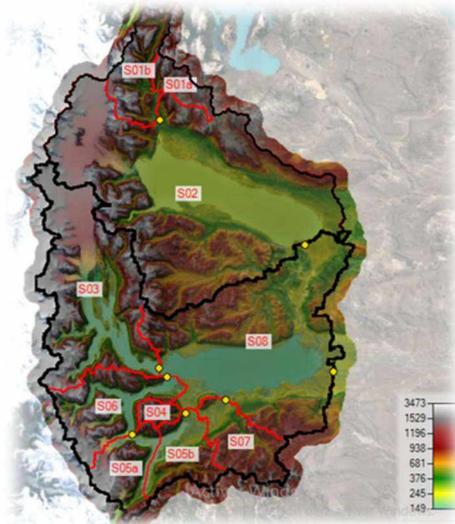
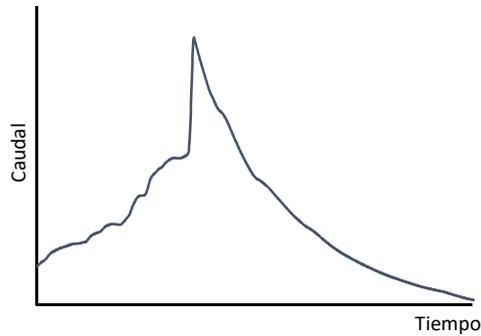


APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ

Presas Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (Cóndor Cliff) y Presa Gdor. Jorge Cepernic (La Barrancosa)



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

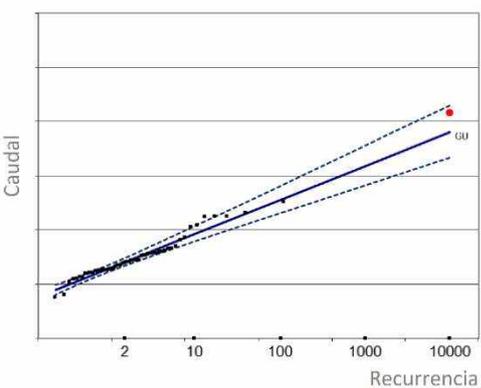


APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ

PROVINCIA DE SANTA CRUZ - ARGENTINA

CRECIDAS DE DISEÑO DEL RÍO SANTA CRUZ

Sergio O. Liscia
Pablo Cacik
Mariano de Dios
Brenda Vath



CRECIDAS DE DISEÑO DEL RÍO SANTA CRUZ

Sergio Oscar Liscia

Pablo Cacik

Mariano de Dios

Brenda Vath

Crecidas de diseño del río Santa Cruz / Sergio Oscar Liscia ... [et al.]. - 1a ed.
- La Plata : Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, 2023.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-950-34-2292-2

1. Glaciares. I. Liscia, Sergio Oscar.
CDD 578.7586

Crecidas de diseño del río Santa Cruz

Sergio Oscar Liscia, Pablo Cacik, Mariano de Dios y Brenda Vath



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA**

Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, 2023.

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723.
© Universidad Nacional de La Plata

Coordinador

Sergio Oscar Liscia ¹

Autores

Sergio Oscar Liscia

Pablo Cacik ²

Mariano de Dios ¹

Brenda Vath ¹

Autores de anexos

Pablo Cacik

Esteban Lacunza ¹

Facundo Ortiz ¹

Mariano de Dios

Brenda Vath

Revisores Externos

Daniel Bacchiega ³

Nicolás Badano

Colaboradores

Rocío Rolón ¹

Sergio Martínez ¹

Paula Consoli Lizzi ¹

Rafael Días ¹

María Julieta Buscetti ¹

Agustín Poblet ⁴

Guillermo Serrano ¹

Macarena Fernández Gago ⁴

Violeta Blasetti ¹

Thomás Vanovhan ¹

¹ Universidad Nacional de La Plata

² Universidad Nacional del Litoral

³ Instituto Nacional del Agua

⁴ Energía Argentina S.A.

Agradecimientos

Queremos agradecer al Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales por brindarnos la información meteorológica y nivométrica de las estaciones operadas por este organismo. Agradecemos al personal de Parques Nacionales por su hospitalidad durante la visita a la zona de estudio.

Valoramos la disponibilidad de información de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación, del Servicio Meteorológico Nacional, del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, de la Dirección General de Aguas de Chile y de la Dirección Nacional de Meteorología de Chile.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción General de la cuenca. Enfoque Conceptual para la determinación de crecidas	2
1.2. Descripción General de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del Río Santa Cruz	5
2. RECOPIACIÓN DE INFORMACION Y ANTECEDENTES	13
2.1. General	13
2.2. Visita de reconocimiento del área de estudio	13
2.3. Recopilación hidrológica e hidrometeorológica	14
2.3.1. Fuentes consultadas	14
2.3.2. Síntesis de estaciones con observaciones recopiladas	15
2.4. Análisis de disponibilidad de información hidrológica e hidrometeorológica recopilada	16
2.4.1. Datos de caudales	16
2.4.2. Datos de niveles hidrométricos	18
2.4.3. Datos de precipitaciones	18
2.4.4. Datos de temperatura	20
2.4.5. Datos de evaporación	20
2.4.6. Datos de altura de nieve	21
2.4.7. Otras variables meteorológicas	22
2.5. Antecedentes cartográficos y satelitales	22
2.5.1. Antecedentes cartográficos y Modelos Digitales de Elevación	22
2.5.2. Imágenes satelitales	23

3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, CLIMÁTICAS E HIDROLÓGICAS GENERALES DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CRUZ	25
4. BREVE SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES CRECIDAS	35
5. ANÁLISIS DE EVENTOS DE APERTURA DE BRECHA ENTRE EL GLACIAR PERITO MORENO Y LA PENÍNSULA DE MAGALLANES	39
5.1. Caracterización de los eventos	39
5.1.1. Características generales	39
5.1.2. Causas de la ocurrencia del cierre	41
5.1.3. Impacto hidrológico de las roturas	42
5.2. Curva cota – volumen lago Rico. Límite físico a la capacidad de retención	46
5.3. Registro histórico de eventos de rotura	50
5.4. Modelo de simulación de operación de embalse	54
5.4.1. Curva cota – volumen del lago Argentino	56
5.4.2. Caudales entrantes al modelo	57
5.4.3. Caudales salientes del modelo	64
5.4.4. Modelo de simulación de operación de embalse simplificado	67
6. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA	73
6.1. Procesamiento Información Hidrometeorológica	73
6.1.1. Introducción	73
6.1.2. Precipitaciones anuales y mensuales	74
6.1.3. Temperaturas mensuales	75
6.1.4. Evaporación y evapotranspiración	77
6.1.5. Comparación de información disponible con fuentes de datos globales	80
6.1.6. Precipitaciones. Análisis de frecuencia	82
6.1.7. Análisis de frecuencia de temperaturas	89
6.2. Caracterización y análisis de consistencia de la serie de caudales en CHF	91
6.2.1. Continuidad de mediciones y aforos disponibles	91

6.2.2. Caudales anuales	92
6.2.3. Caudales diarios máximos anuales	93
6.2.4. Análisis de homogeneidad – caudales diarios máximos anuales en CHF	94
6.2.5. Relación entre caudales máximos de crecidas y caudales aforados	95
6.2.6. Relación entre caudales diarios y caudales instantáneos	96
6.2.7. Relación entre caudales máximos diarios anuales y volúmenes de escurrimiento	96
7. CRECIDA DE DISEÑO CON BASE PROBABILÍSTICA – ESCENARIO BASE	99
7.1. Análisis de frecuencia de extremos máximos anuales	99
7.1.1. Introducción	99
7.1.2. Análisis de frecuencia de caudales diarios máximos anuales en CHF	100
7.1.3. Análisis de frecuencia de caudales diarios máximos anuales en LLEO	110
7.2. Análisis de frecuencia de volúmenes máximos anuales	111
7.2.1. Estación CHF	111
7.2.2. Estación LLEO	116
7.3. Hidrogramas de diseño estadísticos	117
7.3.1. Introducción	117
7.3.2. Hidrograma de diseño en CHF	119
7.3.3. Hidrograma de diseño en LLEO	119
8. CRECIDA DE VERIFICACIÓN ESCENARIO 1	125
8.1. Introducción	125
8.2. Determinación de niveles máximos en lago Argentino	126
8.2.1. Análisis de frecuencia de caudales máximos en CHF sin considerar desembalses rápidos en lago Rico	126
8.2.2. Niveles máximos en lago Argentino	130
8.3. Crecida del río Santa Cruz: Escenario 1	131
8.3.1. Hidrograma de la rotura máxima	131
8.3.2. Crecida del río Santa Cruz: Escenario 1	132

8.4. Análisis de sensibilidad del modelo	135
8.4.1. Sensibilidad a la forma del hidrograma de rotura	135
8.4.2. Sensibilidad a la duración del desembalse	135
8.4.3. Sensibilidad a la variación de las curvas cota - volumen	137
8.4.4. Sensibilidad al nivel inicial de lago Argentino	139
8.4.5. Conclusiones	140
9. CRECIDA DE VERIFICACIÓN ESCENARIO 2	143
9.1. Introducción	143
9.2. Simulación hidrológica de crecidas en el río Santa Cruz	144
9.2.1. Características del modelo de simulación	144
9.2.2. Delimitación de subcuencas de aporte y características físicas	149
9.2.3. Implementación del modelo hidrológico	152
9.2.4. Calibración y verificación del modelo	154
9.2.5. Explotación – Crecida Máxima Probable	159
10. ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS CRECIDAS DEL RÍO SANTA CRUZ	167
10.1. Cambio climático. Generalidades	167
10.2. Región Patagónica	168
10.2.1. Temperaturas	168
10.2.2. Precipitaciones	169
10.3. Proyecciones del clima para el siglo XXI	169
10.3.1. General	169
10.3.2. Proyecciones del clima para el siglo XXI en la región patagónica	170
10.3.3. Cuenca superior del río Santa Cruz	171
10.4. Crecida de Verificación Escenario 2 (CMP) con incorporación de cambio climático	177
11. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON ESTUDIOS PREVIOS - CONCLUSIONES	181

11.1.Crecida de diseño para las obras de alivio de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz	181
11.2.Crecida Máxima Probable	181
12.PASAJE DE HIDROGRAMAS DE CRECIDAS POR LOS APROVECHAMIENTOS DEL RÍO SANTA CRUZ	185
12.1.Introducción	185
12.2.Metodología de cálculo	186
12.3.Resultados obtenidos	188
13.PREDICCIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS EN EL RÍO SANTA CRUZ	193
Anexo Anexos	199
Anexo A. INFORME DE VISITA AL ÁREA DE ESTUDIO	201
Anexo B. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA	209
B.1. Disponibilidad	209
B.1.1. Precipitaciones	212
B.1.2. Temperaturas medias (Figura B.6 a Figura B.8)	215
B.1.3. Velocidad de viento (Figura B.9)	216
B.1.4. Humedad relativa (Figura B.10)	216
B.1.5. Heliofanía efectiva (Figura B.11)	217
B.1.6. Evaporación de tanque y temperatura del punto de rocío (Figura B.12 y Figura B.13)	217
B.1.7. Caudales y niveles en lagos (Figura B.14)	218
B.2. Consistencia y completamiento	218
B.3. Cantidad de días con precipitaciones. Estaciones seleccionadas (Tabla B.3)	224
B.4. Análisis de frecuencia precipitaciones y temperaturas	224
B.4.1. Precipitaciones máximas cuatrimestre enero - abril	224
B.4.2. Precipitaciones máximas mensuales (meses de enero, febrero, marzo y abril)	227

B.4.3. Precipitaciones máximas diarias anuales (Tabla B.24 a Tabla B.28. Figura B.19)	233
B.5. Test no paramétricos para análisis de homogeneidad	238
B.5.1. Test de Mann-Kendall	238
B.5.2. Test de Smirnov	239
B.6. Referencias bibliográficas	240
Anexo C. REGISTRO DE ROTURAS DEL GLACIAR PERITO MORENO	241
C.1. Referencias bibliográficas	261
Anexo D. DETERMINACIÓN DE CURVAS COTA - VOLUMEN EN LAGO RICO Y LAGO ARGENTINO	263
D.1. Objetivo	263
D.2. Metodología	264
D.3. Primer bloque: curva cotal – área para niveles normales	264
D.3.1. Información disponible	264
D.3.2. Procesamiento imágenes LANDSAT	266
D.3.3. Vinculación entre la extensión areal de los lagos y las cotas de superficie libre.	269
D.3.4. Estimación de la capacidad de almacenamiento de los lagos.	269
D.3.5. Resultados	270
D.3.6. Análisis de sensibilidad	277
D.3.7. Comparación de resultados obtenidos con relevamiento topográfico costero en regiones puntuales del lago.	279
D.4. Segundo bloque: relación cota - volumen de los lagos	284
D.4.1. Ajuste de las fuentes de información	287
D.4.2. Estimación de las curvas cota - volumen almacenado	292
D.5. Conclusiones	295
D.6. Referencias bibliográficas	296
Anexo E. CAUDALES MENSUALES DE APORTES AL LAGO RICO	307

Anexo F. RESULTADOS SIMULACIÓN MODELO DE EMBALSE SIMPLIFICADO	313
Anexo G. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE SIMULACIÓN HEC-HMS y del modelo SMA	321
Anexo H. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD. COMPARACIONES CON OTRAS CMP EN REGÍMENES NIVALES O PLUVIO-NIVALES EN ARGENTINA	329
H.1. Análisis de sensibilidad	329
H.1.1. Incertidumbres al ingreso de hidrograma de 10.000 años en La Leona	329
H.1.2. Sensibilidad a la variación de precipitaciones	330
H.1.3. Sensibilidad al incremento de temperaturas	331
H.1.4. Sensibilidad a la condición inicial en lago Rico	332
H.1.5. Sensibilidad a la forma del hidrograma de rotura y a las variaciones de las curvas Nivel-Volumen	333
H.1.6. Resumen análisis de sensibilidad	334
H.2. Comparación de CMP con formulaciones generales	334
H.3. Referencias bibliográficas	338

Índice de figuras

1.1. Ubicación general cuenca río Santa Cruz (fuente: SIPH).	3
1.2. Cuenca Superior río Santa Cruz.	4
1.3. Ubicación de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz, presa Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (NK) y presa Gdor. Jorge Cepernic (JC): vista en planta (superior); perfil longitudinal (inferior).	6
1.4. Esquema general – Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner.	7
1.5. Sección típica de la presa Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner.	8
1.6. Sección típica de la obra de descarga (vertedero / descargadores de fondo y medio fondo / desvío) - Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner. .	8
1.7. Sección típica de la central - Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner.	8
1.8. Esquema general – Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic.	10
1.9. Sección típica de la presa Gdor. Jorge Cepernic.	10
1.10. Sección típica de la obra de descarga (vertedero y descargadores de fondo) - Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic.	11
1.11. Sección típica de la central - Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic.	11
2.1. Ubicación de estaciones medición de caudales (SIPH)	17
2.2. Ubicación de estaciones medición de alturas hidrométricas en lagos (SIPH). . . .	18
2.3. Disponibilidad de información de caudales y alturas (SIPH).	19
2.4. Ubicación estaciones medición de precipitaciones (con más de 5 años de registros).	19
2.5. Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Argentina).	20
2.6. Ubicación de estaciones con temperaturas utilizadas.	21
2.7. Disponibilidad de información de temperaturas (Argentina). Series de mayor longitud.	21

2.8. Ubicación de estaciones nivométricas (IANIGLA).	22
3.1. Temperaturas mensuales en El Calafate Aero (SMN) – diferentes años.	27
3.2. Variación del manto de nieve acumulada y evolución de temperaturas medias en estación Aonikenk (IANIGLA) ubicada a 1.200 mIGN de altura (2014 – 2018).	27
3.3. Variación mensual de caudales y principales variables climáticas relacionadas.	28
3.4. Sector sur del lago Argentino.	29
3.5. Evolución de caudales medio mensuales a lo largo del año en la cuenca superior río Santa Cruz.	31
4.1. Crecida 1988	36
4.2. Crecida 1980	36
4.3. Crecida 1966	37
4.4. Crecida 1963	37
4.5. Crecida 2018	38
5.1. Proceso de cierre del glaciar Perito Moreno contra la península de Magallanes.	40
5.2. Bocetos esquemáticos del proceso de rotura: avance del frente del glaciar Perito Moreno, formación del dique de hielo, y drenaje, primero a través de grietas en el contacto entre el glaciar y el lecho rocoso, luego a través del túnel formado en el hielo y finalmente a través de un canal (Nichols y Miller, 1952).	41
5.3. Niveles del brazo Rico registrados en la estación LRIC (SIPH).	43
5.4. Niveles del lago Argentino registrados en la estación CAL (SIPH).	43
5.5. Caudales del río Santa Cruz registrados en la estación CHF (SIPH).	44
5.6. Diferencia de nivel entre el brazo Rico y el lago Argentino, a partir de los registros de las estaciones LRIC y CAL, desde 2003 hasta la actualidad.	44
5.7. Hidrogramas en el río Santa Cruz considerando y sin considerar la influencia del evento de desembalse rápido del año 2004.	45
5.8. Caudales máximos anuales desde el año hidrológico 1957/58 hasta el 2018/19. Se identifican en el gráfico el valor medio de la serie de caudales máximos y los eventos de rotura.	46
5.9. Curva cota-volumen del lago Rico (por encima de cota 176,5 mIGN).	47

5.10. a) Zona de desborde del lago Rico; b) detalle del relevamiento topográfico; c) perfil longitudinal del sector de desborde.	48
5.11. Área de desbordes y perfiles transversales relevados.	48
5.12. Perfil Longitudinal desborde lago Rico.	49
5.13. Sección transversal área de desbordes.	49
5.14. Relación cota lago Rico – caudal de desborde.	50
5.15. Simulación lago Rico. Situación de desborde – cota inicial 207 mIGN.	51
5.16. Relación cota lago Rico – caudal de desborde.	51
5.17. Línea de tiempo de los eventos de rotura registrados con el aumento de caudal en el río Santa Cruz provocado por los mismos y el desnivel del lago Rico entre el inicio y el fin del desembalse.	53
5.18. Porcentaje de eventos de rotura que se han producido en cada mes.	54
5.19. Esquema en planta del modelo de embalse utilizado para simular el paso de la crecida provocada por la apertura de brecha entre el glaciar Perito Moreno y la península de Magallanes.	55
5.20. Esquema del perfil del modelo de embalse utilizado para simular el paso de la crecida provocada por la apertura de brecha entre el glaciar Perito Moreno y la península de Magallanes.	55
5.21. Curva cota - volumen lago Argentino (por encima de cota 176,5 mIGN).	57
5.22. Hidrograma de rotura para el evento del año 2018.	59
5.23. Desnivel máximo del lago Rico y duración del desembalse del evento de rotura del año 2018.	61
5.24. Adimensionalización de la curva de variación de niveles del lago Rico durante los eventos de desembalse (en la leyenda, entre paréntesis, se indica la duración total de cada desembalse en días).	62
5.25. Ajuste del desembalse medio a partir de las curvas adimensionales de variación de niveles del lago Rico durante las roturas del GPM.	62
5.26. Curva adimensional de desembalse media.	63
5.27. Curva que relaciona los niveles de agua en el lago Argentino con los caudales en Charles Fuhr (Lara, 2016).	64

5.28. Curva que relaciona los niveles de agua en el lago Argentino con los caudales en Charles Fuhr (Lara, 2016). Los puntos indican los valores registrados en diferentes eventos de desembalse.	65
5.29. Puntos cota lago Argentino – caudal río Santa Cruz obtenidos de las modelaciones del “Estudio del Funcionamiento del sistema Lago Argentino – Río Santa Cruz – Embalse Néstor Kirchner” (UNLP, 2015) graficados sobre la ley $N_{LA} - Q_{CHF}$ de Lara (2016).	66
5.30. Modificación del tramo c4 de la curva que relaciona los niveles de agua en el lago Argentino con los caudales en Charles Fuhr.	67
5.31. Caudal inicial considerado en el modelo de simulación de embalse para el evento del año 2018.	68
5.32. Evolución de los niveles del lago Argentino en función del tiempo luego de iniciado el evento de desembalse del año 2018 (modelo y registros).	69
5.33. Hidrograma de crecida del río Santa Cruz luego de iniciado el desembalse del año 2018 (modelo y registros).	69
5.34. Comparación de los puntos cota lago Argentino – caudal río Santa Cruz registrados durante los desembalses respecto a la ley que relaciona estas dos variables. . . .	70
6.1. Precipitaciones medias mensuales.	75
6.2. Temperaturas mensuales. Comparación.	76
6.3. Temperaturas mensuales 2010 – 2019. Estaciones con más de 5 años de datos. . .	76
6.4. Correlación temperaturas SMN (El Calafate Aero + Lago Argentino Aero) vs EMGPM. .	77
6.5. Temperaturas medias mensuales y estimación de la cota para 0°C.	78
6.6. Evaporación y temperatura media mensual en El Calafate Aero (SMN).	79
6.7. Comparación evaporación de tanque y obtenidas por fórmulas (El Calafate Aero - SMN).	79
6.8. Evolución anual de variables hidrometeorológicas (El Calafate Aero - SMN).	80
6.9. Estimación de ETP	80
6.10. Precipitación anual 2008. Comparación CR2Met vs datos observados.	81
6.11. Precipitación media anual (1979/2018) - CR2Met.	82
6.12. Temperatura anual 2008. Comparación CR2Met vs datos observados.	83
6.13. Gradiente de Temperatura en función de cotas (mIGN). CR2Met.	83

6.14. Análisis de frecuencia de precipitaciones mensuales (mm) – Marzo – Lago Dickson.	85
6.15. Precipitaciones mensuales adimensionales del mes de marzo y vector regional – región Z2.	85
6.16. Precipitaciones mensuales adimensionales marzo y vector regional – región Z1.	86
6.17. Precipitaciones mensuales adimensionales y vector regional (E+F+M+A).	86
6.18. Vector K región base cordillera. Análisis regional precipitación máxima, 1 día.	88
6.19. Distribución de frecuencias de temperaturas El Calafate SMN.	90
6.20. Temperaturas mensuales con diferentes recurrencias – comparación con años característicos.	90
6.21. Aforos realizados en CHF.	91
6.22. Caudales anuales CHF (1958/59 – 2018/19).	92
6.23. Caudales anuales LLEO (1958/59 – 2018/19).	93
6.24. Caudales diarios máximos anuales CHF (1958/59 – 2018/19). Medias deslizantes y cronológicas.	95
6.25. Comparación de caudales aforados – caudales informados ($H-Q$) durante eventos de crecidas.	96
6.26. Relación entre caudales máximos anuales y volúmenes máximos en 30 días (CHF).	97
6.27. Relación entre caudales máximos anuales y volúmenes máximos en 90 días (CHF).	97
6.28. Relación entre caudales máximos anuales y volúmenes máximos en 30 días (LLEO).	98
7.1. Relación coeficiente de variación – coeficiente de asimetría (submuestras 40 años).	101
7.2. Relación coeficiente de asimetría – coeficiente de kurtosis (submuestras 40 años).	102
7.3. Relación coeficiente de variación – coeficiente de asimetría (submuestras cronológicas de 40 a 60 años).	102
7.4. Relación coeficiente de asimetría – coeficiente de kurtosis (submuestras cronológicas de 40 a 60 años).	103
7.5. Análisis de frecuencia de caudales máximos anuales en CHF (serie 1957/58 – 2018/19). Frecuencia empírica Gringorten.	107
7.6. Análisis de frecuencia de caudales máximos anuales en CHF (serie 1957/58 – 2018/19). Frecuencia empírica Weibull.	107

7.7. Análisis de frecuencia de caudales diarios máximos anuales en CHF (1957/58 – 2018/19). Intervalos de confianza – distribución Gumbel (MPP).	110
7.8. Análisis de frecuencia de caudales máximos anuales en río La Leona en LLEO (1956/57 – 2018/19).	111
7.9. Volúmenes máximos anuales en CHF.	112
7.10. Relación $CS-CV$. Volúmenes máximos anuales diferentes duraciones en CHF. . .	113
7.11. Relación $CS-CK$. Volúmenes máximos anuales diferentes duraciones en CHF. . .	113
7.12. Análisis de frecuencia de volúmenes máximos en 30 días. Río Santa Cruz en CHF (1957/58 – 2018/19).	114
7.13. Análisis de frecuencia de volúmenes máximos en 60 días. Río Santa Cruz en CHF (1957/58 – 2018/19).	114
7.14. Análisis de frecuencia de volúmenes máximos en 120 días. Río Santa Cruz en CHF (1957/58 – 2018/19).	115
7.15. Error cuadrático medio volúmenes (Gringorten).	115
7.16. Error cuadrático medio frecuencias (Gringorten).	116
7.17. Error cuadrático medio volúmenes (Weibull).	116
7.18. Error cuadrático medio frecuencias (Weibull).	117
7.19. Curvas Volumen – Duración – Recurrencia según distribución Gumbel (MPP) en CHF (serie 1957/58 – 2018/19).	117
7.20. Curvas Volumen – Duración – Recurrencia según distribución LN2 (MV) en LLEO.	118
7.21. Hidrograma tipo adimensional en CHF.	119
7.22. Hidrogramas maximizados para distintas recurrencias en CHF.	120
7.23. Hidrograma tipo adimensional en LLEO.	120
7.24. Hidrograma de diseño para distintas recurrencias en LLEO.	121
8.1. Esquematación de eventos críticos. Escenario 1.	126
8.2. Ejemplo separación de hidrogramas.	127
8.3. Caudales diarios máximos anuales en CHF sin considerar eventos de rotura. . . .	128
8.4. Análisis de frecuencia de caudales máximos anuales sin considerar años con eventos de rotura. Río Santa Cruz en CHF (1957/58 – 2018/19) – serie de 45 años. . .	129

8.5. Análisis de frecuencia de caudales máximos anuales truncando efecto de rotura. Río Santa Cruz en CHF (1957/58 – 2018/19).	129
8.6. Cuenca superior del río Santa Cruz. Comparación análisis de frecuencia de caudales máximos anuales entre LLEO y CHF sin aportes de rotura.	130
8.7. Cuenca superior del río Santa Cruz. Comparación análisis de frecuencia de caudales máximos anuales entre LLEO y CHF sin aportes de rotura (series coincidentes).	130
8.8. Curva de variación de niveles del lago Rico durante el desembalse máximo del Escenario 1.	133
8.9. Hidrograma de la rotura máxima del Escenario 1.	133
8.10. Variación en el tiempo de los niveles del lago Argentino durante los quince primeros días luego de iniciado el desembalse.	134
8.11. Hidrograma de crecida de verificación del río Santa Cruz (Escenario 1) durante los quince primeros días luego de iniciado el desembalse.	134
8.12. Hidrogramas de rotura máxima construidos a partir de la curva adimensional de desembalse media, del año 2018 y del año 1966.	136
8.13. Hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura máxima construidos en base a la curva adimensional media, la del año 2018 y la del año 1966.	136
8.14. Hidrogramas de rotura máxima construidos a partir de la curva adimensional de desembalse media para duraciones de 2, 2,5 y 3 días.	137
8.15. Hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura máxima de 2, 2,5 y 3 días de duración.	137
8.16. Hidrogramas de rotura máxima construidos a partir de la curva adimensional de desembalse media para duración de 3 días, nivel inicial del lago Argentino de 181,6 mIGN, variando las curvas cota - volumen de los lagos Rico y Argentino.	138
8.17. Hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura máxima variando las curvas cota - volumen de los lagos Rico y Argentino.	139
8.18. Hidrogramas de rotura máxima construidos a partir de la curva adimensional de desembalse media para duración de 3 días y niveles iniciales del lago Argentino de 181,6 mIGN, 182,0 mIGN, 182,5 mIGN.	140
8.19. Hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura máxima con niveles iniciales del lago Argentino de 181,6 mIGN, 182,0 mIGN, 182,5 mIGN.	140
9.1. Etapas para definición de la Crecida de Verificación 2.	144

9.2. Esquema conceptual del modelo SMA.	146
9.3. Esquematación modelo derretimiento.	147
9.4. Delimitación de las subcuencas de aporte.	150
9.5. Curva hipsométrica frecuencia de alturas (cotas) S06.	151
9.6. Esquematación modelo hidrológico.	152
9.7. Evapotranspiración potencial por subcuencas.	154
9.8. Ejemplo de comportamiento de acumulación y comportamiento de nieve – S03 b1200 m.	155
9.9. Comportamiento acumulación y derretimiento de nieve diferentes bandas de altura.	156
9.10. Caudales observados y simulados en CHF evento 2017/18.	157
9.11. Caudales observados y simulados en CHF (con y sin consideración evento rotura 2018).	157
9.12. Caudales observados y simulados en CHF evento 2015/16.	158
9.13. Caudales observados y simulados en CHF – primavera – otoño 2008.	158
9.14. Caudales simulados en CHF. Evento maximizado 10.000 años río La Leona (sin rotura).	160
9.15. Temperaturas mensuales maximizadas – recurrencias. Escenario 1.	161
9.16. Temperaturas mensuales maximizadas – recurrencias. Escenario 2.	161
9.17. Caudales en CHF. Influencia de temperaturas maximizadas Escenario 1 en cuenca del lago Argentino.	162
9.18. Caudales en CHF. Influencia de precipitaciones maximizadas en cuenca lago Ar- gentino.	163
9.19. Hidrograma de desbordes del lago Rico (sin rotura GPM)	164
9.20. Hidrogramas en CHF sin rotura. Maximización de ingresos ($P_{10000} + T_{10000} + LLEO_{10000} +$ $Q_{desb.}$). Desbordes en lago Rico a partir de 25/febrero.	164
9.21. Hidrograma de rotura GPM. Escenario 2	165
9.22. Crecida Escenario 2 ($P_{10000} + T_{10000} + LLEO_{10000} + Q_{desb} + Q_{rot.max}$)	166

10.1. Cambios en la temperatura media anual con respecto al período 1986-2005. Promedio de los modelos CSIRO-Mk3-6-0 Y GFDL-ESM2G: a) escenario RCO4.5, futuro cercano (2015 - 2039); b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099); c) escenario RCP8.4, futuro cercano (2015 - 2039); escenario RCP8.4, futuro lejano (2075-2099). (CIMA, 2015)	170
10.2. Sitios con información de modelos climáticos regionales (MCR) en la cuenca superior del río Santa Cruz.	171
10.3. Temperaturas mensuales. Comparación simulaciones MCR vs observaciones período histórico.	173
10.4. Temperaturas mensuales. Comparación simulaciones MCR (futuro cercano) vs observaciones período histórico.	174
10.5. Temperaturas mensuales. Comparación simulaciones MCR (futuro lejano) vs observaciones período histórico.	175
10.6. Precipitaciones mensuales simuladas y observadas en período histórico.	176
10.7. Precipitaciones mensuales. Comparación simulaciones MCR (futuro lejano) vs observaciones período histórico.	178
10.8. Crecida Escenario 2 (CMP) + Cambio Climático.	179
11.1. Análisis de frecuencia de caudales diarios máximos anuales en CHF (1957/58 – 2018/19). Intervalos de confianza – distribución Gumbel (MPP). Caudal de Pliego (punto rojo).	182
11.2. Hidrograma decamilenario para diseño de Obras en el río Santa Cruz	182
12.1. Relación cota - volumen. Embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner. (Fuente: UTE, 2016)	187
12.2. Relación cota - volumen. Embalse Gdor. Jorge Cepernic. (fuente: UTE, 2016) . . .	187
12.3. Ley de descarga del vertedero libre. Aprovechamiento Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner. (fuente: UTE, 2020)	188
12.4. Ley de descarga del vertedero libre. Aprovechamiento Gdor. Jorge Cepernic. (fuente: UTE, 2019)	188
12.5. Niveles característicos de los embalses: Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (izquierda), Gdor. Jorge Cepernic (derecha).	189

12.6. Resultados simulación de embalse, crecida decamilenaria: embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (superior); embalse Gdor. Jorge Cepernic con operación de NK (medio); embalse Gdor. Jorge Cepernic sin operación de NK (inferior).	190
12.7. Resultados simulación de embalse, crecida decamilenaria: embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (superior); embalse Gdor. Jorge Cepernic con operación de NK (medio); embalse Gdor. Jorge Cepernic sin operación de NK (inferior).	191
12.8. Resultados simulación de embalse, CMP + Cambio Climático: embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (superior); embalse Gdor. Jorge Cepernic con operación de NK (medio); embalse Gdor. Jorge Cepernic sin operación de NK (inferior). . . .	192
13.1. Curvas de pronóstico de caudales en el río Santa Cruz en función de los niveles en el lago Rico y el lago Argentino (publicado en Vath et al., 2021)	194
A.1. Recorrido día 23/02/21	202
A.2. Fotografías día 23/02/21	203
A.3. Recorrido día 24/02/21	204
A.4. Fotografías día 24/02/21	206
A.5. Fotografías día 25/02/21	207
B.1. Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Argentina). Estaciones con más de 5 años de registros	212
B.2. Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Carlos Ibañez – Chile DGA) (1)	213
B.3. Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Carlos Ibañez – Chile DGA) (2)	213
B.4. Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Magallanes – Chile DGA) (1)	214
B.5. Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Magallanes – Chile DGA) (2)	214
B.6. Disponibilidad de información de temperaturas (Argentina). Series de mayor longitud.	215
B.7. Disponibilidad temporal de información de temperaturas (Carlos Ibañez – Chile DGA) (*) Estaciones con menos de 1 año de información no fueron incluidas	215
B.8. Disponibilidad temporal de información de temperaturas (Magallanes – Chile DGA)	215
B.9. Disponibilidad de información de velocidad de viento (SMN - Argentina).	216

B.10.	Disponibilidad de información de humedad relativa (SMN - Argentina).	216
B.11.	Disponibilidad de información de heliofanía efectiva (SMN - Argentina).	217
B.12.	Disponibilidad de información de evaporación de tanque (SIPH - Argentina). . . .	217
B.13.	Disponibilidad de información de temperatura punto rocío (SMN- Argentina). . . .	217
B.14.	Disponibilidad de información de caudales y niveles hidrométricos en lagos (SIPH).	218
B.15.	Ejemplos de análisis de dobles acumulaciones de precipitaciones anuales, con sus datos originales	220
B.16.	Análisis de dobles acumulaciones – series a partir del año 2000 zona Cordillera Sur.	222
B.17.	Análisis de dobles acumulaciones – zona Cordillera Sur y Norte	222
B.18.	Precipitaciones mensuales adimensionales y vector regional	226
B.19.	Precipitaciones máximas diarias anuales adimensionales y vector regional	234
B.20.	Precipitaciones máximas diarias anuales adimensionales y vector regional	237
C.1.	Planimetría de la zona en que el glaciar Perito Moreno toca la península de Maga- llanes a fines de 1939, según los levantamientos taquimétricos de Volpi y Grandi (1940).	245
C.2.	Posición del frente del glaciar Perito Moreno desde 1899 hasta marzo de 1946 (Heim, 1951)	246
C.3.	Imágenes del túnel formado en el dique de hielo en la rotura de noviembre de 1947 (Raffo et al., 1953; Bertone, 1972).	247
C.4.	Esquema de un corte longitudinal (izquierda) y la planta (derecha) del frente del glaciar Perito Moreno luego de la rotura de marzo de 1949 (Nichols y Miller, 1952).	247
C.5.	Alturas hidrométricas del lago Argentino, medidas en Puerto Irma, y del Brazo Rico, medidas en la estación homónima, desde abril de 1950 hasta agosto de 1953 (Raffo et al., 1953)	247
C.6.	Niveles del lago Rico y el lago Argentino, desde el 25 de febrero de 1952 hasta el 16 de marzo del mismo año, según los registros en las estaciones Brazo Rico y Puerto Irma del Servicio Meteorológico Nacional (MINPLAN, 2012)	248
C.7.	Niveles del lago Rico y el lago Argentino, desde el 19 de marzo de 1953 hasta el 10 de abril del mismo año, según los registros en las estaciones Brazo Rico y Puerto Irma del Servicio Meteorológico Nacional (MINPLAN, 2012).	249

C.8. Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}), desde el 21 de agosto de 1956 hasta el 28 de noviembre del mismo año, según los registros en las estaciones Brazo Rico y Puerto Irma del Servicio Meteorológico Nacional (MINPLAN, 2012).	250
C.9. Caudales registrados en la estación Charles Fuhr de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, en el período de las roturas de 1960. Los puntos naranjas corresponden a los aforos realizados en el período.	250
C.10. Niveles del Brazo Rico registrados en la estación homónima del Servicio Meteorológico Nacional en el período de la rotura de febrero de 1966.	251
C.11. Croquis de la posición del frente del glaciar Perito Moreno en febrero de 1966, sobre la península de Magallanes, y en marzo del mismo año, después de la rotura (Mercer, 1968).	252
C.12. Caudales registrados en la estación Charles Fuhr de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, desde enero de 1970 hasta septiembre de 1975. Los puntos naranjas corresponden a los aforos realizados en el período.	252
C.13. Caudales registrados en la estación Charles Fuhr de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, desde enero de 1980 hasta diciembre de 1988. Los puntos naranjas corresponden a los aforos realizados en el período.	253
C.14. Variación de niveles del lago Rico desde el 1/10/2003 hasta el 26/6/2004. Fuentes: Skvarca y Naruse (2006), color negro; registros de alturas hidrométricas en la estación Parque Nacional Los Glaciares de la SIPH, color naranja. Las escalas no están referidas al mismo cero (difieren aproximadamente en 1 m), pero la variación del nivel coincide en ambos registros.	255
C.15. Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2004, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.	255
C.16. Variación del nivel del lago Rico durante el evento de desembalse rápido del año 2004, medidos en la margen Sur del Brazo Rico con un indicador de presión de agua (Skvarka y Naruse, 2006).	256
C.17. Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2006, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.	256
C.18. Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2008, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.	257

C.19.Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2012, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.	258
C.20.Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2016, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.	259
C.21.Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2018, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.	259
C.22.Caudales en el río Santa Cruz en el período de la rotura de marzo de 2018. Para esta rotura no se cuenta con registros de caudales en Charles Fuhr, pero sí con alturas hidrométricas, que permiten obtener los caudales que se produjeron a partir de una ley que los relaciona.	260
D.1. Serie de registros desde el año 1992 hasta 2020, Estación El Calafate, ubicada sobre el lago Argentino. Cota del Cero de la Escala 174,8696 mIGN (SRVN71). . .	265
D.2. Serie de registros desde el año 1991 hasta 2020 de la Estación Lago Rico. Cota del Cero de la Escala 176,516 mIGN (SRVN71).	265
D.3. Regiones empleadas para la calibración de los índices y umbrales sobre los lagos estudiados.	270
D.4. Referencia de las coberturas de suelo de las regiones seleccionadas (imagen compuesta Google Earth).	270
D.5. Binarización de las imágenes de alta resolución para las distintas regiones y fechas empleadas en la calibración.	272
D.6. Índices espectrales para las regiones 1A y 5A, ilustración del trabajo que se realizó para todas las regiones.	273
D.7. Polígonos de agua de los lagos, generados automáticamente con el umbral 0,60 en el índice NDWI.	275
D.8. Polígono de la superficie libre del lago Argentino y el lago Rico obtenido del procesamiento para la imagen del 28/02/2014. Imagen representativa del resultado obtenido para cada imagen procesada.	276
D.9. Curva cota - área del lago Argentino.	278
D.10.Curva cota - área del lago Rico.	278
D.11.Esquema de vectorización de los píxeles de agua.	278

D.12.Sensibilidad al proceso de vectorización, lago Argentino.	279
D.13.Sensibilidad al proceso de vectorización, lago Rico.	279
D.14.Sectores costeros del lago Argentino donde se efectuaron los relevamientos topográficos.	281
D.15.Superposición de la línea de orilla estimada por el relevamiento topográfico y la composición RGB de las imágenes LANDSAT.	281
D.16.Superposición de la línea de orilla estimada por el relevamiento topográfico y a partir del índice NDWI de las imágenes LANDSAT con el umbral utilizado en el trabajo.	282
D.17.Diferencias altimétricas entre el modelo digital del terreno producto del relevamiento topográfico y del correspondiente a las curvas de nivel obtenidas del procesamiento de las imágenes LANDSAT.	283
D.18.Histogramas de frecuencias de las diferencias altimétricas de los modelos digitales del relevamiento topográfico y el procesamiento de las imágenes LANDSAT por sectores.	283
D.19.Histogramas de frecuencias de las diferencias altimétricas de los modelos digitales del relevamiento topográfico y el procesamiento de las imágenes LANDSAT (área total analizada)	284
D.20.Comparación de curvas de niveles del relevamiento topográfico y las correspondientes al procesamiento de las imágenes LANDSAT.	284
D.21.Curva cota - área lago Argentino. MDE-Ar 2.0.	286
D.22.Curva cota - área lago Rico. MDE-Ar 2.0.	286
D.23.Verificación de curva cota - área del lago Argentino con la información MDE-Ar 2.0 (SRTM).	287
D.24.Verificación de curva cota - área del lago Rico con la información MDE-Ar 2.0 (SRTM).	287
D.25.Composición RGB de imagen LANDSAT del 05/08/2019, nivel del lago Argentino 177,5 msnm. En verde, curva de nivel 182 msnm MDE-Ar 2.0, que corregida resulta en 177,5 msnm.	288
D.26.Histograma de las diferencias entre las alturas de los puntos altimétricos y las alturas derivadas del MDE-Ar 2.0 en la Provincia de Santa Cruz (Instituto de Geodesia Nacional, 2019)	288

