnica como el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto Nacional del Agua (INA).

REFERENCIAS

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., y otros, 2020: The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999–2049.

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., & Xie, P., 2014: Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG), Version 4.4. NASA's Precipitation Processing System. <https://gpm.nasa.gov/data/imerg>

Beck, H. E., Wood, E. F., Pan, M., y otros, 2019: MSWEP V2 Global 3-Hourly 0.1° Precipitation: Methodology and Quantitative Assessment. Bulletin of the American Meteorological Society, 100(3), 473-500.

COMPARACIÓN DE LA MEDICIÓN AUTOMÁTICA DE NUBOSIDAD CON DATOS DE REANÁLISIS ERA5 EN EL OBSERVATORIO ARGENTINO-ALEMÁN DE GEODESIA (AGGO)

Pablo L. Antico^{1,2}, Mauricio Gende^{1,2}, Michael Häfner¹
pablo.antico@aggo-conicet.gob.ar

¹Argentinean-German Geodetic Observatory, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas-Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

²Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata

Palabras clave: Nubosidad, Cobertura Total de Nubes, ERA5, AGGO.

1) INTRODUCCIÓN

En el AGGO se dispone de observaciones automáticas continuas de diversas variables atmosféricas. Además de estaciones meteorológicas automáticas con sensores convencionales, también se utiliza un nefobasímetro (o en inglés, ceilometer) con un laser para determinar la altura de la base de las nubes (Ceilometer Luft CHM15k). Entre los distintos parámetros vinculados con la medición de nubes, se determina la cobertura total de nubes o simplemente TCC por sus siglas en inglés (Total Cloud Cover).

El objetivo del presente trabajo consiste en determinar las características de la TCC durante un año de medición continua. Los resultados obtenidos se comparan con la misma variable obtenida de los reanálisis ERA5.

2) DATOS

Las mediciones de TCC se obtienen a intervalos de 5 min durante el período comprendido entre las 00 UTC del 1 de enero de 2024 y las 23:55 UTC del 31 de diciembre de 2024. Para el mismo período se consideran los datos de los ERA5. En este último caso, el intervalo de muestreo es de una hora. A los fines de comparar ambos conjuntos de datos, las observaciones se seleccionan a intervalos de 1 hora de manera sincrónica con los ERA5. Estos últimos son convertidos a octavos ($\frac{1}{8}$) de cielo para compararlos con los del nefobasímetro.

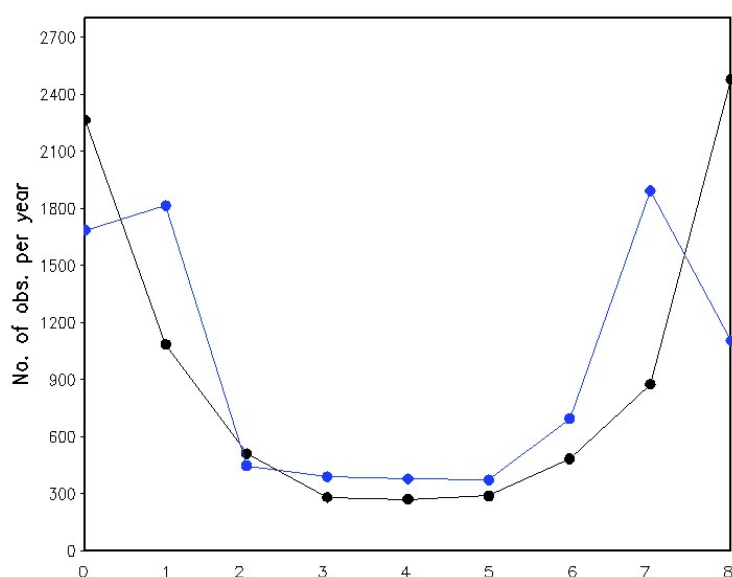


FIGURA 1 – Distribución Anual de Frecuencia Absoluta, Año 2024.

En la Figura 1 se muestra el número total de observaciones (línea negra) o frecuencia absoluta de TCC para cada octavo de cielo desde cero (despejado) a ocho (cubierto) durante el año 2024. La distribución de frecuencias presenta una estructura bimodal. La TCC a partir de los ERA5 (línea azul) exhibe un comportamiento similar con marcadas diferencias en los extremos. Es posible que éstas se expliquen en parte por el método de conversión de porcentajes a octavos aplicado a los datos de los ERA5 y/o al sistema de medición de TCC por parte del CHM15k.

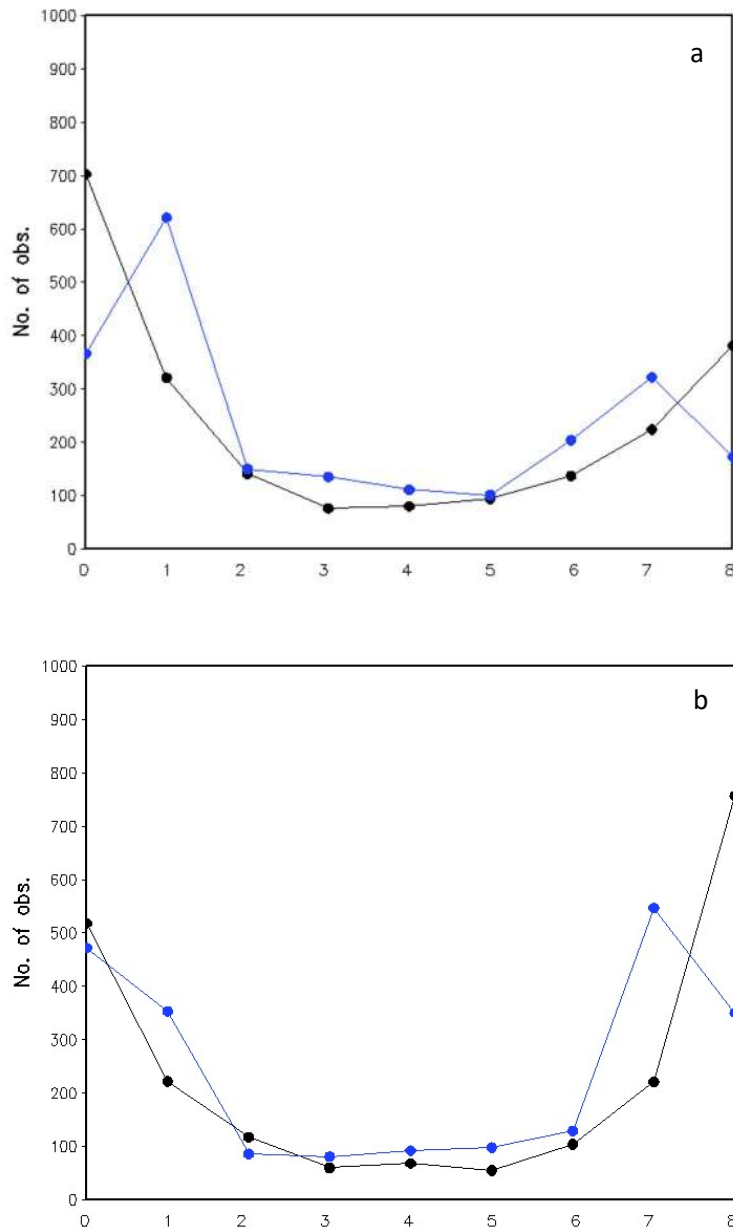


FIGURA 2 – Distribución de TCC en verano (a) e invierno (b).

En cuanto a la distribución de la TCC a lo largo del año, en la Figura 2 se comparan las frecuencias absolutas para el verano (diciembre–enero–febrero) (panel a) y el invierno (junio–julio–agosto). Las principales diferencias se manifiestan en los extremos, siendo más frecuentes las horas con cielo despejado en verano en comparación con las de cielo cubierto. Por el contrario, las horas con cielo cubierto son más frecuentes en invierno en comparación con las de cielo despejado.