D.27. Modelo estimado para la relación cota - volumen en base a las correcciones estimadas por el IGN para la provincia de Santa Cruz y el error de los datos obtenidos mediante el procesamiento LANDSAT. Lago Argentino.	289
D.28. Modelo estimado para la relación cota - volumen en base a las correcciones estimadas por el IGN para la provincia de Santa Cruz y el error de los datos obtenidos mediante el procesamiento LANDSAT. Lago Rico.	290
D.29. Relevamientos topográficos realizados sobre el lago Rico y empleados para analizar el modelo MDE-Ar 2.0.	291
D.30. Histograma de diferencia entre los relevamientos topográficos en campo y el modelo MDE-Ar 2.0. En el eje de abscisas se presentan los segmentos de discretización de las diferencias altimétricas en unidades métricas, mientras que la altura de los bastones representa el número de eventos de cada segmento.	291
D.31. Sectores del lago Argentino que no son descriptos como tal por el MDE-Ar 2.0. En verde, curva de nivel 182,57 msnm MDE-Ar 2.0, y en rosa la curva 187,57 msnm MDE-Ar 2.0.	292
D.32. Modelo estimado para la relación cota - área en base a los datos del MDE-Ar 2.0 corregidos por el relevamiento topográfico más las correcciones del cómputo del área y los datos obtenidos mediante el procesamiento LANDSAT con sus errores. Lago Argentino.	293
D.33. Modelo estimado para la relación cota - área en base a los datos del MDE-Ar 2.0 corregidos por el relevamiento topográfico más las correcciones del cómputo del área y los datos obtenidos mediante el procesamiento LANDSAT con sus errores. Lago Rico.	293
D.34. Relación cota - volumen almacenado, lago Argentino.	294
D.35. Relación cota - volumen almacenado, lago Rico.	294
E.1. Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2004. . . .	308
E.2. Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2006. . . .	309
E.3. Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2008. . . .	309
E.4. Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2012. . . .	310

E.5. Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2013	310
E.6. Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2016.	311
E.7. Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2018.	311
F.1. Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 1966.	314
F.2. Nivel del lago Argentino para el evento de rotura del año 2004.	314
F.3. Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 2004.	315
F.4. Nivel del lago Argentino para el evento de rotura del año 2006.	315
F.5. Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 2006.	316
F.6. Nivel del lago Argentino para el evento de rotura del año 2008.	316
F.7. Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 2008.	317
F.8. Nivel del lago Argentino para el evento de rotura del año 2016.	317
F.9. Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 2016	318
F.10. Nivel del lago Argentino para el evento de rotura del año 2018.	318
F.11. Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 2018.	319
G.1. Esquema conceptual del modelo SMA.	322
G.2. Esquema de procesos de cálculo SMA (humedecimiento – desecación).	323
H.1. Hidrograma 10.000 años en La Leona, límite superior e inferior intervalo 90%.	330
H.2. Hidrogramas en CHF considerando variaciones en La Leona (límite superior e inferior intervalo 90%).	331
H.3. Hidrogramas en CHF considerando variaciones en precipitaciones (15% en período Enero – Abril).	332
H.4. Hidrogramas en CHF considerando variaciones en condiciones iniciales de lago Rico.	333
H.5. Coeficiente Creager para CMP	336
H.6. Coeficiente k Francou – Rodier para CMP	336

Índice de tablas

1.1. Características principales del aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner.	9
1.2. Características principales del aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic.	12
2.1. Datos de caudales líquidos en las estaciones de la SIPH.	17
2.2. Datos de niveles líquidos en las estaciones de la SIPH.	18
3.1. Caudales anuales específicos (1992/93 – 2018/19).	30
5.1. Registro histórico de eventos de apertura de brecha entre el glaciar Perito Moreno y la península de Magallanes.	52
5.2. Duración total, desnivel del sistema lago Rico antes y después del desembalse, diferencia de caudal provocado por el evento en el río Santa Cruz.	60
5.3. Niveles del lago Argentino correspondientes a una serie de caudales en Charles Fuhr modelados (Fuente: UNLP, 2015).	66
5.4. Coeficientes de las funciones que componen la curva modificada que relaciona los niveles de agua en el lago Argentino con los caudales en Charles Fuhr.	67
5.5. Resultados del modelo de simulación de operación de embalse y comparación con registros	70
6.1. Precipitaciones anuales (set – ago).	75
6.2. Precipitaciones mensuales del mes de marzo. Estadísticos principales.	84
6.3. Precipitaciones mensuales maximizadas. Meses de enero, febrero, marzo y abril.	87
6.4. Precipitaciones máximas período enero – abril para diferentes recurrencias.	88
6.5. Precipitaciones máximas diarias (1 día). Estadísticos principales.	88

6.6. Precipitaciones máximas diarias anuales en 1 día (mm) según meteorología regional – zona base cordillera.	89
6.7. Precipitaciones máximas anuales en 5 días (mm) según meteorología regional – zona base cordillera.	89
6.8. Valores críticos del test de Mann Kendall para niveles de significación de 1 %, 5 % y 10 %.	94
6.9. Aplicación del Test de Mann Kendall.	94
7.1. Estadísticos principales de la serie de caudales del río Santa Cruz en CHF.	101
7.2. Caudales máximos anuales para diferentes recurrencias en CHF (m ³ /s).	105
7.3. Errores cuadráticos medios.	107
7.4. Caudales máximos anuales en CHF, serie 1958/59 – 2018/19, según Gumbel (MPP).109	
7.5. Caudales máximos anuales en CHF y cotas máximas en lago Argentino, serie 1958/59 – 2018/19, según Gumbel (MPP).	110
7.6. Estadísticos principales río La Leona en LLEO.	110
7.7. Caudales máximos anuales para diferentes recurrencias en LLEO (m ³ /s).	111
7.8. Estadísticos de volúmenes máximos anuales en CHF (serie 1957/58-2018/19). . .	112
7.9. Volúmenes máximos anuales para diferentes duraciones y recurrencias en CHF. .	123
8.1. Estadísticos principales de las series de caudales analizadas para el río Santa Cruz en CHF.	128
8.2. Caudales máximos anuales para diferentes recurrencias en CHF (sin considerar efectos de rotura del GPM) y en LLEO (m ³ /s).	131
8.3. Cotas máximas en lago Argentino sin considerar efectos de roturas.	131
8.4. Caudales pico del hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para distintas duraciones y construidos en base a diferentes curvas adimensionales de desembalse.	141
8.5. Resultados de niveles, volúmenes y caudales de un desembalse instantáneo. . . .	141
8.6. Resultados de caudal pico del hidrograma de crecida en el río Santa Cruz a la variación de las curvas cota - volumen de los lagos Rico y Argentino.	141
8.7. Resultados de caudales del río Santa Cruz al análisis de sensibilidad del modelo al nivel inicial del lago Argentino.	142

9.1. Parámetros físicos de las subcuencas de aporte al lago Argentino.	150
10.1. Parámetros físicos de las subcuencas de aporte al lago Argentino.	168
10.2. Valores medios y cambios de precipitaciones en la Provincia de Santa Cruz (CIMA, 2015).	169
10.3. Valores medios de temperaturas mensuales observadas en El Calafate y simuladas en el período histórico por los MCR.	172
10.4. Valores medios de temperaturas mensuales simuladas. Futuro cercano (2015-2039). 173	
10.5. Diferencias en temperaturas (°C) entre futuro cercano (2015-2039) y período histórico (1962-2010).	174
10.6. Valores medios de temperaturas mensuales simuladas. Futuro lejano (2075-2099). 174	
10.7. Diferencias en temperaturas (°C) entre futuro lejano (2075-2099) y período histórico (1962-2010).	174
10.8. Valores medios de precipitaciones mensuales observadas en El Calafate.	176
10.9. Valores medios de precipitaciones mensuales simuladas. Futuro cercano (2015-2039).	177
10.10 Diferencias en precipitaciones (mm) entre futuro cercano (2015-2039) y período histórico (1962-2010).	177
10.11 Valores medios de precipitaciones mensuales simuladas (mm). Futuro lejano (2075-2099).	177
10.12 Diferencias en precipitaciones mensuales simuladas (mm) entre futuro lejano (2075-2099) y período histórico (1962-2010).	177
12.1. Resumen de resultados del tránsito de hidrogramas de crecida por los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz.	189
B.1. Listado estaciones de medición hidrometeorológica.	212
B.2. Precipitaciones medias mensuales y anuales [mm]	223
B.3. Cantidad de días con precipitaciones. Estaciones seleccionadas	224
B.4. Precipitaciones enero - abril. Estadísticos principales	225
B.5. Precipitaciones máximas enero – abril según análisis individual estación. Distribución GUMBEL (MPP) [mm]	225
B.6. Relación P_{max_T}/P_{med}	226

B.7. Precipitaciones máximas enero - abril según análisis regional	227
B.8. Precipitaciones enero. Estadísticos principales	227
B.9. Precipitaciones febrero. Estadísticos principales	227
B.10. Precipitaciones marzo. Estadísticos principales	228
B.11. Precipitaciones abril. Estadísticos principales	228
B.12. Precipitaciones máximas enero según análisis individual estación [mm]	228
B.13. Precipitaciones máximas febrero según análisis individual estación [mm]	229
B.14. Precipitaciones máximas marzo según análisis individual estación [mm]	229
B.15. Precipitaciones máximas abril según análisis individual estación [mm]	229
B.16. Relación P_{max_T}/P_{med} enero	230
B.17. Relación P_{max_T}/P_{med} febrero	230
B.18. Relación P_{max_T}/P_{med} marzo	230
B.19. Relación P_{max_T}/P_{med} abril	231
B.20. Precipitaciones máximas enero según análisis regional	231
B.21. Precipitaciones máximas febrero según análisis regional	232
B.22. Precipitaciones máximas marzo según análisis regional	232
B.23. Precipitaciones máximas abril según análisis regional	232
B.24. Precipitaciones máximas diarias anuales 1 día [mm] región Z2	233
B.25. Precipitaciones máximas diarias anuales región Z2. Estadísticos principales (1 día)	234
B.26. Precipitaciones máximas diarias anuales según análisis individual estación, región Z2. Distribución GUMBEL (MPP) [mm]	234
B.27. Relación P_{max_T}/P_{med} (1 día)	235
B.28. Precipitaciones máximas diarias anuales según análisis regional (1 día) [mm] . . .	235
B.29. Precipitaciones máximas diarias anuales 5 días [mm] región Z2	236
B.30. Precipitaciones máximas anuales región Z2. Estadísticos principales (5 días) . . .	236
B.31. Precipitaciones máximas anuales según análisis individual estación, región z2. Dis- tribución GUMBEL (MPP) [mm] (5 días)	237
B.32. Relación P_{max_T}/P_{med} (5 días)	237

B.33.Precipitaciones máximas diarias anuales según análisis regional (5 días) [mm] . . .	238
B.34.Valores críticos del test de Mann Kendall para niveles de significación de 1 %, 5 % y 10 %.	239
B.35.Valores críticos del test de Smirnov para niveles de significación de 1 %, 5 % y 10 %.239	
C.1. Registro histórico de eventos de rotura del glaciar Perito Moreno	244
D.1. Características de las bandas espectrales generadas por el sensor OLI del satélite LANDSAT 8 (USGS, 2019).	266
D.2. Áreas de las regiones de calibración.	271
D.3. Imágenes empleadas para el proceso de calibración.	271
D.4. Análisis de umbrales para el índice NDWI.	273
D.5. Análisis de umbrales para el índice MNDWI.	273
D.6. Análisis de umbrales para el índice AWEI.	274
D.7. Error en la delimitación del área de agua con el índice NDWI, umbral 0,60, en las regiones y fechas de la calibración.	274
D.8. Imágenes LANDSAT 8 procesadas para la delimitación de los cuerpos de agua. .	275
D.9. Relación cota - área del lago Argentino. Cota del cero de escala limnimétrica 174,8696 mIGN SRVN71.	277
D.10.Relación cota - área del lago Rico. Cota del cero de escala limnimétrica 176,516 mIGN SRVN71	277
D.11.Variación del área del lago Argentino debida al proceso de vectorización.	280
D.12.Variación del área del lago Rico debida al proceso de vectorización.	280
D.13.Relación cota - área del lago Argentino. MDE-Ar 2.0.	285
D.14.Relación cota - área del lago Rico. MDE-Ar 2.0.	285
D.15.Análisis de umbrales en Región 1-A.	297
D.16.Análisis de umbrales en Región 1-B.	298
D.17.Análisis de umbrales en Región 2-A.	299
D.18.Análisis de umbrales en Región 2-B.	300
D.19.Análisis de umbrales en Región 3-A.	301
D.20.Análisis de umbrales en Región 3-B.	302

D.21. Análisis de umbrales en Región 4-A.	303
D.22. Análisis de umbrales en Región 4-B.	304
D.23. Análisis de umbrales en Región 5-A.	305
E.1. Caudales medios mensuales de aporte al lago Rico	308
G.1. Parámetros del modelo SMA.	327
H.1. Resultados simulaciones considerando incertidumbres en La Leona.	330
H.2. Resultados simulaciones considerando incertidumbres en precipitaciones	331
H.3. Resultados simulaciones variando niveles iniciales en lago Rico.	333
H.4. Resumen de los análisis de sensibilidad realizados.	334

Nomenclatura

Símbolos

A: área

ADS1: volumen de agua almacenado en el primer depósito de agua subterránea al comienzo del intervalo de tiempo (modelo SMA)

ADS2: volumen de agua almacenado en el segundo depósito de agua subterránea al comienzo del intervalo de tiempo (modelo SMA)

AS: volumen de agua almacenado en el suelo al comienzo del intervalo de tiempo (modelo SMA)

C: coeficiente Creager, utilizado para relacionar caudales máximos de diferentes cuencas del mundo

CADS1: máxima capacidad de almacenamiento de agua en el primer depósito de agua subterránea (modelo SMA)

CADS2: máxima capacidad de almacenamiento de agua en el segundo depósito de agua subterránea (modelo SMA)

CADSUP: capacidad del depósito de almacenamiento superficial (modelo SMA)

CAS: máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (modelo SMA)

CK: coeficiente de kurtosis

CS: coeficiente de asimetría

CV: coeficiente de variación

D: duración del desembalse rápido del lago Rico

E: evaporación

ECMF: error cuadrático medio en frecuencia

ECMV: error cuadrático medio en caudal o volumen

EPT: evapotranspiración potencial total (modelo SMA)

ERT: evapotranspiración real total (modelo SMA)

ETS: substracción de la evapotranspiración (SMA)

ETP: evapotranspiración potencial

F: frecuencia

h: diferencia entre niveles, utilizada en la determinación de la ley Nivel-Área de los lagos

h_i : nivel registrado en el lago Rico en el instante i

h_f : nivel registrado en el lago Rico finalizado el desembalse

h_i^* : altura adimensionalizada para definición del desembalse rápido del lago Rico

HE: heliofanía efectiva

HR: humedad relativa

I_m : caudal medio ingresante durante el intervalo de tiempo

IP: potencial de infiltración en el suelo durante el intervalo Δt (modelo SMA)

k: coeficiente Francou – Rodier, utilizado para relacionar caudales máximos de diferentes cuencas del mundo

K: coeficiente de almacenamiento en el método del hidrograma unitario de Clarck

K_{iT} : factor de proporcionalidad entre las precipitaciones de distintas recurrencias y la precipitación media en la estación i

K_{med_T} : vector regional. Factor medio regional entre las precipitaciones de distintas recurrencias y la precipitación media.

L: longitud de escurrimiento

$LLEO_{10000+90\%}$: hidrograma de 10.000 años de recurrencia del río La Leona con un intervalo de confianza del + 90 %

$LLEO_{10000-90\%}$: hidrograma de 10.000 años de recurrencia del río La Leona con un intervalo de confianza del - 90 %

$LLEO_{CC}$: caudal del río La Leona incrementado por efecto del cambio climático

MCIS: máxima capacidad de infiltración de agua en el suelo (modelo SMA)

MCPDS1: máxima capacidad de percolación entre los dos depósitos de agua subterránea, definida por el usuario.

MCPDS2: máxima capacidad de infiltración desde el segundo depósito de agua subterránea

(modelo SMA)

$MCPS$: máxima capacidad de percolación desde el depósito de almacenamiento de agua en el suelo (modelo SMA)

N : cantidad de años con información disponible; rugosidad adimensional; nieve

N_{LA} : nivel del lago Argentino

N_{LAi} : nivel inicial del lago Argentino antes de la rotura del GPM

N_{LR} : nivel del lago Rico

N_{LRi} : nivel inicial del lago Rico antes de la rotura del GPM

N_{max} : nivel máximo

O_m : caudal medio saliente durante el intervalo de tiempo

P : precipitación

P_2 : precipitación de 2 años de recurrencia

P_{10000} : precipitación de 10.000 años de recurrencia

$P_{10000+15\%}$: precipitación de 10.000 años de recurrencia incrementada un 15 %

$P_{10000-15\%}$: precipitación de 10.000 años de recurrencia reducida un 15 %

p_i : frecuencia empírica

P_{ijT} : precipitación de recurrencia T en la estación i en el período j

P_{acum} : precipitación acumulada

P_a : precipitación media anual

P_m : precipitación media mensual

$P_{max_{ijT}}$: precipitación máxima de la estación i para cada recurrencia T en el período j

P_{med} : precipitación media

P_r : presión atmosférica

PM_{ij} : precipitación media en la estación i en el período j

PP_1 : potencial de percolación hacia el primer depósito de agua subterránea (modelo SMA)

PP_2 : potencial de percolación entre los dos depósitos de agua subterránea (modelo SMA)

PP_3 : potencial de percolación profunda (modelo SMA)

PP_1^* : percolación profunda que se produce directamente desde el depósito de almacenamiento

de agua en el suelo, cuando no se considera almacenamiento de agua subterránea (modelo SMA)

PP_1^* : percolación profunda se produce cuando se considera un único depósito de agua subterránea (modelo SMA)

PR_1 : volumen de percolación que tiene lugar, durante el intervalo de tiempo Δt , entre el suelo y el primer depósito de agua subterránea (modelo SMA)

PR_2 : volumen real de percolación que tiene lugar, durante el intervalo de tiempo Δt , entre ambos depósitos de agua subterránea (modelo SMA)

q : caudal específico

Q : caudal

Q_{10000} : caudal de 10.000 años de recurrencia

Q_{100000} : caudal de 100.000 años de recurrencia

$Q_{1,t}$: caudal de salida del primer depósito de agua subterránea al principio del intervalo Δt (modelo SMA)

$Q_{1,t+\Delta t}$: caudal de salida del primer depósito de agua subterránea al final del intervalo Δt (modelo SMA)

$Q_{2,t}$: caudal de salida del segundo depósito de agua subterránea al principio del intervalo Δt (modelo SMA)

$Q_{2,t+\Delta t}$: caudal de salida del segundo depósito de agua subterránea al final del intervalo Δt (modelo SMA)

Q_{anual} : caudal medio anual

Q_{desb} : aportes provenientes del desborde del lago Rico

Q_{CHF} : caudal en la estación de medición Charles Fuhr

Q_{diario} : caudal diario

$Q_{instantaneo}$: caudal instantáneo

Q_i : caudal inicial, antes del desembalse rápido del LR

Q_{LA} : aportes del resto de la cuenca del lago Argentino

Q_{LLEO} : aportes del río La Leona

Q_{max} : caudal máximo

$Q_{max.anual}$: caudal máximo anual

Q_{med} : caudal medio histórico

$Q_{med.cron}$: media deslizante cronológica de la serie de caudales medios anuales

$Q_{med.cron.mx}$: media deslizante cronológica de la serie de caudales máximos anuales

$Q_{med.des10}$: media deslizante cada 10 años de la serie de caudales medios anuales

$Q_{med.des10.mx}$: media deslizante cada 10 años de la serie de caudales máximos anuales

$Q_{med.max}$: media histórica de la serie de caudales máximos anuales

Q_p : caudal pico

Q_{rot} : caudal asociado al desembalse rápido del lago Rico

$Q_{e(t)}$: caudal entrante al modelo de embalse en el intervalo Δt

$Q_{eLA(t)}$: caudal entrante al lago Argentino en el intervalo Δt

$Q_{s(t)}$: caudal saliente del modelo de embalse en el intervalo Δt

$Q_{sLA(t)}$: caudal saliente del lago Argentino en el intervalo Δt

r = coeficiente de correlación

R^2 : R-cuadrado o coeficiente de determinación

Rad : radiación

S : desvío estándar; pendiente adimensional

Sc : pendiente de la cuenca

Scp : pendiente media del cauce principal

T : temperatura; recurrencia

t_0 : fecha de inicio del desembalse

t_i : fecha de lectura de nivel del lago Rico en el instante i

t_i^* : tiempo adimensionalizado para definición del desembalse rápido del lago Rico

T_c : tiempo de concentración de la cuenca

T_{CC} : temperatura con cambio climático para el escenario de futuro lejano

$T_{channel}$: tiempo de traslado en canal o cauce

T_p : tiempo al pico del hidrograma

T_{pr} : temperatura del punto de rocío

$T_{shallow}$: tiempo de traslado sobre segmento de cauce de bajo tirante

T_{sheet} : tiempo de traslado sobre tramo de flujo en lámina

$TADS1$: coeficiente de almacenamiento del depósito subterráneo (modelo SMA)

TN : terreno natural

U : velocidad media basada en la ecuación de Manning

V : velocidad promedio para superficies no pavimentadas; volumen; estadístico del test de Mann Kendall

$V_{Ap(t)}$: volumen aportado por la cuenca del lago Rico (sin cuenca del río Mitre) en el intervalo t

V_c : valor crítico del test de Mann Kendall

$V_{Cuenca LR(t)}$: volumen aportado por la cuenca del lago Rico durante en un intervalo t

$V_{Evap(t)}$: volumen evaporado en lago Rico en el intervalo t

$V_{Mitre(t)}$: volumen aportado por la cuenca del río Mitre en el intervalo t

V_{LA} : volumen del lago Argentino

$V_{LRf(t)}$: volumen del lago Rico al final del intervalo de tiempo t

$V_{LRi(t)}$: volumen del lago Rico al inicio del intervalo de tiempo t

$V_{eLA(t)}$: volumen entrante al lago Argentino en el intervalo Δt

$V_{sLA(t)}$: volumen saliente del lago Argentino en el intervalo Δt

Vto : viento

$VDS1$: volumen de salida de agua del primer depósito de agua subterránea (modelo SMA)

$VDS2$: volumen de salida de agua del segundo depósito de agua subterránea (modelo SMA)

X : media

Z_c : valor crítico del test de Smirnov

α : nivel de significancia de los test de Mann Kendall y Smirnov

ΔH_{LA} : desnivel máximo que se produce en el lago Argentino entre el instante anterior al inicio del desembalse rápido del LR y una vez finalizado el mismo

ΔH_{LA-LR} : desnivel entre el lago Argentino y el lago Rico previo al inicio del desembalse rápido del mismo

ΔH_{LR} : desnivel máximo que se produce en el lago Rico entre el instante anterior al inicio del desembalse rápido del LR y una vez finalizado el mismo

ΔQ : variación de caudal

Δt : intervalo de tiempo

ΔV : variación del almacenamiento

$\Delta V_{LA(t)}$: variación del volumen del lago Argentino en el intervalo Δt

$\Delta V_{LR(t)}$: variación del volumen del lago Rico en el intervalo Δt

χ^2 : test de bondad de ajuste de chi-cuadrado

Siglas

AL: presa Alicurá

AT: presa Agua del Toro

AWEI: índice espectral Automated Water Extraction Index without shadow

BR: estación Buta Ranquil

BRN: subcuenca Brazo Norte lago Argentino

BRS: subcuenca Brazo Sur lago Argentino

CAL: estación de medición lago Argentino (SIPH)

CENT: estación de medición RP70 (SIPH); subcuenca río Centinela

CFBR: Comité Français des Barrages et Réservoirs

CHF: estación de medición Charles Fuhr (SIPH)

CIMA: Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera

CM: estación de medición Candelario Mancilla (DGA)

CMP: Crecida Máxima Probable

CP: presa Casa de Piedra

CRU TS: Climatic Research Unit gridded Time Series – University of East Anglia

DGA: Dirección General de Aguas - Ministerio de Obras Públicas de Chile

DNA-IAA: Dirección Nacional del Antártico - Instituto Antártico Argentino

DNM: Dirección Nacional de Meteorología de Chile

EMGPM: estación meteorológica glaciar Perito Moreno

EVARSA: Evaluación de Recursos S.A.

EXP: distribución probabilística Exponencial

FAO: Food and Agriculture Organization de las Naciones Unidas

GPM: glaciar Perito Moreno

GEV: distribución probabilística General de Valores Extremos

GVP: Global Vegetation Monitoring

GU: distribución probabilística Gumbel

HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Model System

IGN: Instituto Geográfico Nacional

IANIGLA: Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales

IMGI: Instituto de Meteorología y Geofísica de la Universidad de Innsbruck

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

JRC: Joint Research Centre

LA: lago Argentino; subcuenca lago Argentino

LLEO: estación de medición La Leona (SIPH); río La Leona

LN2: distribución probabilística Log-Normal

LPIII: distribución probabilística Log-Pearson III

LR: lago Rico (hace referencia al sistema lacustre conformado por el brazo Rico, lago Roca y brazo Sur del lago Argentino)

LRIC: estación de medición Parque Nacional Los Glaciares - Lago Rico (SIPH); subcuenca lago Rico

MCR: modelos climáticos regionales

MDE-Ar 2.0: Modelo Digital de Elevaciones de Argentina, versión 2.0, desarrollado por el IGN

MDT: modelo digital del terreno

MNDWI: índice espectral Modification of Normalized Difference Water Index

MITR: estación de medición RN11, río Mitre (SIPH); subcuenca río Mitre

MoM: método de ajuste de parámetros de momentos tradicionales

MPP: método de ajuste de parámetros de momentos ponderados por probabilidades

MV: método de ajuste de parámetros de máxima verosimilitud

MxM: método de ajuste de parámetros de momentos mixtos

NDWI: índice espectral Normalized Difference Water Index

NK: aprovechamiento Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner

NQN: río Neuquén

PIII: distribución probabilística Pearson III

PA: presa Piedra del Águila

PMP: Precipitación Máxima Probable

PNG: estación de medición Parque Nacional Los Glaciares - río de las Vueltas (SIPH)

PV: Portezuelo del Viento

SCS: Soil Conservation Service

SIG: sistemas de información geográficos

SIPH: Secretaría de Infraestructura y Políticas Hídricas

SMA: modelo Soil Moisture Account del HEC-HMS

SMN: Servicio Meteorológico Nacional

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

SRVN71: Sistema de Referencia Vertical Nacional del año 1971

VO: estación de medición Villa Oghigins (DGA)

WA: distribución probabilística Wakeby

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El río Santa Cruz, ubicado en la provincia homónima en el Sur de la Patagonia Argentina, tiene su cuenca con nacientes en el Campo de Hielo Patagónico Sur. Sus caudales se originan por la combinación de aportes de los glaciares, las lluvias y el derretimiento de nieve, los cuales interactúan con una gran cantidad de lagos y lagunas. Precisamente este río se forma a la salida del lago Argentino, dirigiéndose al oeste hasta desembocar en el Océano Atlántico. Si bien cuenta con un área de cuenca total de 29.686 Km², el caudal del río Santa Cruz se genera casi en su totalidad en el sector andino. El clima y geomorfología reinante en su cuenca cabecera determinan que los caudales medios presentan un régimen unimodal, con un marcado período de aguas altas en los meses de verano y hasta principios del otoño; y caudales mínimos al final de invierno y principios de la primavera.

Este marcado ciclo anual de caudales es interrumpido ocasionalmente por un hecho singular que se desarrolla en el suroeste del lago Argentino, y es el bloqueo de los aportes del brazo Rico hacia dicho lago ocasionado por el avance del glaciar Perito Moreno (GPM). Este fenómeno natural, provoca el incremento de los niveles de agua en el brazo Rico hasta que la carga hidráulica produce la rotura del bloqueo de hielo, con la posterior liberación de los volúmenes acumulados en pocos días hacia el lago Argentino, dando origen a un crecimiento repentino de este último y de los caudales que finalmente escurren por el río Santa Cruz. Este fenómeno, no ocurre todos los años ni tampoco con una frecuencia establecida, introduciendo una complejidad adicional al comportamiento del río.

En este contexto, el entendimiento del sistema físico y sus mecanismos de interrelación, con la identificación de las principales variables intervinientes, resultan elementos críticos en lo relativo al conocimiento de la hidrología de crecidas y su posterior aprovechamiento para el diseño de diferentes obras y medidas no estructurales.

Los proyectos más relevantes desarrollados en este río resultan sin duda los Aprovechamientos Hidroeléctricos del Río Santa Cruz, los cuales son un viejo anhelo del interés energético de la Argentina, postergados por diferentes motivos a lo largo de los años.

Ellos están conformados por dos presas, ambas con una central hidroeléctrica y estructuras de seguridad, que se han denominado como Presidente Dr. Néstor Carlos Kirchner (Cóndor Cliff), emplazada a unos 127 km del inicio del río Santa Cruz, y Gobernador Jorge Cepernic (La Barrancosa), ubicada a 70 km aguas abajo de la primera. Ambas forman el complejo hidroeléctrico del río Santa Cruz, encontrándose actualmente en construcción.

La concreción del inicio de las obras en el año 2015 cierra un ciclo de varios intentos y actualizaciones del proyecto, cada época aggiornándose a los avances que las matrices energéticas y los abordajes de los temas ambientales han impuesto.

El proyecto concebido para la licitación, como es dable esperar, se ha ido modificando conforme a la profundización del conocimiento geológico, geotécnico, ambiental, hidráulico e hidrológico, llevando cada modificación a soluciones técnicas/científicas que permitan superar los inconvenientes suscitados.

Entre las optimizaciones más destacadas de los campos ambientales, hidráulicos e hidrológicos, se puede citar el cambio de los niveles de los embalses que componen las obras, a fin de garantizar que se mantengan intactas las oscilaciones naturales del lago Argentino, estudio que se conoció como desacople de las obras hacia el lago Argentino. Por otro lado, si bien el pliego de las obras contaba con un estudio hidrológico que permitió estimar el caudal máximo de la crecida de diseño de las estructuras de alivio de ambas presas, el mismo no determinaba el origen ni el hidrograma de dicha crecida, cuestión imperiosa en el diseño y operación de las obras.

En atención a lo expuesto, este documento responde a una iniciativa de la Universidad Nacional de La Plata para que se cuente con información hidrológica e hidráulica de las crecidas del río Santa Cruz, las cuales son fundamentales para el diseño de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz, coincidiendo con las recomendaciones expresadas por el Panel de Expertos de las Obras.

En este estudio se incluye el análisis del fenómeno de rotura del glaciar Perito Moreno y su impacto sobre los caudales del río Santa Cruz.

1.1. Descripción General de la cuenca. Enfoque Conceptual para la determinación de crecidas

La cuenca de aportes completa del río Santa Cruz abarca 29.686 Km² (ref: SIPH). Tiene sus nacientes en el Campo de Hielo Patagónico Sur, del cual descienden glaciares y aguas de fusión que junto al aporte de lluvias y derretimiento de nieve forman ríos, arroyos y torrentes que descargan sus aguas a una gran cantidad de lagos y lagunas., donde los dos lagos más importantes son el lago Viedma y el lago Argentino. A la salida de este último se forma el río Santa Cruz propiamente dicho, el cual cuenta con un área de aportes hídricos de 16.853 km² hasta la estación de mediciones Charles Fuhr (CHF) ubicada a 6,9 Km del lago Argentino.

El caudal del río Santa Cruz se genera casi en su totalidad en el sector andino, debido tanto a la nieve y lluvia que recibe en su cuenca superior como al agua provista por el derretimiento de los extensivos cuerpos de hielo ubicados en su cuenca hidrológica superior, teniendo gran interacción con el almacenamiento lacustre presente, particularmente con los lagos Viedma y Argentino. Luego, desde sus nacientes en el lago Argentino hasta su desembocadura en el océano, el río atraviesa la estepa patagónica con aportes laterales muy reducidos.

La Figura 1.1 presenta la ubicación de la cuenca del río Santa Cruz, en base a información de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (SIPH).

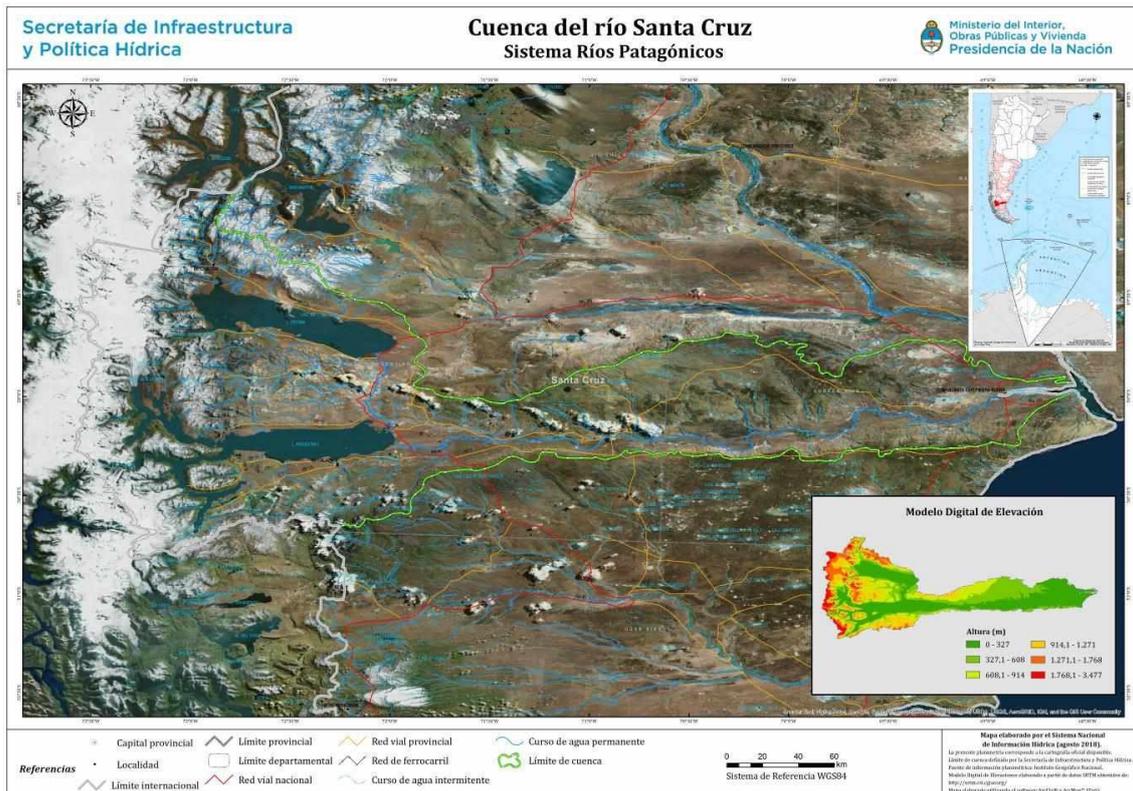


Figura 1.1: Ubicación general cuenca río Santa Cruz (fuente: SIPH).

Los caudales medios que escurren por el río Santa Cruz presentan un régimen unimodal, con un marcado período de aguas altas en los meses de verano y hasta principios del otoño; y caudales mínimos al final de invierno y principios de la primavera.

Dentro del área de aportes superior se distinguen claramente dos subcuencas principales (Figura 1.2): la correspondiente al lago Viedma ubicada al norte de la cuenca (7.098 Km² al cierre en la estación La Leona) que se conecta con el lago Argentino a través del río La Leona, y la subcuenca propia del lago Argentino (9.755 Km² sin considerar a la subcuenca del lago Viedma). El caudal medio anual del río Santa Cruz a la salida de lago Argentino es de 730 m³/s en el período 1958/59 – 2018/19, abasteciendo la subcuenca del lago Viedma a través del río La Leona alrededor del 36 % de la descarga anual del mismo.

En función de las áreas de aportes de cada subcuenca y los caudales producidos, se observa que la subcuenca del lago Argentino es la que produce mayores excedentes hídricos (totales y



Figura 1.2: Cuenca Superior río Santa Cruz.

relativos).

El marcado ciclo anual de ascensos y descensos de caudales es interrumpido ocasionalmente por un hecho singular que se desarrolla en el sector suroeste del lago Argentino, y es el bloqueo de los aportes del brazo Rico hacia el lago Argentino provocado por el avance del glaciar Perito Moreno (GPM). Este fenómeno natural, origina el incremento de los niveles de agua en el brazo Rico hasta que la carga hidráulica produce la rotura de dicho bloqueo de hielo, con la posterior liberación de los volúmenes acumulados en pocos días hacia el lago Argentino, dando lugar a un crecimiento repentino de este último y de los caudales que finalmente escurren por el río Santa Cruz. Este fenómeno de bloqueo del brazo Rico – lago Argentino, que usualmente se lo llama “rotura”, no ocurre todos los años ni tampoco con una frecuencia establecida, introduciendo complejidad adicional al comportamiento del conjunto lago Argentino – río Santa Cruz.

Los caudales del río Santa Cruz son observados próximos a su nacimiento, en la estación denominada Charles Fuhr (CHF). Las crecidas allí registradas son producto de la combinación de:

- el deshielo de glaciares, derretimiento de nieve, y aportes de lluvias;
- crecidas ocasionadas por el fenómeno de rotura del endicamiento formado por el GPM a la salida del brazo Rico;
- la regulación impuesta por el sistema lacustre (principalmente los lagos Viedma y Argentino).

A los fenómenos indicados previamente, debe adicionarse la singularidad que ocasionan los

vientos frecuentes intensos del suroeste sobre el lago Argentino.

Los objetivos específicos de este trabajo se vinculan con la descripción del comportamiento del sistema brazo Rico - lago Argentino y GPM, en su relación con las crecidas del río Santa Cruz. Estos objetivos involucran la revisión y análisis de estudios hidrológicos previos, completamiento de estudios básicos y la realización de nuevos estudios de detalle asociados a la cantidad y calidad de la información topográfica, hidrológica e hidrometeorológica disponible.

En función de la información disponible y las características de la cuenca, se propone considerar la adopción de una crecida de diseño, obtenida con base probabilística y crecidas superiores o de verificación, concebidas bajo criterios de Crecida Máxima Probable (CMP), contemplando escenarios de desembalse rápido del brazo Rico. De esta manera, se definen las siguiente crecidas:

- Crecida de diseño con base probabilística: análisis de frecuencia de caudales diarios máximos anuales, volúmenes máximos anuales para diferentes duraciones e hidrogramas de diseño en el río Santa Cruz.
- Crecida de verificación Escenario 1: superposición de evento de rotura (desembalse máximo), con maximización probabilística de niveles del lago Argentino. Crecida que combina base probabilística con maximización determinística del desembalse abrupto del lago Rico.
- Crecida de verificación Escenario 2: superposición de evento de rotura (desembalse máximo) con aportes hídricos maximizados al lago Argentino del resto de las subcuencas (simulación con enfoque principal determinístico – conceptual orientado a la obtención de una CMP).

Finalmente, se realiza una evaluación del posible impacto del Cambio Climático en la cuenca y su influencia sobre las crecidas máximas del río Santa Cruz. Notar que en este informe se ha definido como “lago Rico” para hacer referencia al sistema lacustre conformado por el brazo Rico, lago Roca y brazo Sur del lago Argentino

1.2. Descripción General de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del Río Santa Cruz

La presa Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (Cóndor Cliff) y la presa Gdor. Jorge Cepernic (La Barrancosa) se encuentran ubicadas en la Patagonia Argentina, en la provincia de Santa Cruz. Ambas obras, emplazadas sobre el curso del río Santa Cruz, constituyen los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz cuya finalidad es la generación de energía. En la Figura 1.3 se observa la ubicación de las presas, la hidrografía de la zona y las localidades más cercanas.

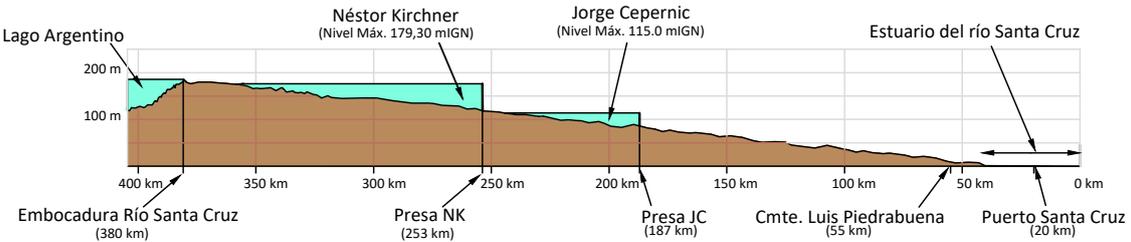


Figura 1.3: Ubicación de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz, presa Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (NK) y presa Gdor. Jorge Cepernic (JC): vista en planta (superior); perfil longitudinal (inferior).

El aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner ¹ (también denominada NK por sus siglas) está situado a una distancia de 127 km de la salida del lago Argentino, en coordenadas 50° 12' 45" Sur y 70° 47' 1" Oeste. La población más cercana a la presa es la ciudad de El Calafate. La obra está conformada por una presa de escollera con pantalla de hormigón en el talud de aguas arriba (CFRD), una central hidroeléctrica equipada con 5 turbinas Francis, descargadores de fondo y medio fondo, y un aliviadero de superficie regulado por compuertas. En la Figura 1.4 se presenta un esquema general del aprovechamiento y en las Figuras 1.5 a 1.7 se pueden observar las secciones típicas de los principales componentes de la obra. La Tabla 1.1 resume las características del aprovechamiento Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner.

El aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic (también denominada JC por sus siglas) se encuentra localizado aguas abajo del cierre NK a una distancia de 70 km, en coordenadas 50° 11' 9" Sur y 70° 7' 29" Oeste. La población más cercana a la presa es la ciudad de Comandante Luis Piedrabuena. La obra está conformada por una presa de escollera con pantalla de hormigón en el talud de aguas arriba (CFRD), una central hidroeléctrica equipada con 3 turbinas Kaplan, descargadores de fondo y un aliviadero de superficie regulado por compuertas. En la Figura 1.8 se presenta un esquema general del aprovechamiento y en las Figuras 1.9 a 1.11 se pueden observar las secciones típicas de los principales componentes de la obra. La Tabla 1.2 resume las características del aprovechamiento Gdor. Jorge Cepernic.

¹El aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner se encuentra en un proceso de revisión. Algunos de los componentes que conforman la obra pueden verse modificados.