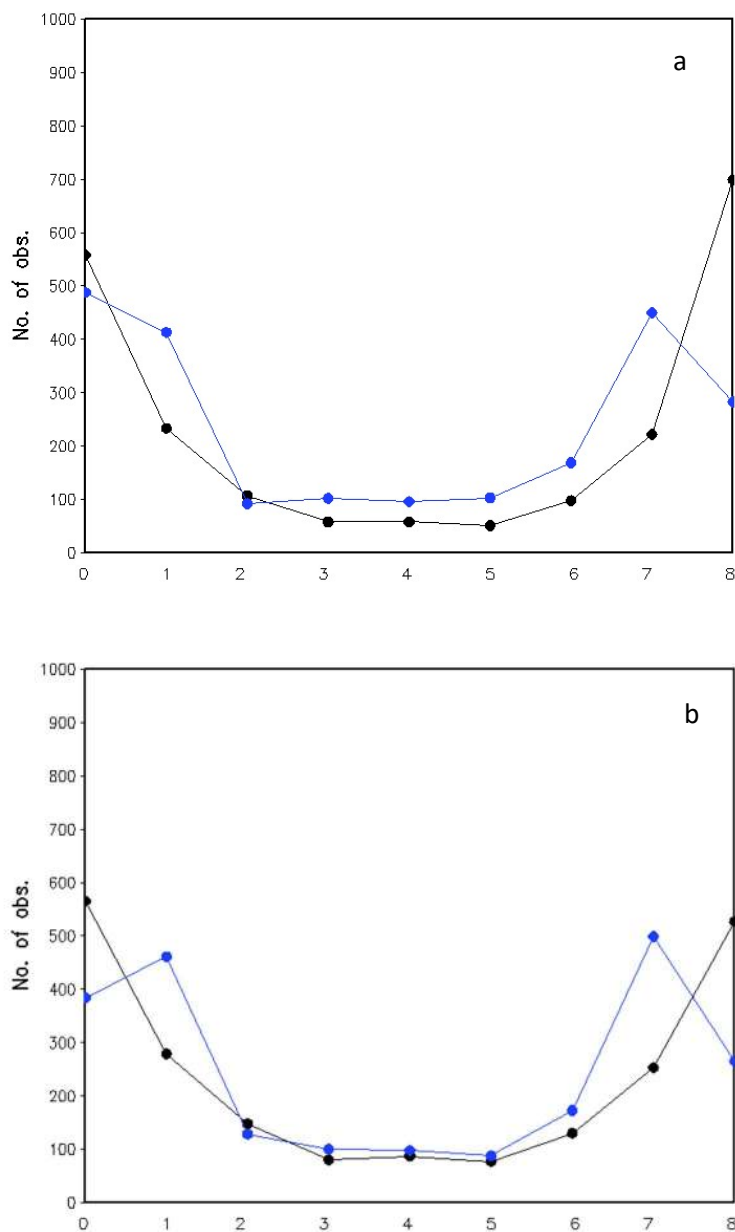


FIGURA 3 – Distribución de TCC a lo largo del día: noche (a) y día (b).

La Figura 3 compara la distribución de la TCC durante la noche (panel a) y el día (panel b). En cuanto a las observaciones, se percibe una disminución en la frecuencia de horas con cielo despejado y con cielo cubierto durante el día simultáneamente con un aumento de las horas con cielo parcialmente nublado (octavos intermedios). Mas allá de las diferencias entre los datos ERA5 y los observados con el CHM15k en los extremos de la distribución, durante la noche los ERA5 sobreestiman ligeramente la cantidad de horas con cielo parcialmente nublado.

3) DISCUSIÓN

La observación de TCC durante el término de un año es consistente en términos generales con los datos de los ERA5. Sin embargo, es necesario analizar las diferencias en los extremos y discriminar entre los grupos de nubes altas, medias y bajas.

HACIA UNA DEFINICIÓN FÍSICAMENTE ROBUSTA DE LOS *WEATHER REGIMES* SOBRE SUDAMÉRICA

Marco E. Micieli^{1,2}, Marisol Osman^{1,2,3}, Denisse Sciamarella^{1,2,4}
marco.micieli@cima.fcen.uba.ar. Autor correspondiente.

¹CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

²CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

³Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

⁴CNRS – Centre National de la Recherche Scientifique, 75016 Paris, France.

Palabras clave: dinámica subestacional, dimensión local, persistencia.

1) INTRODUCCIÓN

Gran parte de la variabilidad de la circulación atmosférica extratropical en la escala subestacional y estacional puede explicarse a partir de los *Weather Regimes* (WRs), un conjunto reducido de patrones recurrentes y cuasi-estacionarios asociados a la dinámica del flujo de gran escala. Suelen identificarse mediante algoritmos de *clustering*, pero ciertas decisiones *ad-hoc* como el número de *clusters* a retener afectan la robustez de los resultados (Christiansen, 2007). Estudios recientes en el Hemisferio Norte (HN) han vinculado a los WRs con una dinámica en el espacio de estados del sistema caracterizada por una menor dimensión local y una mayor persistencia (Faranda y otros, 2017; Hochman y otros, 2021; Lee y Messori, 2024). A diferencia de trabajos previos en Sudamérica que se han enfocado principalmente en el invierno y que retienen la variabilidad de escala sinóptica (e.g. Solman y Menéndez, 2003), en este estudio formulamos una primera definición anual de WRs sobre la región, corroborando la existencia de una estructura física subyacente robusta.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos medios diarios de geopotencial en niveles medios (400-600 hPa) del reanálisis del centro europeo ERA5 (Hersbach y otros, 2020) para el período 1980-2019 en la región 20-80°S 20-120°W con una resolución de 2.5° x 2.5°. Como parte del pre-procesamiento, se filtró el ciclo estacional a partir de una climatología suavizada con un promedio móvil centrado de 60 días, seguido de la aplicación del filtro de Lanczos con una ventana móvil centrada de 61 días y una frecuencia de corte de 10 días para retener la variabilidad de más baja frecuencia. Posteriormente, se removió la tendencia a largo plazo global del dominio mediante un promedio espacial diario ponderado por la latitud, suavizando la serie resultante con un promedio móvil centrado de 365 días y ajustando luego una regresión lineal cuya pendiente fue calculada a partir del estimador no paramétrico de Sen. Las anomalías resultantes fueron normalizadas por la desviación estándar media, ponderada por la latitud, de todo el dominio para cada día del año suavizada con un promedio móvil centrado de 60 días, de forma tal de darle el mismo peso a todas las estaciones del año.

Se obtuvieron luego las Componentes Principales (*Principal Components*, PCs) asociadas a las primeras 4 Funciones Ortogonales Empíricas (*Empirical Orthogonal Functions*), que explican alrededor de un 70% de la varianza total. Se aplicó *K-means* al espacio de dimensión

reducida de las 4 PCs, estandarizando las variables para que todas tengan el mismo rango de variabilidad. En base a los resultados obtenidos con distintas métricas de validación (no se muestran), se retuvieron 5 *clusters* de forma tal de obtener 5 WRs. Sólo se asignaron en alguno de estos regímenes aquellos campos diarios con una correlación lineal ponderada por la latitud mayor o igual a 0,5 con el campo asociado a la media del *cluster* correspondiente.

Para caracterizar la evolución de los eventos asociados a cada WR se obtuvo un índice a partir de la proyección normalizada de cada campo diario de anomalías subestacionales normalizadas de geopotencial en niveles medios en el campo asociado a la media del *cluster* (*Weather Regime Index*, IWR; Michel y Rivière, 2011). En este contexto, se definió como evento activo de un determinado WR aquel con una duración mayor o igual a 3 días, i.e. 3 días consecutivos asignados en ese régimen en base al agrupamiento y al criterio de la correlación, y que presenta un máximo local del IWR asociado.

A través del paquete *Chaotic Dynamical System Kit* (CDSK; Robin, 2021) para *Python*, se calcularon los valores instantáneos de dimensión local (d) y de persistencia ($1/\theta$) para cada campo diario de anomalías subestacionales normalizadas de geopotencial en niveles medios. Posteriormente, se obtuvieron las anomalías de estos parámetros respecto a una climatología suavizada con un promedio móvil centrado de 60 días. El parámetro d es representativo de los grados de libertad que el sistema puede explorar en torno a un estado determinado, mientras que el parámetro θ es inversamente proporcional a la persistencia promedio de las trayectorias alrededor de éste último. Por lo tanto, valores menores de d y θ son indicativos de estados del sistema caracterizados por una mayor estabilidad y recurrencia.

3) RESULTADOS PRINCIPALES

Las composiciones de anomalías subestacionales normalizadas de geopotencial en niveles medios para los días asignados en cada uno de los WRs hallados (Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 , Figura 1) muestran que, en términos generales, Z_1 y Z_4 (Z_3 y Z_5) presentan anomalías anticiclónicas (cyclónicas) en latitudes subpolares sobre el Océano Pacífico y viceversa sobre el Océano Atlántico, mientras que Z_2 evidencia una estructura más zonal.

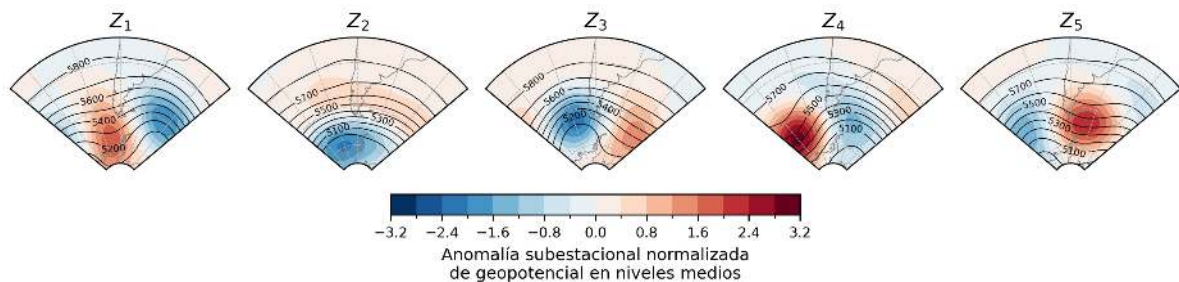


Figura 1: Composiciones de anomalías subestacionales normalizadas de geopotencial en niveles medios (sombreado) y de altura geopotencial en 500 hPa (contornos, metros) a partir de los campos diarios asignados en cada WR (columnas).

La Figura 2 muestra la evolución promedio de las anomalías de d y θ alrededor del máximo local de IWR de los eventos activos de cada WR. Se observan anomalías negativas de d y θ alrededor del momento mayor amplitud, i.e. máximo local del IWR, acentuándose la presencia de un mínimo absoluto cuando se retienen eventos activos de mayor duración. Esto sugiere que, a medida que estos patrones evolucionan a un estado de máximo desarrollo, la dinámica asociada en el espacio de estados se vuelva más persistente y acotada en grados de libertad, y viceversa luego de dicho estado.

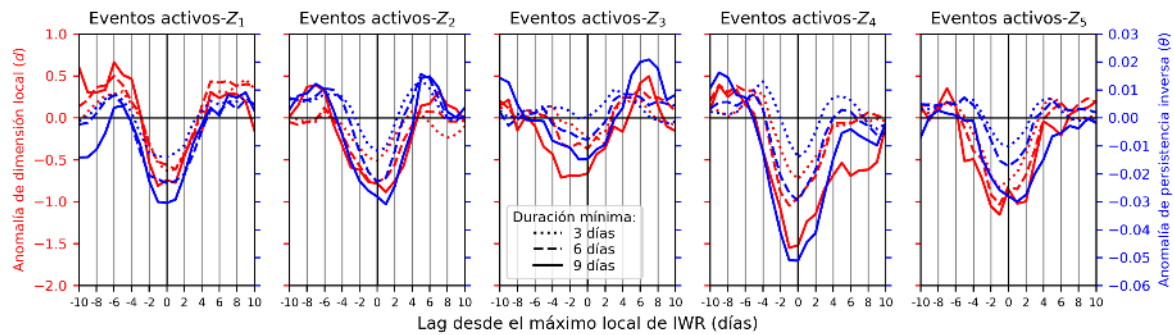


Figura 2: Evolución promedio de anomalías de d (rojo) y θ (azul) alrededor del máximo local del IWR de eventos activos para cada WR (columnas) cuya duración es mayor o igual a 3 días (líneas punteadas), a 6 días (líneas discontinuas) y a 9 días (líneas sólidas).

4) CONCLUSIONES

Se obtuvieron 5 WRs anuales sobre Sudamérica cuyos patrones son muy similares a los obtenidos por Solman y Menéndez (2003) para el invierno. Estos regímenes presentan una evolución dinámica consistente y esperable para estados del sistema caracterizados por una mayor estabilidad y recurrencia, como se demostró en HN.

REFERENCIAS

Christiansen, B., 2007: Atmospheric Circulation Regimes: Can Cluster Analysis Provide the Number?. *Journal of Climate*, 20, 10, 2229-2250.

Faranda, D., Messori, G. y Yiou, P., 2017: Dynamical proxies of North Atlantic predictability and extremes. *Scientific Reports*, 7, 41278.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M. y Thépaut, J.-N., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 730, 1999-2049.

Hochman, A., Messori, G., Quinting, J. F., Pinto, J. G. y Grams, C. M., 2021: Do Atlantic-European weather regimes physically exist? *Geophysical Research Letters*, 48, 20, e2021GL095574.

Lee, S. H. y Messori, G., 2024: The dynamical footprint of year-round North American weather regimes. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL107161.

Michel, C. y Rivière, G., 2011: The link between Rossby wave breakings and weather regime transitions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68, 8, 1730-1748.

Robin, Y., 2021: CDSK-python: Python version of CDSK. <https://github.com/yrobink/CDSK-python/tree/main>

Solman, S. A. y Menéndez, C., 2003: Weather regimes in the South American sector and neighbouring oceans during winter. *Climate Dynamics*, 21, 1, 91-104.

DETECCIÓN DE POLVO ATMOSFÉRICO EN PILAR (CÓRDOBA, ARGENTINA) MEDIANTE TÉCNICA AVANZADA DE LIDAR

Gabriela Celeste Mulena^{1,2*}, Yoshitaka Jin³, Eija María Asmi⁴, Juan José Ruiz^{1,5}, Juan Vicente Pallotta⁶, Sebastián Daniel Papandrea², María Soledad Osorez², Elian Augusto Wolfram²

gmulena@smn.gob.ar

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

² Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

³ National Institute for Environmental Studies (NIES)

⁴ Finnish Meteorological Institute (FMI)

⁵ Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)—Universidad de Buenos Aires (UBA)

⁶ Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones (DEILAP)— Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF)—
Unidad De Investigación Y Desarrollo Estratégico Para La Defensa (UNIDEF)—CONICET

Palabras clave: monitoreo atmosférico, transporte de partículas, óptica atmosférica.

1) INTRODUCCIÓN

La recurrencia de eventos de intrusión de polvo atmosférico puede tener un impacto significativo en el medio ambiente, la visibilidad y la salud humana, especialmente en zonas urbanas (e.g., Díaz et al., 2017). El objetivo de este estudio fue detectar y caracterizar eventos de intrusión de polvo ocurridos durante septiembre de 2019 sobre el Observatorio Pilar, ubicado en la provincia de Córdoba (Argentina), a 31.5° S y 63.9° O y 338 m sobre el nivel del mar (m s.n.m.) (Figura 1). Para ello, se emplearon técnicas avanzadas de teledetección activa mediante un sistema lidar Raman instalado en el observatorio, el cual forma parte de la red South American Environmental Risk Management Network (SAVER-Net) (Ristori et al., 2017).

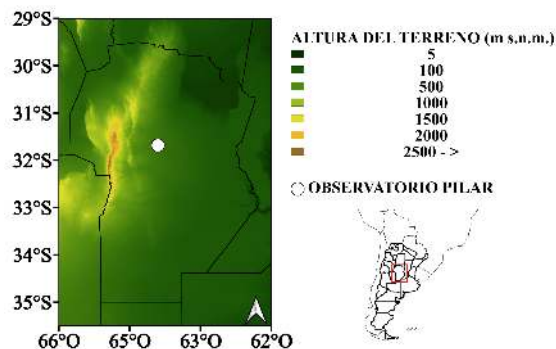


Figura 1: Ubicación geográfica del Observatorio Pilar, situado en la provincia de Córdoba, Argentina.

2) MÉTODOS Y MATERIALES

La detección de los casos de intrusión de polvo en el Observatorio Pilar durante septiembre de 2019 involucró la coincidencia temporal de múltiples parámetros obtenidos mediante el sistema lidar Raman (Mulena et al. 2024). Para la identificación de una capa de polvo, se utilizaron umbrales reportados en la literatura para el coeficiente de retrodispersión atenuado a 532 nm ($\beta_{\text{att}}(532) > 0.001 \text{ km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$), la razón de despolarización de volumen a 532 nm ($\delta_v(532) > 0.2$), y la razón de color de retrodispersión atenuada (1064/532) ($\beta^r > 0.5$), los

cuales permitieron distinguir la altura de las capas, y evidenciar en ellas los aerosoles no esféricos y de gran tamaño, típicos del polvo mineral (ver por ejemplo, Freudenthaler et al. 2009). La caracterización de los eventos de polvo se realizó en función de la altura, duración y estructura vertical de las capas de aerosoles identificadas en cada episodio.

3) RESULTADOS

La Tabla I muestra las características de los eventos de polvo hallados con el lidar en el Observatorio Pilar. Durante septiembre de 2019 se identificaron tres eventos de intrusión de polvo (Casos 1, 2 y 3), los cuales presentaron capas densas o moderadas en superficie, así como capas delgadas en niveles elevados. Las intrusiones superficiales se detectaron los días 2, 19 y 30 de septiembre, con alturas inferiores a 1,5 km sobre el nivel del suelo (s.n.s.), y duraciones que oscilan las 12h. Por otro lado, las capas elevadas, que se evidenciaron el 3, 6 y 20 de septiembre, se extendieron entre 2 y 6 km de altitud y mostraron mayor persistencia, con duraciones de hasta 52 h.

Tabla I: Características temporales y verticales de los eventos de polvo detectados durante septiembre de 2019 en el Observatorio Pilar.

Caso	Fase	Estructura vertical de la capa de polvo	Altura (km s.n.s.)	Período (UTC)	Duración (h)
Caso 1	1	Densa/moderada superficial	< 1,5	2-sep, 12:00 – 24:00	~12
	2	Delgada en altura	hasta 2,5	3-sep, 02:30 – 5-sep, 05:00	~52
	3	Delgada en altura	4 – 6	6-sep, 19:00 – 8-sep, 07:00	~36
Caso 2	1	Densa/moderada superficial	< 1,5	19-sep, 05:00 – 17:00	~12
	2	Delgada en altura	2 – 5	20-sep, 00:00 – 21-sep, 18:00	~42
Caso 3	1	Denso/moderada superficial	< 1,5	30-sep, 12:00 – 24:00	~12

En la Figura 2 se ilustran diferentes parámetros del lidar para los eventos de polvo listados en la Tabla I. La Figura 2a muestra estructuras bien definidas en niveles bajos y medios durante los días con presencia de polvo, evidenciadas por valores moderados de $\beta_{\text{att}}(532)$ ($30\text{--}70 \text{ km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$). Para los eventos de intrusión cercanos a la superficie (líneas punteadas rojas en la Figura 2), la información adicional proporcionada por $\delta_v(532)$ (Figura 2b) y β^r (Figura 2c) refuerza esta interpretación, evidenciando la presencia de aerosoles no esféricos ($\delta_v(532) > 0,2$) de gran tamaño ($\beta^r > 0,5$), característicos del polvo mineral. En los casos en altura (líneas punteadas negras en la Figura 2), aunque los valores de β^r se mantienen cercanos a 0,5 —indicando partículas relativamente grandes—, las plumas tienen valores más bajos de $\delta_v(532)$ cercanos a 0,2, y están rodeados por aerosoles con valores de $\delta_v(532)$ entre 0,1 y 0,2 que sugieren la mezcla de los aerosoles no esféricos y esféricos, secundarios o envejecidos.