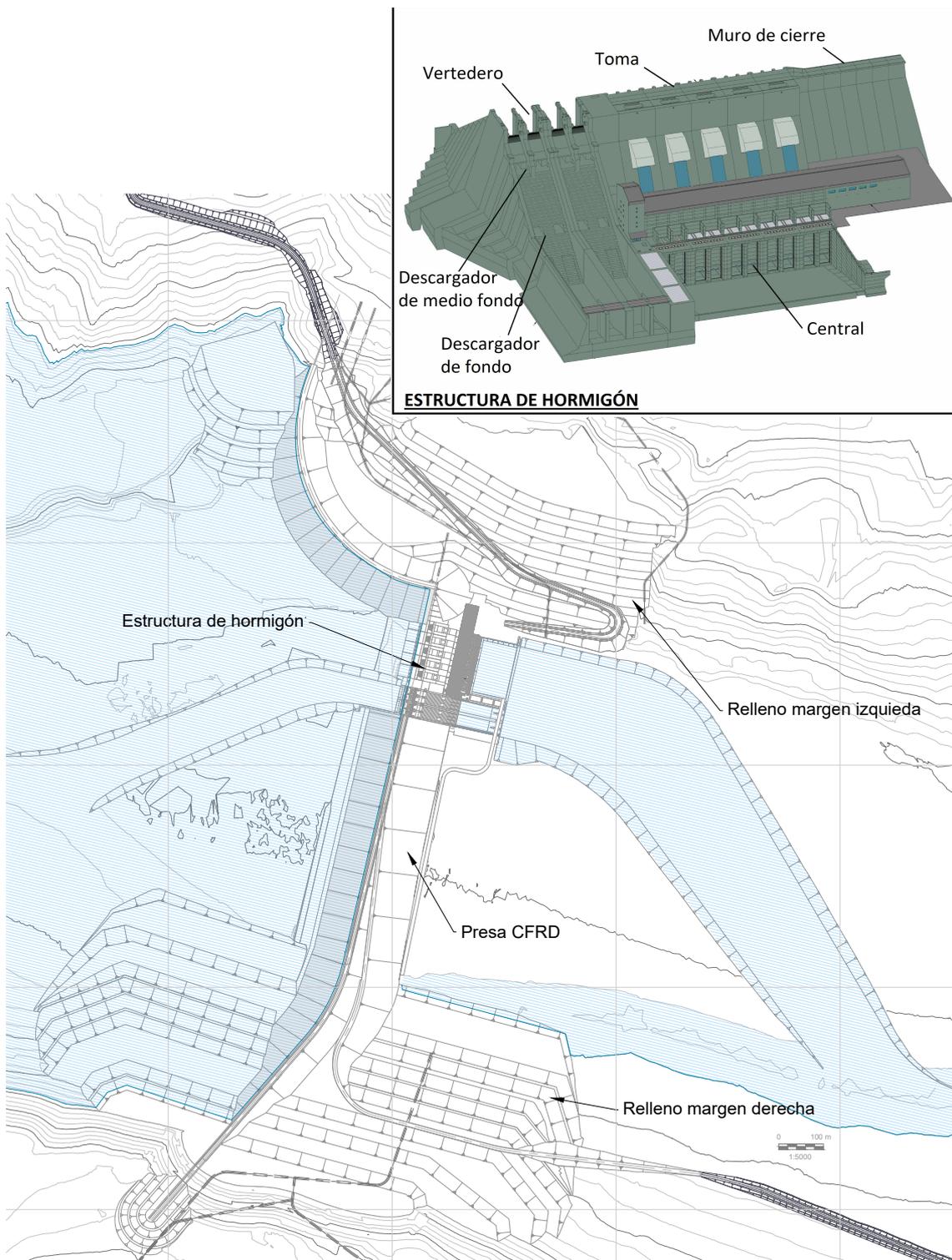


Figura 1.4: Esquema general – Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner.

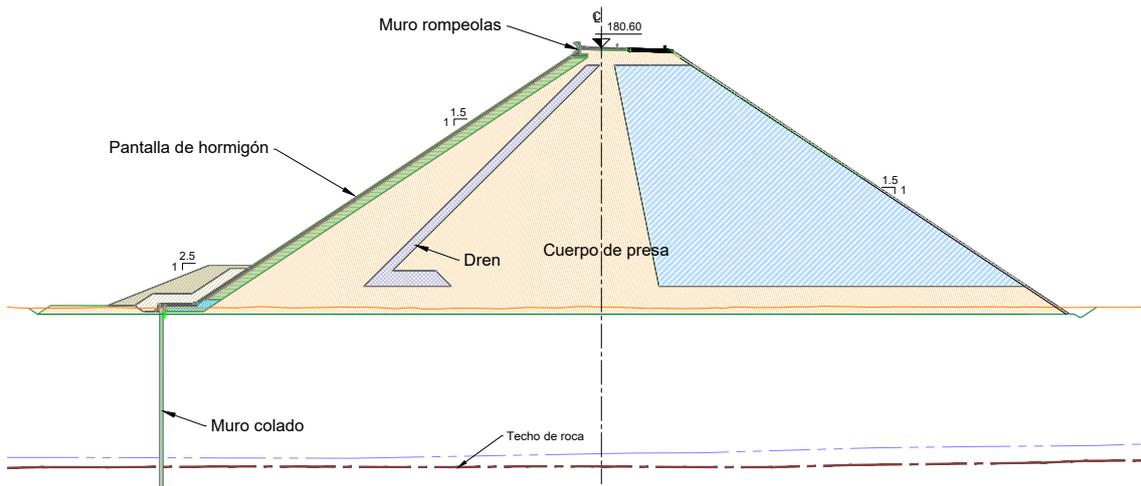


Figura 1.5: Sección típica de la presa Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner.

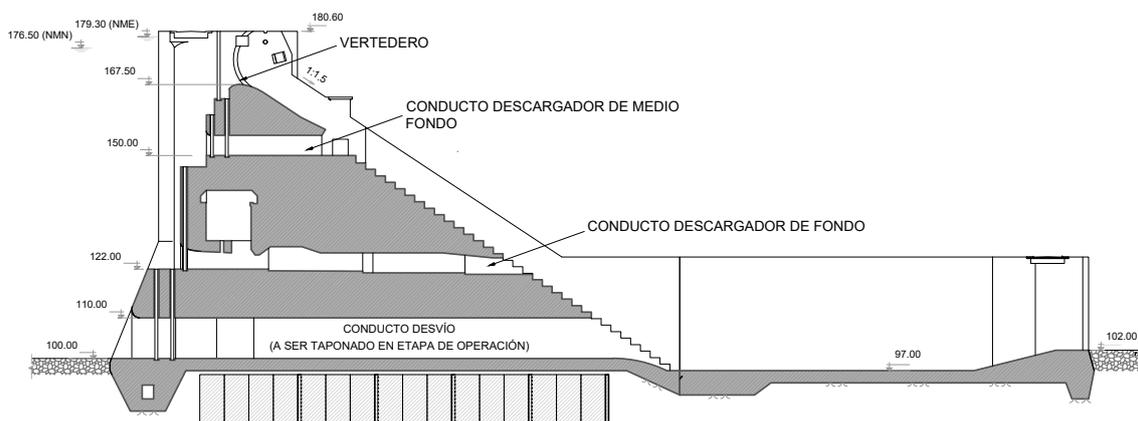


Figura 1.6: Sección típica de la obra de descarga (vertedero / descargadores de fondo y medio fondo / desvío) - Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner.

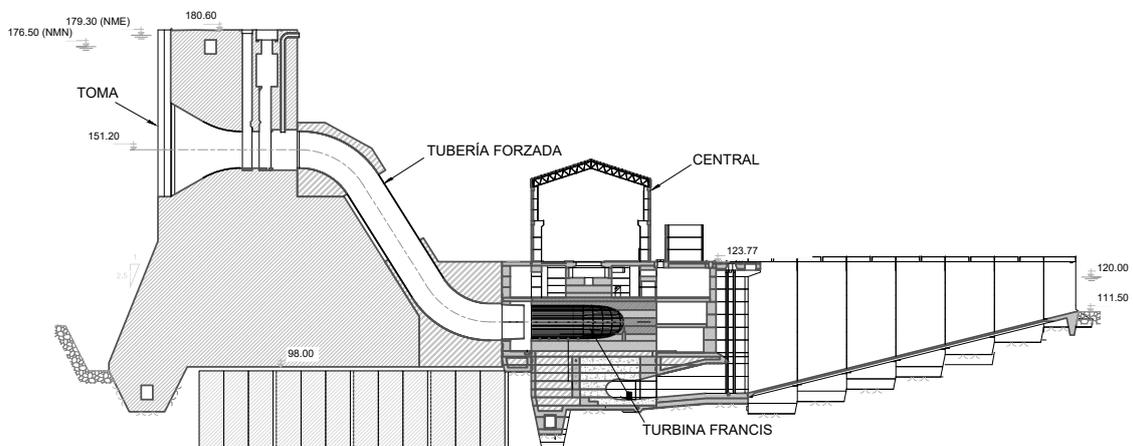


Figura 1.7: Sección típica de la central - Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner.

Embalse	Caudal medio anual (módulo del río)		720 m ³ /s
	Caudal crecida decamilenario		4.160 m ³ /s
	Caudal máximo de crecida registrado		2.520 m ³ /s
	Volumen del embalse a nivel máximo normal		5.800 Hm ³
Presa	Tipo		CFRD
	Altura máxima		71,6 m
	Longitud /ancho		1.850 m /10,95 m
	Cota de coronamiento		180,6 mIGN
	Cota de parapeto rompeolas		181,8 mIGN
	Cota máxima extraordinaria		179,3 mIGN
	Cota máxima normal		176,5 mIGN
Vertedero	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)		Margen izquierda
	Tipo		Recto
	Caudal máximo de diseño		4.160 m ³ /s
	Ancho total		60 m
	Compuertas	Cantidad	4
		Tipo	Radial
		Dimensiones (alto x ancho)	9,5 m x 12 m
Órgano de disipación		Cuenca disipador	
Cota de cresta		167,5 mIGN	
Descargador de medio fondo	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)		Margen izquierda
	Número de conductos		4
	Órgano de cierre	Cantidad	4
		Tipo	Compuerta plana
		Dimensiones (alto x ancho)	5 m x 4 m
	Caudal máximo unitario		350 m ³ /s
Cota de umbral del conducto		150 mIGN	
Descargador de fondo	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)		Margen izquierda
	Número de conductos		4
	Órgano de cierre principal	Cantidad	4
		Tipo	Compuerta radial
		Dimensiones (alto x ancho)	4 m x 3 m
	Órgano de cierre de emergencia	Cantidad	4
		Tipo	Compuerta plana
		Dimensiones (alto x ancho)	4 m x 3 m
	Caudal máximo unitario		350 m ³ /s
Cota de umbral del conducto		122 mIGN	
Central	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)		Margen izquierda
	Caracterización de la central		Punta
	Cantidad de turbinas		5
	Tipo de turbinas		Francis
	Caudal nominal turbinado		365 m ³ /s
	Caudal máximo de operación		365 m ³ /s
	Caudal mínimo de operación		242 m ³ /s
	Salto de diseño		57,9 m
	Salto máximo de operación		61,4 m
	Salto mínimo de operación		49,6 m
	Potencia instalada		950 MW
	Energía media anual mínima (central empuntada)		3.286 GWh/año
	Energía media anual máxima (central base)		3.350 GWh/año
	Velocidad de rotación de turbina		100 rpm
	Número de álabes del rotor de turbina		13
	Número de álabes del distribuidor		24
	Center line del rotor de turbina		109 m
	Altura del álabe del distribuidor		2.068 mm
	Diámetro superior D1		6.300 mm
	Diámetro inferior D2		6.682 mm
	Órgano de cierre		Compuerta plana
Potencia nominal de generadores		190 MW	

Tabla 1.1: Características principales del aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner.

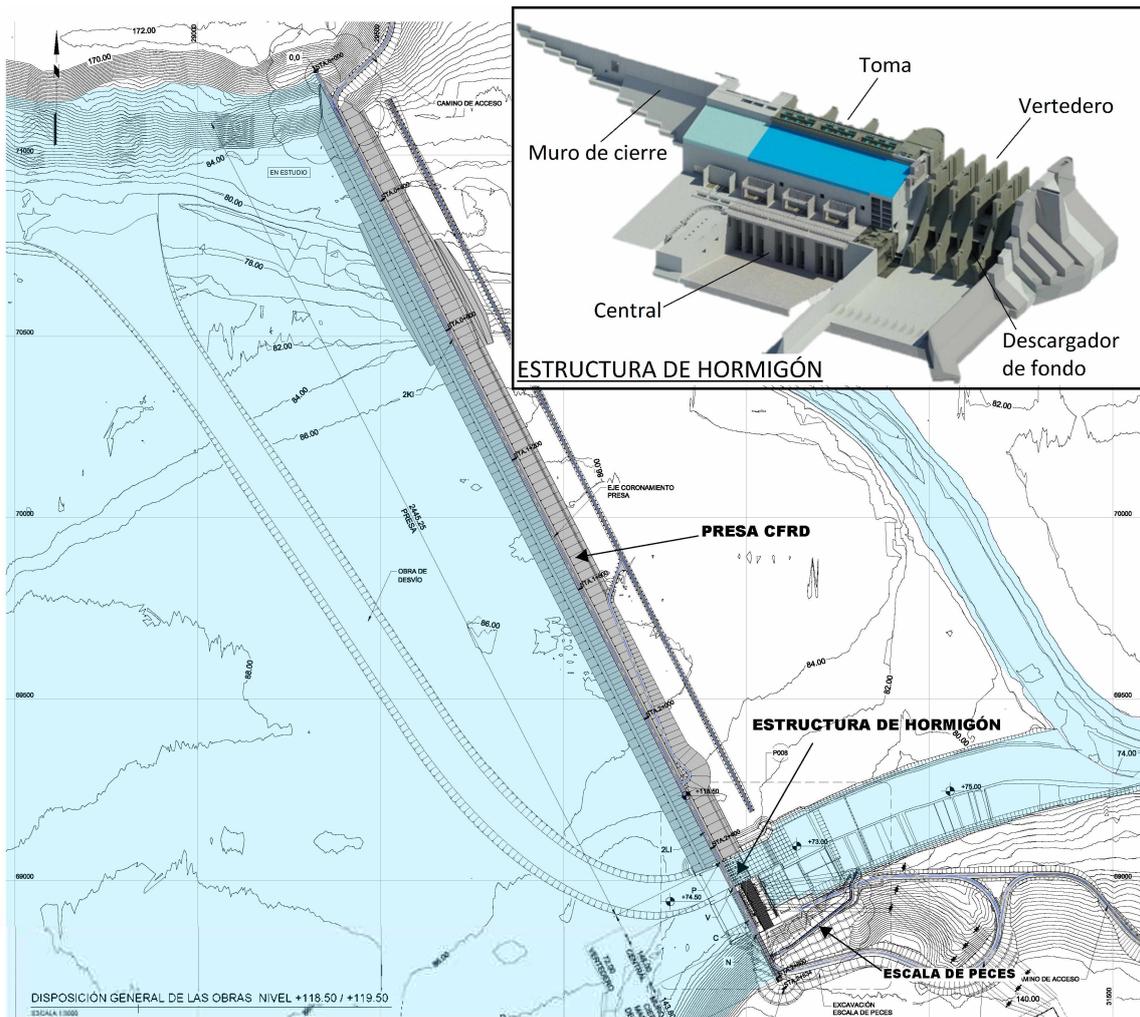


Figura 1.8: Esquema general – Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic.

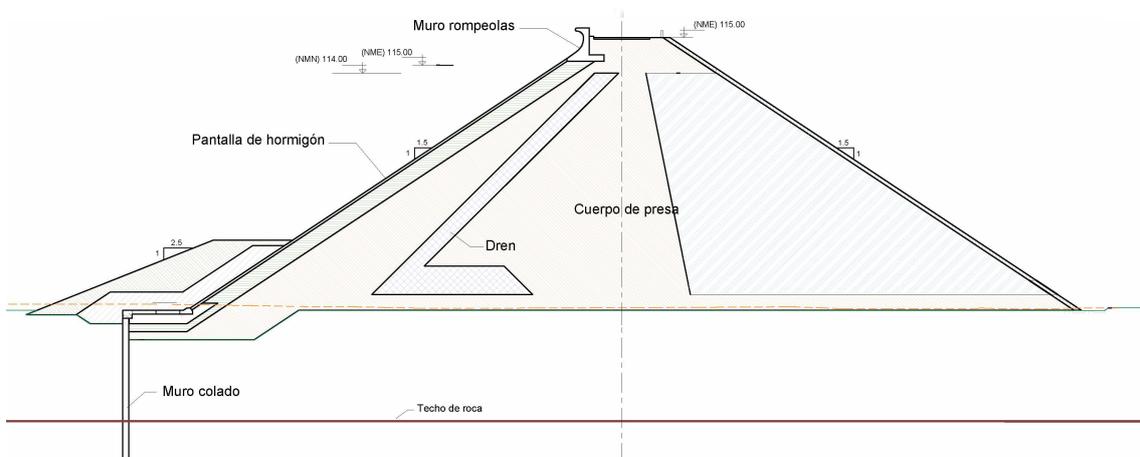


Figura 1.9: Sección típica de la presa Gdor. Jorge Cepernic.

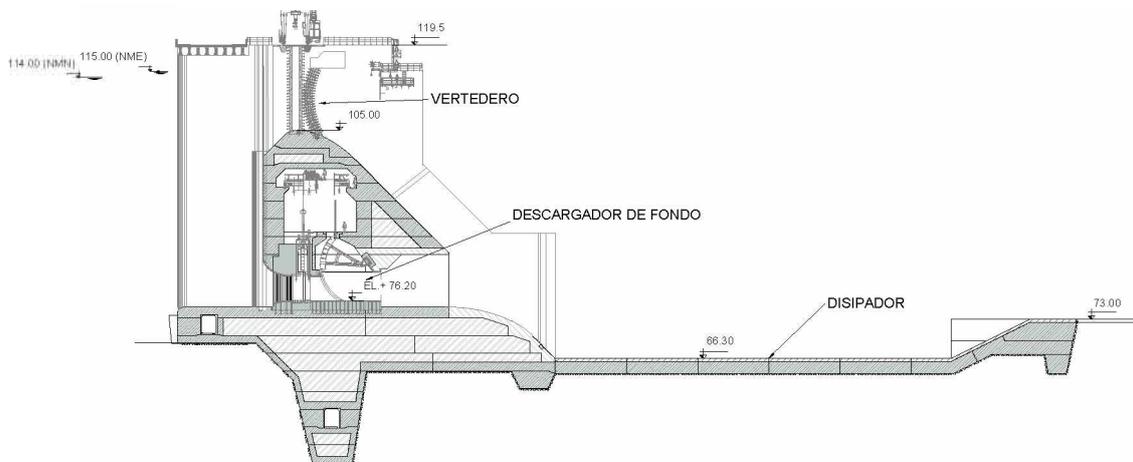


Figura 1.10: Sección típica de la obra de descarga (vertedero y descargadores de fondo) - Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic.

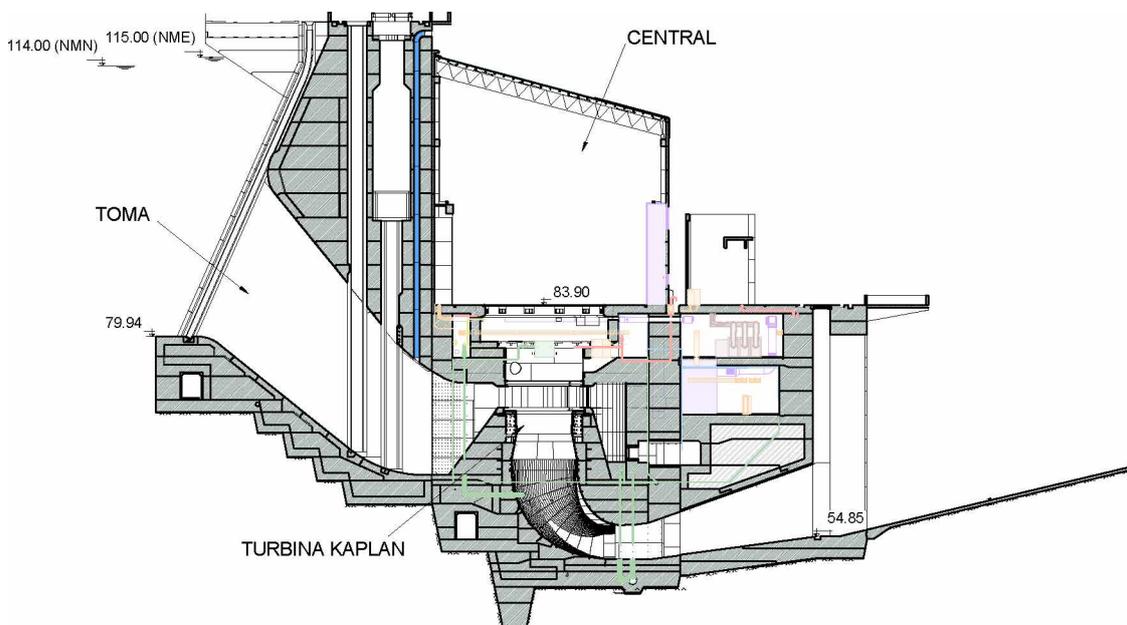


Figura 1.11: Sección típica de la central - Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic.

Embalse	Caudal medio anual (módulo del río)		720 m ³ /s
	Caudal crecida decamilenario		4.160 m ³ /s
	Caudal máximo de crecida registrado		2.520 m ³ /s
	Volumen del embalse a nivel máximo normal		3.000 Hm ³
Presa	Tipo		CFRD
	Altura máxima		45,5 m
	Longitud /ancho		2.440 m / 9,20 m
	Cota de coronamiento		118,5 mIGN
	Cota de parapeto rompeolas		119,7 mIGN
	Cota máxima extraordinaria		115,0 mIGN
	Cota máxima normal		114,0 mIGN
Vertedero	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)		Margen derecha
	Tipo		Recto
	Caudal máximo de diseño		4.160 m ³ /s
	Ancho total		72 m
	Compuertas	Cantidad	6
		Tipo	Radial
		Dimensiones (alto x ancho)	10,62 m x 12 m
	Órgano de disipación		Cuenco disipador
Cota de cresta		105,0 mIGN	
Descargador de fondo	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)		Margen derecha
	Número de conductos		4
	Órgano de cierre principal	Cantidad	4
		Tipo	Compuerta radial
		Dimensiones (alto x ancho)	4 m x 3 m
	Órgano de cierre de emergencia	Cantidad	4
		Tipo	Compuerta plana
		Dimensiones (alto x ancho)	4 m x 3 m
Caudal máximo unitario		296 m ³ /s	
Cota de umbral del conducto		76,2 mIGN	
Central	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)		Margen derecha
	Caracterización de la central		Base
	Cantidad de turbinas		3
	Tipo de turbinas		Kaplan
	Caudal nominal turbinado		382 m ³ /s
	Caudal máximo de operación		394 m ³ /s
	Caudal mínimo de operación		133 m ³ /s
	Salto nominal		34.4 m
	Salto máximo de operación normal		36 m
	Salto mínimo de operación		33,3 m
	Salto mínimo extraordinario / Caudal mínimo extraordinario		26,5 m / 126 m ³ /s
	Potencia instalada		360 MW
	Energía media anual		1.942 GWh/año
	Velocidad de rotación de turbina		107,1 rpm
	Número de álabes del rotor de turbina		6
	Número de álabes del distribuidor		24
	Center line del rotor de turbina		69,3 m
	Altura del álabe del distribuidor		2.625 mm
	Diámetro rodete		7.000 mm
	Órgano de cierre		Compuerta plana
Potencia nominal de generadores		120 MW	

Tabla 1.2: Características principales del aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic.

Capítulo 2

RECOPIACIÓN DE INFORMACION Y ANTECEDENTES

2.1. General

Dada la configuración de la cuenca, la información de mayor interés para los estudios hidrológicos a realizar en este trabajo corresponden a los caudales observados a la salida de los grandes lagos; resultando de interés para comprender los fenómenos hidrológicos que se desarrollan analizar también niveles hidrométricos en lagos, precipitaciones, así como variables que contribuyen en la evaporación, evapotranspiración, derretimiento de nieve, fusión y ablación de hielos, en especial la temperatura.

La información disponible cuenta con distinto grado de detalle y alcance geográfico. En las siguientes subsecciones se presenta un análisis de los antecedentes más importantes disponibles, en función de los objetivos del estudio.

2.2. Visita de reconocimiento del área de estudio

La evaluación de los antecedentes se vio complementada y enriquecida por las impresiones directas que fueron captadas durante las visitas de reconocimiento al área de estudio. Se recorrió parcialmente la cuenca superior del río Santa Cruz, incluyendo el brazo Rico, brazo Sur, canal de los Témpanos, sitio del cierre de hielo, así como el río La Leona y las estaciones de medición hidrológicas principales.

En el Anexo A se presenta un informe de las visitas realizadas.

2.3. Recopilación hidrológica e hidrometeorológica

2.3.1. Fuentes consultadas

A continuación, se indican las fuentes de información y una síntesis de la información recopilada al presente, detallándose luego la disponibilidad temporal de la misma.

- Organismos Nacionales
 - Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (SIPH)
 - Servicio Meteorológico Nacional (SMN)
 - Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales. (IANIGLA)
 - Pliego Licitación Pública de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del Río Santa Cruz (MINPLAN, 2012)
- Organismos de la República de Chile
 - Ministerio de Obras Públicas de Chile – Dirección General de Aguas (DGA)
 - Dirección Nacional de Meteorología (DNM)
- Bases de datos globales
 - CRU TS (Climatic Research Unit – University of East Anglia). <http://www.cru.uea.ac.uk/>. Datos climáticos en formato grilla de 0,5° x 0,5°, obtenidos por interpolación (datos mensuales) de observaciones. Se obtuvieron inicialmente series de temperatura y precipitación en el período 1901-2018.
 - ECMWF - ERA-Interim: información meteorológica mensual / diario / horario en grilla de 0,75° x 0,75°. Series de temperaturas, precipitación y otras variables meteorológicas, series 1979-2018.
 - ECMWF - ERA-Land: información meteorológica mensual / diario / horario en grilla de 0,25° x 0,25°. Series de temperaturas, precipitación y otras variables meteorológicas 1979-2018.
 - Center for climate and resilience research. Chile dataset. <http://www.cr2.cl/>. CR2MET: información meteorológica mensual / diario / en grilla de 0,05° x 0,05°. Series de temperatura, precipitación, 1979-2018. En base a datos de: ERA-Interim, observaciones locales y regionalización estadística considerando la topografía. Para temperaturas considera adicionalmente estimaciones mediante observaciones satelitales (MODIS LST)
 - FAO (Food and Agriculture Organization de las Naciones Unidas), FAO - Climwat2.0 (2006)
- Publicaciones científicas con información

A partir de las publicaciones de Stuefer (1999), Skvarca (2002), Minowa et al. (2017) se pudo obtener información parcial de datos recopilados por la Estación Meteorológica Glaciar Perito Moreno, ubicada muy próxima al glaciar. Esta estación se instaló a partir de un acuerdo de cooperación científica entre DNA-IAA (Dirección Nacional del Antártico - Instituto Antártico Argentino) y el Instituto de Meteorología y Geofísica de la Universidad de Innsbruck (IMGI) en 1994. Opera desde diciembre de 1995, y en base a las publicaciones mencionadas se obtuvo información de temperaturas mensuales medias, máximas y mínimas, y otras variables meteorológicas hasta 2017.

Asimismo, teniendo en cuenta la nula información observada disponible en la alta cordillera, la publicación "Net accumulation rates derives from ice core stable isotope records of PIO XI glacier, Southern". Schwikowski et al., (2013), permitió obtener estimaciones de montos de precipitación anual en el Glaciar PIO XI (cercano al límite internacional) en base a testigos de hielo.

2.3.2. Síntesis de estaciones con observaciones recopiladas

- Información de la SIPH. A través de la base de datos del Sistema Nacional de Información Hídrica (<https://snih.hidricosargentina.gob.ar>) se obtuvo información digital de:

- 4 estaciones pluviométricas, con información diaria
- 3 estaciones de temperaturas diarias
- 5 estaciones de caudales y niveles hidrométricos en ríos y arroyos (con aforos puntuales)
- 3 estaciones de niveles hidrométricos en lagos
- 1 estación de evaporación
- 1 estación nivométrica (Lago Guacho – alejada de la cuenca)

En el punto 2.4 se presenta la ubicación y disponibilidad de datos de estas estaciones.

- SMN

- 2 estaciones meteorológicas (El Calafate Aero y Lago Argentino Aero), con valores diarios de precipitación, temperatura, temperatura del punto rocío, humedad relativa, velocidad de viento a 2 m, radiación solar, heliofanía, en el período 01/09/1958 a 12/2000 (Lago Argentino Aero) y 12/2000 al 31/12/2019 (El Calafate Aero).
- 6 estaciones meteorológicas (Esquel Aero, Gob. Gregores Aero, Perito Moreno Aero, Río Gallegos Aero, San Julián Aero, Santa Cruz Aero), con valores mensuales de precipitación, temperatura, temperatura del punto rocío, humedad relativa, velocidad del viento a 2 m, radiación solar, heliofanía.

- Dirección General de Aguas (Chile)

Se obtuvieron vía internet (<https://dga.mop.gob.cl/servicioshidrometeorologicos/Paginas/default.aspx>) datos de precipitación y temperatura de estaciones ubicadas en Chile entre

latitud 46° y 52°, más la estación de Punta Arenas. Se recopilaron 53 estaciones con mediciones de precipitaciones diarias y 20 de temperaturas medias diarias, aunque se destaca que muchas de ellas cuentan con muy poca información y discontinuidad en sus registros. No se dispone en la región, ni en cercanías, de información relativa a estaciones que releven altura de nieve y/o equivalente de agua en nieve.

- Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA)

Se obtuvo información meteorológica y nivométrica de las estaciones operadas por este organismo en la cuenca del río de Las Vueltas y región lindante, con algunas estaciones iniciándose en el año 2010. En el período 2010 – 2019 se tiene información a paso de tiempo diario de:

- 2 estaciones pluviométricas
- 11 estaciones de temperaturas
- 2 estaciones de medición de acumulación de nieve
- 4 sitios con mediciones de humedad relativa
- 3 sitios con mediciones de velocidad de viento y 1 sitio con medidas de radiación

2.4. Análisis de disponibilidad de información hidrológica e hidrometeorológica recopilada

Sin duda la fuente más abarcativa de información en la cuenca resulta la proveniente del Sistema Nacional de Información Hídrica (<https://snih.hidricosargentina.gob.ar>) de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación. A continuación, se realiza un análisis de la disponibilidad de las diferentes fuentes de información en el tiempo y espacio.

2.4.1. Datos de caudales

Se tienen 5 estaciones con información de caudales diarios de la SIPH (Tabla 2.1). La ubicación de las estaciones se indica en la Figura 2.1, mientras que en la Figura 2.3 se presenta la disponibilidad temporal de la misma.

Como parte de las tareas de operación y mantenimiento de la red hidrometeorológica nacional, la SIPH realiza mediciones directas de caudales líquidos. Se dispone en cada aforo: fecha, hora, altura de escala y caudal total. Para la estación principal a los fines de este estudio, estación Charles Fuhr (CHF) sobre el río Santa Cruz, se presenta el tipo de caudales disponibles y la fecha de inicio de mediciones:

- caudales medios diarios, desde 19/12/55;

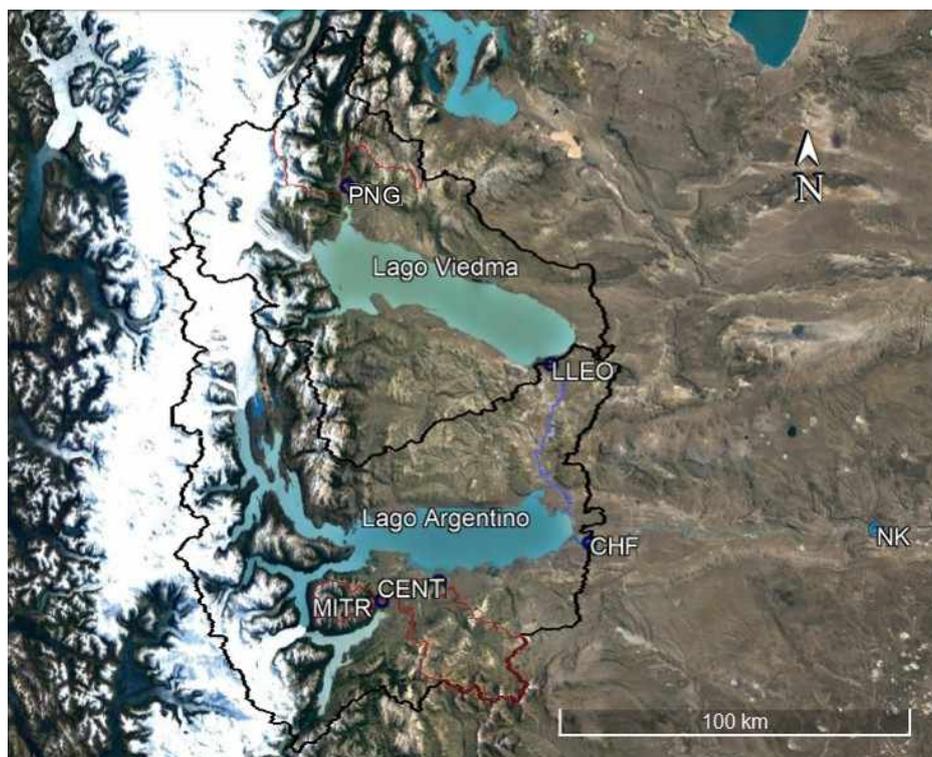


Figura 2.1: Ubicación de estaciones medición de caudales (SIPH)

Río	Estación nombre	Latitud	Longitud	Código	Caudales diarios	Aforos Líquidos
Santa Cruz	Charles Fuhr (CHF)	50°15'7,60	71°54'28,10	2802	12/55 – 12/19	01/58-12/19
Centinela	RP70 (CENT)	50°21'7,00"	72°30'21,00	2815	03/93 - 03/19	09/90-12/19
Mitre	RN11 (MITR)	50°23'60,00	72°43'57,00	2822	03/93 - 03/19	11/91-12/19
La Leona	La Leona (LLEO)	49°47'50,00	72° 3'51,00"	2801	06/56 – 12/19	12/58-12/19
De las Vueltas	Parque Nac. los Glaciares - río de las vueltas (PNG)	49°20'35,80"	72°51'38,60"	2820	12/91 – 12/19	05/92-12/19

Tabla 2.1: Datos de caudales líquidos en las estaciones de la SIPH.

- caudal medio diario máximo anual: desde 01/09/58;
- aforos líquidos puntuales, desde enero de 1958;
- caudal máximo instantáneo, desde 31/01/87;
- caudal mínimo instantáneo, desde 01/01/87;
- caudal medio diario mínimo anual, desde 01/09/58.

Se cuenta con monografía de la estación (SIPH – EVARSA).

2.4.2. Datos de niveles hidrométricos

Además de las estaciones donde los niveles se utilizan como soporte a la determinación de caudales, se tienen 3 estaciones hidrométricas que permiten analizar la variación de los lagos Argentino, Rico y Viedma, disponiéndose de los niveles diarios; y para eventos puntuales valores con paso de tiempo menores al diario (Figura 2.2 y Tabla 2.2).



Figura 2.2: Ubicación de estaciones medición de alturas hidrométricas en lagos (SIPH).

Un dato relevante en las estaciones hidrométricas, resulta el valor de cota IGN de "0" de escala, la cual ha sido obtenida por relevamientos realizados por la UTE Represas Patagonia (UTE). La Figura 2.3 presenta la disponibilidad de información de estas variables en el tiempo.

Río/Lago	Estación nombre	Latitud	Longitud	Código	Cota "0" escala [mIGN] (SRVN71)	Cota "0" escala [mIGN] (SRVN16)
Santa Cruz	Charles Fuhr (CHF)	50°15'7,6"	71°54'28,1"	2802	172,167	171,597
Lago Argentino	Lago Argentino - Calafate (CAL)	50°16'09,0"	71°43'07,0"	2817	174,8696	174,299
Lago Rico	Parque Nac. Los Glaciares - Lago Rico (LRIC)	50°25'34,0"	72°44'52,0"	2816	176,516	175,946

Tabla 2.2: Datos de niveles líquidos en las estaciones de la SIPH.

2.4.3. Datos de precipitaciones

Se tienen 4 registros de precipitaciones diarias de SIPH, 53 estaciones obtenidas de la DGA de Chile (aunque muchas de ellas con muy poca información), 8 del SMN y 2 del IANIGLA.

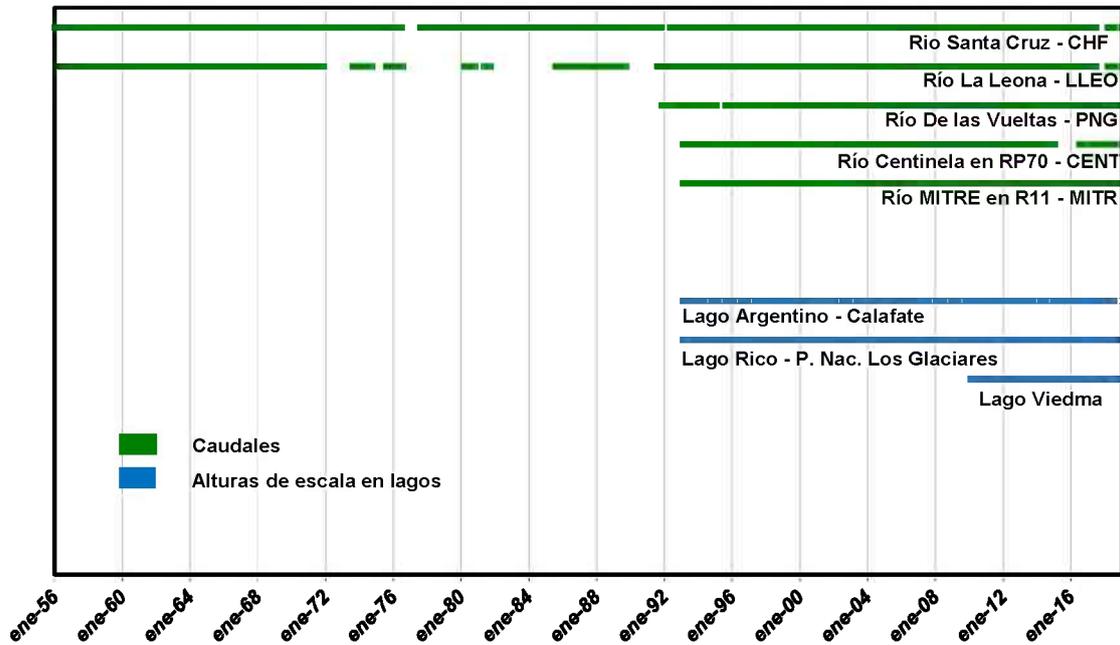


Figura 2.3: Disponibilidad de información de caudales y alturas (SIPH).

De las estaciones del SMN (El Calafate Aero y Lago Argentino Aero) se tienen datos diarios, disponiéndose en las restantes de valores mensuales.

La ubicación de las estaciones utilizadas, con más de 5 años de registros confiables, se indica en la Figura 2.4, mientras que en la Figura 2.5 se muestra la disponibilidad de información de precipitaciones en el tiempo en las estaciones argentinas (el resto de estaciones se presenta en Anexo B).



Figura 2.4: Ubicación estaciones medición de precipitaciones (con más de 5 años de registros).

La distribución espacial de estaciones es irregular, quedando sectores dentro de la cuenca prácticamente sin información, sobre todo en las porciones más elevadas de la misma.

Esta dificultad se magnifica teniendo en cuenta el hecho que en la medida que la altitud se incrementa resulta necesaria una mayor cantidad de estaciones para representar la variabilidad espacial de los fenómenos hidrometeorológicos que se producen.

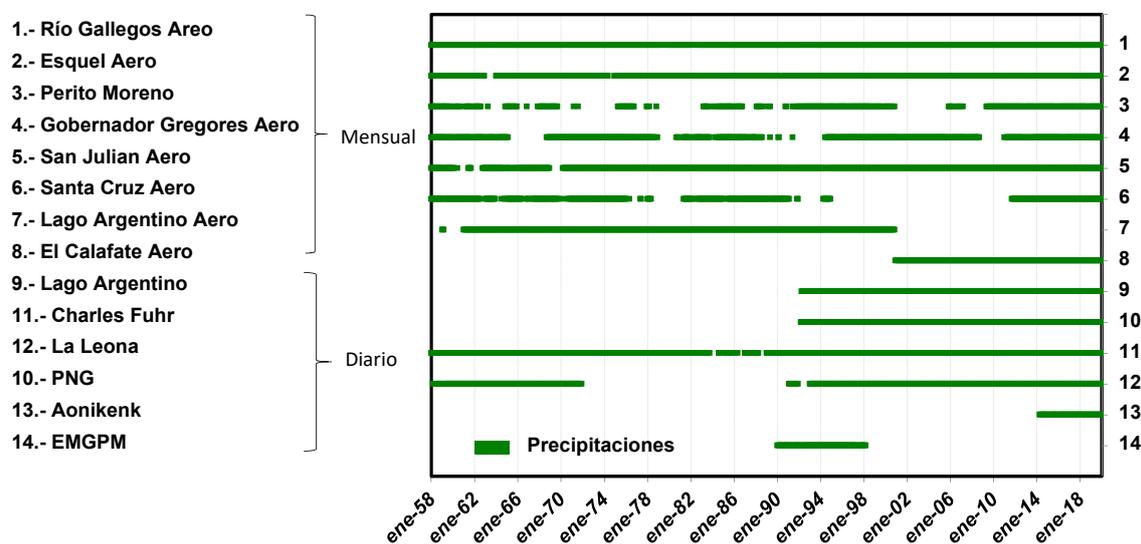


Figura 2.5: Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Argentina).