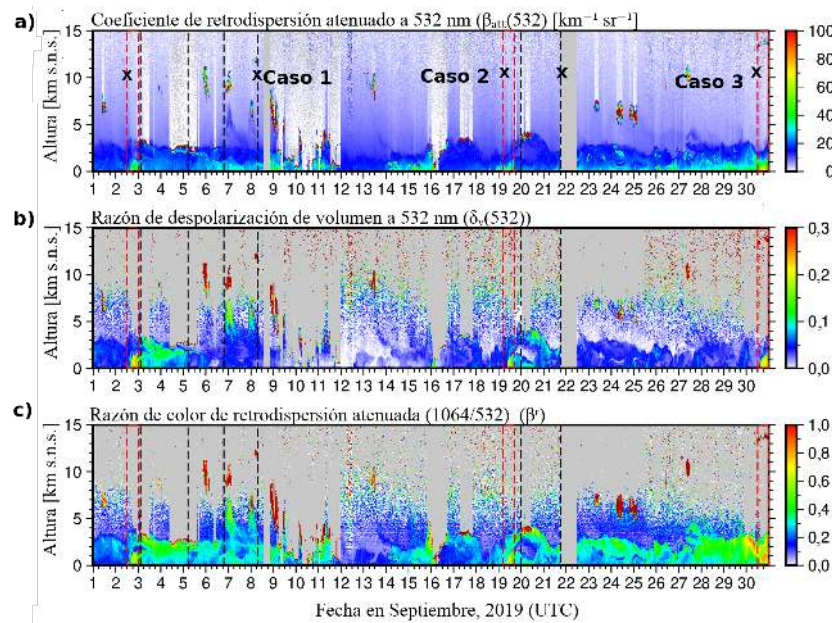


Figura 2: Estructura vertical de parámetros derivados del lidar ubicado en el Observatorio Pilar durante septiembre 2019: a) $\beta_{att}(532)$, b) $\delta_v(532)$, c) β_r . Según la Tabla I, se identifican en la imagen los Casos 1, 2 y 3. Las intrusiones densas o moderadas cercanas a la superficie están indicadas con líneas punteadas rojas, mientras que las capas delgadas en niveles elevados se representan con líneas punteadas negras.

4) CONCLUSIONES

En este estudio se detectaron y caracterizaron tres eventos de intrusión de polvo ocurridos durante septiembre de 2019 sobre el Observatorio Pilar. Los resultados obtenidos evidencian la capacidad del sistema lidar, mediante la combinación de diferentes parámetros, para detectar polvo tanto en niveles bajos como elevados de la atmósfera. La diferenciación en la altura y duración de las capas revela la presencia de múltiples episodios dados posiblemente por distintas características de transporte y mezcla vertical, lo que pone de manifiesto la complejidad de los procesos dinámicos asociados al polvo atmosférico en la zona urbana.

REFERENCIAS

Díaz, J., C. Linares, R. Carmona, A. Russo, C. Ortiz, P. Salvador, y R. M. Trigo, 2017: Saharan dust intrusions in Spain: Health impacts and associated synoptic conditions. *Environ. Res.*, 156, 455–467.

Freudenthaler, V., Esselborn, M., Wiegner, M., y Coautores, 2009: Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006. *Tellus B*, 61, 165–179.

Mulena, G. C., Asmi, E. M., Ruiz, J. J., Pallotta, J. V., y Jin, Y., 2024: Biomass burning aerosol observations and transport over northern and central Argentina: A case study. *Remote Sens.*, 16, 1780.

Ristori, P., Otero, L., Jin, Y., Barja, B., Shimizu, A., Barbero, A., Salvador, J., Bali, J. L., Herrera, M., Etala, P., y Coautores, 2017: SAVER-Net lidar network in Southern South America. *EPJ Web Conf.*, 176, 09011. Presented at the 28th International Laser Radar Conference (ILRC 28), Bucharest, Romania, 25–30 June 2017.

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE CALIDAD DE DATOS AUTOMÁTICOS DE PRECIPITACIÓN EN EL MARCO DEL PROYECTO PREVENIR

Ignacio Guglielmetti^{1,2}, Luciano Vidal¹, Sergio Hernán Gonzalez^{1,2,3}, Juan Ruiz^{2,3}
ignacioguglielmetti@gmail.com

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN/UBA)

³Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET)

Palabras clave: EMA, precipitación, control de calidad.

1) INTRODUCCIÓN

Las mediciones de precipitación confiables con alta resolución temporal y espacial son datos de entrada esenciales para numerosas aplicaciones operativas en meteorología e hidrología, como la estimación cuantitativa de precipitación (ej., Hobouchian et al., 2017), el pronóstico inmediato, las condiciones iniciales en tiempo real para la predicción meteorológica numérica, el modelado hidrológico, etc. (Ośródk et al., 2022).

En las últimas décadas, la disponibilidad de datos de precipitación con alta resolución temporal y espacial se ha incrementado significativamente sobre los continentes gracias al desarrollo de redes de estaciones automáticas y a las estimaciones de precipitación provistas por sensores remotos como el radar meteorológico. Estos conjuntos de datos permiten analizar y entender el comportamiento de la precipitación en escalas temporales del orden de los minutos y espaciales del orden del kilómetro. Las estaciones automáticas pueden contribuir a complementar la información provista por los sensores remotos y ser utilizadas para la validación de dicha información y para el desarrollo de algoritmos más precisos, así como también para realizar un monitoreo con alta resolución temporal de la precipitación.

Los datos de precipitación están sujetos a errores sistemáticos y aleatorios que deben ser detectados para poder hacer un uso eficiente de la información. Esto es cierto en particular para las redes de estaciones automáticas que utilizan sensores más complejos y que producen datos con mayor frecuencia temporal. El objetivo del presente trabajo es implementar y evaluar un sistema de control de calidad para datos pluviométricos con particular énfasis en las escalas temporales sub-horarias. En particular, se plantea desarrollar y evaluar diferentes componentes de dicho sistema, incluyendo un componente basado en la comparación objetiva con imágenes satelitales infrarrojas.

2) DATOS

La base de datos pluviométrica utilizada en este trabajo consta de observaciones de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) de 5 fuentes distintas dentro de la provincia de Córdoba. El periodo de estudio fue del 1 de enero de 2018 al 27 de septiembre de 2021. La base de datos incluye observaciones de 239 estaciones, compuestas por 5 estaciones del Proyecto SINARAME, 100 estaciones de la Bolsa de Cereales de Córdoba (BCC), 42 estaciones del Instituto Nacional del Agua (INA), 57 estaciones del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Córdoba, 25 estaciones de la Administración de Recursos Hídricos de Córdoba (APRHI), 3 de la Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC) y, por último, 7 de distintas municipalidades de la provincia. Para la obtención de los datos de las últimas 4 fuentes antes mencionadas, se utilizó el sistema de la empresa Omixom.

3) METODOLOGÍA

Los componentes del sistema de control de calidad implementados están basados en la idea de verosimilitud, es decir, que buscan asignar a cada dato una probabilidad de que ese dato sea correcto en base a algún criterio. Para algunos aspectos puntuales se utilizan también controles de calidad que permitan descartar la información. Como por ejemplo, en el caso de fallas graves que afectan directamente la validez de los registros, como la presencia de fechas duplicadas, valores negativos en acumulados de precipitación o valores que superan los récords históricos mundiales. El sistema incluye controles clásicos, tales como la búsqueda de valores extremos respecto de los registros climatológicos, la búsqueda de períodos con datos repetidos, entre otros. Como parte del sistema de QC implementado, se incluye además una comparación objetiva con datos de temperatura de brillo del canal 13 del sensor ABI a bordo del satélite GOES-16. La comparación con la temperatura de brillo consiste en calcular la función de distribución de probabilidad de las tasas instantáneas de precipitación, condicionadas a la temperatura de brillo medida por el sensor ABI. Esto se logra a partir de la comparación en tiempo y espacio de las tasas de precipitación estimadas por el radar DPR a bordo del satélite GPM y las temperaturas de brillo del GOES-16. Las funciones de probabilidad resultante se muestran en la Figura 1, donde se puede ver cómo, a medida que disminuye la temperatura de brillo, las tasas de precipitación más altas se vuelven más probables.

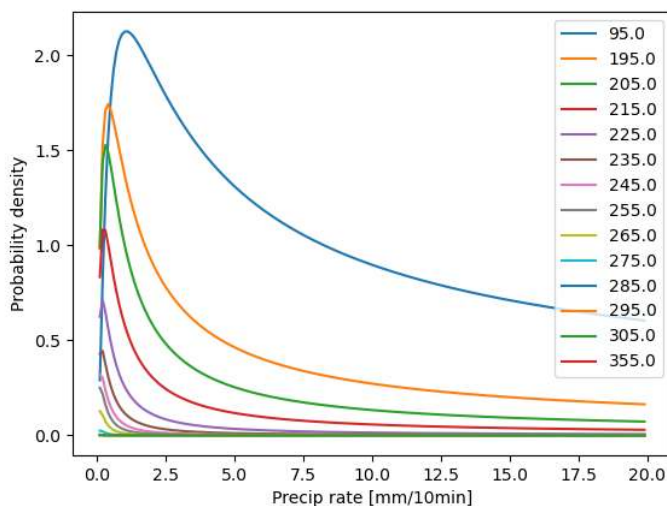


Figura 1: Función de densidad de probabilidad como función de la tasa instantánea de precipitación. Las diferentes curvas corresponden a diferentes rangos de temperatura de brillo en el canal 13 del sensor ABI a bordo del satélite GOES-16.

4) RESULTADOS

La Figura 2 muestra la dispersión de los acumulados de precipitación acumulada en 10 minutos medida en las estaciones automáticas, como función de la temperatura de brillo mínima en un entorno espacial de 8 km alrededor de la ubicación de la estación y temporal de más o menos 5 minutos. El color asignado a los puntos muestra la probabilidad acumulada de que el valor de precipitación sea menor o igual al observado, condicionada a la temperatura de brillo mínima medida por el satélite. Los colores bordó indican eventos de precipitación que están asociados a un extremo en términos probabilísticos. Esto permite detectar rápidamente y de forma objetiva valores que tienen una alta probabilidad de ser erróneos, sobre

todo aquellos asociados con las temperaturas de brillo más altas. La Figura 3 muestra el porcentaje de registros cuya probabilidad acumulada, condicionada a la temperatura de brillo, es mayor al 99.9%. Si bien este valor por sí solo no implica que estos datos se trate de datos erróneos; dicho umbral puede utilizarse para analizar la verosimilitud asociada a los registros de las diferentes estaciones. Si bien las diferentes hipótesis y simplificaciones introducidas en el cálculo de la verosimilitud no permiten una comparación directa entre esta y las frecuencias empíricas obtenidas, este análisis permite identificar rápidamente estaciones cuyo comportamiento difiere del de las estaciones vecinas.

Los resultados obtenidos son prometedores respecto de la consistencia y complementariedad de los diferentes controles implementados. En particular, el control objetivo en base a sensores remotos puede ser mejorado significativamente combinándolo con estimaciones de lluvia asociada a otros sensores, como los radares meteorológicos, o implementando controles cruzados con otras estimaciones de precipitación en diferentes escalas temporales.

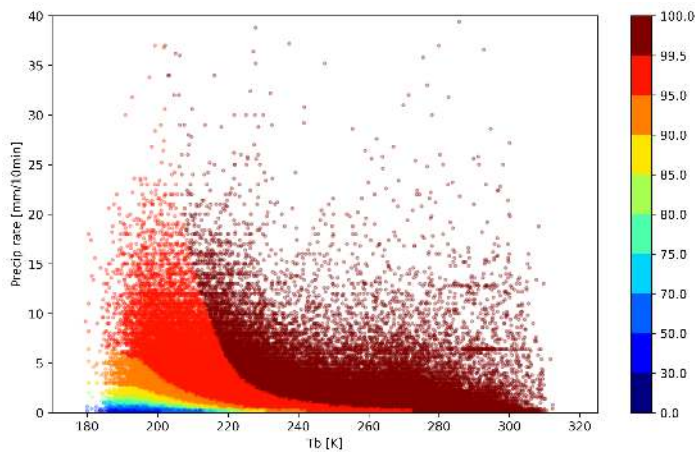


Figura 2: Probabilidad acumulada hasta el valor de precipitación observado, condicionada al valor de temperatura de brillo mínima en un entorno de la estación.

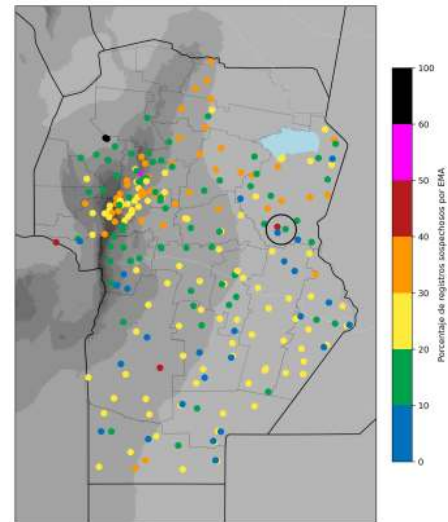


Figura 3: Ubicación de las estaciones analizadas en el trabajo, coloreadas según el porcentaje de registros cuya probabilidad acumulada (condicionada a la temperatura de brillo) es mayor al 99.9% (colores).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha realizado en el marco del Proyecto PREVENIR (prevenir.smn.gob.ar).

REFERENCIAS

Hobouchian, M. P., and Coauthors, 2017: Assessment of satellite precipitation estimates over the slopes of the subtropical Andes, *Atmospheric Research*, 190, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.02.006>.

Ośródk, K., Otop, I., and Szturc, J., 2022: Automatic quality control of telemetric rain gauge data providing quantitative quality information (RainGaugeQC), *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 5581–5597, <https://doi.org/10.5194/amt-15-5581-2022>

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN SAN JUAN DE LURIGANCHO UTILIZANDO SENSORES DE BAJO COSTO

Marian Montalvo¹, Daniel Horna^{1,2}
marian.montalvo@utec.edu.pe

¹Centro de Investigación y Tecnología del Agua, Universidad de Ingeniería y Tecnología

²Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Ingeniería y Tecnología

Palabras clave: Calidad del aire, sensores de bajo costo, contaminación atmosférica.

1) INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales y de salud pública más críticos a nivel mundial, responsable de más de 7 millones de muertes prematuras al año por enfermedades respiratorias y cardiovasculares vinculadas a contaminantes como el material particulado fino (PM_{2.5}), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el ozono troposférico (O₃) (Shairsingh et al., 2023). En América Latina, esta problemática se agrava por la rápida urbanización, el crecimiento del parque vehicular, las emisiones industriales y la débil aplicación de políticas ambientales (Delgado-Villanueva y Aguirre-Loayza, 2020). A pesar de los esfuerzos por reducir estos impactos, más del 90% de las ciudades en países de ingresos bajos y medios aún superan los niveles recomendados por la OMS (Shairsingh et al., 2023).

En Perú, Lima presenta los niveles más altos de contaminación del aire del país, y San Juan de Lurigancho destaca como uno de los distritos más afectados. Esta situación responde al intenso flujo vehicular, un parque automotor antiguo y una urbanización desordenada (Underhill et al., 2015). En sectores rodeados de cerros —como el entorno de la I.E.P. Antúnez de Mayolo— la topografía dificulta la dispersión de contaminantes, generando una mayor acumulación en el aire. Las instituciones educativas ubicadas en estas zonas suelen carecer de infraestructura verde o barreras físicas que mitiguen la exposición, lo que incrementa la vulnerabilidad de la población escolar. La I.E.P. Antúnez de Mayolo, situada en una zona urbanamente densa, representa un caso crítico para evaluar las condiciones locales de calidad del aire en contextos escolares de alto riesgo.

Este estudio analiza las condiciones de calidad del aire y meteorología en los alrededores de dicha institución educativa, mediante el uso de sensores de bajo costo instalados por meses. El objetivo es caracterizar los niveles de contaminación en un entorno urbano vulnerable y con baja capacidad de dispersión, para aportar datos útiles a futuras estrategias de monitoreo y mitigación.

2) METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en los alrededores de la Institución Educativa Pública Antúnez de Mayolo, ubicada en el distrito de San Juan de Lurigancho, Lima, Perú. Esta zona se caracteriza por una alta densidad urbana, tránsito vehicular constante y una topografía cerrada debido a la presencia de cerros, lo que limita la ventilación natural y favorece la acumulación de contaminantes atmosféricos.

2.1 Monitoreo de calidad de aire

El sensor de bajo costo Qaira es una estación portátil de monitoreo ambiental que mide contaminantes atmosféricos como material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y monóxido de carbono (CO). Además, registra variables meteorológicas

como temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), presión atmosférica (hPa) y velocidad del viento (m/s). Los datos son recolectados en tiempo real a intervalos de un minuto, almacenados en la nube mediante la plataforma Qaira Cloud, y exportables en formato CSV para análisis posteriores.