2.4.4. Datos de temperatura

Se dispone de 3 estaciones con información de temperatura media diaria de la SIPH, 20 de la DGA de Chile (con muchos datos faltantes), 8 del SMN (2 con temperaturas diarias y 6 con temperaturas mensuales), y 10 del IANIGLA, aunque con pocos años de registros. Tienen distribución semejante a aquellas de precipitación. Los registros disponibles de mayor longitud se inician en la década del 60, teniéndose la mayor cantidad de estaciones operativas en los últimos 5 años. La ubicación de las estaciones disponibles se presenta en la Figura 2.6, mostrándose en la Figura 2.7 la disponibilidad en el tiempo de esta variable en estaciones argentinas de mayor longitud.

2.4.5. Datos de evaporación

Se cuenta únicamente con 1 estación de evaporación en El Calafate (SIPH), la cual abarca el período 1993 - 2019.

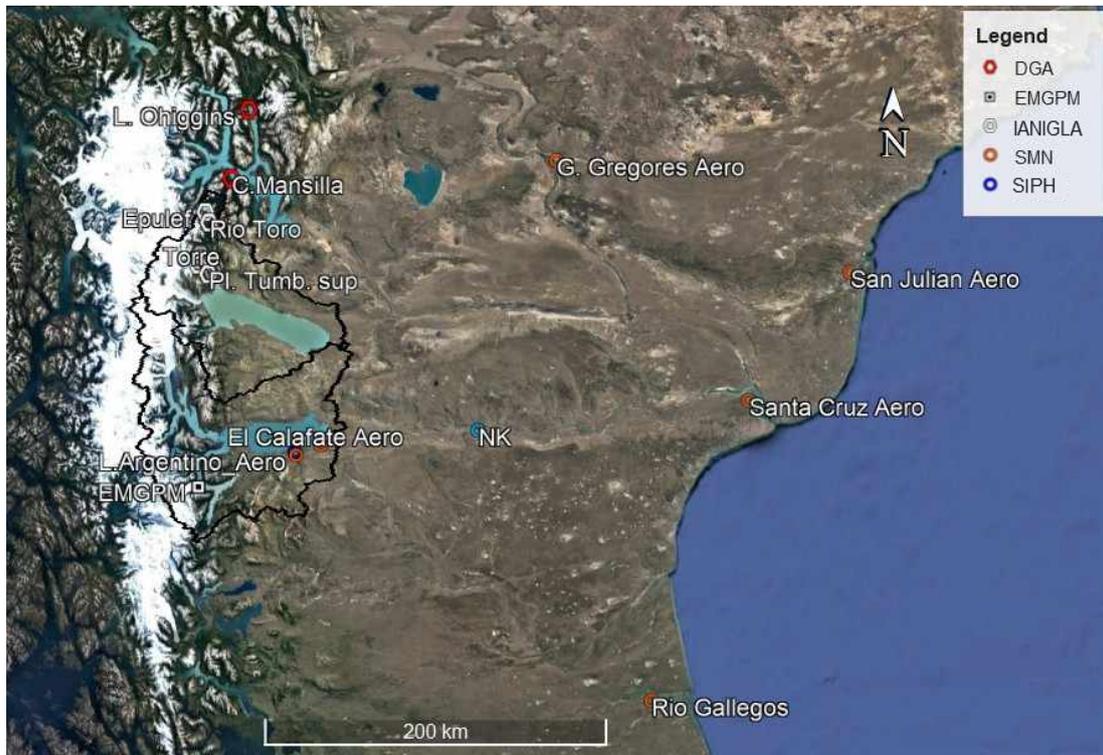


Figura 2.6: Ubicación de estaciones con temperaturas utilizadas.

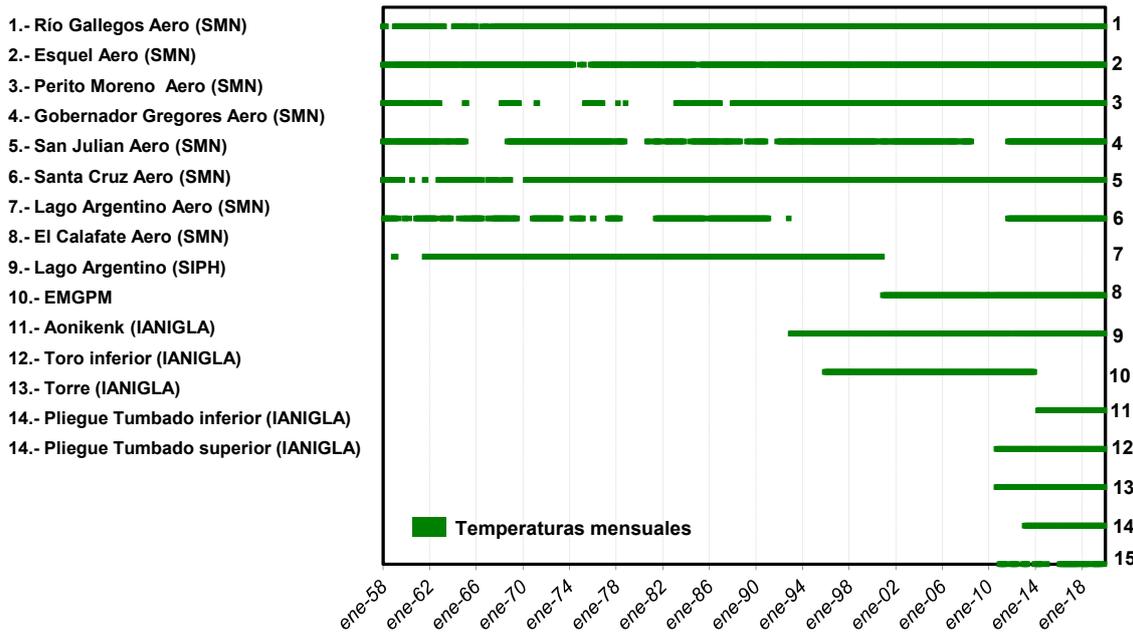


Figura 2.7: Disponibilidad de información de temperaturas (Argentina). Series de mayor longitud.

2.4.6. Datos de altura de nieve

El IANIGLA presenta estaciones con información desde 2014 (Aonikenk) y desde 2016 (Epulef – Glaciar Milanesio), más otra estación con registros a partir de 2020 (Pliegue Tumbado) ubicadas en el extremo norte de la cuenca (Figura 2.8)

La estación más próxima de la SIPH se encuentra en lago Guacho, con información desde junio 2015, pero ubicada a más de 650 Km al norte de la cuenca.

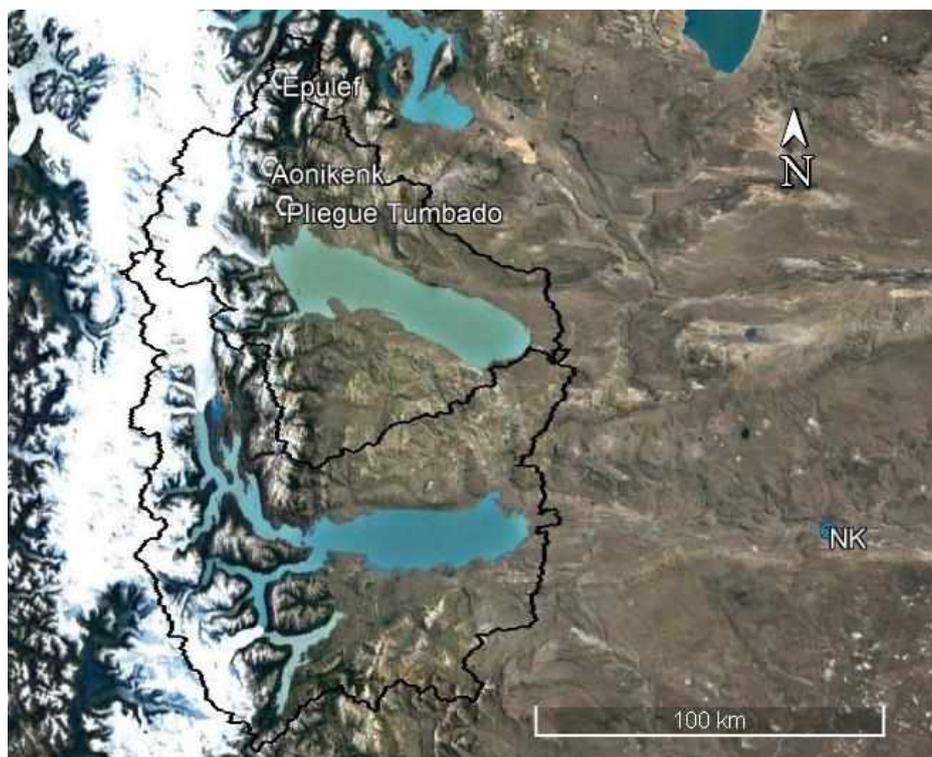


Figura 2.8: Ubicación de estaciones nivométricas (IANIGLA).

2.4.7. Otras variables meteorológicas

Se dispuso de otras variables meteorológicas de interés, como ser humedad relativa, heliofanía, velocidad de viento y temperatura punto de rocío. En el Anexo B se presenta la disponibilidad de esta información.

2.5. Antecedentes cartográficos y satelitales

2.5.1. Antecedentes cartográficos y Modelos Digitales de Elevación

A continuación, se resume la información cartográfica y los modelos digitales de elevación empleados:

- Mapa de los Recursos Hídricos Superficiales de la Provincia de Santa Cruz. Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación – INA – CONAE, esc. 1:750.000.
- Cuenca del río Santa Cruz. Sistema ríos Patagónicos. Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación.
- Modelos digitales de elevaciones IGN - resolución espacial de 30 m x 30 m - precisión vertical de aproximadamente 2 m.
- Modelo digital de elevaciones del SRTM (utilizado en porciones de la cuenca que no cubre IGN).

2.5.2. Imágenes satelitales

Se emplearon las siguientes fuentes de imágenes satelitales:

- Imágenes Google Earth diferentes fechas
- Imágenes Sentinel (obtenidas del portal USGS Global Visualization Viewer (<http://glovis.usgs.gov/>))
- Imágenes Landsat 8 (ver Anexo D).

Capítulo 3

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, CLIMÁTICAS E HIDROLÓGICAS GENERALES DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CRUZ

La cuenca del río Santa Cruz tiene origen en la cordillera de los Andes, tomando tal denominación a partir de la desembocadura del lago Argentino, la cual ocurre con un umbral de salida a cota 175,5 mIGN sobre el nivel del mar. Escurre hacia el Océano Atlántico con dirección O-E, atravesando la Provincia de Santa Cruz en un recorrido de 383 km hasta su desembocadura, que lo hace en el estuario que lo une con el río Chico, formando un complejo régimen de niveles y mezclas de aguas dulces y marinas.

La región está afectada por vientos húmedos provenientes del Pacífico y por la circulación del aire polar desde el sur. Las interacciones de las masas de aire húmedo proveniente del Pacífico con la cordillera (ascenso y enfriamiento de la masa de aire húmeda) causan que las precipitaciones en forma de nieve o lluvia, sean mayores al oeste de la misma, disminuyendo abruptamente al este de la cordillera. Esto determina un fuerte gradiente de precipitación oeste - este a través de la región.

A su vez la temperatura dentro del área de la cuenca disminuye hacia el oeste.

Se registran vientos fuertes del oeste durante todo el año, pudiendo existir variaciones locales en su dirección en la zona próxima a los Andes, ocasionadas por la orografía. Durante el verano es mayor la frecuencia e intensidad de los vientos. El pasaje de sistemas frontales resulta frecuente.

Se distinguen dos tipos climáticos básicos:

- El clima frío húmedo cordillerano que se desarrolla en la región andina. Sobre las altas cumbres, y asociado a la formación del campo de hielo continental y a los glaciares de montaña, aparece el frío nival.
- Un clima templado frío árido en la zona central y hacia el este del lago Argentino, en plena meseta patagónica. Las precipitaciones no alcanzan los 200 mm anuales y los vientos del oeste son fríos y desecantes con ráfagas que superan los 50 km/h.

Según indica IANIGLA (2017), la precipitación se distribuye uniformemente a lo largo de todo el año en las cercanías de las partes altas de la cuenca del río Santa Cruz (estaciones de Villa O'Higgins y Los Huemules), con los meses de invierno algo más lluviosos, pero sin observarse meses realmente secos. Hacia el este de la cordillera los acumulados anuales se reducen notablemente.

Se presentan fuertes variaciones de las precipitaciones a través de la cordillera, aumentando las mismas en la ladera occidental y sobre la cresta andina, y disminuyendo marcadamente hacia la estepa Patagónica. Debido a que no existen mediciones sobre o en cercanías a las cumbres existe una gran incertidumbre de los valores de precipitación en la alta cordillera. No obstante, estimaciones a partir de testigos de hielos tomados en el Campo Patagónico de Hielo Sur (Schwikowski et al., 2013), y simulaciones numéricas de la dinámica atmosférica (Lenaerts et al., 2014; Shaefer et al., 2015), sugieren que la precipitación climatológica anual en las cercanías de la cresta andina es del orden de los 6.000 - 8.000 mm o más (IANIGLA, 2017). Información con valores similares se indica en Mapas de isolíneas de precipitación anual, presentadas en el Balance Hídrico de Chile (DGA, 1988).

Asimismo, IANIGLA (2017) indica que la precipitación ocurre normalmente como nieve en los Andes meridionales por encima de los 600 mIGN en invierno y de los 1.200 mIGN en verano, según la climatología de la isoterma de 0 °C construida a partir de los datos de radiosondeo en la estación de Punta Arenas.

La distribución de las temperaturas medias mensuales alcanza los mínimos en invierno (junio - julio - agosto) y máximos en verano (enero - febrero), en forma contrapuesta a la evolución de las precipitaciones.

En las mediciones del Servicio Meteorológico Nacional en El Calafate (Figura 3.1), se tienen temperaturas medias mensuales entre 0,9 °C a 2,6 °C en invierno y del orden de los 13 °C a 14 °C en verano; no obstante, se han presentado valores medios diarios mínimos de -11,8 °C y máximos medios diarios de hasta 23 °C.

Dentro del área de la cuenca, los patrones de temperatura están altamente influenciados por la latitud y la elevación, y las temperaturas mínimas absolutas pueden ser inferiores a - 25 °C en el área de la cuenca del río Santa Cruz (IANIGLA, 2017).

Otra variable de interés directamente relacionada con el escurrimiento es la acumulación de nieve en la cuenca alta. Las estaciones nivométricas que posee IANIGLA, ubicadas entre cotas

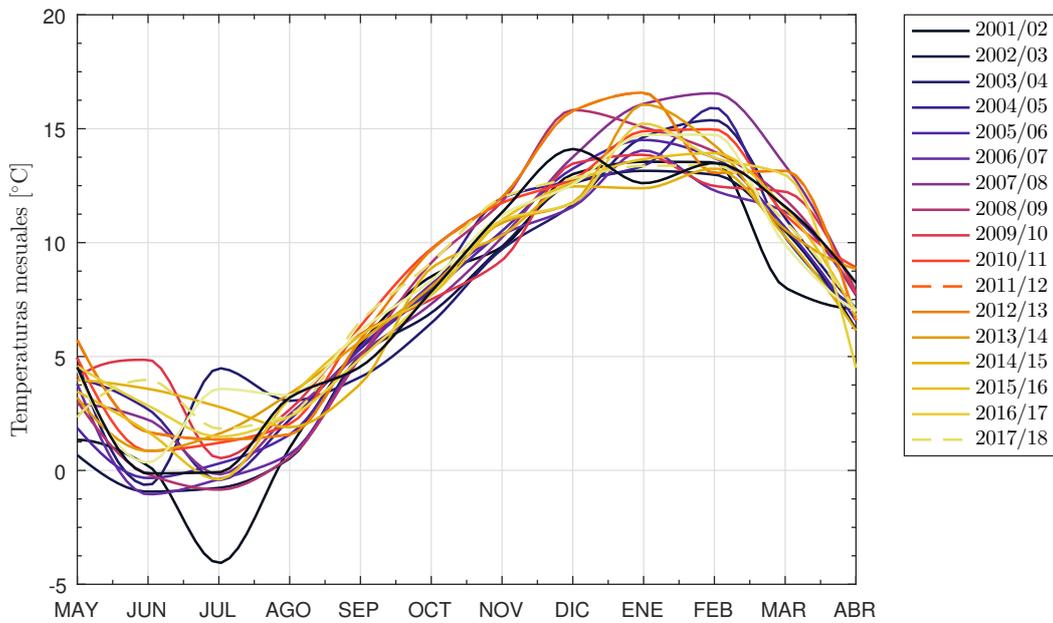


Figura 3.1: Temperaturas mensuales en El Calafate Aero (SMN) – diferentes años.

900 mIGN y 1.200 mIGN, muestran que la acumulación máxima se produce generalmente a fines de agosto y setiembre, disminuyendo en la medida que se incrementa la temperatura, hasta prácticamente desaparecer a partir de mediados de noviembre hasta marzo – abril (Figura 3.2). Se hace notar que existen diferencias marcadas en la acumulación máxima de nieve alcanzada (en los años con información disponible).

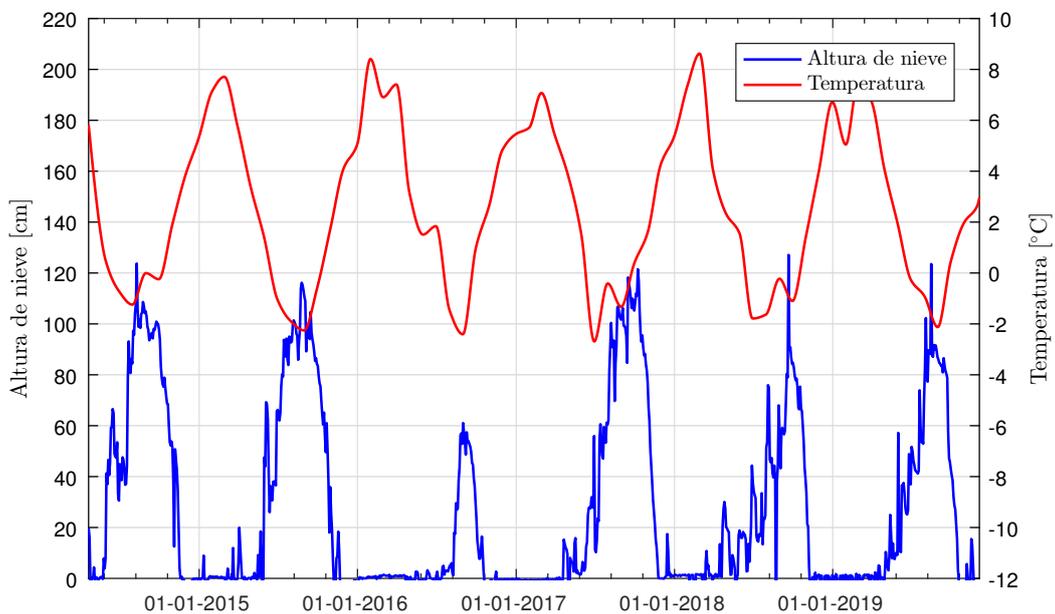


Figura 3.2: Variación del manto de nieve acumulada y evolución de temperaturas medias en estación Aonikenk (IANIGLA) ubicada a 1.200 mIGN de altura (2014 – 2018).

Los caudales se incrementan en la medida que aumenta la temperatura y el derretimiento del manto de nieve, a lo cual se adiciona el aporte desde los glaciares y lluvias. Los caudales máximos mensuales medios tienen lugar en el mes de marzo en la estación Charles Fuhr, con un retraso respecto al momento de su generación ocasionado por la acción lacustre. La precipita-

ción tiene sus máximos mensuales hacia fines de Otoño y principios de Invierno, contribuyendo al mantenimiento de los caudales en este período.

La Figura 3.3 presenta caudales medios mensuales en las estaciones de medición disponibles en la cuenca en el período 1992/93 – 2018/19, así como temperaturas y precipitaciones medias mensuales en la estación Lago Argentino - Calafate (CAL) en el mismo período.

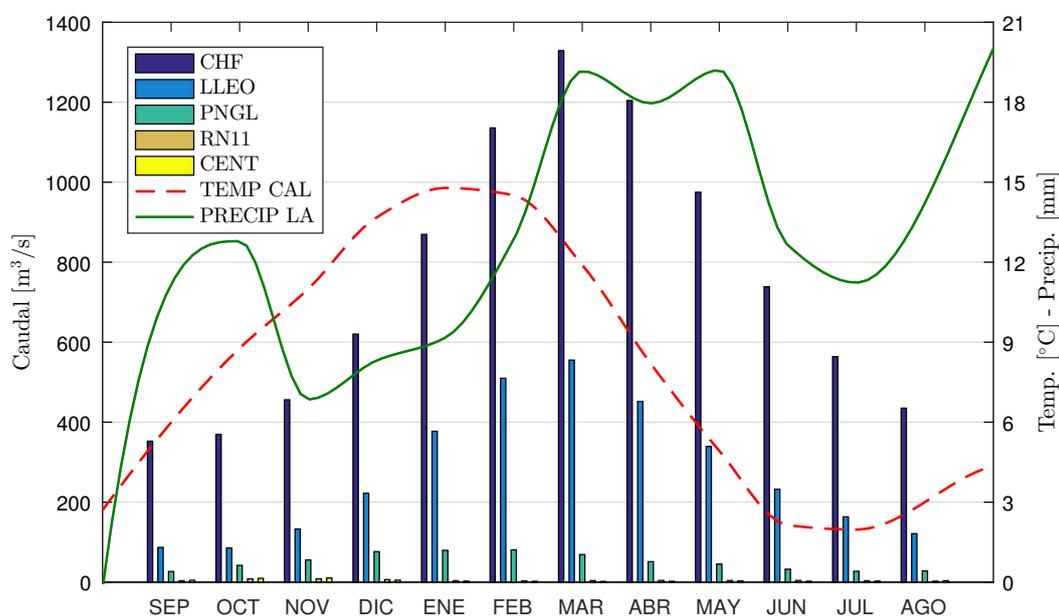


Figura 3.3: Variación mensual de caudales y principales variables climáticas relacionadas.

La cuenca del río Santa Cruz tiene una superficie total de unos 29.686 Km² (ref: SIPH). La cuenca alta o superior comprende a las nacientes en el Campo de Hielo Patagónico Sur, desde donde descienden lenguas glaciares y aguas de fusión que descargan a los lagos Viedma y Argentino. La subcuenca del lago Viedma tiene un área de aproximadamente 7.100 Km² aportando al lago Argentino a través del río La Leona, totalizando 16.850 km² hasta la estación de mediciones de Charles Fuhr (CHF).

Dentro de la cuenca superior, su sector occidental constituye la porción hidrológica más activa de la cuenca. Luego, el tramo medio e inferior de la cuenca hasta el Océano Atlántico, tiene escasa a nula actividad hidrológica (en términos relativos).

El río Santa Cruz presenta caudales medios máximos a fines del verano y principios de otoño (marzo) y mínimos en el mes de septiembre.

El lago Viedma se ubica a una cota de 250 mIGN y ocupa una superficie de 1.100 km². En su extremo norte recibe el aporte del río de las Vueltas, siendo el glaciar Viedma (575 km²) el más importante entre los que aportan a este lago. El lago Viedma descarga a través del río La Leona, el cual nace en el extremo sureste del mismo y desemboca en el lago Argentino (ingresa al noreste del mismo).

El lago Argentino ocupa una superficie aproximada de 1.380 km². Por el oeste del mismo se divide en brazos que reciben aguas de fusión de diferentes glaciares. El brazo norte recibe, entre

otros, aportes de los glaciares Upsala, Onelli y Spegazzini. El glaciar Upsala es el más extenso con una superficie de 595 km². Hacia el sur del cuerpo principal del lago Argentino se desarrolla el canal de los Témpanos que se vincula a su vez con el brazo Rico (ver Figura 3.4). En esta vinculación tiene particular relevancia el glaciar Perito Moreno (250 km²), con una altura de unos 60 m sobre el nivel del lago y que provoca por su avance, ocasionales cierres de las aguas del brazo Rico, impidiendo que fluyan hacia el canal de los Témpanos y posteriormente al lago Argentino.

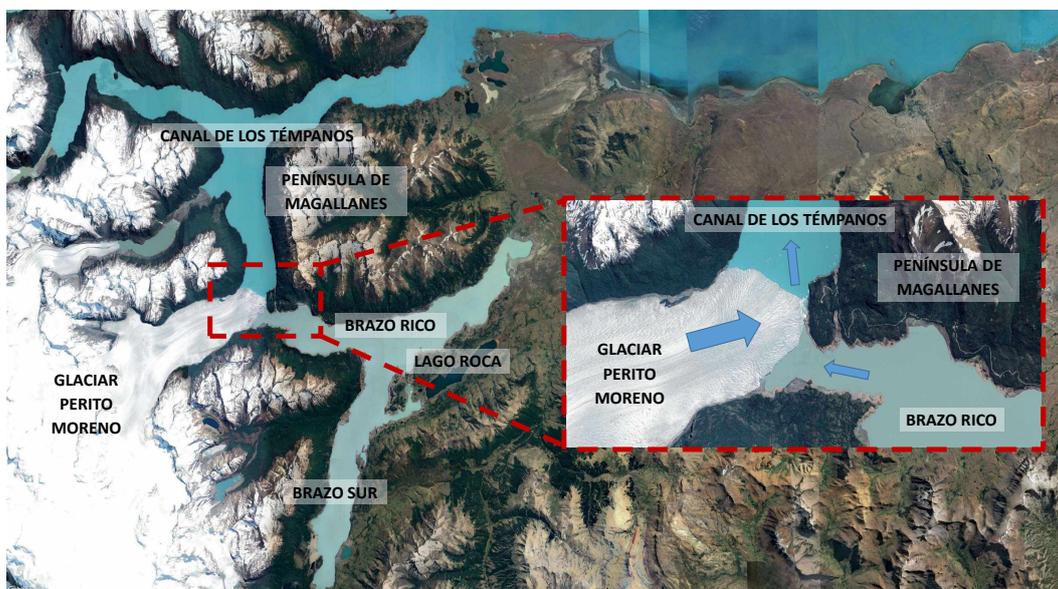


Figura 3.4: Sector sur del lago Argentino.

En dichas ocasiones, la descarga del brazo Rico queda obstruida por el hielo glaciario, hasta que el desnivel hidráulico (junto con otros factores propios del movimiento glaciario) provoca la rotura del cierre (en general formando un túnel por debajo del glaciar, cuyo frente se desmorona tiempo después). Este fenómeno se produce de manera irregular, y los registros indican que se tuvieron hasta 16 años sin acontecimientos, así como períodos con cierres en años consecutivos. Teniendo en cuenta la irregularidad mencionada, en los últimos 60 años se tuvo 1 evento de cierre relevante cada 4 años en promedio. Se menciona que el primer cierre documentado data de 1917.

Un hecho relacionado al punto anterior y de relevancia en fenómenos de crecidas extremas, es la existencia de un límite físico a la magnitud de la acumulación máxima de agua en el lago Rico. Esto es ocasionado por los niveles topográficos del sector noreste del lago, donde a partir de cota 207,5 mIGN existe un desborde hacia una zona de bajos que finalmente aportarían al río Centinela y posteriormente al lago Argentino. Este hecho se analiza en detalle en el punto 5.2.

También por la margen norte y sur, el lago Argentino recibe diversos afluentes, aunque de menores aportes relativos (arroyo Las Horquetas, río Centinela, arroyo Calafate, el arroyo de los Perros, etc.).

A efectos de una primera caracterización, en la Tabla 3.1 se presentan caudales medios anuales ($Q_{med.}$) y caudales específicos (q) para las estaciones de medición en el período común de información disponible (1992/93 – 2018/19).

Río	Estación nombre	Q_{med} [m ³ /s]	Área [Km ²]	q [lts/s/Km ²]
Santa Cruz	Charles Fuhr (CHF)	754,1	16.853	44,7
Centinela	RP70 (CENT)	4,2	706	5,9
Mitre	RN11 (MITR)	4,7	140	33,5
La Leona	La Leona (LLEO)	273,2	7.098	38,5
De las Vueltas	Parque Nac. Los Glaciares (PNG)	51,1	983	52,0

Tabla 3.1: Caudales anuales específicos (1992/93 – 2018/19).

La estación La Leona (LLEO), que mide las descargas del lago Viedma, presenta un caudal específico de 38,5 lts/s/Km², mientras que en CHF se tienen 44,7 lts/s/Km². Haciendo una relación entre los caudales específicos y las áreas de aporte, se tendría en la subcuenca propia del lago Argentino (9.755 km²) un caudal específico de 49,3 lts/s/Km².

Por ende, la subcuenca correspondiente al lago Argentino ha tenido mayor producción de excedentes hídricos respecto a la subcuenca del lago Viedma, en el período analizado.

A su vez, dentro de la subcuenca del lago Argentino se tienen mediciones en 2 sitios. En el río Centinela, cuya cuenca se desarrolla al sur y oeste de la localidad de El Calafate (con una altura media de 844 mIGN), la cual presenta una baja producción hídrica relativa, de 5,9 lts/s/Km². Por otro lado, la cuenca del río Mitre, ubicada al oeste de la cuenca anterior a mayor altura media (983 mIGN), con un caudal específico de 33,5 lts/s/Km². Este río aporta al lago Rico por su extremo noreste.

En la medida que la cuenca se desarrolla más hacia el oeste, y a mayor altura media, es esperable un aumento en el caudal específico.

Respecto a las características topográficas y de suelos superficiales, se menciona que en la alta cuenca se presentan altas pendientes, características de la zona cordillerana, con presencia de roca en superficie en un alto porcentaje en los sectores no ocupados por los hielos permanentes.

Asimismo, se observa un incremento de vegetación en sentido este – oeste, aunque limitada en altura de acuerdo a los sectores con habitual presencia de nieve / hielo. Hacia el este, se despliega la estepa patagónica.

La Figura 3.5 muestra la evolución de los caudales medios mensuales en las estaciones: río de Las Vueltas en Parque Nacional Los Glaciares (PNG), río La Leona en La Leona (LLEO), Centinela en RP70 (CENT), Mitre en RN11 (MITR) y Santa Cruz en Charles Fuhr (CHF), en el período común de información (1992/93 a 2018/2019).

Las estaciones de PNG, CENT y MITR se representan en el eje de ordenadas de la derecha, magnificando su escala. Las estaciones CENT y MITR con bajos aportes relativos muestran valores máximos en octubre – noviembre. La estación PNG tiene sus caudales máximos en enero – febrero. Por otro lado, las descargas medias máximas del lago Viedma en LLEO se dan

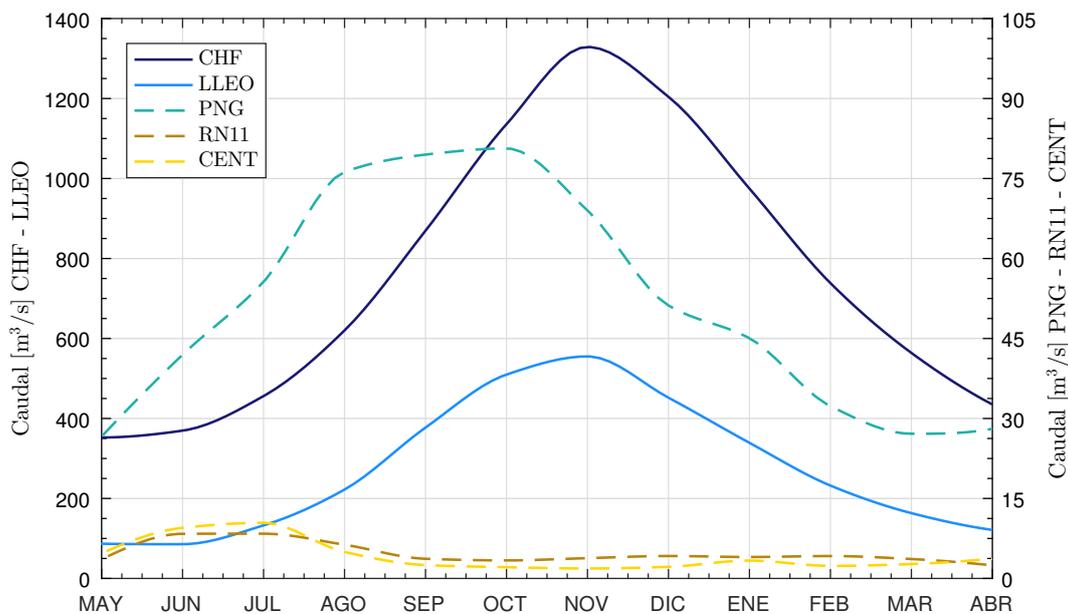


Figura 3.5: Evolución de caudales medio mensuales a lo largo del año en la cuenca superior río Santa Cruz.

en marzo al igual que las descargas totales en CHF.

Los ríos Mitre y Centinela no reciben aportes de cuerpos de hielo, sus caudales máximos en octubre –noviembre, son fundamentalmente motivados por el derretimiento de nieve en la parte alta de sus cuencas.

Respecto a los mínimos medios, también se observan diferencias. Los valores más bajos en CENT se tienen en el mes de marzo, en MITR en agosto. En PNG el caudal medio mínimo se da en setiembre y a la salida del lago Viedma en LLEO en octubre. La combinación de los aportes de las diferentes subcuencas que integran el lago Argentino, hacen que los mínimos se tengan en setiembre en CHF.

En este período, los caudales anuales del río La Leona aportaron un 36% de los caudales observados en CHF, mientras que los caudales de los ríos Centinela y Mitre significaron un 1,2% de los caudales anuales en CHF, en conjunto.

Los caudales medios que escurren por el río Santa Cruz evidencian un marcado período de aguas altas al final del verano y principios del otoño. Así el régimen hídrico del derrame del río Santa Cruz puede ser caracterizado como fuertemente estacional, unimodal, producto de la alimentación correspondiente al derretimiento de hielo (aporte de glaciares), la fusión nival y las lluvias, todo ello combinado con los almacenamientos lacustres.

Finalmente, respecto al comportamiento de caudales mensuales se transcribe lo expresado por IANIGLA (2017), “las variaciones interanuales del caudal mensual del Río Santa Cruz están relacionadas con las variaciones de temperatura y precipitación a lo largo del año. Durante los meses de verano y comienzo del otoño (enero – abril), las variaciones del caudal están mayormente afectadas por la temperatura. Es muy probable que la relación directa entre temperatura

y caudal refleje el proceso de derretimiento de la nieve y la ablación de los cuerpos de hielo en los sectores altos de la cuenca y en el Campo de Hielo. Durante los meses de invierno, la contribución de la nieve y el derretimiento de glaciares son menores o nulos por efecto de las bajas temperaturas. Allí, la precipitación líquida en los sectores más bajos de la cuenca alcanza mayor significancia y contribuye a la variabilidad interanual de los caudales mensuales del Río Santa Cruz. Si bien estos procesos de derretimiento de la nieve y la fusión del hielo pueden introducir cierto retraso en relación al caudal emergente, la presencia de dos grandes lagos refuerza este retraso, de tal forma que las variaciones en el caudal parecen estar influenciadas por las condiciones climáticas no solo en el mismo momento, sino hasta 2-3 meses previos.”

En relación a la importancia del aporte de glaciares, IANIGLA (2017) indica que el 36 % del caudal medio anual del río Santa Cruz en CHF (2000-2012) proviene de los mismos.

Como expresión notable a los efectos del cambio climático, se indica el retroceso generalizado de los cuerpos de hielo a escala global, indicando IANIGLA (2017):

“Se prevé que la recesión de los glaciares continúe a lo largo del siglo XXI en respuesta al Calentamiento Climático (Radic’ y Hock, 2011)”

“Puede tomar varias décadas para que un glaciar ajuste su extensión a un cambio instantáneo del clima, por lo que se estima que la mayoría de los glaciares son actualmente más grandes de lo que serían si estuvieran en equilibrio con el clima actual. Debido a que el tiempo requerido para el ajuste aumenta con el tamaño de los glaciares, los glaciares más grandes continuarán reduciéndose durante las próximas décadas, incluso si las temperaturas se estabilizan. Los glaciares más pequeños también seguirán reduciéndose, pero ajustarán su extensión más rápidamente y es posible que algunos desaparezcan por completo.”

“En muchas cuencas hidrográficas parcialmente cubiertas por cuerpos de hielo, como la del Río Santa Cruz, la recesión de los glaciares impulsada por el calentamiento climático podría conducir a patrones complejos en la respuesta del régimen hidrológico en el tiempo. A medida que el clima se calienta, se espera que la escorrentía aumente inicialmente como resultado de mayores tasas de ablación, sin embargo, el área de los glaciares eventualmente se irá reduciendo a un punto donde la escorrentía podría disminuir posteriormente (Huss et al., 2008; Lambrecht y Mayer, 2009; Moore et al., 2009; Baraer et al., 2012). La intensificación de la fusión del hielo, así como el aumento de la duración de la estación de fusión de los glaciares, conduce en primer lugar a un aumento de la escorrentía y descarga de los ríos, mientras que en el largo plazo (de décadas a siglos) se espera que la escorrentía alimentada por los glaciares disminuya (Jansson et al., 2003)”

“Sin embargo, revisiones climáticas focalizadas en los Andes Patagónicos del Sur son prácticamente inexistentes. Esto muy probablemente obedezca a que la región es muy remota y despoblada, y en consecuencia, existe una gran escasez de datos meteorológicos.”

IANIGLA (2017) menciona que el Campo de Hielo Patagónico Sur ha perdido en promedio 0,96

m agua equivalente al año entre 1968-1975 y 2000 (Rignot et al., 2003) y 1,8 m agua equivalente al año, entre 2000 y 2012 (Willis et al., 2012). Adoptando 3.000 Km² de la superficie de la cuenca superior del río Santa Cruz cubierta por glaciares se tendrían 171 m³/s promedio aportados por los mismos, entre 2000 y 2012.

Asimismo, indica que en 39 glaciares que tienen información del RSC (2.641 km² o 88% de la superficie en el año 2000), la pérdida de masa anual media es de 6,5 km³, lo que equivale a un 28% del derrame anual del RSC en el mismo período (2000-2012). La mayoría los glaciares existentes en la cuenca superior del río Santa Cruz han experimentado pérdida de espesor, siendo muy relevante la disminución del espesor en el glaciar Upsala.

Capítulo 4

BREVE SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES CRECIDAS

Las crecidas que se generan en la cuenca del río Santa Cruz son el producto de diferentes fenómenos físico – hidrológicos. Los mismos se encuentran asociados a la magnitud de la cuenca, que abarca zonas de distintas características climáticas y geomorfológicas, con un régimen con fuerte componente del aporte de derretimiento de glaciares, nieve y presencia de precipitaciones. A todo ello se adiciona el impacto del desembalse abrupto que tiene ocasionalmente el lago Rico debido al fenómeno de rotura del cierre provocado por el glaciar Perito Moreno (GPM) en su vinculación al lago Argentino (aportes del embalse generado en lago Rico), y la amortiguación de esta onda en el lago Argentino, configurando las mayores crecidas registradas en la serie observada del río Santa Cruz.

En estas crecidas el tiempo entre el momento de rotura del cierre de hielo y el momento en que se produce el caudal máximo en el río Santa Cruz, es variable y dependiente del tipo de rotura, volumen embalsado en el lago Rico, nivel del lago Argentino al momento de la rotura, aportes de otros tributarios, etc. Los registros comparativos disponibles entre los desniveles abruptos en el lago Rico y caudales máximos en Charles Fuhr muestran diferencias temporales entre 1 y 4 días (crecidas de 1966, 2004, 2006, 2016, 2018).

Entre las mayores crecidas registradas en CHF, se presentan en las Figura 4.1 a Figura 4.5 las crecidas correspondientes a los años 1988, 1980, 1966, 1963 y 2018. Se presentan los hidrogramas registrados en el río Santa Cruz en CHF, y cuando se dispone, caudales en el río La Leona en LLEO, a efectos comparativos. En todas estas crecidas el efecto dominante es el caudal producto del desembalse rápido del lago Rico o rotura del dique de hielo del GPM, superpuesta con la onda de crecidas normales del río.