El equipo fue instalado en el entorno inmediato de la I.E.P. Antúnez de Mayolo, a una altura aproximada de 2 metros del suelo y en una ubicación representativa, alejada de fuentes puntuales directas. Las mediciones se realizaron de forma continua durante 1 mes, cubriendo tanto horarios escolares como períodos de baja actividad para captar variaciones diarias.

Según la política de calidad de Qaira, estos sensores están diseñados para proporcionar datos ambientales confiables mediante tecnología validada de bajo costo, alineada con normas internacionales como ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001.

2.1 Preprocesamiento y análisis de datos

Los datos recolectados por el sensor Qaira fueron descargados en formato CSV y analizados con Rstudio. Se realizaron controles de calidad que incluyeron la eliminación de valores atípicos, registros incompletos o inconsistentes, y mediciones nulas o imposibles (por ejemplo, concentraciones negativas o superiores a los máximos teóricos).

Posteriormente, se elaboraron series temporales y gráficos de concentración de contaminantes utilizando la librería ggplot2, aplicando el método de suavizado GAM (Generalized Additive Models) para observar tendencias en los datos. Este enfoque permite modelar patrones no lineales y es especialmente útil en entornos urbanos con alta variabilidad horaria.

También se consideraron variables meteorológicas como la temperatura y la humedad relativa, que influyen en la dispersión de contaminantes. Por ejemplo, en condiciones de baja temperatura y alta humedad relativa, las partículas tienden a permanecer más tiempo en las capas bajas de la atmósfera, incrementando la exposición. Se incluyó también el análisis del ruido ambiente como indicador indirecto de la actividad vehicular y, por tanto, de emisiones contaminantes.

3) RESULTADO

Durante el periodo evaluado, se observaron niveles variables de contaminación atmosférica en la zona de estudio. En cuanto al material particulado, tanto $\text{PM}_{2.5}$ como PM_{10} presentaron concentraciones que en varios momentos superaron los límites establecidos por la normativa peruana (MINAM) y las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Las gráficas muestran que PM_{10} alcanzó valores superiores a $60\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que $\text{PM}_{2.5}$ superó los $30\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ en varios puntos, lo cual representa una calidad del aire clasificada como “mala” o “no saludable para grupos sensibles”.

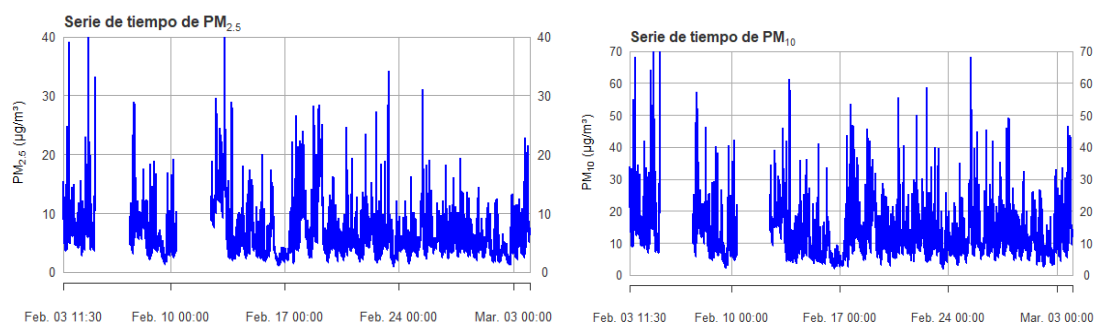


Figura 1: Serie de tiempo de material particulado.

Estas superaciones fueron más notorias durante los fines de semana, lo cual podría estar

asociado a mayor tránsito vehicular, actividades comerciales o condiciones meteorológicas que favorecen la acumulación de contaminantes.

El análisis de calidad del aire en San Juan de Lurigancho muestra en general buenos niveles según los estándares de la OMS. El SO₂ y el CO presentan valores seguros en más del 94% y 99% de las mediciones, respectivamente. El PM_{2.5} también muestra buenos resultados (79% en categoría “Good”), aunque un 21% supera ese nivel. El contaminante más preocupante es el NO₂, con solo 37% en categoría “Good” y más del 60% en niveles que podrían afectar a grupos sensibles. Esto sugiere que el tráfico vehicular es una fuente relevante de contaminación en la zona.

Contaminante	Good (%)	Moderate (%)	Unhealthy for sensitive groups (%)
SO ₂ (ug/m ³)	94.3	5.7	0
NO ₂ (ug/m ³)	37.2	31.4	31.4
PM _{2.5} (ug/m ³)	79.3	20.6	0.1
CO (ug/m ³)	99.8	0.1	0

Tabla 1: Resumen de clasificación según OMS.

4) CONCLUSIONES

El presente estudio confirma que la calidad del aire en San Juan de Lurigancho, especialmente en zonas urbanas densas como el entorno de la I.E.P. Antúnez de Mayolo, presenta niveles de contaminación que, si bien son aceptables para algunos contaminantes como el CO y el SO₂, muestran valores preocupantes en NO₂ y PM_{2.5}, vinculados principalmente a la actividad vehicular y la topografía local que limita la dispersión atmosférica. Estos resultados evidencian la necesidad de implementar políticas específicas de control y mitigación que consideren las condiciones particulares del distrito y prioricen la protección de grupos vulnerables como la población escolar. Además, el uso de sensores de bajo costo demuestra ser una herramienta valiosa para generar información local continua y apoyar la toma de decisiones ambientales. Estos hallazgos aportan evidencia relevante para el diseño de estrategias de monitoreo y manejo de la calidad del aire, alineadas con las normas y recomendaciones internacionales, contribuyendo así a futuras publicaciones en el área.

REFERENCIAS

Delgado-Villanueva, A. y Aguirre-Loayza, A., 2020: Modelamiento y evaluación del nivel de calidad del aire mediante el análisis de grey clustering, estudio de caso Lima metropolitana. *Tecnia*, 30(1). <http://dx.doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.588>.

Montalvo, L., Patiño, J., Gómez, H. y Ramírez, A., 2022: An air quality monitoring and forecasting system for Lima City with low-cost sensors and artificial intelligence models. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4, 849762. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.849762>.

Shairsingh, K., Barrera, M., Wolf, J., Prüss-Ustün, A. y Künzli, N., 2023: WHO air quality database: Relevance, history and future developments. *Bulletin of the World Health Organization*, 101, 356–358.

Underhill, L. J., Joshi, R., Gladson, L. A., Miranda, J. J., Tavera, J. D., Naeher, L. P., Gonzales, G. F. y Breysse, P. N., 2015: Association of roadway proximity with indoor air pollution in a peri-urban community in Lima, Peru. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 13466–13481.

CONSTRUCCIÓN DE CURVAS IDF A PARTIR DE DATOS PLUVIOGRÁFICOS EN EL PARTIDO DE AZUL, BUENOS AIRES (2003-2017)

Elguezabal, M. Constanza¹; Aguas, Laura¹; Hernández, Gabriela¹; Randazzo, Lucia¹
melguezabal@azul.faa.unicen.edu.ar . Autor correspondiente.

¹ Núcleo de estudios en actividades agropecuarias y cambio climático (NAACCE) - Centro Regional de Agrometeorología (CRAGM), Facultad de Agronomía de Azul, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA).

Palabras clave: precipitación, digitalización, ajuste de curvas de distribución.

1) INTRODUCCIÓN

La obtención de datos de precipitación acumulada en intervalos menores al diario resulta esencial para ciertos estudios que requieren mayor resolución temporal. Actualmente, esta necesidad se suple con estaciones automáticas que envían la información a los centros de cómputo en tiempo casi real (Flores, K., 2025). Sin embargo, existen extensos y valiosos registros históricos de precipitación en archivos de papel provenientes de pluviógrafos. Por lo tanto, la digitalización de fajas pluviográficas, es de suma importancia tanto para el almacenamiento y resguardo de los datos, como también para estudios y análisis posteriores, que permiten facilitar entre otros usos y aplicaciones, la elaboración de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) (Chow et al., 1994), útiles para predecir la magnitud de eventos extremos a futuro, aunque limitadas en ciertas ocasiones, por la escasa disponibilidad de datos, producto de la longitud insuficiente de registros (Collazos y Cazenave, 2015).

El presente trabajo tiene como objetivo digitalizar registros pluviográficos del partido de Azul para el periodo 2003-2017, mediante la metodología PluvioRSMNArg desarrollada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), con el propósito final de construir curvas IDF que permitan caracterizar eventos extremos de precipitación mediante el ajuste de distribuciones estadísticas y la evaluación de su desempeño.

2) METODOLOGÍA

La base de datos utilizada para la construcción de las curvas IDF proviene de registros de precipitación obtenidos a partir de un pluviógrafo de cubeta basculante ubicado en la Estancia “Cerro del Águila” (partido de Azul, Buenos Aires, Argentina; con coordenadas -37.17619° de latitud y -59.93773° de longitud).

Las fajas legibles y sin fallas instrumentales (Figura 1.A) fueron digitalizadas mediante el software WebPlotDigitizer (Figura 1.B) (Rohatgi, 2017 y posteriores versiones), siguiendo los lineamientos de la metodología PluvioRSMNArg del SMN.

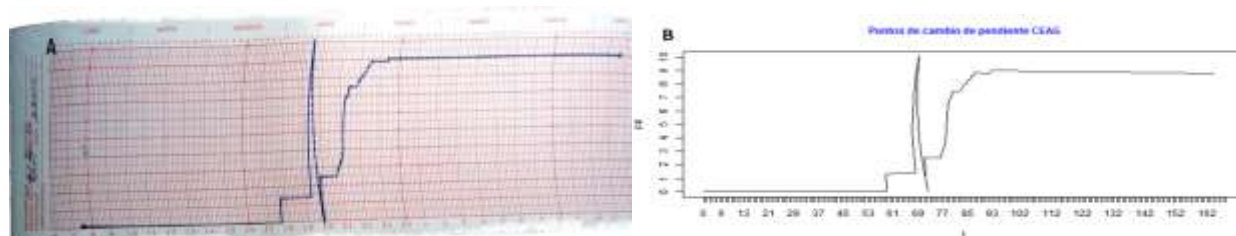


Figura 1. A) Fotografía de una faja pluviográfica original. B) Imagen digitalizada.

A continuación, se procesaron los datos mediante un script en R-Studio adaptado, debido a que el formato de las fajas difiere del estándar utilizado por el SMN. Esto permitió convertir los valores graficados en series numéricas de precipitación acumulada y generar archivos en formato TXT y Excel. Para verificar la consistencia de los datos digitalizados, se realizó un análisis de correlación entre las precipitaciones acumuladas extraídas de las fajas y los registros diarios del pluviómetro de Cerro del Águila, perteneciente a la base de datos del Centro Regional de Agrometeorología (CRAGM) de la Facultad de Agronomía de Azul.

Posteriormente a partir de los valores de intensidad obtenidos para distintas duraciones y períodos de retorno, se elaboraron las curvas IDF utilizando tres distribuciones estadísticas comúnmente aplicadas en estudios hidrológicos: Gumbel, Gamma, y Log-Normal. Para evaluar la bondad de ajuste de cada distribución, se emplearon el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el test de Kolmogorov–Smirnov (KS) y, adicionalmente para la distribución de Gumbel, se incluyó el test de Anderson–Darling.

3) RESULTADOS

El coeficiente de la correlación entre los datos digitalizados y los registros del pluviómetro fue de 0.69, considerado suficiente para avanzar con la construcción de las curvas IDF.

En cuanto a la evaluación de las distribuciones estadísticas, Gamma demostró un desempeño similar a Gumbel según el test de Kolmogorov-Smirnov, aunque exhibió un valor de AIC ligeramente superior, indicando una menor calidad de ajuste. Log-Normal fue totalmente descartada por su elevado estadístico KS y bajo p-valor, evidenciando un mal ajuste a los datos observados. Por lo tanto, se seleccionó la distribución de Gumbel, ya que, por un lado, se fundamenta teóricamente en la modelización de eventos extremos de precipitación y es la opción recomendada para series de longitud limitada, pero, además, resultó ser la distribución que mejor performance estadística obtuvo en las pruebas de evaluación de desempeño.

La comparación de los indicadores estadísticos obtenidos se presenta en la Tabla I.

Distribución	AIC	KS Statistic	KS p-value	Anderson-Darling
Gumbel	119.42	0.1805	0.6484	0.3736
Gamma	121.10	0.1735	0.6947	No disponible
Log-Normal	128.00	0.4625	0.0019	No disponible

Tabla I. Comparación de indicadores estadísticos para las distribuciones evaluadas. Valores de los criterios AIC, Kolmogorov-Smirnov (estadístico y p-valor) y Anderson-Darling (solo disponible para Gumbel).

A partir de los parámetros estimados de la distribución de Gumbel, se construyeron las curvas IDF (Figura 2), considerando períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 75 y 100 años, y duraciones de hasta 24 horas.

Las curvas IDF construidas permiten identificar la relación entre la magnitud de la precipitación, la duración del evento y su frecuencia de ocurrencia. Los resultados muestran que para eventos de corta duración y baja recurrencia (100 años), se estiman hasta 31 mm acumulados en 1 hora, mientras que eventos más frecuentes (período de retorno de 2 años) alcanzan 18 mm acumulados en 1 hora. Se observa que, a medida que aumenta la duración del evento, la intensidad disminuye, aunque el volumen total de precipitación continúa incrementándose, alcanzando alrededor de 104 mm acumulados en 24 horas para un evento de 100 años. Estas curvas resultan claves para el diseño de infraestructura hidráulica y la gestión del riesgo hídrico asociado a inundaciones en la región.

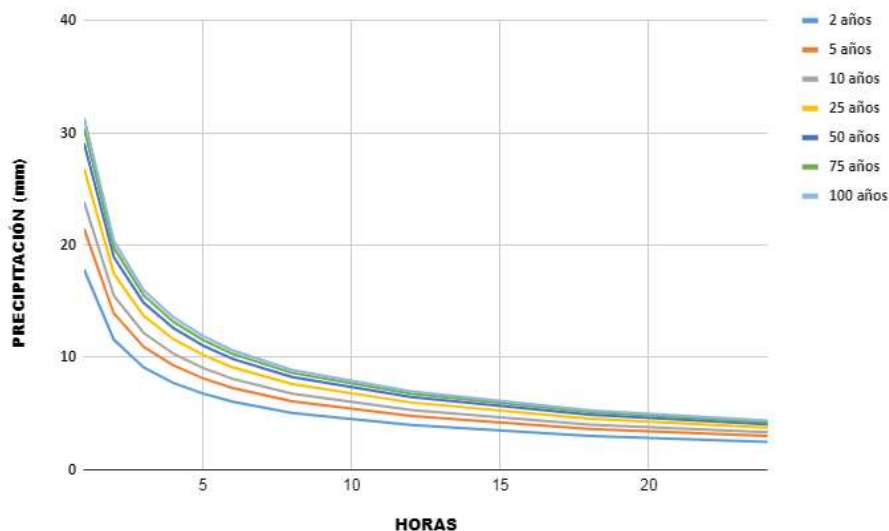


Figura 2. Curvas IDF para la estación Cerro del Águila ajustadas mediante la distribución de Gumbel.

4) CONCLUSIONES

Las curvas IDF obtenidas para la estación Cerro del Águila constituyen una herramienta útil para estimar eventos extremos de precipitación en la región, aportando un insumo clave para el diseño hidráulico y la gestión del riesgo hídrico local. La digitalización permitió recuperar datos históricos valiosos, contribuyendo a mejorar y enriquecer la base de datos regional. La elección de la distribución de Gumbel se fundamentó por su adecuado ajuste en series cortas, validado mediante pruebas estadísticas (AIC, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling).

Si bien las estimaciones obtenidas son consistentes, se sugiere cautela en la aplicación de estas curvas para períodos de retorno superiores a 100 años, y particularmente en el uso de duraciones prolongadas, donde la incertidumbre se incrementa debido a la extensión limitada de la serie analizada.

Este trabajo se presenta como un aporte relevante para la integración de registros históricos con futuras series de datos de estaciones automáticas, facilitando el fortalecimiento de la planificación y gestión del recurso hídrico ante escenarios de creciente variabilidad climática.

REFERENCIAS

- Chow, V.; D. Maidament y L. Mays., 1994: Manual de hidrología aplicada. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia, 584 p.
- Collazos G. y Cazenave G., 2015: Curvas IDF para el centro de la provincia de Buenos Aires. Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires, Argentina.
- Flores, K., 2025: Generación y Procesamiento de Datos Pluviográficos en el SMN: desarrollo de método de digitalización. Nota Técnica SMN 2025-194.
- Rohatgi, A., 2017: Web Plot Digitizer. <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>.

EVALUACIÓN DEL PRODUCTO CHIRPS PARA LA DETECCIÓN DE EVENTOS DE SEQUÍA

Hernán Veiga¹², Santiago Rovere², María de los Milagros Skansi¹²,
Norma Garay¹², Karina Flores¹²
hernan.veiga@smn.gob.ar

¹Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²Sistema de Información sobre Sequías para el sur de Sudamérica /
Centro Regional del Clima para el sur de América del Sur (SISSA/CRC-SAS)

Palabras clave: Precipitación, estimación satelital, validación.

1) INTRODUCCIÓN

Los eventos de sequía ocurren por déficit de precipitaciones por lo que resulta de gran interés el monitoreo de esta variable meteorológica. Sin embargo, el monitoreo de la precipitación no es una tarea fácil en una zona tan amplia y diversa como lo es aquella abarcada por el CRC-SAS. El principal desafío que se presenta en Sudamérica para el monitoreo de las precipitaciones es la falta de cobertura a partir de datos in situ. Por tal motivo, se hace necesario el uso de estimaciones derivadas de sensores satelitales.

Del análisis de diversos trabajos de investigación (Cerón et al., 2020; Cerón et al., 2021; Rivera et al., 2019; Shen et al. 2020) se advierte que no existe un único producto que sea el mejor para todas las regiones, escalas temporales, topografía y objetivos de uso. Por ejemplo, CHIRPS tiene mejor performance para describir eventos de sequía a escala mayor a mensual que para la estimación de montos de precipitación a nivel diario.