En la Figura 4.1 se observa un detalle de la crecida de febrero de 1988, la mayor crecida registrada en el río, con un caudal máximo de $2.520 \text{ m}^3/\text{s}$ en CHF (19/02/88). Los caudales al inicio de la crecida tenían un valor de $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$, incrementándose $1.445 \text{ m}^3/\text{s}$ a causa de la rotura

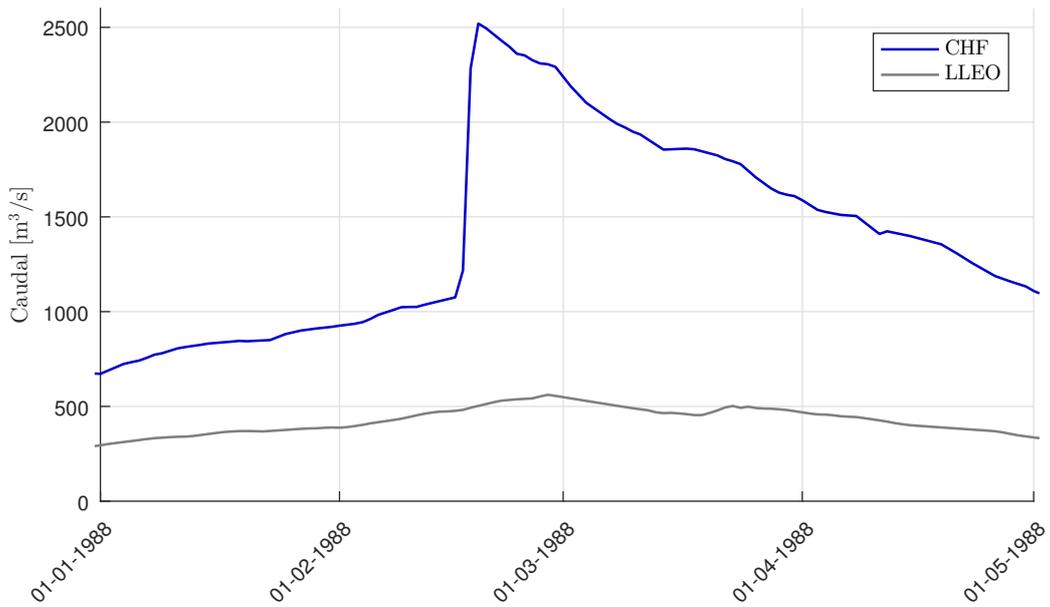


Figura 4.1: Crecida 1988

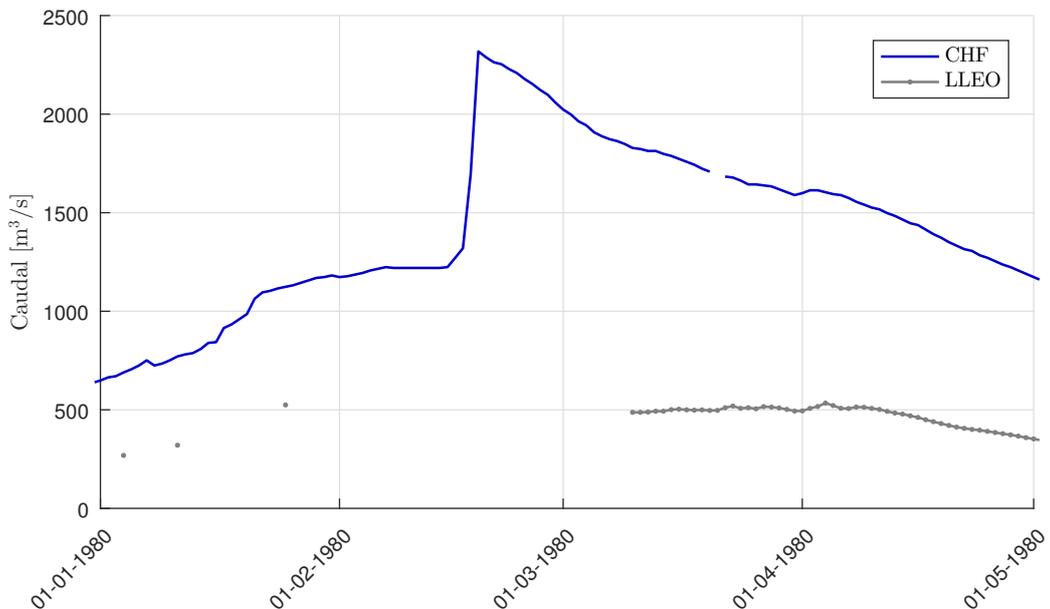


Figura 4.2: Crecida 1980

producida en el frente del glaciar Perito Moreno, la cual se registró el 17/02/88.

En igual fecha a la anterior, pero en el año 1980, se produce una crecida para la cual se registró un caudal pico de 2.318 m³/s en CHF (19/02/80), incrementándose los caudales en 1.095 m³/s a causa de la rotura del frente del GPM, la cual se registró el 15/02/80 (Figura 4.2)

El tercer caudal máximo presente en la serie de mediciones en CHF se presentó en febrero de 1966, en la cual se tuvo un caudal de 2.257 m³/s (28/02/63). Al inicio de la crecida se tiene un caudal de 945 m³/s, incrementándose 1.312 m³/s a causa de la rotura, la cual se registró el 26/02/63, produciéndose un descenso de niveles de 21,53 m en el lago Rico en 2 días, y 20,23 m en tan solo 1 día. Se acompañan en la Figura 4.3 los aforos puntuales desarrollados durante este proceso de crecida, lo cual permite dar adecuada consistencia a los caudales informados

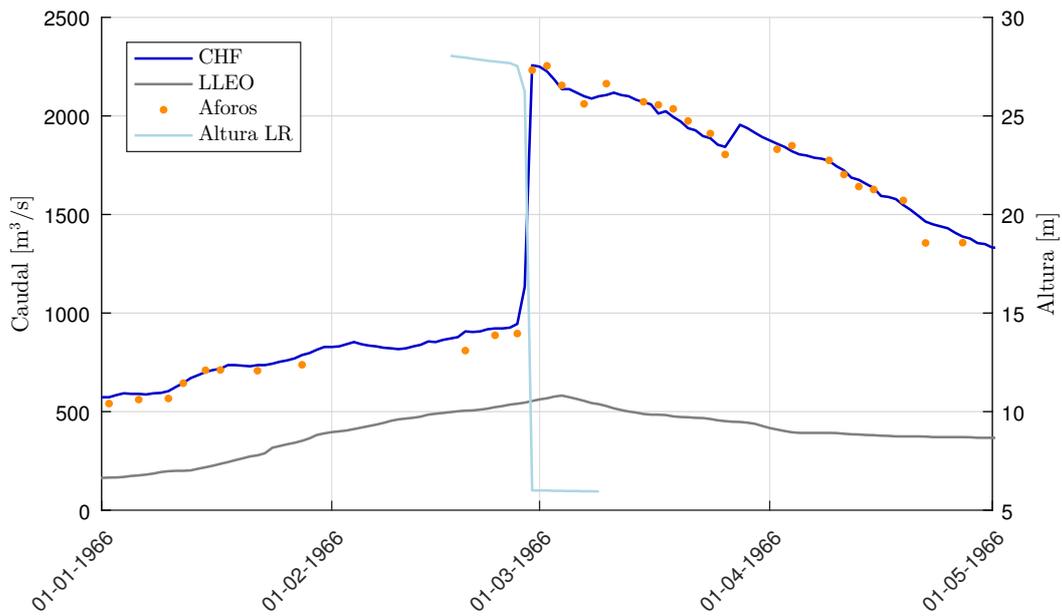


Figura 4.3: Crecida 1966

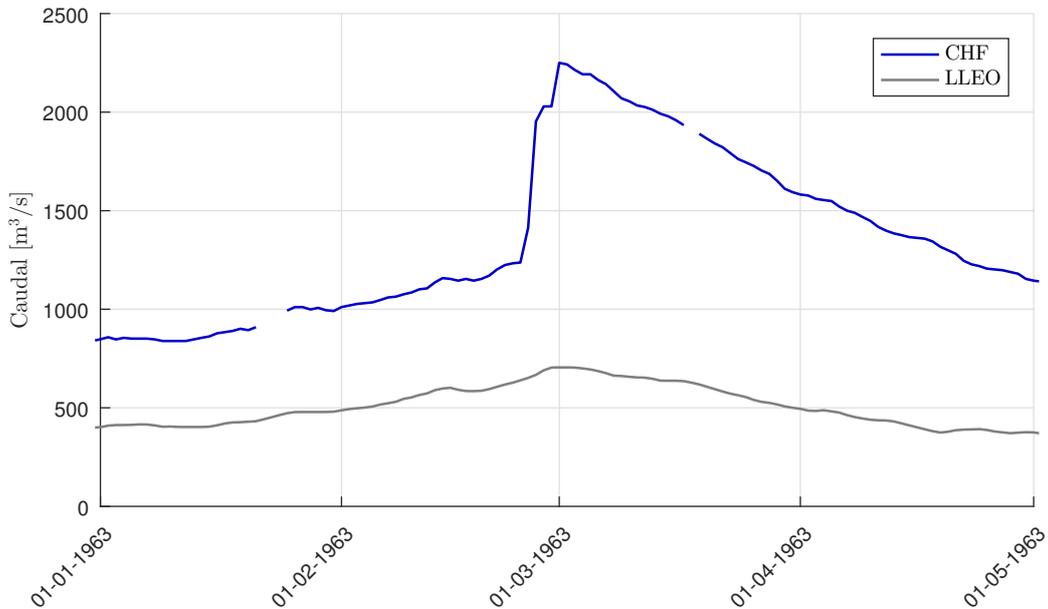


Figura 4.4: Crecida 1963

para la misma.

También, en 1963 se registró otra crecida relevante por rotura del frente del glaciar, en la cual se tuvo un caudal de 2.250 m³/s en CHF (01/03/63). La crecida se inicia a partir de un caudal de 1.237 m³/s, incrementándose en 1.013 m³/s a causa de la rotura, la cual se registró el 24/02/63 produciéndose un descenso de niveles de 13,5 m en el lago Rico en 1 día (Figura 4.4)

En la Figura 4.5 se presenta la crecida más reciente, de marzo de 2018, donde se presentan además los niveles de agua en la escala de brazo Rico (LRIC) y en lago Argentino (CAL). El 10/03/18 comienza a producirse la rotura del frente del glaciar, disminuyendo los niveles de agua 9,8 m en 3 días en lago Rico. Este fue el mayor desembalse del lago Rico desde 1993 a la actualidad. En lago Argentino (CAL) los niveles se incrementan 1,1 m, registrándose un incremento de caudales

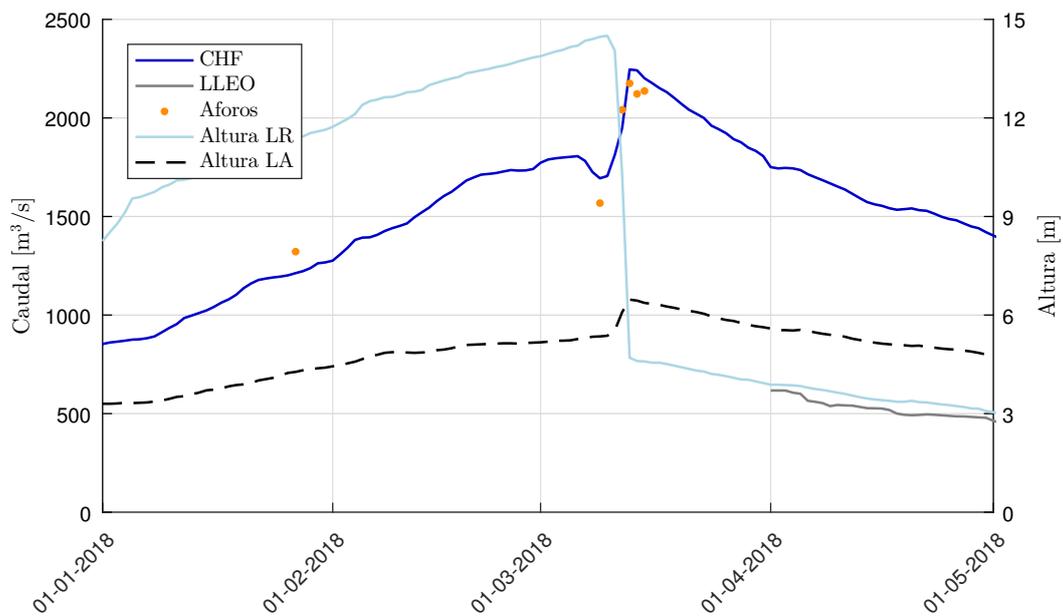


Figura 4.5: Crecida 2018

en CHF de $547 \text{ m}^3/\text{s}$. Teniendo en cuenta que en esta crecida solo se dispone de niveles (la SIPH no informó caudales), los mismos se obtuvieron con la relación $h-Q_{CHF}$ sugerida en el estudio de Lara (2016). En la Figura 4.5 se acompañan aforos disponibles que permiten darle consistencia a los caudales calculados.

Se hace notar que no necesariamente un evento de rotura ocasiona un caudal máximo anual, ya que ello depende de la magnitud del volumen desembalsado y tiempo en el cual se desarrolla, estado de niveles en lago Argentino y aportes desde las otras fuentes. Como ejemplo de ello se tiene la rotura del 04/07/2008, donde se produjo una disminución de niveles en el lago Rico de 7,1 m en 3 días. Los niveles en lago Argentino que se encontraban en 3,0 m, ascendieron 0,6 m; y el caudal en CHF solamente ascendió $187 \text{ m}^3/\text{s}$, llegando solo a $800 \text{ m}^3/\text{s}$.

En relación a los caudales máximos de crecidas “ordinarias”, utilizando esta denominación para las crecidas producidas en años donde no se desarrollan desembalses rápidos por rotura del cierre del glaciar Perito Moreno, el mayor valor corresponde al año 2009 con $1.808 \text{ m}^3/\text{s}$. Estas crecidas (sin rotura) se produjeron en un 80 % de las veces en el mes de marzo, siguiéndole un 16 % en abril, y un 4 % en febrero, dentro del período normal de crecimiento del río. Aunque el efecto de desembalse por rotura del cierre del glaciar Perito Moreno puede provocar fenómenos de crecidas en períodos diferentes, la mayoría de los caudales pico de la serie se obtuvieron en el mes de marzo.

Capítulo 5

ANÁLISIS DE EVENTOS DE APERTURA DE BRECHA ENTRE EL GLACIAR PERITO MORENO Y LA PENÍNSULA DE MAGALLANES

5.1. Caracterización de los eventos

5.1.1. Características generales

Como se mencionó en capítulos anteriores, la cuenca del río Santa Cruz nace en la Cordillera de los Andes, incluyendo en su cuenca alta un importante sector del Campo de Hielo Patagónico Sur. De este campo de hielo se desprenden glaciares de descarga, cuyos frentes entran en contacto con los lagos Viedma y Argentino.

Uno de los glaciares que forma parte de la cuenca del río Santa Cruz es el Perito Moreno que, a diferencia de la mayoría de los glaciares patagónicos, que se encuentran en proceso de retroceso y disminución de su espesor, tiene un comportamiento estable.

El frente del glaciar Perito Moreno presenta un ciclo oscilatorio estacional de avance (junio – diciembre) y retracción (diciembre – abril). En algunos años, durante el semiperíodo de avance, el frente del glaciar alcanza el extremo oeste de la península de Magallanes, formando un dique de hielo que represa el lago Rico. La descarga hacia el canal de los Témpanos se ve impedida, debido a que la base del glaciar apoya sobre el sustrato rocoso, y continúan los aportes al lago Rico, por lo que su nivel de agua aumenta progresivamente, alcanzando a superar por varios metros el nivel medio del lago Argentino. En un determinado momento este dique de hielo pierda

estanqueidad y se producen filtraciones en el cierre. Como resultado de esta situación, el agua del lago Rico comienza a trasvasar progresivamente hacia el canal de los Témpanos. En primer lugar el escurrimiento se produce en el contacto basal entre el lecho rocoso y el glaciar y, posteriormente, a medida que la energía disipada por el agua que fluye incrementa la ablación del hielo circundante, a través de un túnel, cuyo techo finalmente colapsa. De esta manera se origina un canal a través del cual se produce un flujo marcado de agua desde el brazo embalsado hacia el canal de los Témpanos. Este fenómeno puede tener una corta duración, en general 2 a 3 días, provocando un desembalse rápido del lago Rico. El desembalse, comúnmente denominado rotura del glaciar Perito Moreno, da lugar a una onda de crecida que eleva los niveles del lago Argentino y produce un aumento perceptible en el régimen de descarga del río Santa Cruz.

En la Figura 5.1 se muestra en forma esquemática el cierre del glaciar Perito Moreno contra la península de Magallanes y el posterior proceso de apertura de brecha entre ambos.

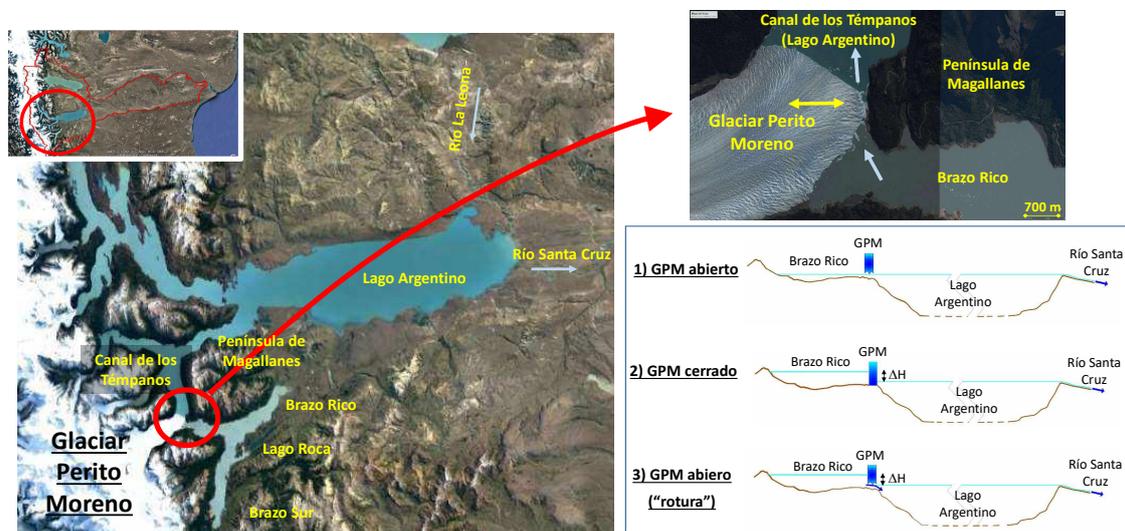


Figura 5.1: Proceso de cierre del glaciar Perito Moreno contra la península de Magallanes.

Según los represamientos registrados, la columna de agua acumulada nunca ha sobrepasado la altura del frente de hielo en la parte terminal del glaciar. Existe además una cota de pelo de agua máxima que podría alcanzar el lago Rico, a partir de la cual éste desborda hacia el lago Argentino por el sector noreste del brazo Rico, imponiendo un límite físico superior al volumen retenido y por lo tanto también a la magnitud del evento de desembalse (ver 5.2).

Este fenómeno se produce en promedio una vez cada 4 años, considerando los registros de los últimos 60 años. Sin embargo, la frecuencia de ocurrencia no es fija, por ejemplo, existen períodos en los que se registraron cierres en años consecutivos y otros de hasta 16 años en los que no se produce el cierre del pasaje entre el glaciar Perito Moreno y la península de Magallanes. Asimismo, existen cierres y consecuentes roturas cuya influencia en los caudales del río Santa Cruz resulta poco significativa, tanto por el bajo desnivel logrado entre los lagos Rico y Argentino y/o porque se han producido con niveles muy bajos del lago Argentino.

Este proceso singular que presenta el glaciar Perito Moreno ha sido motivo de numerosos estudios a lo largo de décadas (Volpi, 1940; Feruglio, 1944; Heim, 1951; Nichols y Miller, 1952;

Heinsheimer, 1954; Liss, 1970; Bertone, 1972; Stuefer, 1999; entre otros). Se destaca, por ejemplo, el trabajo presentado por Nichols y Miller (1952) donde se detalla por primera vez el proceso de rotura que sufre el glaciar (Figura 5.2).

Este evento de rotura del dique de hielo es la razón por la cual el glaciar Perito Moreno es destino turístico a escala internacional.

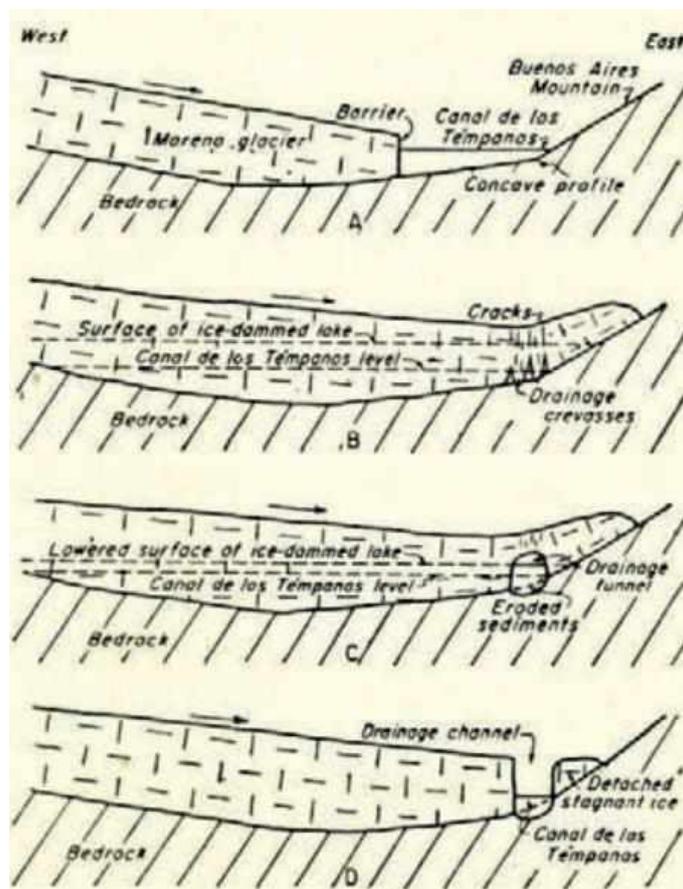


Figura 5.2: Bocetos esquemáticos del proceso de rotura: avance del frente del glaciar Perito Moreno, formación del dique de hielo, y drenaje, primero a través de grietas en el contacto entre el glaciar y el lecho rocoso, luego a través del túnel formado en el hielo y finalmente a través de un canal (Nichols y Miller, 1952).

5.1.2. Causas de la ocurrencia del cierre

La formación y duración de los diques de hielo están fuertemente vinculadas a las oscilaciones del glaciar Perito Moreno. Hasta el presente no ha podido establecerse con certeza cuáles son las causas de la estabilidad del GPM y de su movimiento oscilatorio. Lannutti et al. (2020), en su estudio acerca de la dinámica del proceso de formación de diques de hielo del glaciar Perito Moreno, indican que el control principal del proceso de oscilación está relacionado con las tasas de ablación en el frente del glaciar, condicionadas por la interacción entre el glaciar, la península de Magallanes y el flujo de agua desde el brazo Rico hacia el lago Argentino.

Según Malagnino (2008), una de las causas del avance del glaciar Perito Moreno se relaciona con la circulación basal del agua de ablación. Ésta se produce en la superficie del glaciar, expuesta a

la incidencia directa de los rayos solares, y en su tránsito se infiltra en las fracturas que presenta el bloque de hielo hasta el contacto entre su base y el sustrato rocoso, lubricando esta interfase y promoviendo periódicos reavances.

Este avance se ve limitado por el mismo acercamiento del frente del glaciar a la península de Magallanes, ya que el estrechamiento de la zona de pasaje de agua desde el brazo Rico hacia el canal de los Témpanos provoca un aumento en la velocidad del flujo de descarga que eleva la tasa de ablación en el frente del glaciar. Entonces, se producirá un cierre completo del canal siempre que el equilibrio entre el avance del glaciar Perito Moreno y la ablación en su frente durante el proceso de aproximación permanezca positivo. Una vez formado el dique de hielo, la velocidad del flujo de agua disminuye tendiendo a cero y por lo tanto la ablación se reduce significativamente, favoreciendo el llenado del brazo Rico.

La magnitud del avance del glaciar Perito Moreno no sólo determina si el cierre se produce o no, sino también las características que tendrán las roturas, ya que es un factor decisivo en la robustez del dique de hielo. Los fuertes avances generan cierres robustos que pueden resistir grandes diferencias de nivel entre el brazo Rico y el canal de los Témpanos y cuyas roturas dan lugar a desembalses repentinos con caudales pico importantes que generan un aumento marcado de la ablación y por lo tanto un retroceso abrupto del frente del glaciar. Estos eventos se caracterizan por desniveles entre los lagos previos a la rotura mayores a 5 m, aumentos en la descarga del río Santa Cruz de cientos de m^3/s y descargas que duran pocos días. Cuando la magnitud del avance del glaciar no es lo suficientemente grande como para generar cierres robustos, éstos no son capaces de almacenar suficiente energía potencial y los desembalses no presentan caudales importantes. Roturas de este tipo tienen desniveles menores a 3 m y los aumentos de los caudales del río Santa Cruz son casi imperceptibles. Casi todas las roturas del glaciar Perito Moreno pueden incluirse en el primer caso, excepto las del año 2013, que son ejemplos del segundo tipo de comportamiento (Lannutti et al. 2020). Asimismo, es probable que existan otros cierres de significancia menor que no se encuentren debidamente documentados.

5.1.3. Impacto hidrológico de las roturas

Interesa analizar el notorio impacto que los eventos de rotura y desembalse tienen sobre el nivel del lago Argentino y los derrames del río Santa Cruz. Para ello, se cuenta con registros de los niveles del brazo Rico y el lago Argentino, y de los caudales del río Santa Cruz. En las Figura 5.3 a Figura 5.5 se presentan estos registros desde el año 2003 hasta la actualidad.

Se observa que los niveles en el lago Rico experimentan una marcada elevación desde que se produce el cierre del canal hasta que comienza el evento de desembalse y rotura, que da lugar a súbitos aumentos del nivel del lago Argentino y el caudal del río Santa Cruz.

Si se analizan en detalle los eventos particulares (ver Anexo C), es posible detectar cómo estos aumentos se producen casi simultáneamente con el descenso del nivel en el brazo Rico. Cuando

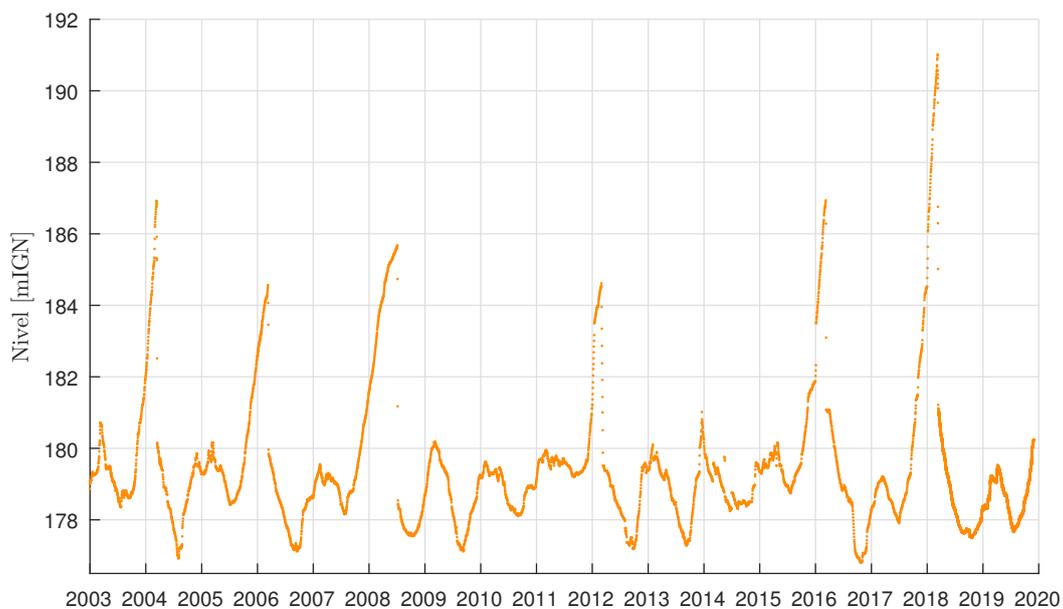


Figura 5.3: Niveles del brazo Rico registrados en la estación LRIC (SIPH).

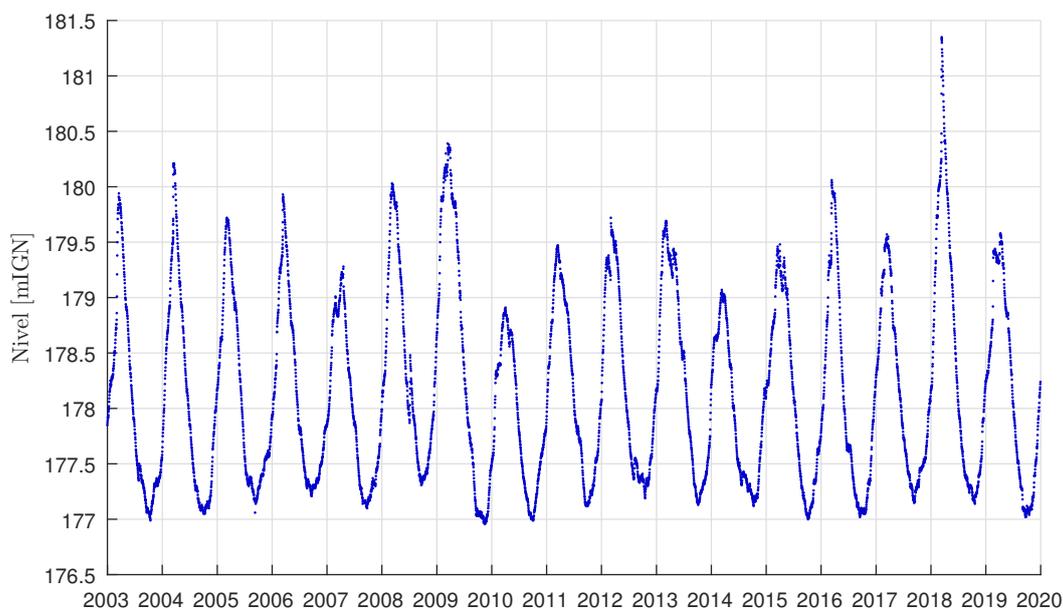


Figura 5.4: Niveles del lago Argentino registrados en la estación CAL (SIPH).

se detectan las primeras filtraciones, los niveles del brazo Rico comienzan a descender y los del lago Argentino a elevarse lentamente, al igual que los caudales registrados en Charles Fuhr. Luego se observa un aumento en la pendiente de elevación de los niveles del lago Argentino, indicando que la pérdida de masa del dique de hielo se ha intensificado, formándose el túnel que conecta ambos lagos y, consecuentemente, el “puente de hielo” que aún vincula el frente del glaciar con la península de Magallanes. En este período, ya se ha establecido un flujo marcado de agua desde el lago Rico hacia el lago Argentino y aguas abajo comienza a notarse una marcada onda de crecida. Como se observa en la Figura 5.6, finalizado el desembalse del lago Rico, se anula la diferencia de nivel entre éste y el lago Argentino, comportándose como un único gran lago.

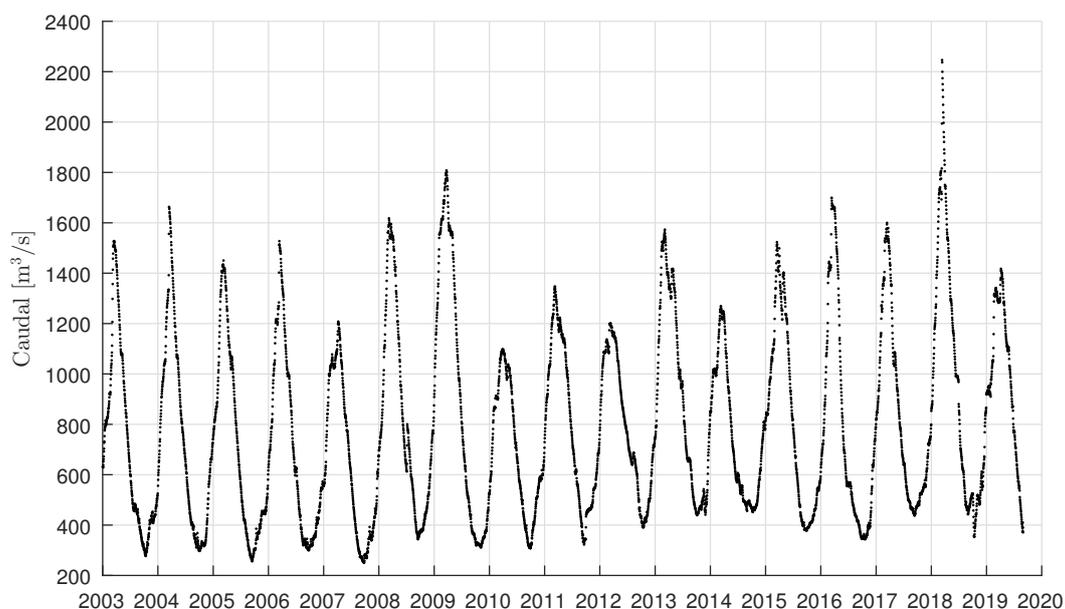


Figura 5.5: Caudales del río Santa Cruz registrados en la estación CHF (SIPH).

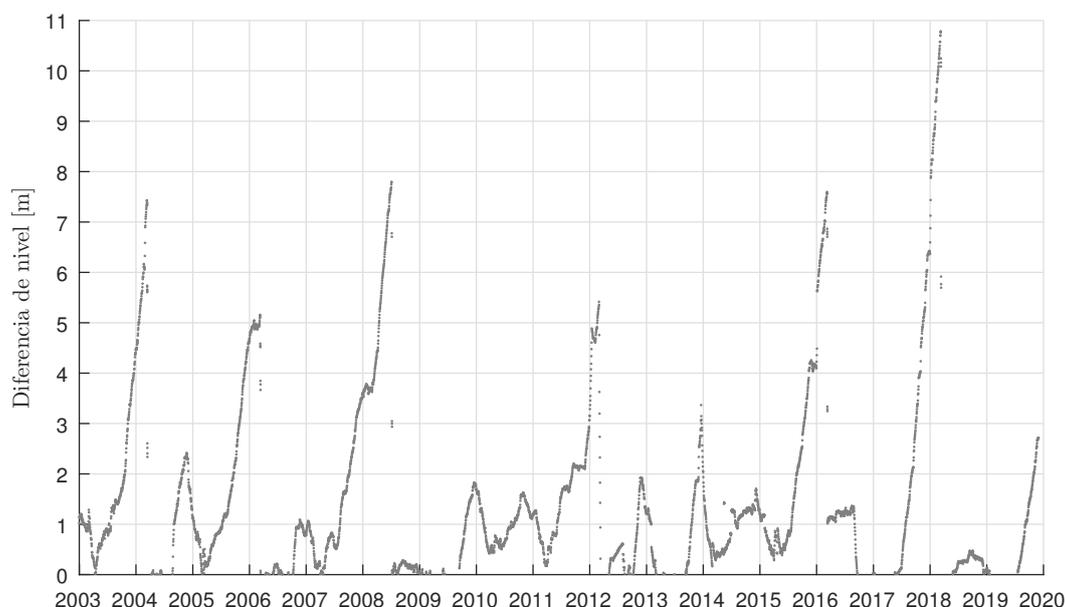


Figura 5.6: Diferencia de nivel entre el brazo Rico y el lago Argentino, a partir de los registros de las estaciones LRIC y CAL, desde 2003 hasta la actualidad.

El retorno al comportamiento hidrológico “normal” de los niveles del lago Argentino y la descarga del río no se limita a los días que dure el desembalse, como ocurre en el lago Rico, sino que la influencia del súbito aporte hídrico puede extenderse varios meses, en función de la magnitud del evento.

A partir del gráfico de la Figura 5.7 se puede realizar la comparación entre el hidrograma registrado en la estación Charles Fuhr para el período de la rotura del año 2004 y dos hidrogramas que representan el comportamiento que hubiese tenido la descarga del río Santa Cruz si no se hubiese producido el evento de desembalse rápido del lago Rico. Estos hidrogramas se determinan en base a dos criterios diferentes: uno consiste en asumir que el caudal se mantiene constante

durante todo el período de influencia de la rotura e igual al que se presentó cuando el evento de desembalse comenzó a influir en los niveles del lago Argentino (truncado horizontal); y el otro se basa en obtener los caudales que se hubiesen presentado en Charles Fuhr a partir de una regresión entre éstos y los caudales registrados en el río La Leona.

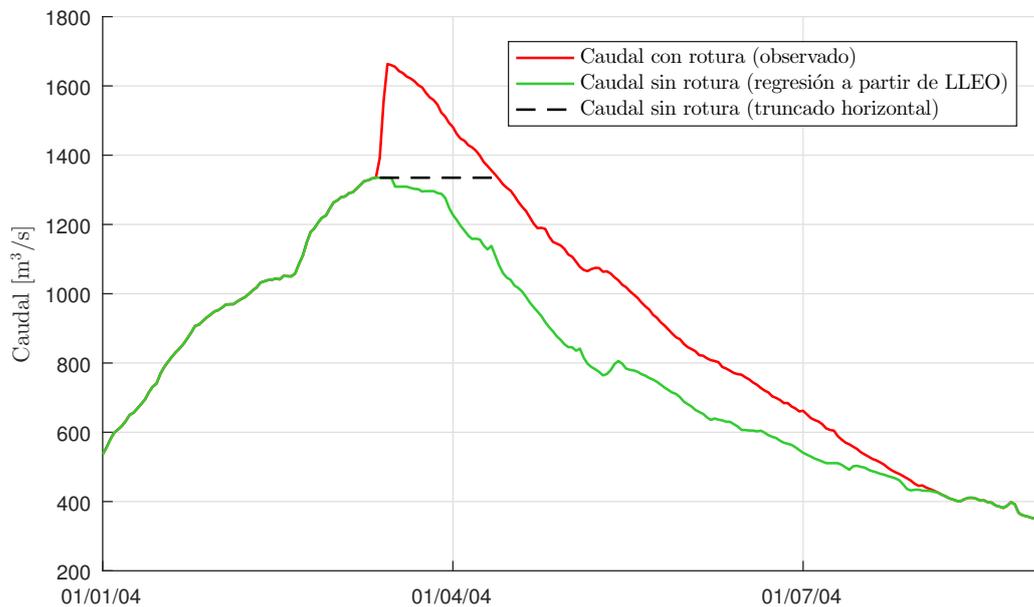


Figura 5.7: Hidrogramas en el río Santa Cruz considerando y sin considerar la influencia del evento de desembalse rápido del año 2004.

Considerando el truncado horizontal del hidrograma, la influencia de la rotura en los caudales del río Santa Cruz se evidencia como mínimo durante un período de aproximadamente un mes, extendiéndose este lapso a casi cinco meses si la comparación se realiza con el hidrograma sin rotura resultante de la correlación con los caudales de La Leona.

A partir de la serie anual de caudales máximos ($Q_{\text{max. anual}}$) en Charles Fuhr (Figura 5.8), se observa que de los veintidós caudales diarios máximos anuales que superan el medio, catorce se deben a eventos de rotura y los ocho restantes se atribuyen a años hidrológicamente ricos que dieron lugar a niveles importantes del lago Argentino y consecuentemente caudales en el río Santa Cruz que lograron superar la descarga máxima media.

Se destaca que los picos de caudal debidos a las roturas son los que más apartamiento presentan del comportamiento medio de los eventos máximos anuales. Esto se debe a que la descarga del río Santa Cruz puede llegar a duplicarse debido a la influencia de los eventos de desembalse rápido del lago Rico (ver Figura 4.1 y Figura 4.3).

De esta manera se demuestra la importancia de estos fenómenos que ocurren en el extremo opuesto del lago Argentino (magnitud de los caudales liberados en el evento de desembalse rápido del lago Rico) al momento de realizar cualquier análisis estadístico de caudales del río Santa Cruz y en cualquier plan de manejo de los mismos.

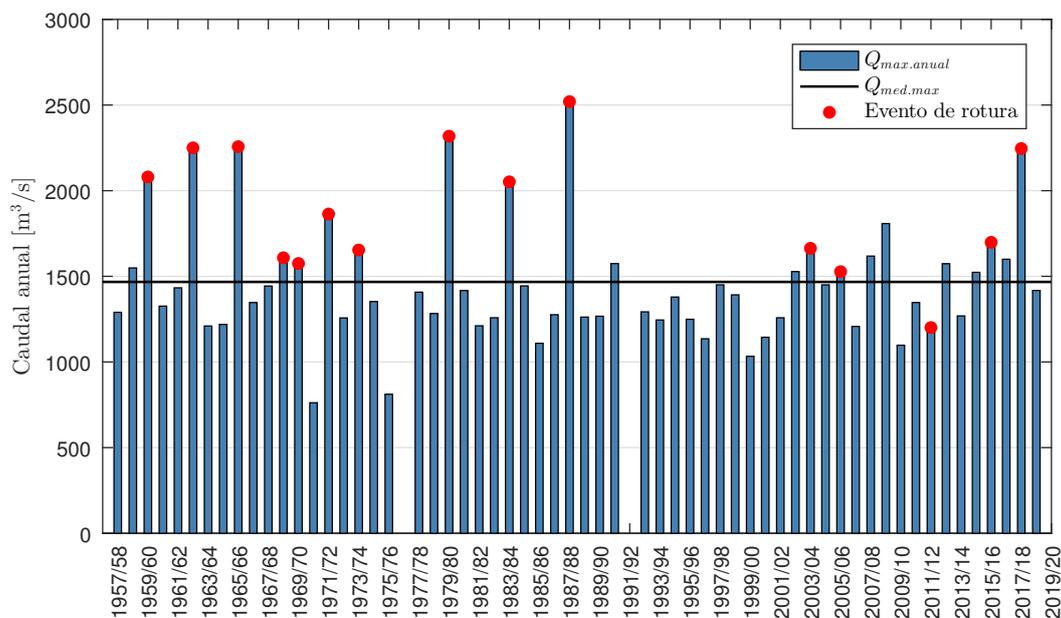


Figura 5.8: Caudales máximos anuales desde el año hidrológico 1957/58 hasta el 2018/19. Se identifican en el gráfico el valor medio de la serie de caudales máximos y los eventos de rotura.

5.2. Curva cota – volumen lago Rico. Límite físico a la capacidad de retención

El cierre del glaciar Perito Moreno sobre la península de Magallanes deja desvinculado al lago Rico del resto de la cuenca del lago Argentino. El volumen de agua almacenado en este sistema lacustre durante todo el período que se encuentra cerrado el lago constituye el factor más importante en la generación de los eventos de rotura, en la magnitud de los caudales descargados durante los desembalses rápidos.

En consecuencia, el conocimiento del volumen acumulado en el lago Rico en función de la altura topográfica resulta de suma importancia a los efectos de cuantificar los caudales producidos por las roturas del glaciar Perito Moreno. La Figura 5.9 muestra la curva cota – volumen del lago Rico obtenida a partir del modelo de elevación MDE-Ar 2.0 del IGN y de imágenes satelitales Landsat 8. En el Anexo D se detalla el procesamiento realizado para la obtención de esta curva.

A continuación, se presenta la regresión que vincula el volumen almacenado en el lago Rico en función de la cota IGN:

$$V_{LR} = 78,905 (N_{LR} - 176,50)^{1,224} \quad 176,50 \leq N_{LR} \leq 211,00 \quad (5.1)$$

Donde, N_{LR} es la cota del nivel de agua en el lago Rico vinculada al Sistema de Referencia Vertical Nacional del año 1971 (SRVN71) y V_{LR} es el volumen almacenado en lago Rico en Hm^3 .

La topografía de la zona muestra un sector de desborde del lago Rico hacia el noreste lo que limita el volumen que este sistema lacustre es capaz de retener y, por lo tanto, un límite físico a

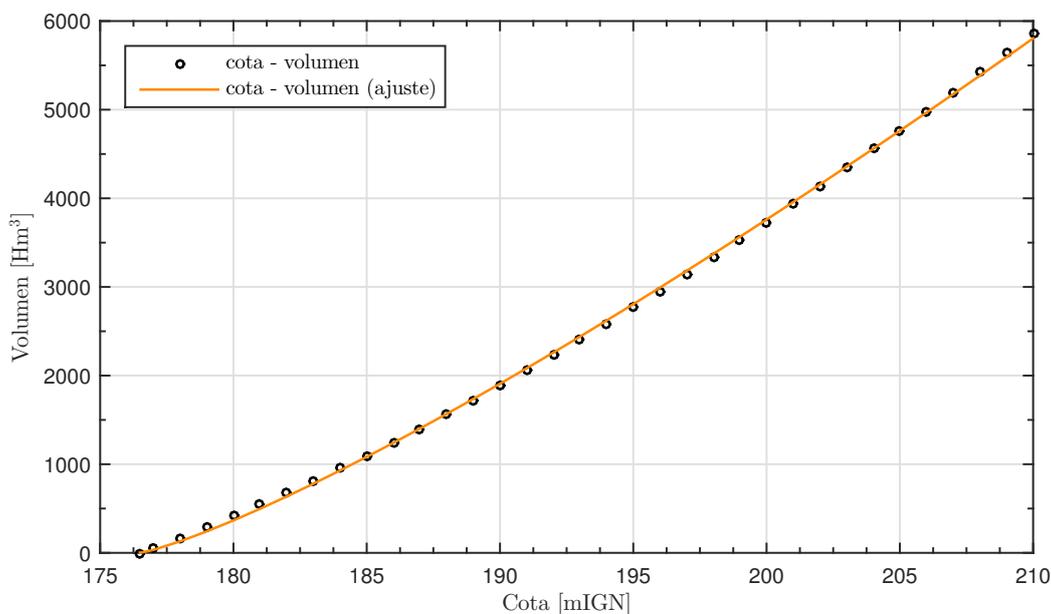


Figura 5.9: Curva cota - volumen del lago Rico (por encima de cota 176,5 mIGN).

la magnitud del evento de desembalse que podría presentarse. Para poder definir esta cota de desborde se realizó una campaña topográfica que arrojó como resultado una cota máxima de 207,5 m respecto al SRVN71.

En la Figura 5.10 se muestra la zona de desborde del lago Rico, el relevamiento topográfico llevado adelante para definir las cotas de este sector y el perfil longitudinal obtenido a partir del relevamiento.

A partir del límite físico impuesto por las condiciones topográficas en el extremo noreste del lago Rico, se realizó un análisis hidráulico del comportamiento de estos desbordes y su relación con los niveles del lago. Para este fin se utilizaron los perfiles topográficos relevados durante la campaña efectuada en mayo 2021 y modelaciones hidráulicas en régimen permanente con el modelo HEC-RAS v. 5.0.7, del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

La Figura 5.11 presenta, sobre la planimetría del área de desbordes, los perfiles transversales disponibles; resaltándose la zona donde se tienen las cotas mínimas.

Existe un tramo de aproximadamente 800 m con cotas de fondo muy similares (207,5 mIGN), lo cual se aprecia en la Figura 5.12 que muestra el perfil longitudinal representativo del fondo del cauce.

Luego del punto límite de desborde hay un aumento de pendiente del fondo, en forma suave en los primeros 800 m y luego con pendiente del 0,74 % hasta alcanzar cota 201 mIGN a unos 15 Km de lago Argentino, a través de un afluente del río Centinela y por el propio río en su tramo final antes de llegar al lago.

En la Figura 5.12 se muestran simulaciones en régimen permanente para caudales de 5 m³/s y 100 m³/s.

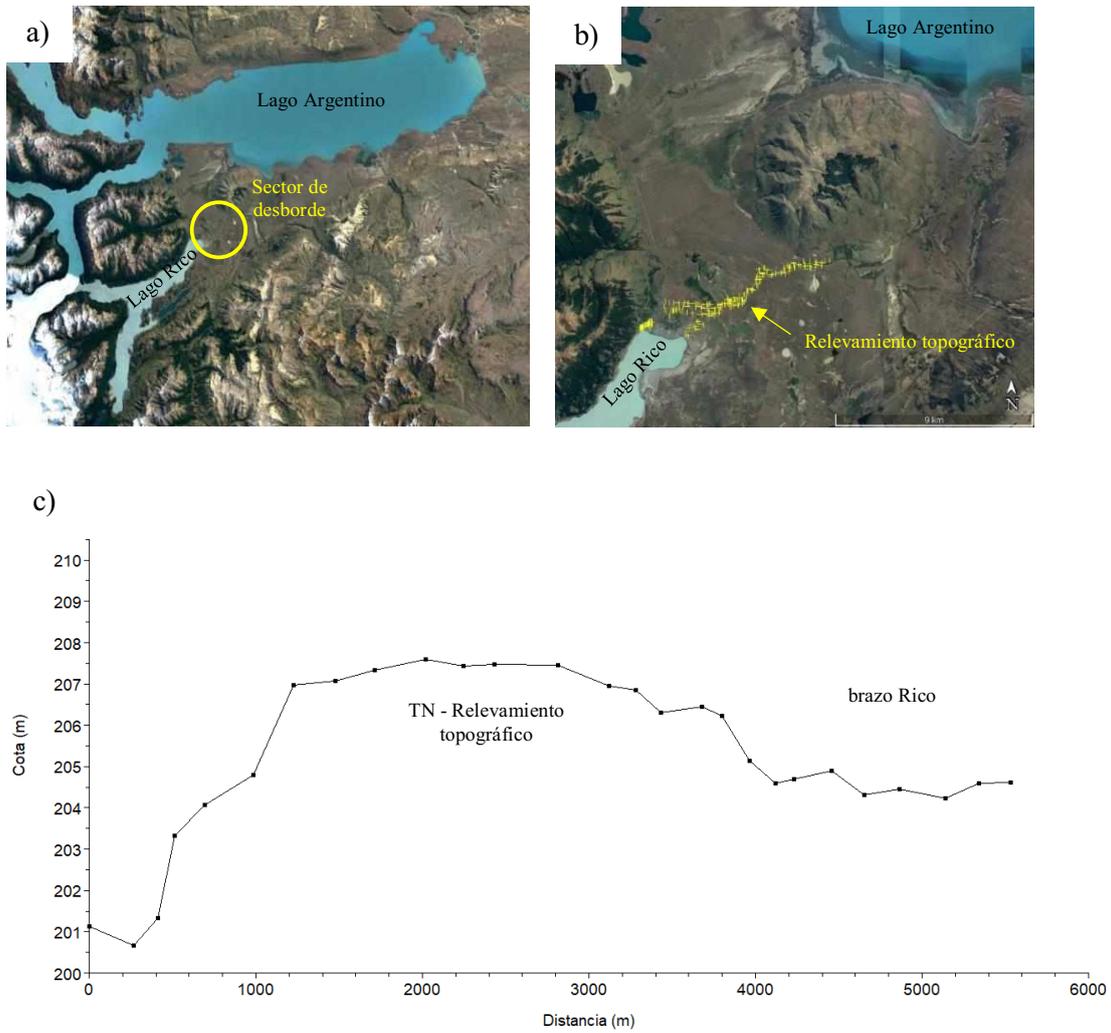


Figura 5.10: a) Zona de desborde del lago Rico; b) detalle del relevamiento topográfico; c) perfil longitudinal del sector de desborde.



Figura 5.11: Área de desbordes y perfiles transversales relevados.

Si bien las cotas mínimas detectadas sobre esta área de posibles desbordes resultan de 207,5 mIGN, hasta no alcanzar una cota de 208 mIGN en lago Rico prácticamente no existirían caudales de desborde; notar que con cota 208 mIGN en lago Rico se tendría un desborde de 5 m³/s.

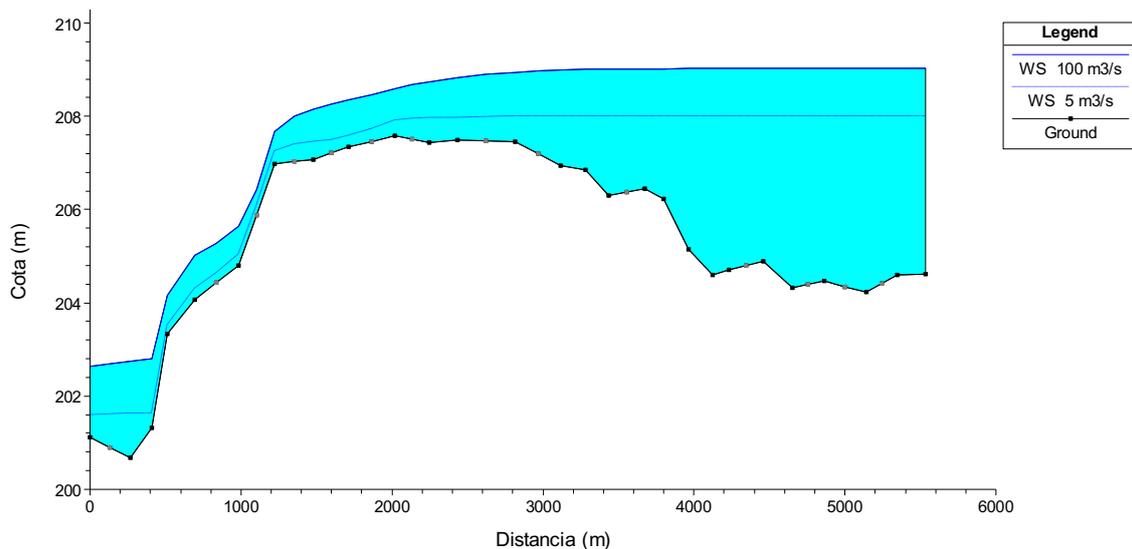


Figura 5.12: Perfil Longitudinal desborde lago Rico.

La Figura 5.13 muestra una sección transversal relevada, donde se aprecia un ancho total de unos 250 m. Para un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ se alcanzaría un ancho de 150 m, con velocidad media de $0,7 \text{ m/s}$.

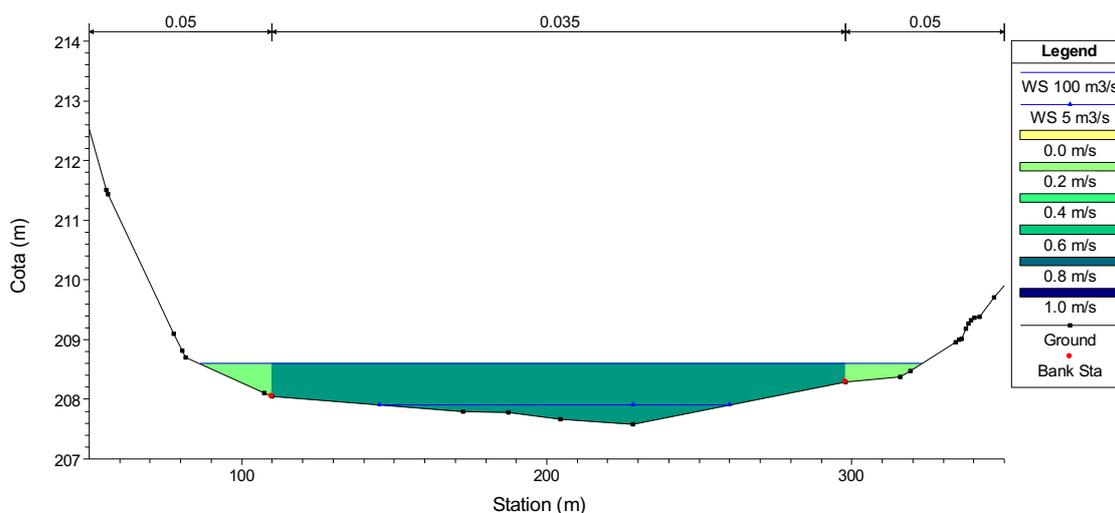


Figura 5.13: Sección transversal área de desbordes.

A partir de este modelo, se puede obtener la relación cota lago Rico – caudal de desborde, la cual se acompaña en la Figura 5.14.

Los caudales afluentes a lago Rico tienen variación estacional, como se indica en Anexo E, con los máximos aportes en el período enero – febrero, con caudales medios mensuales entre 80 y $120 \text{ m}^3/\text{s}$. A su vez, en los eventos más importantes (1988, 1966) se necesitó más de un ciclo anual de escurrimiento para alcanzar los niveles máximos (sin llegar a cota de desborde).

En procura de encontrar un nivel máximo (cota) donde se alcance el equilibrio entre ingresos y egresos del lago Rico en una situación de cierre del glaciar Perito Moreno, en la que solamente hubiera egresos por desbordes, se realizaron simulaciones del comportamiento del lago considerando:

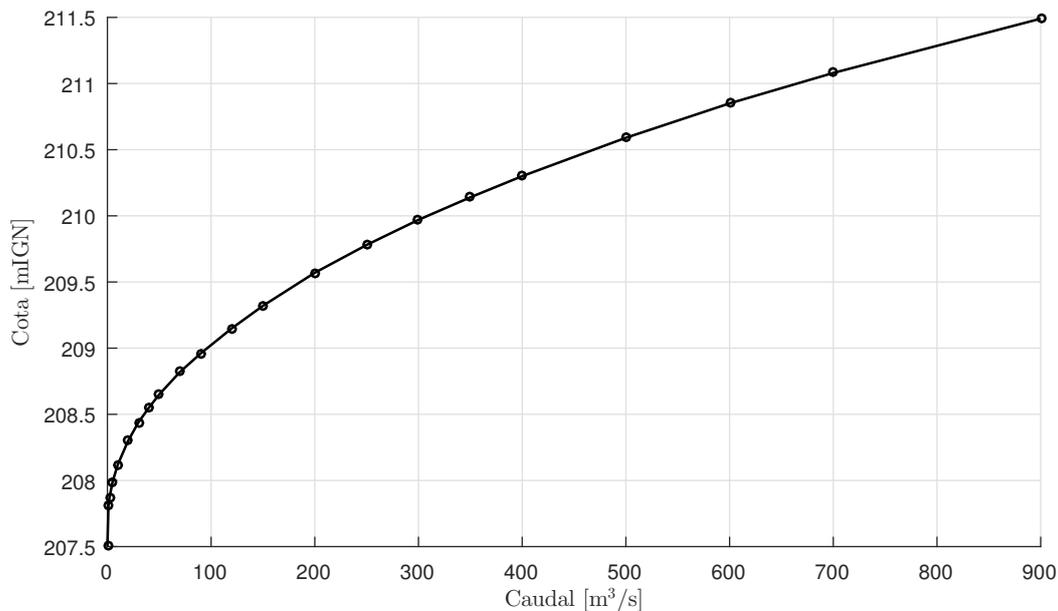


Figura 5.14: Relación cota lago Rico – caudal de desborde.

- caudales afluentes al lago Rico para el período del último cierre del glaciar Perito Moreno (junio 2017 a marzo 2018), deducidos de la ecuación de Balance Hidrológico del lago en función de la variación de niveles en el mismo;
- la relación cota – volumen del lago Rico (Figura 5.9);
- la relación cota lago Rico – caudal de desborde previamente indicada (Figura 5.14);
- diferentes condiciones iniciales del lago Rico.

La Figura 5.15 muestra un ejemplo de simulación del lago Rico, considerando que los caudales ingresantes al lago en el período de cierre del GPM 2017/18, se desarrollan a partir de una cota inicial del lago de 207 mIGN (cota que no ha sido alcanzada en la historia registrada, debe asumirse que han pasado prácticamente dos ciclos anuales con cierre del GPM para ello). La cota máxima alcanzada con esta suposición sería 209,5 mIGN.

La Figura 5.16 presenta resultados de cotas máximas alcanzadas variando la cota inicial del lago Rico. Se aprecia que a medida que los niveles iniciales aumentan, aumenta la cota máxima y los caudales máximos de desborde, pero tendiendo asintóticamente a un valor de cota 209,5 mIGN, aun poniendo la cota inicial del lago en cota de desborde.

5.3. Registro histórico de eventos de rotura

En la Tabla 5.1 se presenta el registro histórico de eventos de apertura de brecha entre el glaciar Perito Moreno y la península de Magallanes desde el año 1900 a la fecha, detallando:

- La fecha de inicio del desembalse rápido, según la bibliografía. La información que no posee

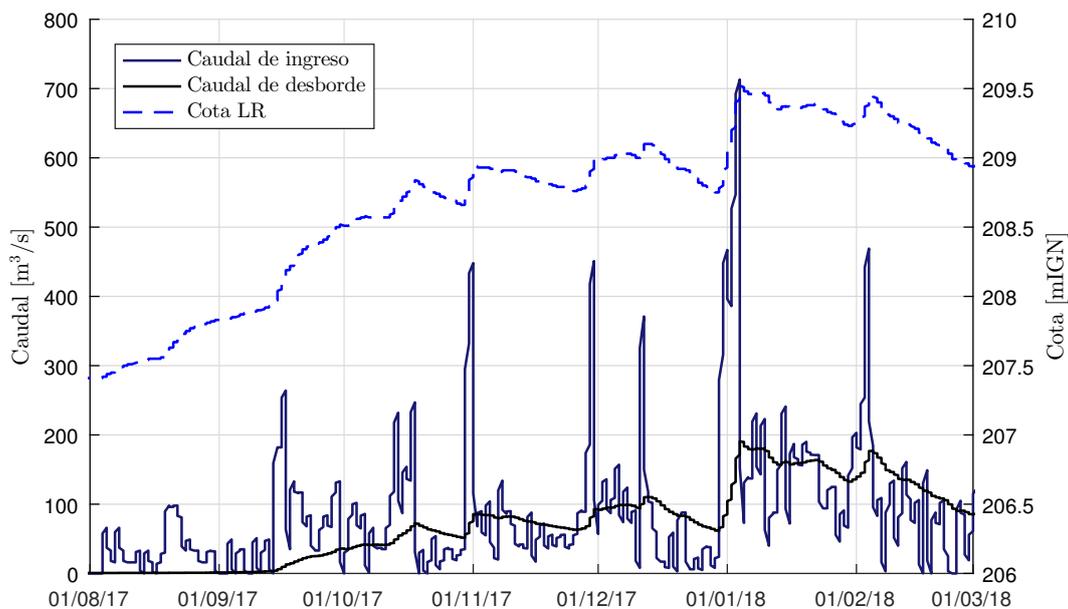


Figura 5.15: Simulación lago Rico. Situación de desborde – cota inicial 207 mIGN.

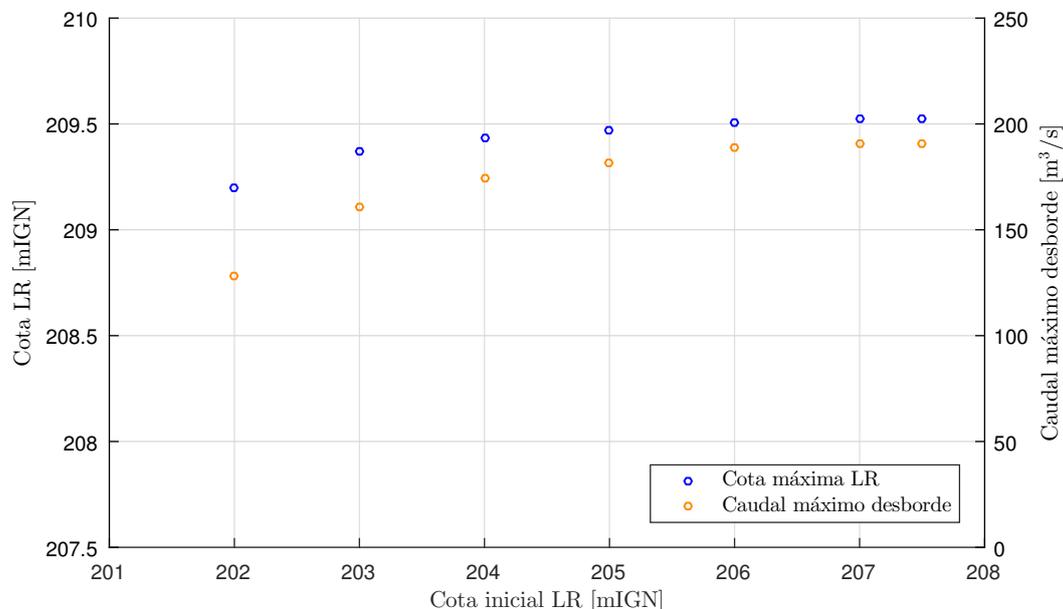


Figura 5.16: Relación cota lago Rico – caudal de desborde.

referencia es aquella en la que la bibliografía coincide.

- El desnivel del lago Rico y del lago Argentino entre el inicio y el fin del evento de desembalse (ΔH_{LR} y ΔH_{LA} , respectivamente), y el desnivel entre los lagos previo al inicio del desembalse (ΔH_{LR-LA}). Esta información fue obtenida a partir de los registros de alturas hidrométricas en las estaciones LRIC (SIPH), CAL (SIPH), Brazo Rico (SMN) y Puerto Irma (SMN), y de la revisión de antecedentes bibliográficos.
- El caudal máximo en el río Santa Cruz (Q_p) y el aumento del caudal respecto al que transitaba por el río en el momento que se inicia el evento de desembalse (ΔQ), obtenidos de los registros de caudales medios diarios en la estación Charles Fuhr (SIPH).
- El nivel alcanzado por el lago Rico según la bibliografía, sin información concreta acerca

del nivel de referencia tomado para realizar las mediciones.

- Fuente de información de los datos.

REGISTRO	Rotura			ΔH_{LR-LA} [m]	ΔH_{LR} [m]	Nivel alcanzado por el Lago Rico [m]	ΔH_{LA} [m]	Q_p [m ³ /s]
	Día	Mes	Año					
1			1917					
2			1934/1935					
3	17	Febrero	1940	4,61 ¹		9,0 ^{6,3} /10,5 ⁴ /11,5 ⁵		
4	19 ⁷ /20 ^{5,6} /21 ⁴	Marzo	1942			13,44 ³ /14,9 ⁵ /17 ⁶		
5	Primeros días de ⁸	Diciembre ^{5,8} /Primavera ⁴	1947	2,61 ^{4,5}		8,0 ⁸		
6	3 o 4 ⁷	Marzo	1949			30,0 ⁷		
7	2	Marzo	1952	9,52	8,12	11,3 ⁹ /12,7 ⁵	0,93**	
8	30	Marzo	1953	10,95	9,65	14,4 ⁵ /12,85 ⁵ /11 ⁹	0,89**	
9	14	Septiembre	1956			26,7 ⁴ /26 ⁹		
10	10	Octubre	"	24,46		23 ¹⁰ /25,6 ⁴ /28 ⁷	2,63**	1162
11	15	Febrero	1960			13,1 ⁴		1915
12	31 ⁴ /4 ¹¹	Marzo	"			11,6 ⁴		2080
13	25	Febrero	1963			15,7 ⁴		2250
14	10	Febrero	1966			28,4 ⁴		
15	25 ⁴	"	"		21,53	27,0 ⁴		2257
16		Marzo	1969		10,00			1608
17		Marzo ¹¹	1970					1575
18	Primeros días de	Marzo	1972			28,0 ⁷ / 38,0 ⁸		1864
19	12	Abril	1974					1654
20		Febrero ¹¹	1975					1309
21			1977					
22	17	Febrero	1980					2318
23	13	Enero	1984		27,0 ⁷			2052
24	17	Febrero	1988	22,0 ¹²		19,0 ¹⁴ /27,0 ⁷ /21,6 ⁷		2520
25	14	Marzo	2004	7,43	6,80	9,35 ^{7,13}	0,72	1663
26	13	Marzo	2006	5,16	4,60	5,4 ¹⁵	0,56	1527
27	9 ^{7,16} / 4 ¹¹	Julio	2008	7,80	7,13	8,1 ¹⁵ /7,9 ⁷	0,57	800
28	3	Marzo	2012	5,42	5,10	5,8 ¹⁵ /5,93 ⁷	0,56	1199
29	19	Enero	2013	0,57	0,39	2,4 ¹⁵		
30	30	Diciembre	2013	3,37	0,20	3,7 ¹⁵		
31	10 ¹⁵ / 8	Marzo	2016	7,60	5,86	8,4 ¹⁵	0,68	1699
32	11	Marzo	2018	10,79	9,80		1,03	2270

¹ Volpi, 1940

² Feruglio, 1944

³ Heim, 1951

⁴ Liss, 1970

⁵ Raffo, Colqui y Madejski, 1953

⁶ Nichols y Miller, 1952

⁷ Guerrero, 2014

⁸ Bertone, 1972

⁹ Heinsheimer, 1954

¹⁰ Mercer, 1968

¹¹ Registros de la SIPH

¹² Diario La Nación (1988)

¹³ Skvarca, 2002

¹⁴ Stuefer, 1999

¹⁵ Lenzano et al., 2018

¹⁶ Aniya y Skvarca, 1992

¹⁷ Depetris y Pasquini, 2000

" Roturas que se han producido en dos etapas.

* Ascenso del nivel del lago Rico desde que se ha producido el cierre.

** Los niveles del lago Argentino se registraron en la estación la Puerto Irma, no en la estación El Calafate (SIPH). La cota del cero de la escala de la estación Puerto Irma es de 176,5 m.

El caudal en el río Santa Cruz para el año 2018 se obtiene de Charles Fuhr (ecuación de Lara, 2016)

Tabla 5.1: Registro histórico de eventos de apertura de brecha entre el glaciar Perito Moreno y la península de Magallanes.

En Anexo C se presentan una versión más completa de la Tabla 5.1, una recopilación y análisis detallado de cada una de las roturas con las que se cuenta registro.

A continuación, se resumen los puntos más importantes del análisis realizado:

- Se destacan como eventos extraordinarios la rotura del año 1988 (Figura 4.1), la cual originó el máximo caudal en la estación Charles Fhur en los 60 años de registro ($2.520 \text{ m}^3/\text{s}$), y la de 1966 (Figura 4.3), que dio lugar a un desnivel en el lago Rico de 21,5 m (el mayor hasta el momento con registros sistemáticos) y un caudal pico en el río Santa Cruz de $2.257 \text{ m}^3/\text{s}$. La rotura del año 1984 presenta un desnivel en el lago Rico de 27 m, mayor al registrado en el evento del año 1966, pero la medición no proviene de un registro sistemático sino que se obtuvo de Guerrido (2014): “Después de la ruptura en enero de 1984, el guardaparque Jannes, junto con el agrimensor de Parques Nacionales señor Custeau, midieron la cota mínima del agua en la margen Sur del Brazo Rico y subieron por la roca desnuda hasta la cota máxima obteniendo una altura de desnivel de 27 m frente al glaciar (Jannes, entrevista N° 8).”
- En cuanto a la duración de los desembalses (que se obtiene del análisis de los registros de niveles del lago Rico en los períodos de las roturas), la gran mayoría ocurre en un período de entre 2 y 3 días, con excepción de los desembalses del año 2004, cuya duración se extiende a 4 días, y del año 2012, en la cual el nivel del lago Rico toma alrededor de 11 días en estabilizarse.
- En la Figura 5.17 se resumen en una línea de tiempo los eventos de desembalse rápido desde el año 1900 hasta la fecha con la indicación del aumento del desnivel del lago Rico registrado en la estación LRIC para los casos en los que se dispone de esta información, y a la izquierda, el aumento de caudal registrado en la estación Charles Fuhr para cada uno.

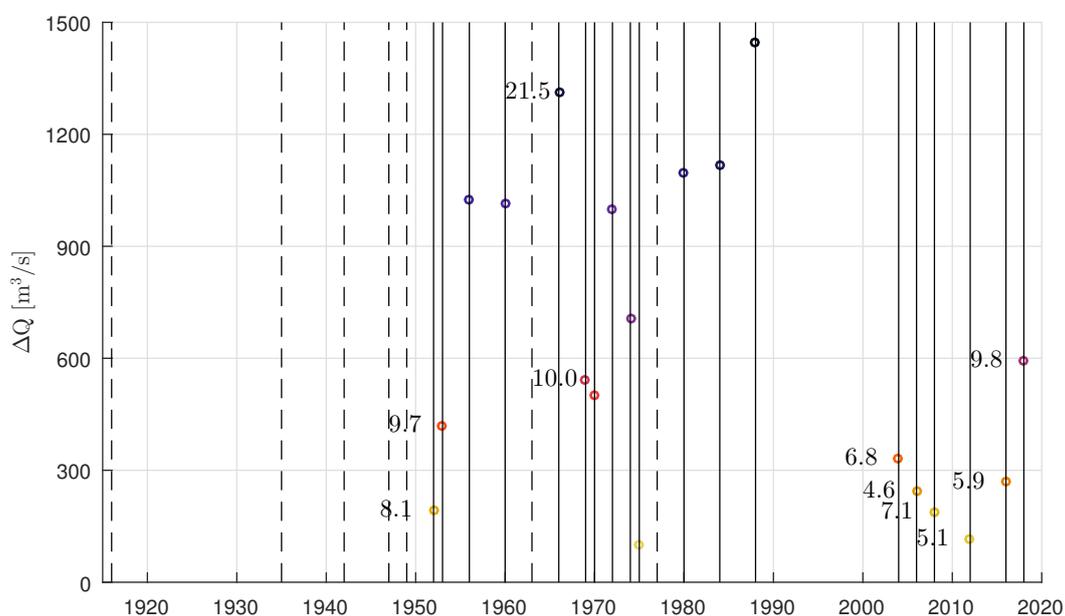


Figura 5.17: Línea de tiempo de los eventos de rotura registrados con el aumento de caudal en el río Santa Cruz provocado por los mismos y el desnivel del lago Rico entre el inicio y el fin del desembalse.

Se observa que los eventos de los años 1966 y 1988, destacados en el punto anterior, son los que dieron lugar al máximo aumento de caudal en el río Santa Cruz respecto al caudal que transitaba por el río previo al inicio del evento de desembalse rápido.

La figura también informa acerca de la frecuencia de ocurrencia de los eventos de rotura. Como ya se ha mencionado, este fenómeno se produce de manera irregular, con un promedio de un evento cada cuatro años en los últimos 60 años de registros.

- Se han registrado en total 27 eventos de desembalse rápido, y de 22 de ellos se tiene información acerca del mes en el que se han producido. En el gráfico de la Figura 5.18 se observa que en el 80 % de los casos los eventos de rotura ocurrieron durante los meses de febrero a marzo.

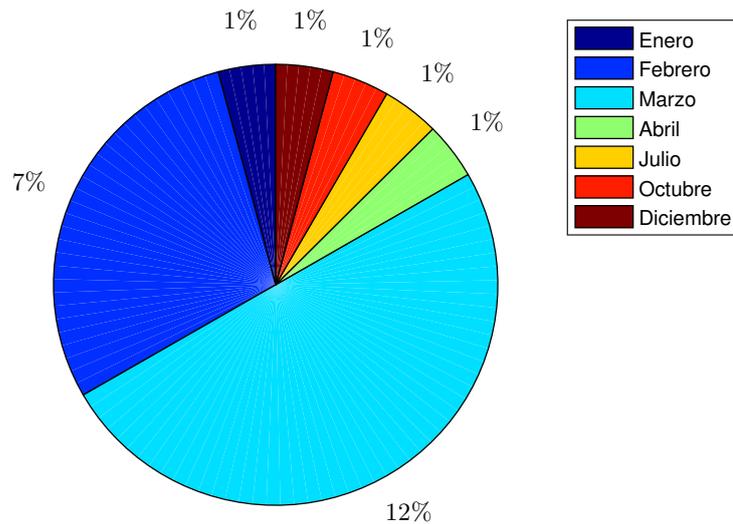


Figura 5.18: Porcentaje de eventos de rotura que se han producido en cada mes.

5.4. Modelo de simulación de operación de embalse

El análisis de la influencia del fenómeno de apertura de brecha entre el glaciar Perito Moreno y la península de Magallanes en la descarga del río Santa Cruz se aborda a partir de un modelo de simulación de operación de embalse, que permite reproducir el comportamiento de los niveles del lago Argentino y los caudales del río Santa Cruz frente al paso de la crecida provocada por el desembalse rápido del lago Rico.

A continuación, se presenta un esquema en planta (Figura 5.19) y un perfil (Figura 5.20) del modelo utilizado.

El modelo consiste en un único reservorio, que representa al lago Argentino, al cual ingresan caudales desde dos fuentes principales (los eventos de desembalse rápido del lago Rico y los aportes del resto de la cuenca del lago Argentino) y del cual egresan caudales a través del río Santa Cruz. El aporte de las precipitaciones es aproximadamente equivalente a la evaporación en el lago, por lo que este balance se considera nulo. Más adelante, se presenta en detalle cómo se obtiene cada uno de estos aportes y egresos al lago Argentino considerados en el modelo.

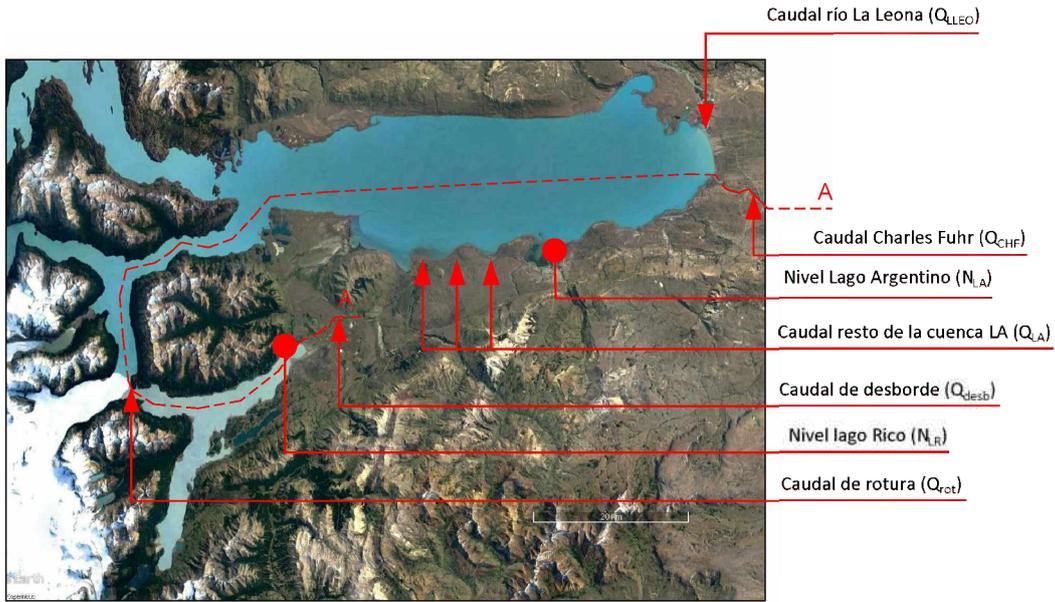


Figura 5.19: Esquema en planta del modelo de embalse utilizado para simular el paso de la crecida provocada por la apertura de brecha entre el glaciar Perito Moreno y la península de Magallanes.

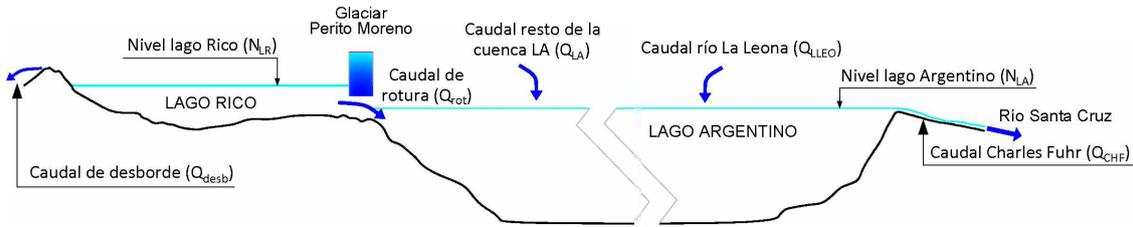


Figura 5.20: Esquema del perfil del modelo de embalse utilizado para simular el paso de la crecida provocada por la apertura de brecha entre el glaciar Perito Moreno y la península de Magallanes.

Se resuelve numéricamente la ecuación de conservación de la masa (continuidad), que realiza un balance entre los volúmenes que entran, los salientes y las variaciones que se producen en el reservorio:

$$\Delta V_{LA(t)} = V_{e_{LA}(t)} - V_{s_{LA}(t)} \quad (5.2)$$

Donde:

$V_{e_{LA}(t)}$: volumen entrante al lago Argentino en el intervalo Δt .

$V_{s_{LA}(t)}$: volumen saliente del lago Argentino en el intervalo Δt .

Los volúmenes se calculan como el producto entre los caudales y el intervalo de tiempo considerado:

$$V_{e_{LA}(t)} = Q_{e_{LA}(t)} \Delta t \quad (5.3)$$

$$V_{s_{LA}(t)} = Q_{s_{LA}(t)} \Delta t \quad (5.4)$$

Los caudales entrantes ($Q_{e_{LA}(t)}$) se componen de:

$$Q_{e_{LA}(t)} = Q_{rot(t)} + Q_{LLEO(t)} + Q_{LA(t)} + Q_{desb(t)} \quad (5.5)$$

Donde:

$Q_{rot(t)}$: caudales asociados al desembalse rápido del lago Rico

$Q_{LLEO(t)}$: aportes del río La Leona

$Q_{LA(t)}$: aportes del resto de la cuenca del lago Argentino

$Q_{desb(t)}$: aportes provenientes del desborde del lago Rico

Los caudales salientes ($Q_{sLA(t)}$) del modelo son los transportados por el río Santa Cruz, que son función del nivel del lago Argentino:

$$Q_{sLA(t)} = Q_{CHF(t)} = f(N_{LA}) \quad (5.6)$$

Donde:

N_{LA} : nivel del lago Argentino

Por lo tanto, el cálculo de la variación del volumen del lago Argentino en el intervalo de tiempo Δt está dado por:

$$\begin{aligned} \Delta V_{LA(t)} &= (Q_{eLA(t)} - Q_{sLA(t)}) \Delta t \\ V_{LA(t)} &= V_{LA(t-1)} + \Delta V_{LA(t)} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Este volumen se relaciona con el nivel del lago Argentino mediante su curva cota – volumen (Figura 5.21), que permite obtener el $N_{LA(t)}$, y con ellos, utilizando la ley que vincula el nivel del lago Argentino con el caudal registrado en la estación Charles Fuhr (Figura 5.30), obtener la descarga del río Santa Cruz.

El nivel inicial del instante $t + \Delta t$ resulta igual al nivel final del instante t . Entonces, partiendo de un nivel inicial del lago fijado previamente, se está en condiciones de calcular y analizar la evolución de los niveles del lago Argentino y los caudales en el río Santa Cruz durante el desarrollo del evento de desembalse.

Los resultados que arroja el modelo de simulación son:

- La variación de la cota del nivel de agua del lago Argentino en el tiempo ($N_{LA(t)}$).
- El hidrograma del río Santa Cruz en la estación Charles Fuhr.

5.4.1. Curva cota – volumen del lago Argentino

Para resolver el modelo de simulación de operación de embalse, resulta indispensable contar con la curva cota – volumen del lago Argentino (Figura 5.21). En el Anexo D se detalla el procesamiento realizado para la obtención de esta curva.

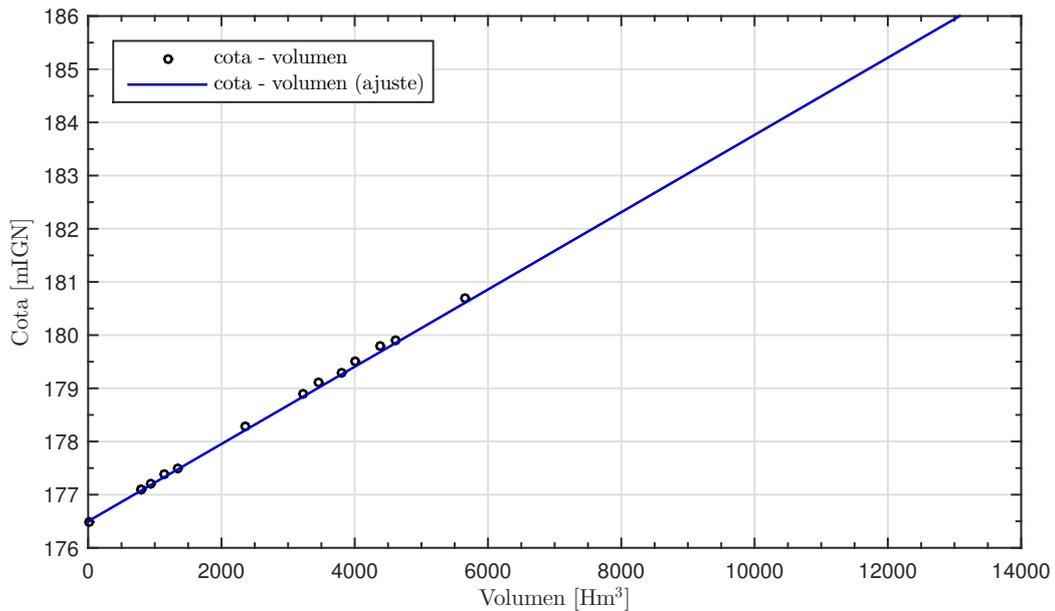


Figura 5.21: Curva cota - volumen lago Argentino (por encima de cota 176,5 mIGN).