El producto CHIRPS (Funk et al., 2015) es producido por el Climate Hazards Center de la Universidad de California en Santa Bárbara y el Servicio Geológico de los Estados Unidos. Este producto combina a duración de nubes frías (Cold Cloud Duration) estimada a partir de sensores en el infrarrojo a bordo de satélites geoestacionarios con datos de precipitación observados en estaciones meteorológicas. El SISSA lo utiliza por su alta frecuencia de actualización, extensa serie temporal, buena resolución espacial y amplia zona de cobertura. El objetivo de este trabajo es validar el producto CHIRPS con el fin de determinar si es adecuado para el estudio de eventos de sequía en la región del CRC-SAS.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

El CRC-SAS comprende el área al sur de 10° sur de América del Sur. Para la validación del producto CHIRPS se consideraron los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas integradas en el CRC-SAS, para el período 1/1/1981 – 31/12/2020. Los análisis se hicieron a escala mensual y trimestral. Debido a que CHIRPS incluye ajustes derivados del uso de observaciones in situ, se descartaron estas estaciones (https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS2.0/diagnostics/list_of_stations_used/monthly/), quedando 131 estaciones restantes para el proceso de validación. Para comparar los datos de CHIRPS con las observaciones in situ se utilizó el método *point-to-area*. A partir de los totales de precipitación acumulada a nivel mensual y trimestral, es posible derivar series temporales de eventos de sequía. Un evento de sequía es una asociación entre una categoría de sequía (de acuerdo con alguna definición dada) y un total de precipitaciones en un período de tiempo determinado. La categorización de eventos de sequía utilizada es la escala de sequía del U.S. Drought Monitor (<https://droughtmonitor.unl.edu/About/AbouttheData/DroughtClassification.aspx>). Esta escala está basada en percentiles de precipitación acumulada, utilizando como período de referencia 1981-2010. Las categorías de sequía establecidas son: no seco (ND), anormalmente seco (D0), sequía moderada

(D1), sequía severa (D2), sequía extrema (D3), y sequía excepcional (D4). A partir de esta definición, se pueden asociar las series temporales de totales de precipitación observada y estimada con categorías de sequía.

Para validar la detección de eventos de sequías utilizando CHIRPS a escalas mensual y trimestral se realizaron dos tipos de diagnóstico: (a) tablas de contingencia para comparar los porcentajes de acuerdo y desacuerdo entre las categorías de sequía observadas y estimadas, y (b) tablas de métricas de concordancia para evaluar la performance. Las métricas de concordancia se calcularon evaluando si el total de precipitación de cada evento fue inferior o no a los percentiles que definen cada una de las seis categorías de sequía.

3) RESULTADOS

En la tabla de contingencia de la Figura 1, correspondiente a la escala mensual, se observa que el 67,5% de los eventos son detectados correctamente por CHIRPS (suma de los valores de la diagonal principal). A escala trimestral, no mostrado aquí, el porcentaje es similar (67.6%). En ambas escalas temporales, los errores más frecuentes de las categorías menos severas (D0 y D1) están asociados a categorías adyacentes, mientras que en las categorías más secas (como D4), los errores se distribuyen uniformemente.

En líneas generales, la performance de CHIRPS disminuye a medida que los eventos representan condiciones de mayor sequía (Tabla 1). Esto indica que un modelo de detección de basado en este producto presenta limitaciones para identificar eventos extremos (sequías severas a excepcionales) con respecto a condiciones más leves de sequía. Esta limitación se relaciona con la tendencia de CHIRPS a sobrestimar los montos de precipitación en los percentiles más bajos, lo que lleva a que los eventos más extremos sean detectados como menos severos (el análisis de los totales de precipitación no fue presentado aquí).



Fig. 1. Tablas de contingencia para la detección de eventos de sequía a escala mensual.

Umbral para eventos de sequía	POD (M)	POD (M)	F1 (M)	F1 (T)	F2 (M)	F2 (T)
Percentil 30	0.683	0.681	0.692	0.691	0.686	0.685
Percentil 20	0.602	0.611	0.62	0.628	0.609	0.628
Percentil 10	0.481	0.501	0.506	0.529	0.491	0.529
Percentil 5	0.379	0.385	0.413	0.42	0.392	0.42
Percentil 2	0.284	0.293	0.321	0.331	0.298	0.331

Tabla 1. Métricas de concordancia a escala mensual (M) y trimestral (T).

Sin embargo, si el objetivo es diferenciar eventos secos de no secos o condiciones de sequía

moderada a extrema de anormalmente secas a no secas, el uso de CHIRPS puede una opción razonablemente buena, de acuerdo con las métricas de concordancia evaluadas. Además, se observa que, en general, las métricas obtenidas para la escala trimestral presentan un desempeño levemente superior al de la escala mensual.

4) CONCLUSIONES

Para la detección de eventos de sequía, a escala mensual y trimestral, el producto CHIRPS es apropiado cuando se busca diferenciar eventos de sequía (percentil de precipitación menor a 30) de condiciones normales o húmedas. También es razonablemente apropiado para diferenciar condiciones de sequía moderada o mayor (percentil menor a 20) de condiciones húmedas, normales o anormalmente secas. Sin embargo, tiene limitaciones para el estudio de eventos de sequías severas o extremas dada la sobrestimación de los totales de precipitación para montos correspondientes a los percentiles más bajos de la distribución (el análisis de los totales de precipitación no fue presentado aquí). Estos resultados coinciden con lo presentado por Rivera et. al. (2019), quienes en su evaluación de CHIRPS en el centro oeste de Argentina, encontraron que el patrón espacial de los eventos de sequías e inundaciones es reproducido con precisión, aunque presenta un sesgo en las categorías más extremas.

Asimismo, CHIRPS presenta debilidades para la detección de eventos de sequía en regiones muy secas o cuyo relieve incluya zonas de topografía compleja o de gran elevación (mayor a 1000 metros), donde su desempeño muestra restricciones para la detección de sequías.

Por las razones expuestas previamente, una línea de trabajo futura de interés para el SISSA sería el abordaje de un proceso que permita la identificación de eventos de sequía severa o mayor (especialmente en zonas muy secas o de topografía compleja) a través de otros mecanismos. Una alternativa es considerar la búsqueda de otras fuentes de datos in situ. También puede considerarse la posibilidad de utilizar otros productos satelitales como complemento de CHIRPS y la implementación de algún proceso estadístico o de aprendizaje automático que permita corregir la sobrestimación de totales de precipitaciones en los percentiles más bajos.

5) REFERENCIAS

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shunkla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J., 2015: *The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes*. Scientific Data vol. 2. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.

Rivera, J., Hinrichs, S., Marianetti, G., 2019: Using CHIRPS Dataset to Assess Wet and Dry Conditions along the Semiarid Central-Western Argentina. *Advances in Meteorology*, 1-18. <https://doi.org/10.1155/2019/8413964>.

Cerón, W. L., Molina-Carpio, J., Ayes Rivera, I., Andreoli R. V., Kayano M. T., Canchala T., 2020: *A principal component analysis approach to assess CHIRPS precipitation dataset for the study of climate variability of the La Plata Basin, Southern South America*. *Nat Hazards* 103, 767–783. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04011-x>.

Cerón, W. L., Kayano, M. T., Andreoli R. V., Avila-Diaz A., Ayes I., Freitas, E. D., Martins, J. A., Souza R. A. F., 2021: *Recent intensification of extreme precipitation events in the La Plata Basin in Southern South America (1981–2018)*. *Atmospheric Research* vol 249. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105299>.

Shen, Z., Yong, B., Gourley, J. J., Qi, W., Lu, D., Liu, J., Ren, L., Hong, Y., Zhang, J., 2020: *Recent global performance of the Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP) with Stations (CHIRPS)*. *Journal of Hydrology*, vol. 59. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125284>.



COMITÉ ORGANIZADOR

Vanesa C. Pántano
Presidente

Josefina Blázquez
Vicepresidenta

Alejandro Godoy
Secretario

Luciano Vidal
Secretario

María Eugenia Dillon
Tesorera

María Paula Llano
Tesorera

Rocío Balmaceda Huarte
Tesorera

COMITÉ EJECUTIVO

Alvaro Scardilli
Andrés Cesanelli

Florencia Solari

María Eugenia Pérez de
Mendiola

Lorenzo Ricetti

Florencia Iacovone

Silvina Righetti

Manuela Milagros Prieto

Matías de Oto

COMITÉ CIENTÍFICO

Yanina García Skabar
Coordinadora

Juan Ruiz
Coordinador

Maira Luz Clara
Coordinadora

Leandro Díaz
Coordinador

Cynthia Matsudo

Hernan Bechis

Juan Rivera

Lucia Curto

Maite Cancelada

Marisol Osman

Matías De Oto

Matías Dinápoli

Mauro Covi

Milagros Alvarez Imaz

Natalia Pessacg

Pablo Spennemann

Rocío Balmaceda Huarte

Romina Ruscica

Vito Galligani