A continuación, se presenta la regresión que vincula el volumen almacenado en el lago Argentino en función de la cota IGN:

$$N_{LA} = 0,0007264 * V_{LA} + 176,50 \quad 176,50 \leq N_{LA} \leq 186,00 \quad (5.8)$$

Donde, N_{LA} es la cota del nivel de agua en el lago Argentino vinculada al Sistema de Referencia Vertical Nacional del año 1971 (SRVN71) y V_{LA} es el volumen almacenado en el lago Argentino en Hm^3 .

5.4.2. Caudales entrantes al modelo

Como ya se ha mencionado, los aportes al lago Argentino considerados en el modelo de simulación son los provenientes de:

- desembalse rápido del lago Rico;
- aportes del río La Leona;
- aportes del resto de la cuenca al lago Argentino;
- aportes asociados al desborde del lago Rico;
- balance nulo entre aportes por precipitación y egresos por evaporación en el lago Argentino.

A continuación, se detalla cómo se obtienen cada uno de los aportes.

(a) Desembalse rápido del lago Rico: hidrogramas de rotura

El lago Rico no se modela como un reservorio en sí mismo, sino que su influencia en el sistema se representa a través de hidrogramas de rotura, que simulan los caudales generados en el evento de apertura de brecha entre el glaciar Perito Moreno y la península de Magallanes.

Los hidrogramas de rotura se construyen a partir de la siguiente formulación:

$$Q_{rot(t)} = \frac{\Delta V_{LR(t)}}{\Delta t} \quad (5.9)$$

Donde Δt es el intervalo de tiempo transcurrido entre dos datos del nivel del lago Rico y $\Delta V_{LR(t)}$ es la diferencia de volumen acumulado, que se obtiene ingresando a la curva cota – volumen del lago (Figura 5.9) con los niveles registrados y realizando la diferencia entre los volúmenes obtenidos.

Durante el evento de desembalse se consideran nulos los caudales ingresantes al lago Rico. La validez de esta hipótesis se sustenta en que la magnitud del volumen que puede significar el aporte de la cuenca del lago Rico durante los días que dura el desembalse no alcanza a representar un 2% del volumen desembalsado en el evento (como ejemplo, el aporte medio mensual del mes de febrero en 3 días de la cuenca del lago Rico es igual a 24 Hm³; mientras que el volumen desembalsado total, por ejemplo en el evento del año 2018, fue de 1.389 Hm³).

Entonces, para resolver la ecuación 5.9, se requiere de la siguiente información base:

- Curva cota – volumen del lago Rico.
- Variación de los niveles del lago Rico durante el evento de desembalse.

Respecto a la información de niveles del lago Rico, se dispone de lecturas de escala en el brazo Rico en el Pliego del llamado a Licitación Pública de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del Río Santa Cruz (MINPLAN, 2012), para el período 1950 – 1970, y en la estación LRIC (SIPH), desde el año 1993. Finalmente, se cuenta con registros de niveles durante el desembalse para las roturas de los años 1952, 1953, 1966, 2004, 2006, 2008, 2012, 2016 y 2018, con diferente densidad de datos en función del paso de tiempo entre las lecturas y de la duración del desembalse (en el Anexo C se presentan los gráficos de los registros de niveles del lago Rico en los períodos de las roturas mencionadas).

Debido a la corta duración que tienen en general los eventos de rotura, el número de lecturas de escala del nivel del brazo Rico durante el desembalse es escaso, ya que para fechas anteriores a marzo del año 2018, las mediciones presentan un paso diario. Casi la totalidad de los desembalses de los cuales se tienen registros presentaron una duración de 2 o 3 días, exceptuando los de los años 2004 y 2012 (con duraciones de 4 y 12 días, respectivamente). Es decir, existen algunos eventos para los cuales se cuenta sólo con una medición del nivel del lago mientras se está produciendo el desembalse del mismo. Entonces, para la construcción del hidrograma de rotura,

se realiza una interpolación lineal entre los registros de nivel del brazo Rico, con el objetivo de aumentar la discretización de los caudales calculados, considerándose un intervalo de una hora.

La baja densidad de datos durante los eventos de desembalse representa una fuente de incertidumbre en la construcción de los hidrogramas, ya que pueden estar omitiéndose valores de caudal que se produjeron en la realidad, pero que los registros no permiten detectar. Sin embargo, el análisis de sensibilidad del modelo de simulación desarrollado en el capítulo 8.4, permite concluir que la forma del hidrograma de rotura no impacta significativamente en el hidrograma de crecida del río Santa Cruz.

Entonces, para resumir, el procedimiento para la construcción de los hidrogramas de rotura cuando se cuenta con registros de niveles en el brazo Rico es:

- I. Obtención de los registros de niveles del lago Rico durante el desembalse.
- II. Interpolación lineal entre los registros, que permite seleccionar la discretización temporal del hidrograma, es decir, el valor de Δt .
- III. Ingreso a la curva cota – volumen del lago Rico para obtener la diferencia de volumen en cada intervalo de tiempo.
- IV. Cálculo del caudal como el cociente entre el cambio de volumen y el intervalo de tiempo en el que éste se produce.

En la Figura 5.22 se presentan los resultados obtenidos para el evento del año 2018, que es uno de los más importantes, no sólo por su magnitud, sino también por la densidad de registros de niveles del lago Rico durante el desembalse.

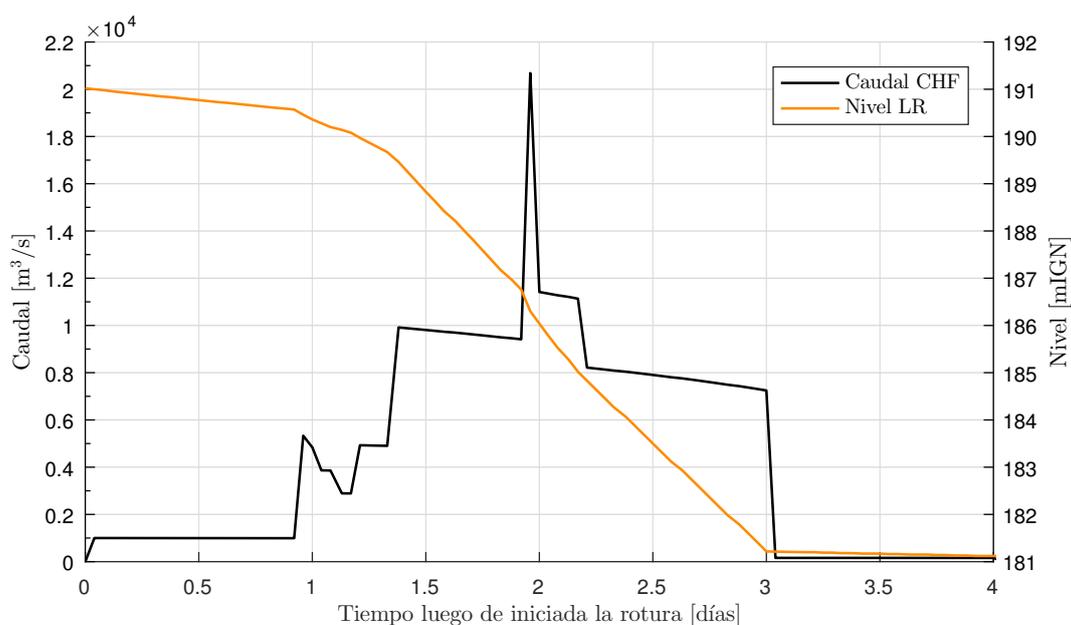


Figura 5.22: Hidrograma de rotura para el evento del año 2018.

Se observa que el hidrograma alcanza un pico horario de casi $21.000 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual se debe a una diferencia de $0,46 \text{ m}$ en la escala de la estación Parque Nacional Los Glaciares en un lapso de

una hora el día 12 de marzo de 2018, que produce un aumento local de la pendiente en el gráfico de niveles y un consecuente aumento de caudales en el hidrograma. También se identifica una posible falta de precisión en las lecturas de nivel en la rama ascendente del hidrograma, ya que se observan períodos donde los caudales descienden mientras se está produciendo el desembalse. La sensibilidad del modelo de embalse a la forma del hidrograma también será útil para analizar qué tan influyentes son en los resultados los posibles errores de medición de escala.

Hasta este punto, se ha descrito la metodología de construcción de hidrogramas de rotura para los eventos que han sido monitoreados. En el caso de los eventos de desembalse que aún no se han producido o que no han sido monitoreados (incluyendo en este grupo a los hidrogramas de diseño), se requiere adicionar algunos pasos previos a la metodología que permiten obtener la curva de variación de niveles del lago Rico durante el desembalse, indispensable para la construcción de los hidrogramas de rotura. Determinada esta curva, se sigue el procedimiento de construcción de hidrogramas de rotura desarrollado anteriormente.

A continuación, se detalla la metodología de obtención de las curvas de variación de niveles del lago Rico durante el desembalse:

- I. Obtención de los registros de niveles del lago Rico durante el proceso de rotura y desembalse. Como ya se ha mencionado, se dispone de registros de niveles durante el desembalse para los eventos de los años 1952, 1953, 1966, 2004, 2006, 2008, 2012, 2016 y 2018.
- II. Definición de la duración del desembalse (D) y del desnivel máximo que se produjo en el lago Rico entre el instante anterior al inicio del desembalse y una vez finalizado el mismo (ΔH_{LR}) en función de la información brindada por la bibliografía y del análisis e interpretación de los registros de niveles.

En la Tabla 5.2 se indican las duraciones y los desniveles considerados para cada evento, y en la Figura 5.23 se indican gráficamente estos parámetros sobre el registro de niveles en el lago Rico durante el desembalse de 2018.

Año	Duración [días]	ΔH_{LR} [m]	ΔQ [m ³ /s]
1952	3	8,1	193
1953	2	9,6	419
1966	2	21,5	1.312
2004	4	6,8	330
2006	3	4,6	243
2008	3	7,1	188
2012	11	5,1	116
2016	3	5,9	267
2018	3	9,8	593

Tabla 5.2: Duración total, desnivel del sistema lago Rico antes y después del desembalse, diferencia de caudal provocado por el evento en el río Santa Cruz.

- III. Adimensionalización de los registros.

La adimensionalización se realiza en el eje de ordenadas respecto al desnivel máximo que se produjo en el lago Rico en cada rotura (ΔH_{LR}), y en abscisas respecto a la duración

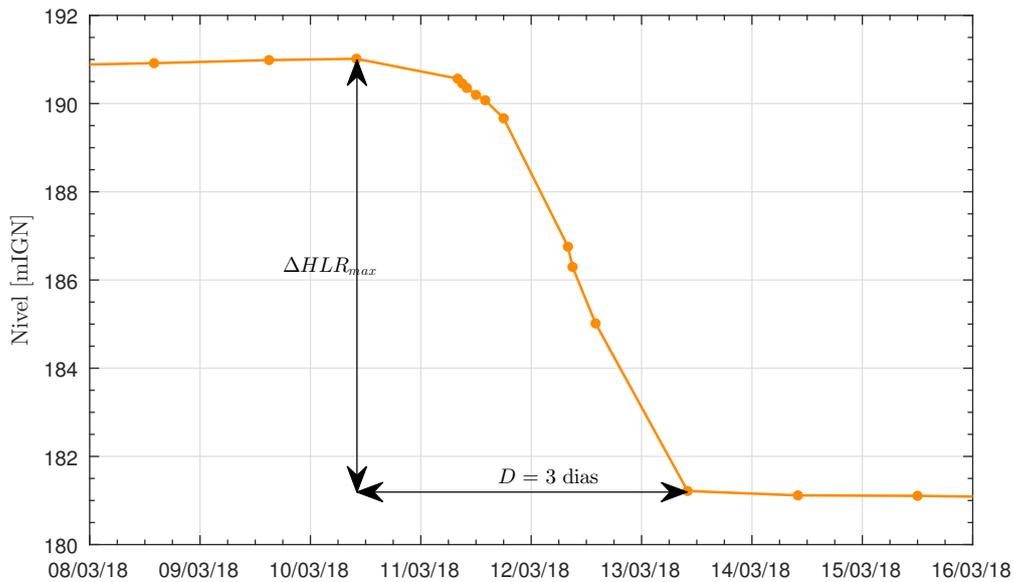


Figura 5.23: Desnivel máximo del lago Rico y duración del desembalse del evento de rotura del año 2018.

total del desembalse (D), en base a las siguientes formulaciones:

$$t_i^* = \frac{(t_i - t_0)}{D} \quad 0 \leq t_i^* \leq 1$$

$$h_i^* = \frac{h_i - h_f}{\Delta H_{LR}} \quad 0 \leq h_i^* \leq 1 \quad (5.10)$$

Donde:

t_i : fecha de lectura de nivel del lago Rico en el instante i

t_0 : fecha de inicio del desembalse

h_i : nivel registrado en el lago Rico en el instante i

h_f : nivel registrado en el lago Rico finalizado el desembalse

En la Figura 5.24 se presentan los resultados de la adimensionalización de la variación de los niveles del lago Rico durante los desembalses.

La mayoría de los eventos que dan lugar a crecidas repentinas del río Santa Cruz presentan duraciones de desembalse de 2, 3 y 4 días, mencionándose también la existencia de roturas prolongadas, como por ejemplo el ocurrido en el año 2012, con una duración aproximada de 11 días. En este último caso, el desembalse fue progresivo y la variación del nivel del pelo de agua del brazo Rico en el tiempo fue casi lineal; en cambio en las roturas súbitas se produce la descarga de entre un 5% y 10% del volumen total durante el primer 30% de la duración, y en el restante 70% del tiempo, que significan aproximadamente dos días, se descarga el 90% o 95% del volumen embalsado.

IV. Obtención de la variación adimensional media de niveles del lago Rico durante el desembalse.

Se realizó un ajuste polinómico de los puntos registrados durante los desembalses rápidos

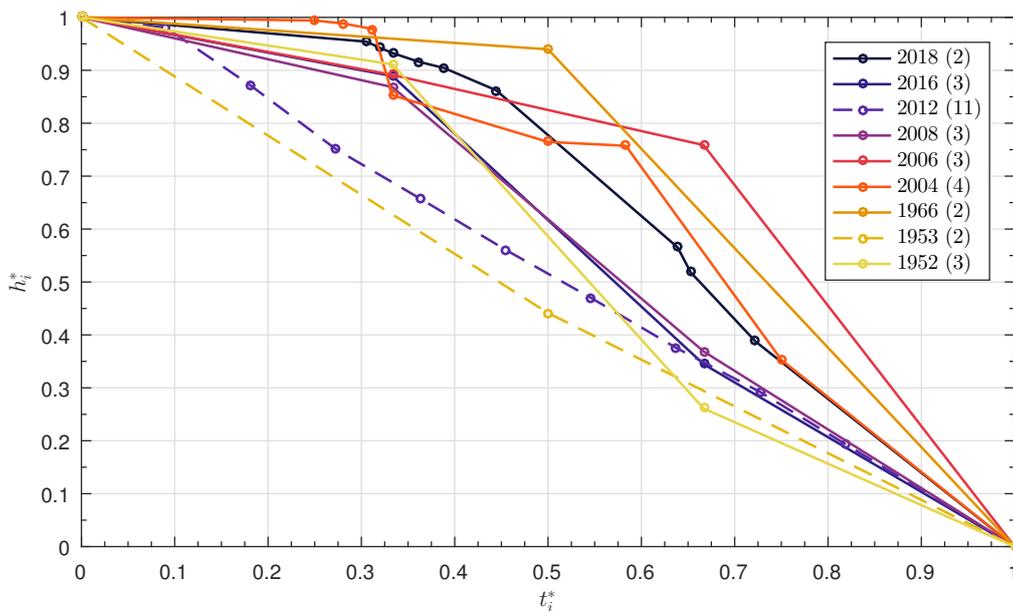


Figura 5.24: Adimensionalización de la curva de variación de niveles del lago Rico durante los eventos de desembalse (en la leyenda, entre paréntesis, se indica la duración total de cada desembalse en días).

de los años 1952, 1953, 2004, 2006, 2008, 2016 y 2018 (Figura 5.25), resultando una curva de desembalse media (Figura 5.26). El evento del año 2012, con 11 días de duración, no fue tenido en cuenta en el ajuste.

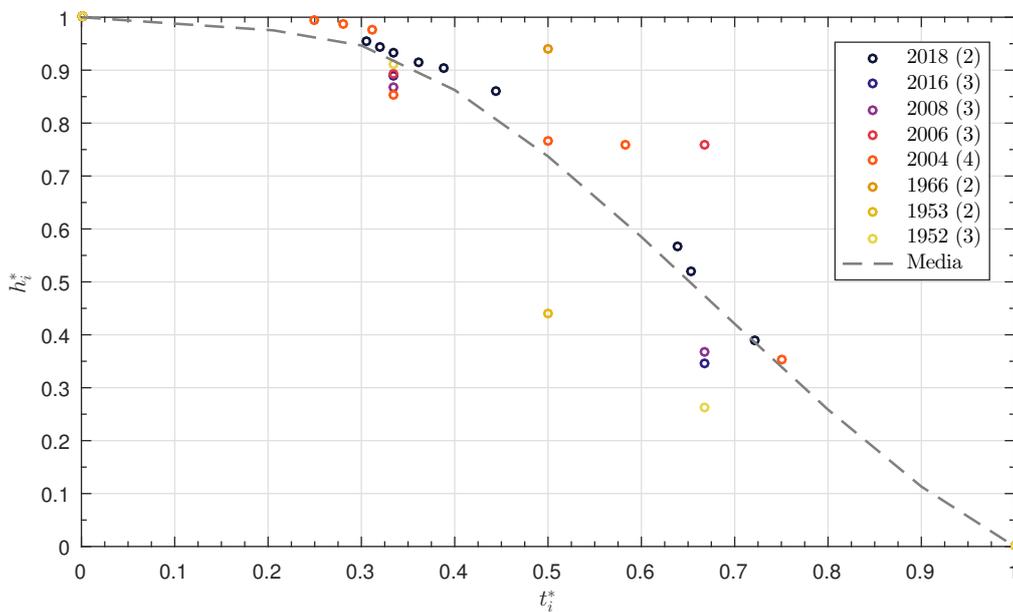


Figura 5.25: Ajuste del desembalse medio a partir de las curvas adimensionales de variación de niveles del lago Rico durante las roturas del GPM.

V. Escalado de la curva adimensional de desembalse media.

Para determinar la curva de variación de niveles del lago Rico durante una rotura abrupta del GPM, se realiza el escalado de la curva adimensional de desembalse media a partir de los mismos parámetros utilizados para la adimensionalización (ver Figura 5.23).

Entonces, habiendo determinado la curva de variación de niveles del lago Rico durante el

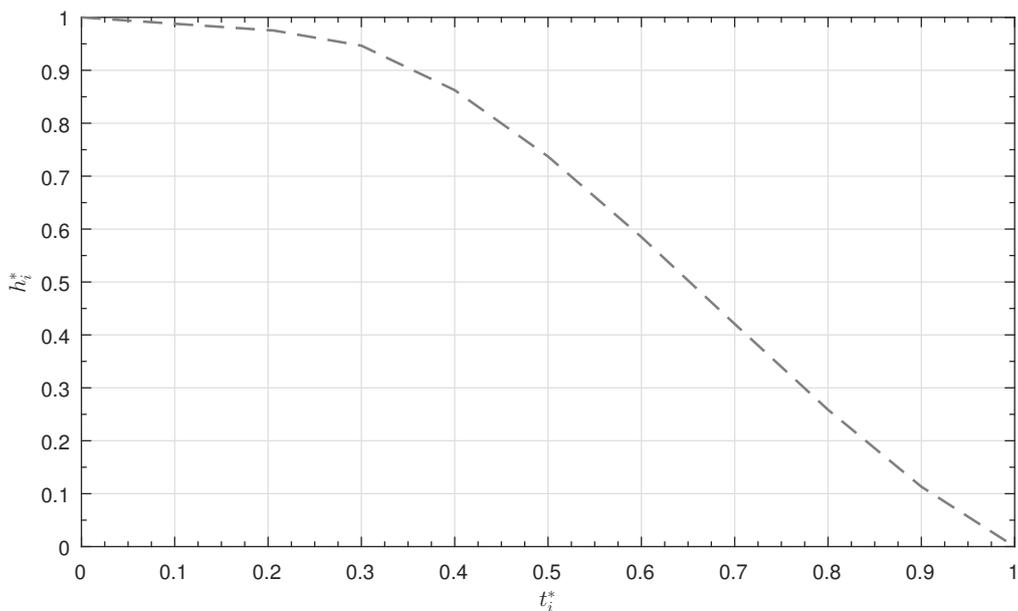


Figura 5.26: Curva adimensional de desembalse media.

desembalse, puede construirse el hidrograma de rotura siguiendo el mismo procedimiento desarrollado anteriormente para los eventos que sí han sido monitoreados.

(b) Aportes del río La Leona

Los aportes del río La Leona pueden obtenerse tanto a partir de caudales observados en la estación La Leona, a la salida del lago Viedma, como maximizados estadísticamente.

(c) Aportes del resto de la cuenca del lago Argentino

Además de los aportes del río La Leona, se tienen mediciones del río Centinela aportando al lago Argentino, pero con bajos caudales relativos. Para tener una estimación de los aportes al lago Argentino debe recurrirse a estimaciones en base modelación hidrológica de la cuenca pluvio-nivo-glaciar.

(d) Aportes asociados al desborde del lago Rico

Los aportes que podrían eventualmente producirse por desbordes del lago Rico, en situación de cierre producido por el glaciar Perito Moreno, se pueden estimar a partir de simulaciones hidrológicas (ver 5.2). Estos caudales resultan con valor nulo una vez producida la rotura y el descenso rápido de niveles del lago Rico.

5.4.3. Caudales salientes del modelo

Los caudales que egresan del modelo se obtienen a partir de una ley que relaciona los niveles en el lago Argentino con los caudales en el río Santa Cruz a la altura de la estación Charles Fuhr.

Esta ley se construye en base a la regresión propuesta por Lara (2016) en el estudio “Evaluación de la influencia del Proyecto Hidroeléctrico Néstor Kirchner sobre los niveles de agua del Lago Argentino” (Figura 5.27).

La curva se compone de tres tramos (c1, c2, c4) según cuál sea el control hidráulico en la zona de la embocadura del río Santa Cruz, y cuyos coeficientes se observan en la Figura 5.27.

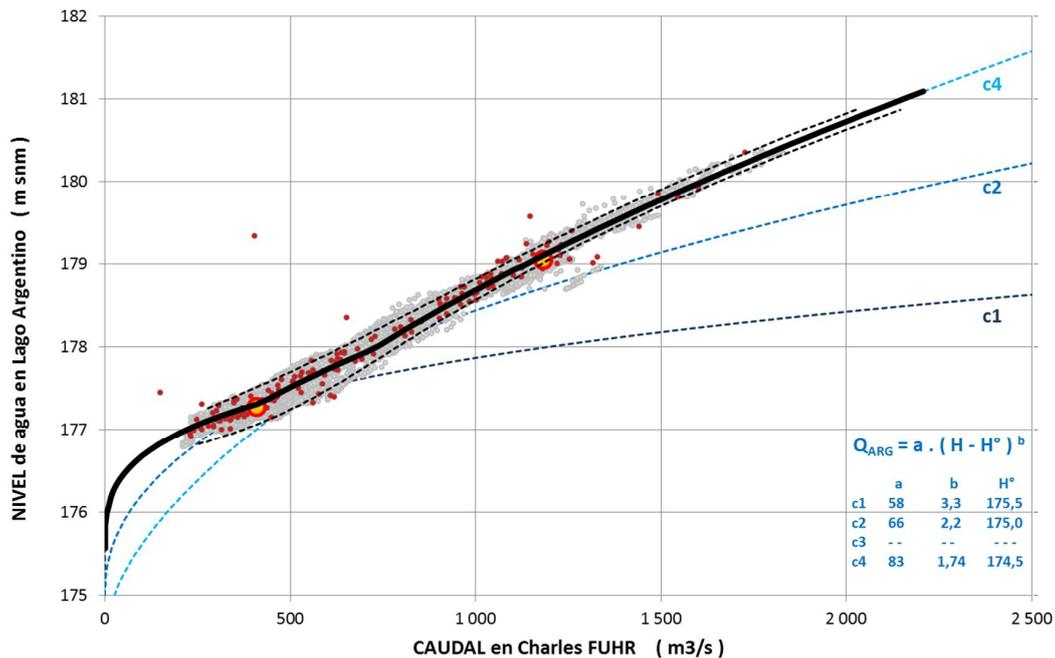


Figura 5.27: Curva que relaciona los niveles de agua en el lago Argentino con los caudales en Charles Fuhr (Lara, 2016).

Esta ley se construyó a partir de los registros con los que se contaba hasta el momento en que se realizó el estudio (2016), es decir, niveles del lago Argentino (CAL), disponibles a partir del año 1992, y caudales en el río Santa Cruz (CHF) a partir del año 1977.

La serie utilizada finalmente dispone de datos de más de 900 aforos, con caudales comprendidos entre 180 m³/s y 1700 m³/s. Dentro de estos datos, la rotura de mayor desnivel previo entre el lago Rico y el canal de los Témpanos es la del año 2008, con una diferencia de cota entre los lagos de 7,8 m; y la que produce un mayor aumento de la descarga del río Santa Cruz es la del año 2004, que dio lugar a una diferencia de caudal de apenas 330 m³/s.

Considerando que con posterioridad a la fecha de realización de dicha curva se han registrado pares de valores de nivel del lago Argentino (N_{LA}) – caudal en el río Santa Cruz (Q_{CHF}) superiores a los de la serie utilizada originalmente, corresponde verificar el comportamiento de esta ley. Para ello, se cuenta con:

- Registros actualizados de niveles del lago Argentino y caudales del río Santa Cruz hasta el año 2019.
- Registros de niveles en el río Santa Cruz en la estación Charles Fuhr, utilizada para completar la serie de caudales mediante la aplicación de la ley $h-Q_{CHF}$ del río Santa Cruz de Lara (2016). La ecuación que representa esta ley es:

$$Q_{CHF} = 14,3 (h + 2,6)^{2,36}$$

Donde h es la lectura de escala en la estación Charles Fuhr (válida a partir del año 1977).

- Información obtenida del “Estudio del Funcionamiento del sistema Lago Argentino – Río Santa Cruz – Embalse Néstor Kirchner” (UNLP, 2015), en el cual, a partir de modelaciones unidimensionales (HEC-RAS) y tridimensionales (FLOW-3D) del río Santa Cruz desde su embocadura hasta la presa Presidente Dr. Néstor Carlos Kirchner, se obtienen los niveles del lago Argentino correspondientes a una serie de caudales en Charles Fuhr.

Se graficaron sobre la ley de Lara (2016) los puntos $N_{LA}-Q_{CHF}$ disponibles durante las roturas, es decir, cuando el nivel del lago Argentino se encuentra ascendiendo rápidamente (Figura 5.28).

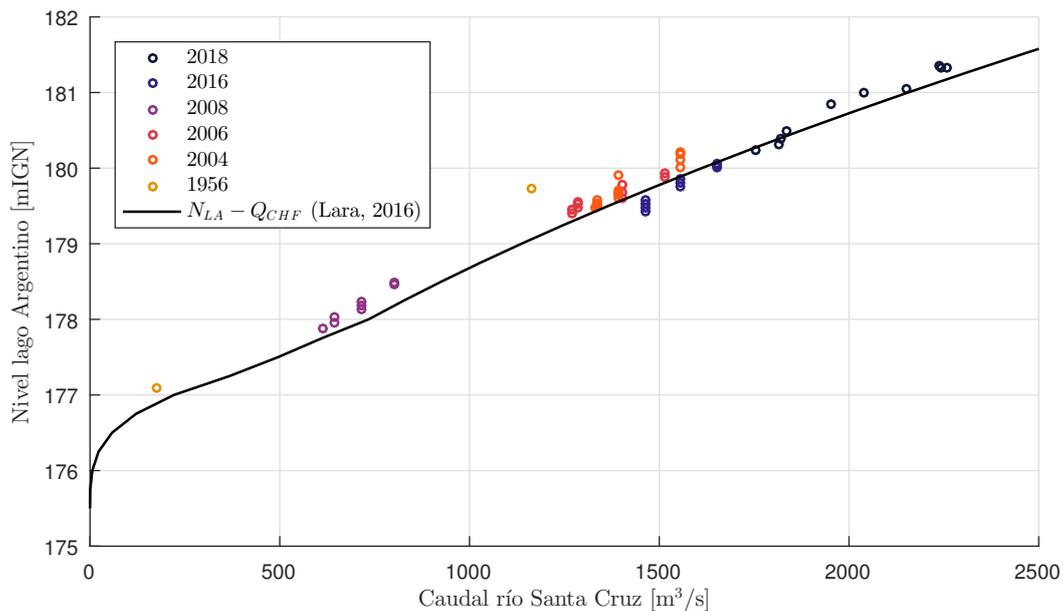


Figura 5.28: Curva que relaciona los niveles de agua en el lago Argentino con los caudales en Charles Fuhr (Lara, 2016). Los puntos indican los valores registrados en diferentes eventos de desembalse.

Se observa que utilizando la ley $N_{LA}-Q_{CHF}$ de Lara (2016) resultan caudales mayores a los registrados en el evento del año 2018, dado que el mismo no ha sido considerado en la determinación de esta ley.

De las modelaciones del “Estudio del Funcionamiento del sistema Lago Argentino – Río Santa Cruz – Embalse Néstor Kirchner” (UNLP, 2015) se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 5.3.

N_{LA} (cero escala SRVN71 = 174,869 mIGN)	Q_{CHF} [m ³ /s]
177,13	360
177,95	790
179,05	1.250
180,89	2.020
184,30	4.100

Tabla 5.3: Niveles del lago Argentino correspondientes a una serie de caudales en Charles Fuhr modelados (Fuente: UNLP, 2015).

Si se vuelcan estos puntos a un gráfico con la ley $N_{LA} - Q_{CHF}$ de Lara (2016), se verifica el comportamiento detectado anteriormente para los caudales mayores a 1700 m³/s (Figura 5.29).

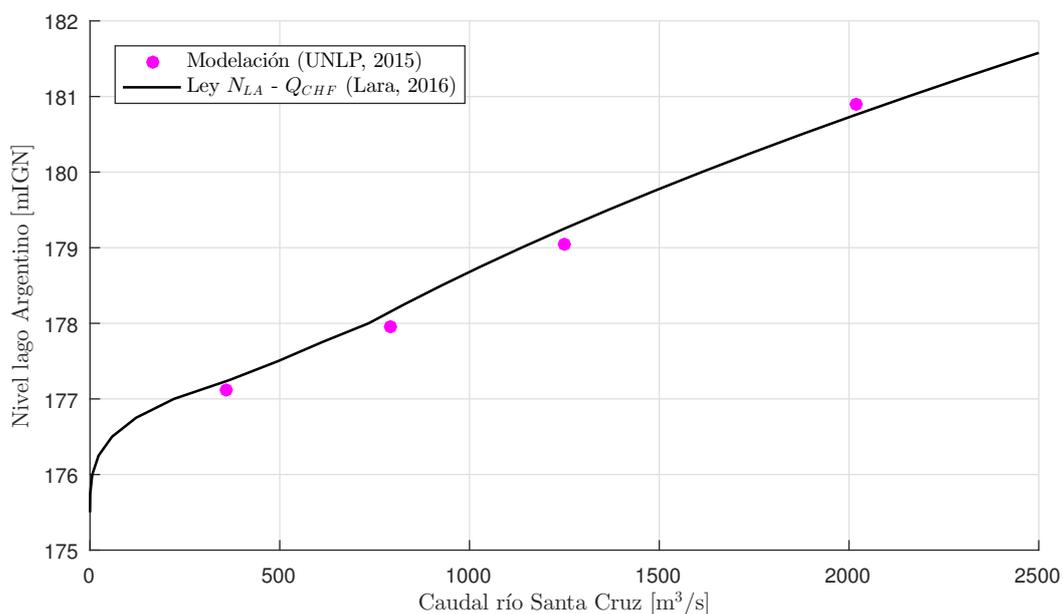


Figura 5.29: Puntos cota lago Argentino – caudal río Santa Cruz obtenidos de las modelaciones del “Estudio del Funcionamiento del sistema Lago Argentino – Río Santa Cruz – Embalse Néstor Kirchner” (UNLP, 2015) graficados sobre la ley $N_{LA} - Q_{CHF}$ de Lara (2016).

Entonces, se propone modificar la curva c4 de la ley de Lara (2016) incluyendo la información con la que se dispone hasta la actualidad (Figura 5.30). Se añadieron los puntos $N_{LA} - Q_{CHF}$ hasta el año 2019, interesando principalmente los de la rotura del año 2018, que tienen magnitudes de hasta 2.270 m³/s; y los puntos obtenidos a partir de las modelaciones del río Santa Cruz, que permiten ajustar la ley para descargas de la magnitud del caudal de diseño de las obras de alivio de las presas Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner y Gdor. Jorge Cepernic, de los cuales no se tienen mediciones. De este análisis resulta la curva potencial c4', cuyos coeficientes se observan en la Tabla 5.4.

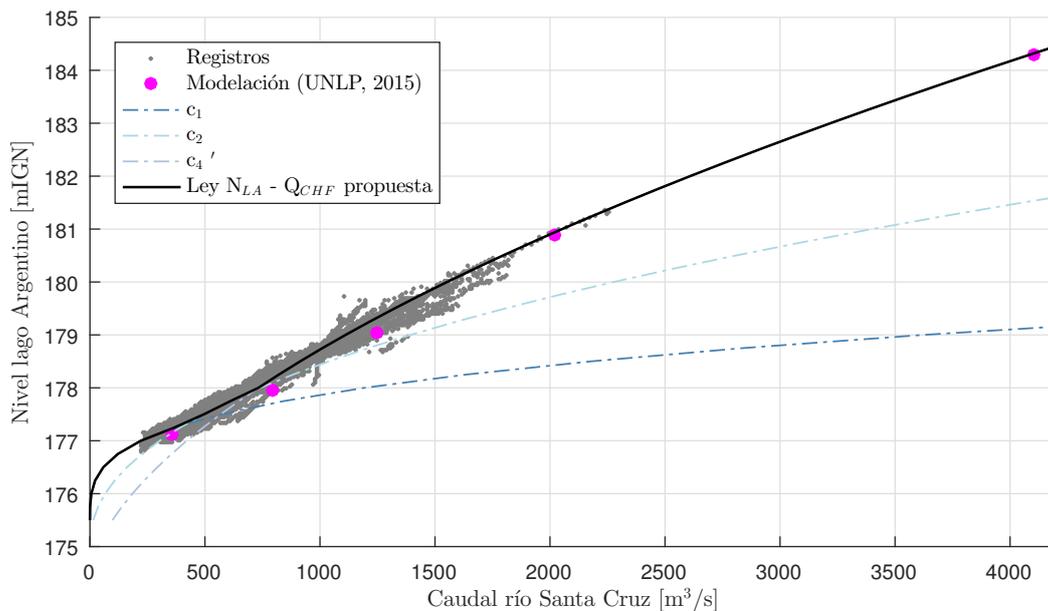


Figura 5.30: Modificación del tramo c4 de la curva que relaciona los niveles de agua en el lago Argentino con los caudales en Charles Fuhr.

$Q = a(N_{LA} - H_0)^b$				
Curva	a	b	H_0	Rango de validez
c_1	58	3,3	175,5	$N_{LA} < 177,3$
c_2	66	2,2	175	$177,3 < N_{LA} < 178$
$c_{4'}$	83	1,70	174,4	$N_{LA} > 178$

Tabla 5.4: Coeficientes de las funciones que componen la curva modificada que relaciona los niveles de agua en el lago Argentino con los caudales en Charles Fuhr.

5.4.4. Modelo de simulación de operación de embalse simplificado

(a) Conceptualización

Los eventos de rotura del glaciar Perito Moreno se producen en general en los meses de febrero o marzo, cuando el nivel del lago Argentino está cercano a sus valores máximos normales. Por lo tanto, puede asumirse en el modelo un caudal entrante que asegure que el lago Argentino al menos conservará su nivel previo a la rotura mientras dure el evento de desembalse. Esto se garantiza a partir de un caudal inicial que se mantendrá constante mientras dure la influencia del evento de rotura (por esta razón el hidrograma que surge del modelo de embalse simplificado se considera válido hasta 15 días después de iniciado el evento), y que se considera igual al que se registra en la estación Charles Fuhr el día que se inicia el desembalse.

Este caudal inicial constante incluye los últimos dos términos de la ecuación de caudales entrantes al modelo:

$$Q_{e(t)} = Q_{rot(t)} + Q_{LLEO(t)} + Q_{LA(t)} \quad (5.11)$$

Es decir, los caudales que ingresan al lago Argentino desde el río La Leona ($Q_{LLEO(t)}$) y el aporte

del resto de la cuenca del lago Argentino ($Q_{LA(t)}$).

En la Figura 5.31 se presenta el hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento del año 2018 y se indica el caudal inicial considerado en el modelo de simulación de embalse simplificado para este caso.

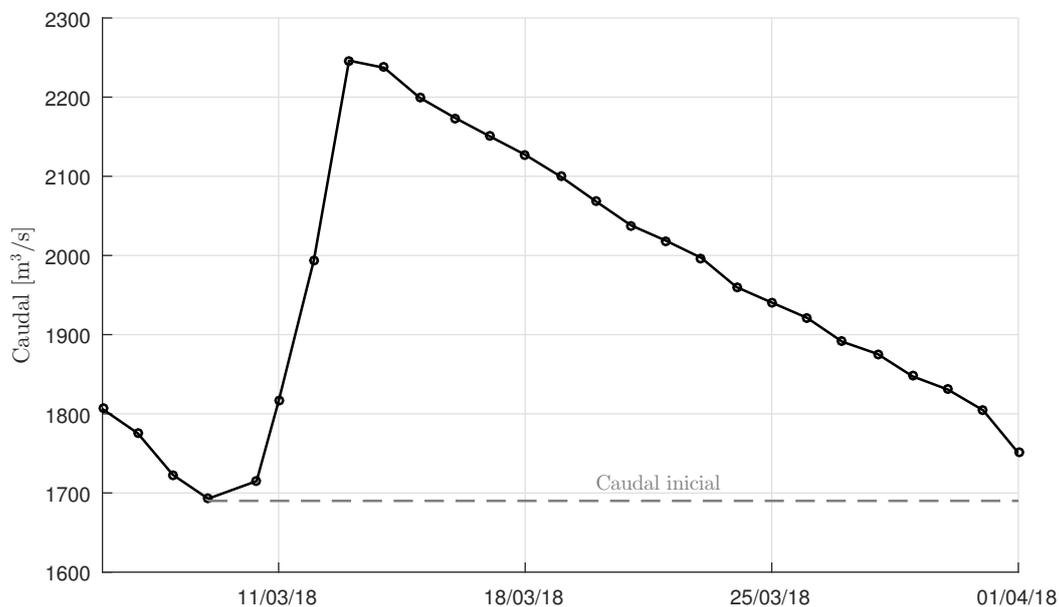


Figura 5.31: Caudal inicial considerado en el modelo de simulación de embalse para el evento del año 2018.

(b) Resultados y validación

Se simula en el modelo simplificado el tránsito de los eventos de los cuales se dispone de:

- Registros de niveles del lago Rico en la estación Parque Nacional Los Glaciares (LRIC), que son los que permiten construir los hidrogramas de rotura.
- Registros de niveles del lago Argentino en la estación El Calafate (CAL) y/o caudales en el río Santa Cruz en la estación Charles Fuhr (CHF), que se comparan con los resultados de las modelaciones con el objetivo de validar el modelo de simulación de embalse.

Estos son los eventos de los años 1966, 2004, 2006, 2008, 2012, 2016, 2018. En la Figura 5.32 se observa la evolución de los niveles del lago Argentino y en la Figura 5.33, el hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento del año 2018. Los resultados gráficos de la modelación de los eventos de los años 1966, 2004, 2006, 2008, 2012 y 2016 se presentan en el Anexo F.

Se observa que los aportes de los eventos de desembalse rápido del lago Rico son tan significativos que el esquema simplificado de simulación permite representar suficientemente bien los niveles del lago Argentino y los caudales en el río Santa Cruz.

En la Tabla 5.5 se resumen los resultados del modelo y su comparación con los registros de

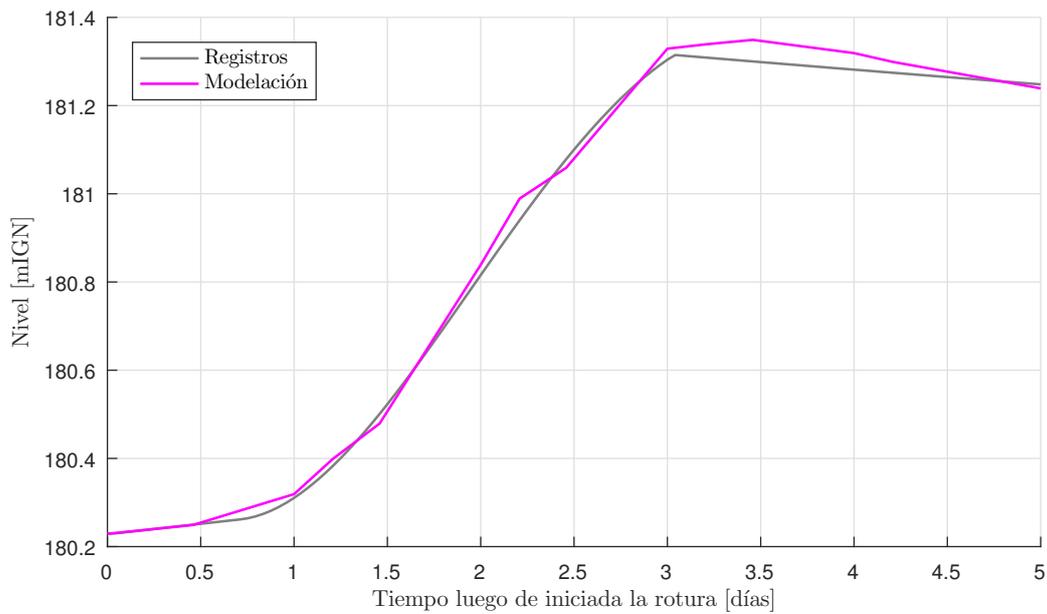


Figura 5.32: Evolución de los niveles del lago Argentino en función del tiempo luego de iniciado el evento de desembalse del año 2018 (modelo y registros).

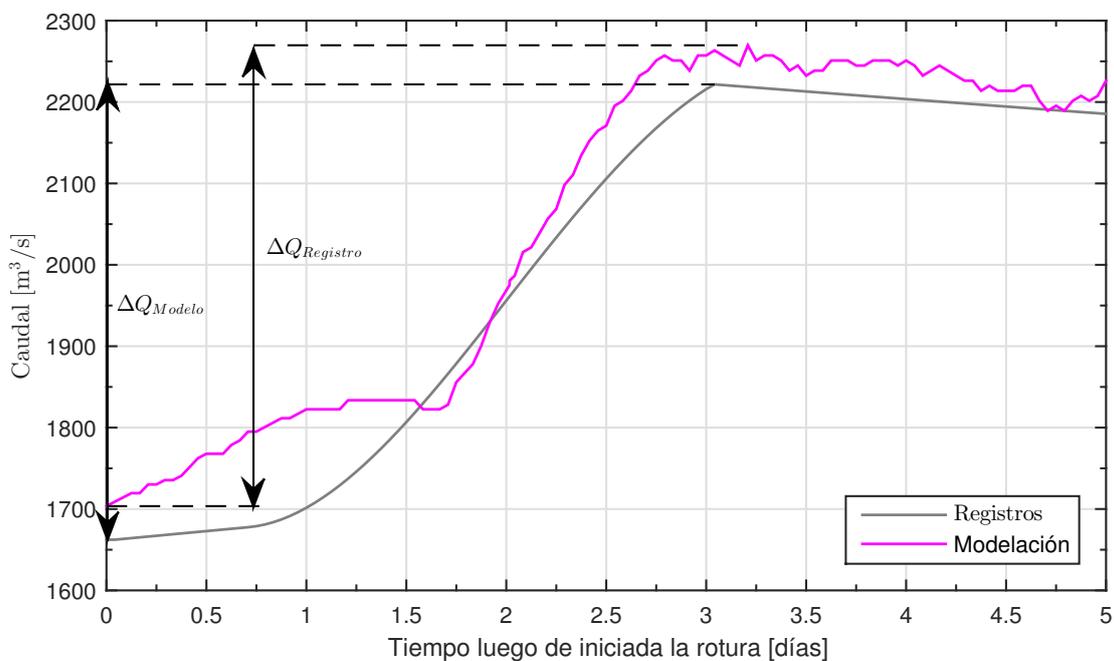


Figura 5.33: Hidrograma de crecida del río Santa Cruz luego de iniciado el desembalse del año 2018 (modelo y registros).

niveles del lago Argentino en CAL y de caudales en CHF para los eventos de los años 1966, 2004, 2006, 2008, 2016 y 2018. Se calculan las diferencias entre:

- los niveles máximos alcanzados en el lago Argentino;
- los caudales pico en el río Santa Cruz; y
- los aumentos de caudal en el río Santa Cruz, respecto al caudal que presentaba previo a considerarse iniciado el desembalse (Figura 5.33).

AÑO	D días	REGISTRO				MODELO				DIFERENCIAS						
		N_{max} LA	Q_p CHF	ΔQ CHF	Vol. 15 días	N_{max} LA	Q_p CHF	ΔQ CHF	Vol. 15 días	N_{max} LA	Q_p CHF	ΔQ CHF	Vol. 15 días			
		mIGN	m ³ /s	m ³ /s	Hm ³	mIGN	m ³ /s	m ³ /s	Hm ³	m	%	m ³ /s	%	m ³ /s	%	Hm ³
1966	2	-	2.257	1.312	2.573	181,41	2.273	1.329	2.480	-	0,7	16	1,3	17	-3,6	-94
2004	4	180,21	1.663	330	2.042	180,19	1.645	325	2.024	-0,02	-1,1	-19	-1,7	-5	-0,9	-18
2006	3	179,93	1.527	258	1.899	179,88	1.496	211	1.870	-0,05	-2,0	-31	-18,1	-47	-1,6	-29
2008	3	178,48	800	188	967	178,59	949	268	1.151	0,11	18,6	149	42,8	80	19,1	185
2016	3	180,06	1699	267	2.129	180,06	1.580	326	1.941	0,00	-7,0	-119	21,9	58	-8,9	-188
2018	3	181,35	2.270	566	2.675	181,31	2.222	559	2.683	-0,03	-2,1	-48	-1,2	-7	0,3	9

Tabla 5.5: Resultados del modelo de simulación de operación de embalse y comparación con registros

En la Figura 5.34 se grafican los puntos cota del lago Argentino – caudal en el río Santa Cruz registrados durante los eventos de desembalse en conjunto con la ley $N_{LA} - Q_{CHF}$.

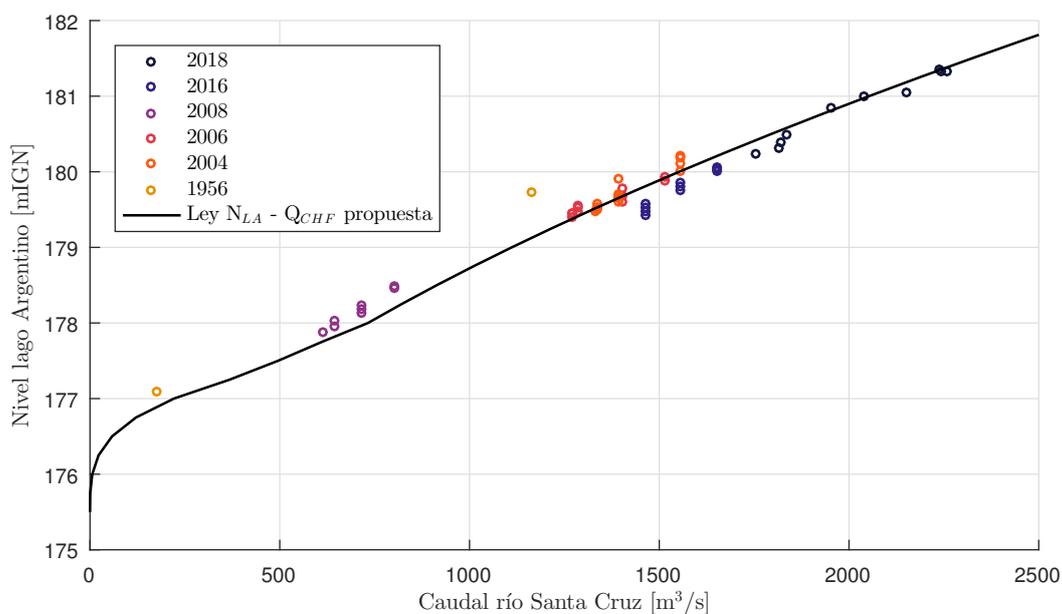


Figura 5.34: Comparación de los puntos cota lago Argentino – caudal río Santa Cruz registrados durante los desembalses respecto a la ley que relaciona estas dos variables.

Los puntos que representarían el evento del año 1966 no aparecen en la Figura 5.34 dado que no existen registros de niveles en el lago Argentino durante este desembalse.

Si se analizan los resultados de la Tabla 5.5 en conjunto con la Figura 5.34, se puede observar que las diferencias en la determinación de los caudales en el río Santa Cruz se deben principalmente a la dispersión de los puntos cota CAL – caudales CHF respecto a la ley que se utiliza en el modelo para determinar los caudales en el río Santa Cruz en función del nivel en el lago Argentino. Se puede concluir también que los menores errores se producen en las crecidas de mayor magnitud y los mayores errores se presentan para los eventos cuyos caudales pico y aumentos de caudal en el río Santa Cruz son menores, lo que permite validar el modelo de simulación de

operación de embalse simplificado como un elemento de predicción de las variables $N_{LA(t)}$ y $Q_{CHF(t)}$ en crecidas de gran magnitud. Este modelo se considera válido para eventos que dan lugar a un caudal pico en el río Santa Cruz de al menos 1700 m³/s y/o un aumento de la descarga del río igual o superior a 300 m³/s.

Capítulo 6

PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA

6.1. Procesamiento Información Hidrometeorológica

6.1.1. Introducción

El procesamiento de información hidrometeorológica tuvo las siguientes finalidades:

- la detección de errores sistemáticos o al azar groseros,
- el rellenamiento de información indispensable para completar series y permitir así un mejor entendimiento del comportamiento de variables hidrometeorológicas,
- la selección de estaciones que pudieran resultar confiables para representar la hidrometeorología de la cuenca.

Además del análisis general a nivel anual y mensual, se realizan análisis de frecuencia de precipitaciones y temperaturas máximas en diferentes intervalos de tiempo que servirán para tareas posteriores de simulación hidrológica en la cuenca.

Teniendo en cuenta los almacenamientos lacustres existentes en la cuenca, el comportamiento de variables extremas durante pocos días puede ser poco significativo en relación a las variaciones de mayor término (mensuales, trimestrales, etc), por lo que se realizaron evaluaciones

con diferentes pasos de tiempo en procura de encontrar luego la situación más crítica para el desarrollo de crecidas.

En los puntos siguientes se presenta el resultado de esta tarea, indicándose el desarrollo y particularidades en el Anexo B.

6.1.2. Precipitaciones anuales y mensuales

En la Figura 2.4 se presentó la ubicación de las estaciones pluviométricas. Previo a la utilización de estas estaciones, se realizaron controles de calidad habituales, tales como análisis de dobles acumulaciones y consistencias regionales, a nivel anual y mensual. Teniendo en cuenta la ubicación de las estaciones se realizaron análisis por grupos, los cuales se presentan en el Anexo B.

Las principales inconsistencias detectadas corresponden a períodos indicados con valor 0 mm cuando en realidad debería haberse indicado dato faltante, así como también la existente de valores mal anotados o transcritos (exageradamente grandes). Algunos casos, relacionando la información con estaciones vecinas, pudieron ser detectados y corregidos o rellenados. Las series fueron rellenadas o completadas con el promedio de los valores de las 2 estaciones más próximas. En otros casos las inconsistencias fueron demasiado importantes y algunas estaciones (por ejemplo, Charles Fuhr) fueron descartadas para su posterior uso.

La Figura 6.1 presenta las precipitaciones medias mensuales de las estaciones principales disponibles dentro de la cuenca y proximidades. La evolución media a lo largo del año muestra la existencia de precipitaciones en todo el año, con un régimen de considerable uniformidad, aunque con incrementos a finales del verano y principio del otoño y valores menores durante la primavera y principios del verano. El eje de la derecha de la Figura 6.1 representa la relación entre la precipitación media mensual (P_m) y la precipitación media anual (P_a), mostrando la línea punteada azul el valor medio de esta relación en todas las estaciones en cada mes del año.

Los valores anuales de precipitación de las estaciones disponibles (seleccionadas dentro de la cuenca y en proximidades) se acompañan en la Tabla 6.1.

Una referencia relevante, resulta el dato reportado en Stuefer (1999) para Ventisquero Moreno donde se indica una precipitación anual de 1.330 mm en el período 1990 – 1997.

Claramente los menores montos de precipitación anual se tienen en la estepa, al este del área de estudio (Aeropuerto El Calafate y La Leona), y los mayores al pie de la cordillera y en la medida que se encuentran a mayor altura.

Otra de las variables analizadas fueron la cantidad de días con precipitaciones en cada estación, a partir de lo cual se deduce:

- mayor cantidad de días con precipitaciones hacia el oeste,

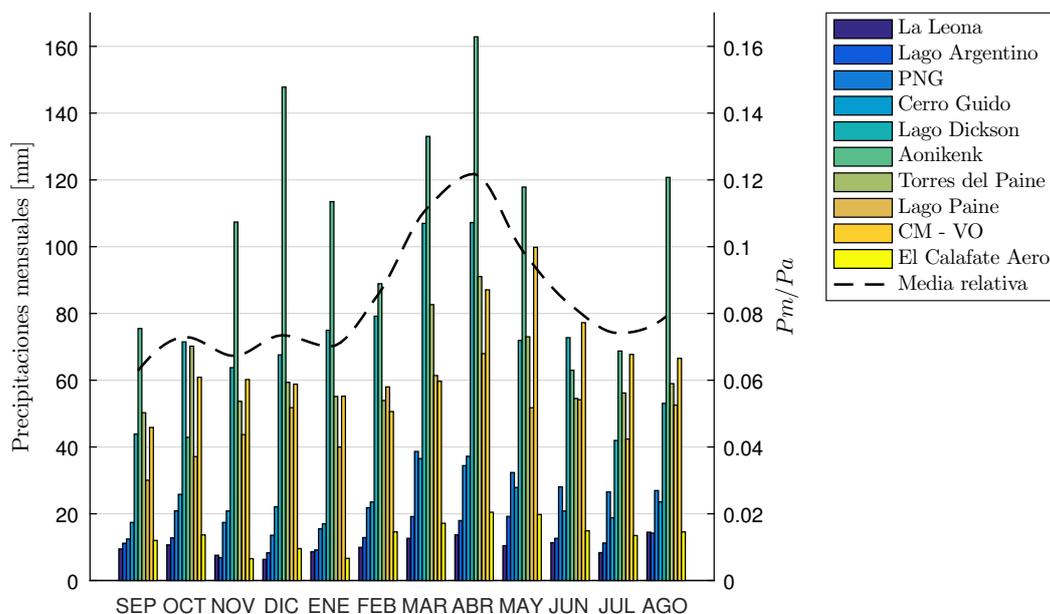


Figura 6.1: Precipitaciones medias mensuales.

	Serie	PREC. ANUAL [mm]
La Leona (SIPH)	1993 - 2019	124
Lago Argentino (SIPH)	1993 - 2019	144
Parque Nac. Los Glaciares (SIPH)	1992 - 2019	289
Cerro Guido (DGA)	1990 - 2019	291
Lago Dickson (DGA)	2004 - 2019	855
Torres del Paine (DGA)	1990 - 2019	759
Lago Paine (DGA)	2011 - 2019	591
CM – VO (DGA) ⁽¹⁾	1994 - 2019	790
El Calafate Aero (SMN)	2001 - 2019	163
Aonikenk (IANIGLA) ⁽²⁾	2014 - 2019	1242

⁽¹⁾ CM – VO es una combinación de datos entre las estaciones Candelario Mancilla – DGA y Villa Oghigins – DGA.

⁽²⁾ La estación se ubica a 1200 m de altura

Tabla 6.1: Precipitaciones anuales (set – ago).

- gran cantidad de días con bajos montos de precipitación.

El análisis completo de esta variable se acompaña en el Anexo B.

6.1.3. Temperaturas mensuales

El análisis de calidad de los datos de temperaturas -mostró un mejor comportamiento general respecto al de precipitaciones, aún en el caso de tener mayor distancia entre estaciones.

La Figura 6.2 presenta una comparación entre las temperaturas mensuales observadas disponibles en el período 1995 - 2019, para estaciones con más de 10 años de datos. La estación El Calafate Aero (SMN) es continuidad de Lago Argentino Aero (SMN - aeropuerto viejo), la estación Lago Argentino (SIPH) se encuentra frente al lago Argentino en El Calafate. La estación Torre es la de mayor longitud suministrada por IANIGLA ubicada a 870 mIGN. Se observa que las tem-

peraturas en la base del glaciar Perito Moreno (EMGPM) presentan menores valores mensuales máximos y menores amplitudes térmicas. Siendo los mínimos muy similares, las temperaturas medias anuales en el glaciar resultan menores a las disponibles en El Calafate. Se destaca que aún en invierno, existen temperaturas mensuales superiores a 0 °C.

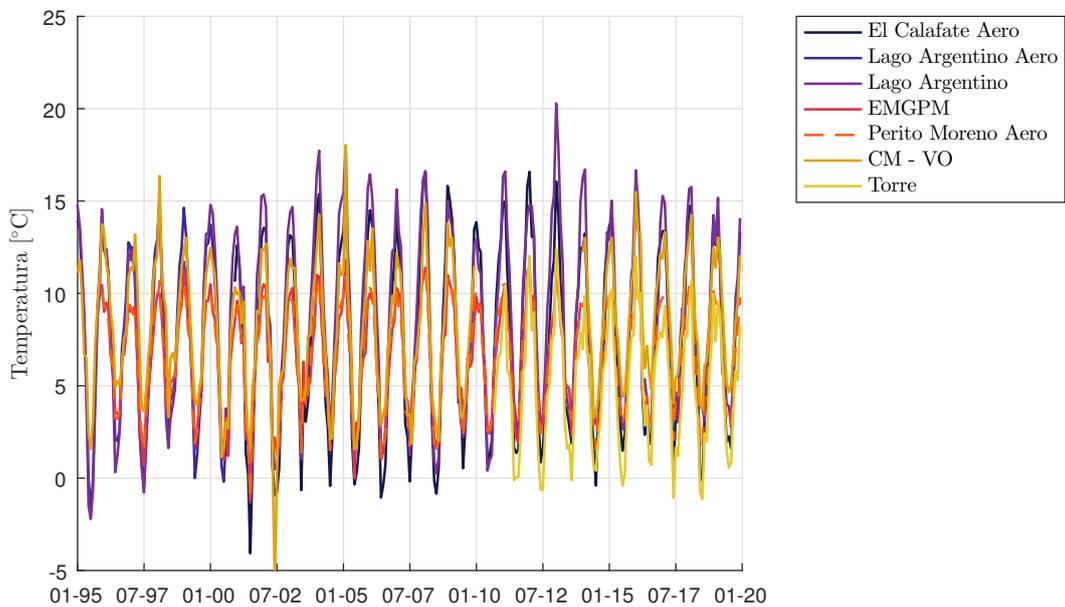


Figura 6.2: Temperaturas mensuales. Comparación.

La Figura 6.3 presenta temperaturas mensuales en el período 2010 - 2019, incorporando las estaciones de mayor longitud del IANIGLA. Se observa que la variación estacional es seguida por todas las estaciones, registrando la estación Aonikenk las menores temperaturas medias, siendo esta la estación que se encuentra a mayor altura (1200 mIGN).

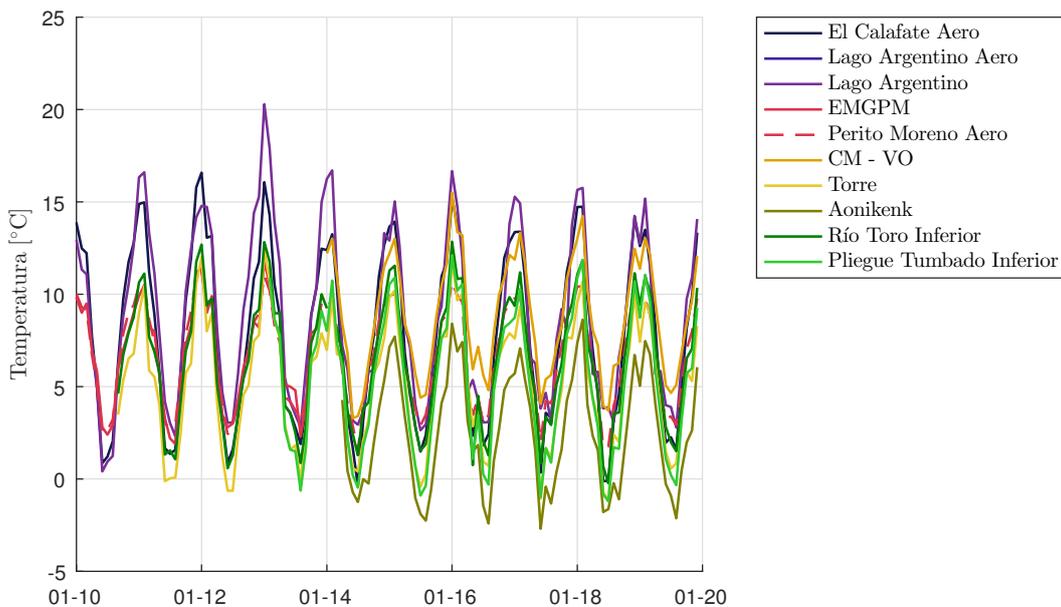


Figura 6.3: Temperaturas mensuales 2010 – 2019. Estaciones con más de 5 años de datos.

La Figura 6.4 muestra un análisis de correlación entre temperaturas mensuales observadas por el SMN en Calafate y temperaturas en la EMGPM, obteniéndose un coeficiente de correlación r

= 0,98.

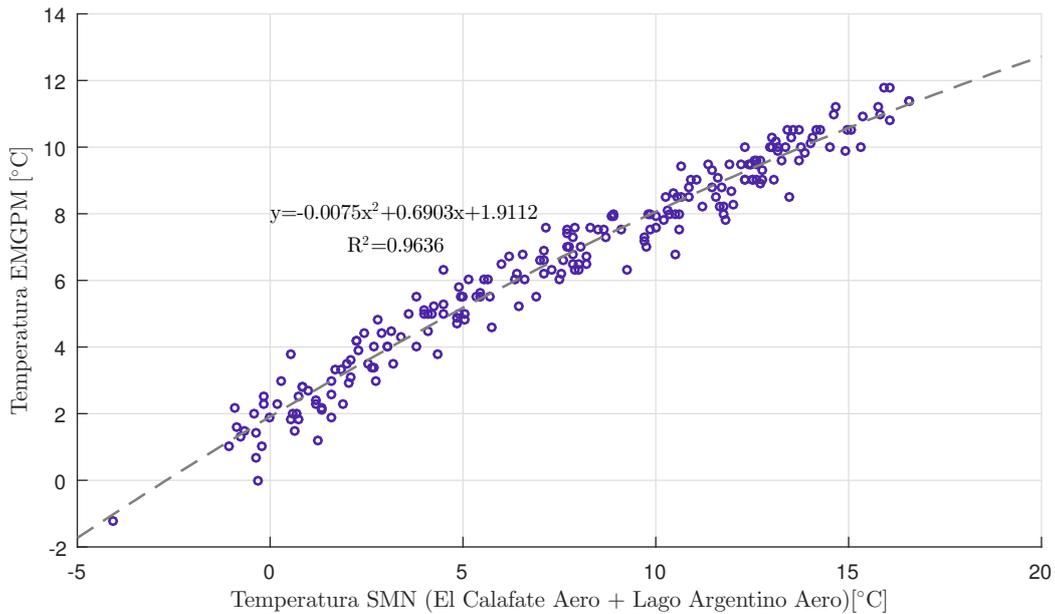


Figura 6.4: Correlación temperaturas SMN (El Calafate Aero + Lago Argentino Aero) vs EMGPM.

Asimismo, se realizó un análisis de la evolución de las temperaturas a lo largo del año. La Figura 6.5 presenta la evolución de las temperaturas medias mensuales en estaciones con información en el período 1993 - 2019, junto con una estimación de la cota a la cual se tendría 0 °C, suponiendo una disminución de temperaturas de 7,0 °C / 1000 m de ascenso.

En base a este análisis, en los meses de invierno la cota 0° se encontraría entre 500 y 600 mIGN, mientras en verano alcanzaría valores próximos a los 2.000 – 2.100 mIGN. Aunque este valor es variable con la latitud, longitud y para cada año particular, es un indicador de la cota a la cual la precipitación se produce en forma de nieve o lluvia.

6.1.4. Evaporación y evapotranspiración

En la Figura 6.6 se observa la evaporación media mensual y la temperatura media mensual registrada en El Calafate (período 1993 - 2019). Se aprecia que la evaporación sigue la evolución de la temperatura, con mayores valores en enero y mínimos en junio – julio. La información del invierno debe tomarse con precaución ya que aparecen numerosos días donde el agua del tanque de evaporación se indica congelada.

La evaporación media anual se estima en 968 mm (aplicando a las observaciones de tanque un coeficiente de 0,7).

A efectos de validar los datos de evaporación estimados, se aplicaron diferentes fórmulas tradicionales de cálculo (Meyer, URSS, Penman), mostrando la Figura 6.7 la comparación de resultados. Las formulas arrojan en verano valores de evaporación mayores que las estimadas por mediciones en tanque, siendo del mismo orden de magnitud en invierno.

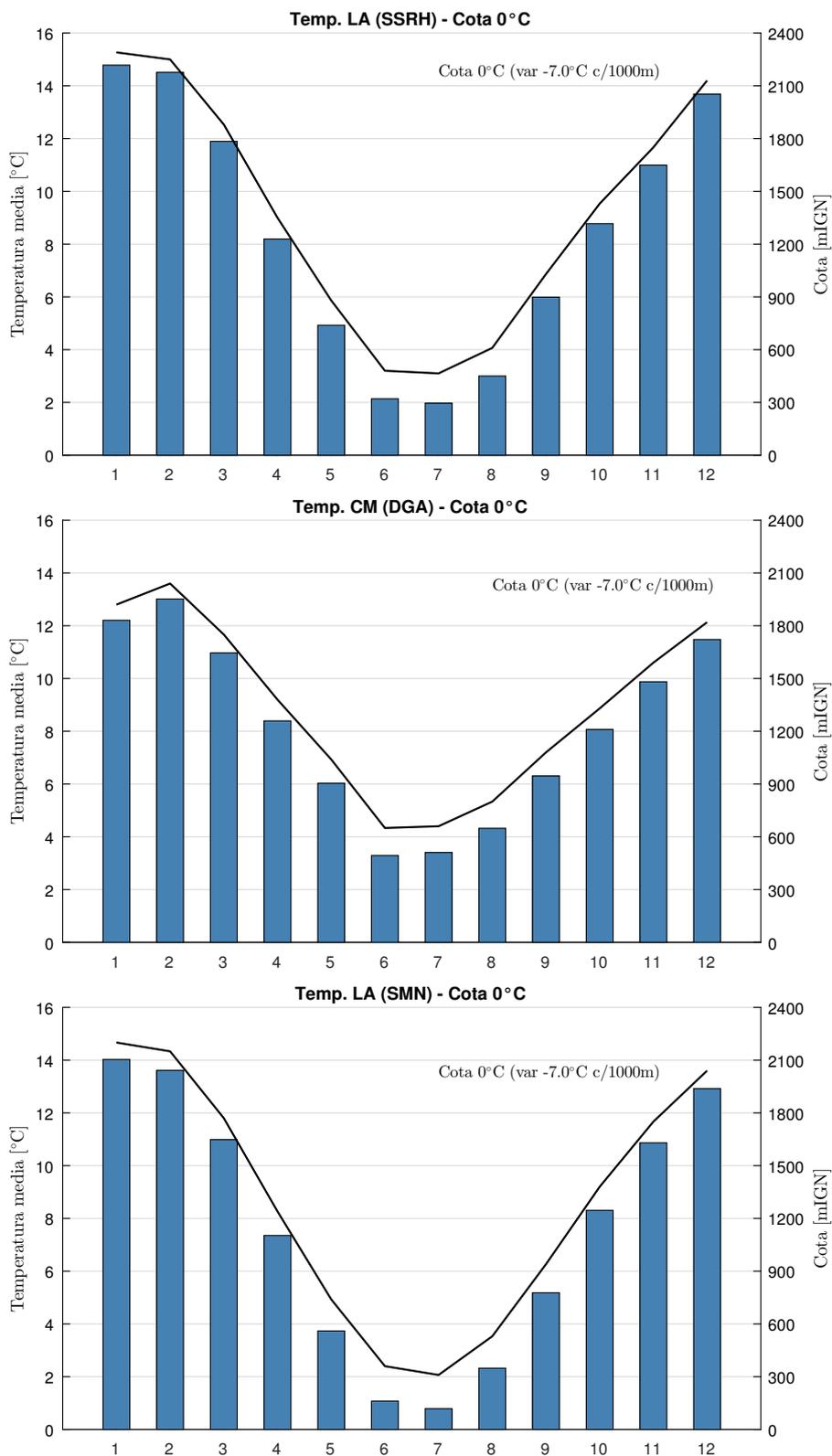


Figura 6.5: Temperaturas medias mensuales y estimación de la cota para 0°C.

La Figura 6.8 presenta la evolución anual de variables meteorológicas que tienen influencia en el proceso de evaporación y evapotranspiración, en la estación El Calafate Aero del SMN, iniciando el ciclo anual en el mes de setiembre. A la evolución de la temperatura indicada previamente, se le adiciona el comportamiento de otras variables; la heliofanía efectiva mensual tiene un comportamiento similar a la temperatura mensual, aunque más atenuada (menor diferencia entre verano

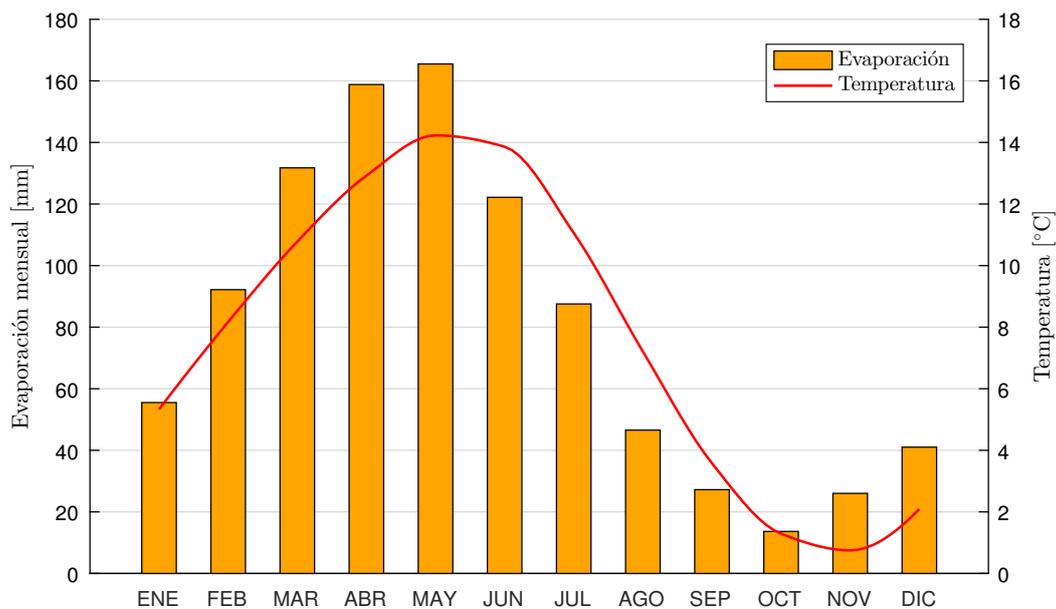


Figura 6.6: Evaporación y temperatura media mensual en El Calafate Aero (SMN).

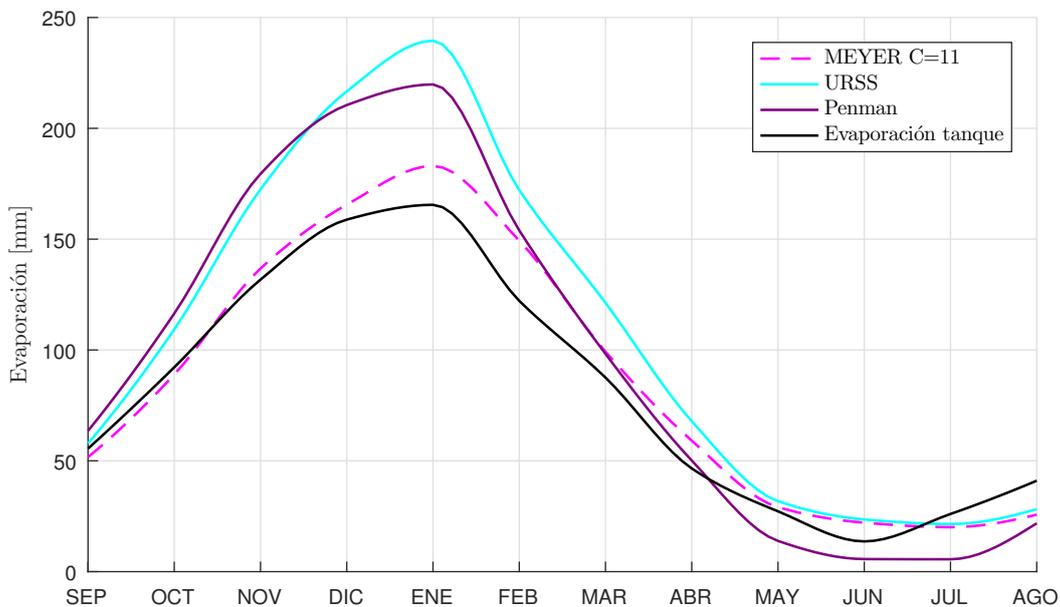


Figura 6.7: Comparación evaporación de tanque y obtenidas por fórmulas (El Calafate Aero - SMN).

e invierno); la humedad relativa tiene un comportamiento contrapuesto a la temperatura, con menores valores durante el verano y mayores en invierno; y la velocidad de viento es mayor en los meses de noviembre a enero, disminuyendo en el invierno.

Se realizó asimismo una estimación de la evapotranspiración potencial (*ETP*), utilizando fórmulas tradicionales (Penman, Turc, Thorntwaite) y comparando resultados con la evaporación medida en tanque, habitualmente utilizada como estimador de *ETP* (Figura 6.9). La temporalidad anual (períodos de ascensos y descensos) es similar en todos los casos. En verano los resultados de Penman y de evaporación de tanque resultan similares, aunque algo superiores en Penman, mientras las formulaciones de Thorntwaite y Turc arrojan valores más bajos; probablemente debido a que estas dos formulaciones no consideran la velocidad de viento. En invierno

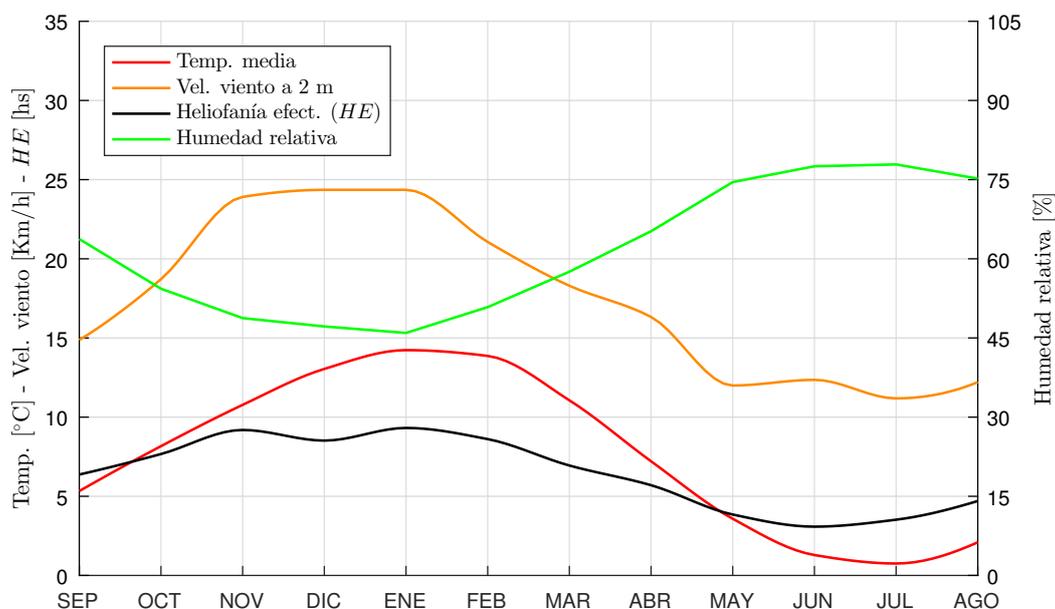


Figura 6.8: Evolución anual de variables hidrometeorológicas (El Calafate Aero - SMN).

las fórmulas dan valores muy parecidos, y la obtenida a través del tanque de evaporación valores ligeramente por encima. Se utilizará la evaporación obtenida a través de las mediciones del tanque tipo A existente, como estimador de la *ETP*.

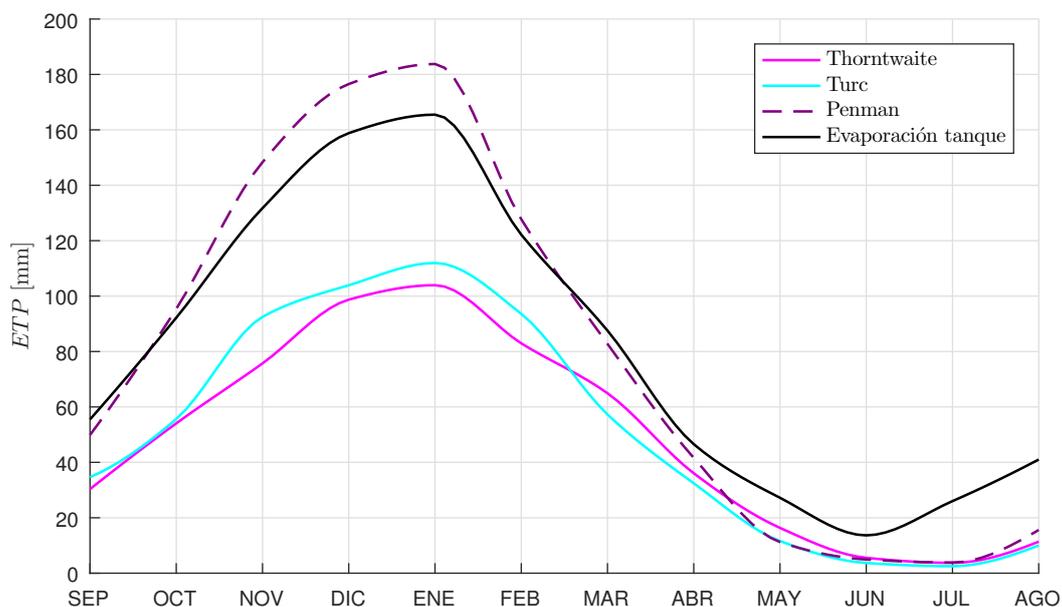


Figura 6.9: Estimación de *ETP*

6.1.5. Comparación de información disponible con fuentes de datos globales

En el punto 2.3.1 se indicaron fuentes de datos globales, que presentan datos a partir de observaciones o resultados de modelos globales de simulación de variables hidrometeorológicas. La misma es de utilidad en esta región teniendo en cuenta el contexto de escasez de datos

en vastos sectores de la cuenca. Se realizaron comparaciones entre esta información y valores observados, a efectos de interpretar diferencias y validar o no su posible uso.

La Figura 6.10 muestra una comparación entre valores de precipitaciones para el año 2008 obtenidos de CR2Met, versus precipitaciones observadas en estaciones disponibles de la cuenca. En esta figura se incluyen cotas del terreno natural obtenidas del Modelo Digital del Terreno (MDT) generado (ver punto 9.2.2). A nivel anual, la correspondencia entre valores simulados y observados es aceptable. Se aprecia el comportamiento de las precipitaciones con incrementos notables en la medida que la posición se desplaza al oeste con el incremento de cotas.

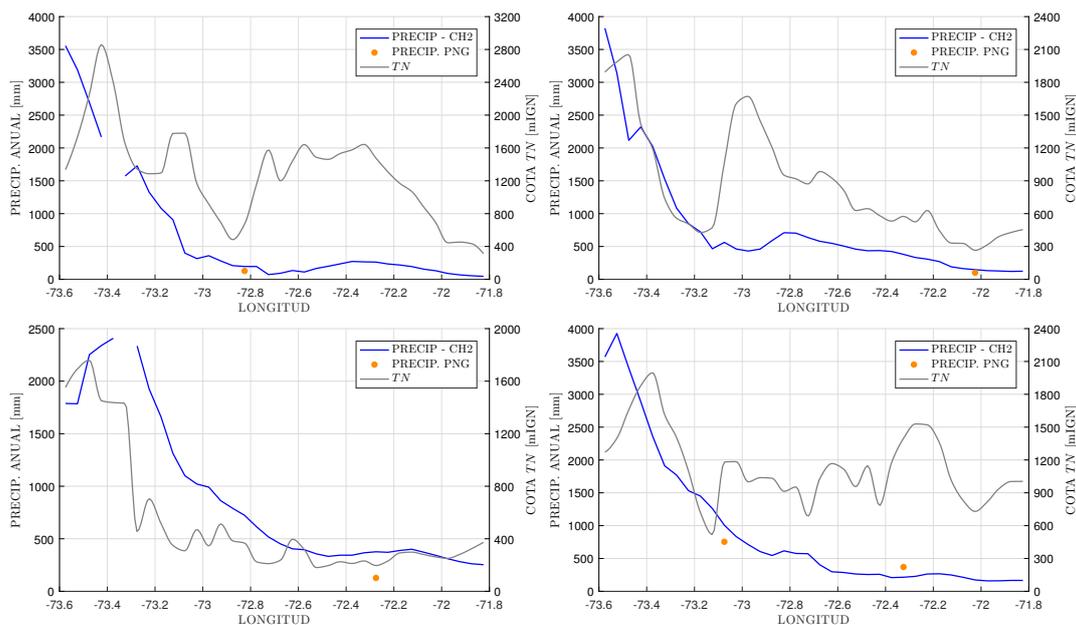


Figura 6.10: Precipitación anual 2008. Comparación CR2Met vs datos observados.

La Figura 6.11 presenta la distribución areal de precipitaciones anuales obtenidas de CR2Met para el período 1979 - 2018. Se tienen valores menores a los 200 mm en la estepa del este de la cuenca, incrementándose hacia el oeste y en particular al llegar a la cordillera. Los valores informados en las cumbres andinas (del orden de 4000 mm) resultan menores a lo sugerido por otras fuentes (por ejemplo, Mapa de isohietas del Balance Hídrico de Chile - DGA, 1988).

En forma similar a las precipitaciones, la Figura 6.12 presenta comparaciones entre temperaturas de CR2met y valores observados. Las temperaturas tienen un comportamiento claramente asociado a las cotas.

La Figura 6.13 muestra la variación de temperaturas en relación a la altitud (cotas) que arroja este modelo, encontrándose una correlación lineal r mayor a 0,98 y una variación de 7,2 °C /1000 m.

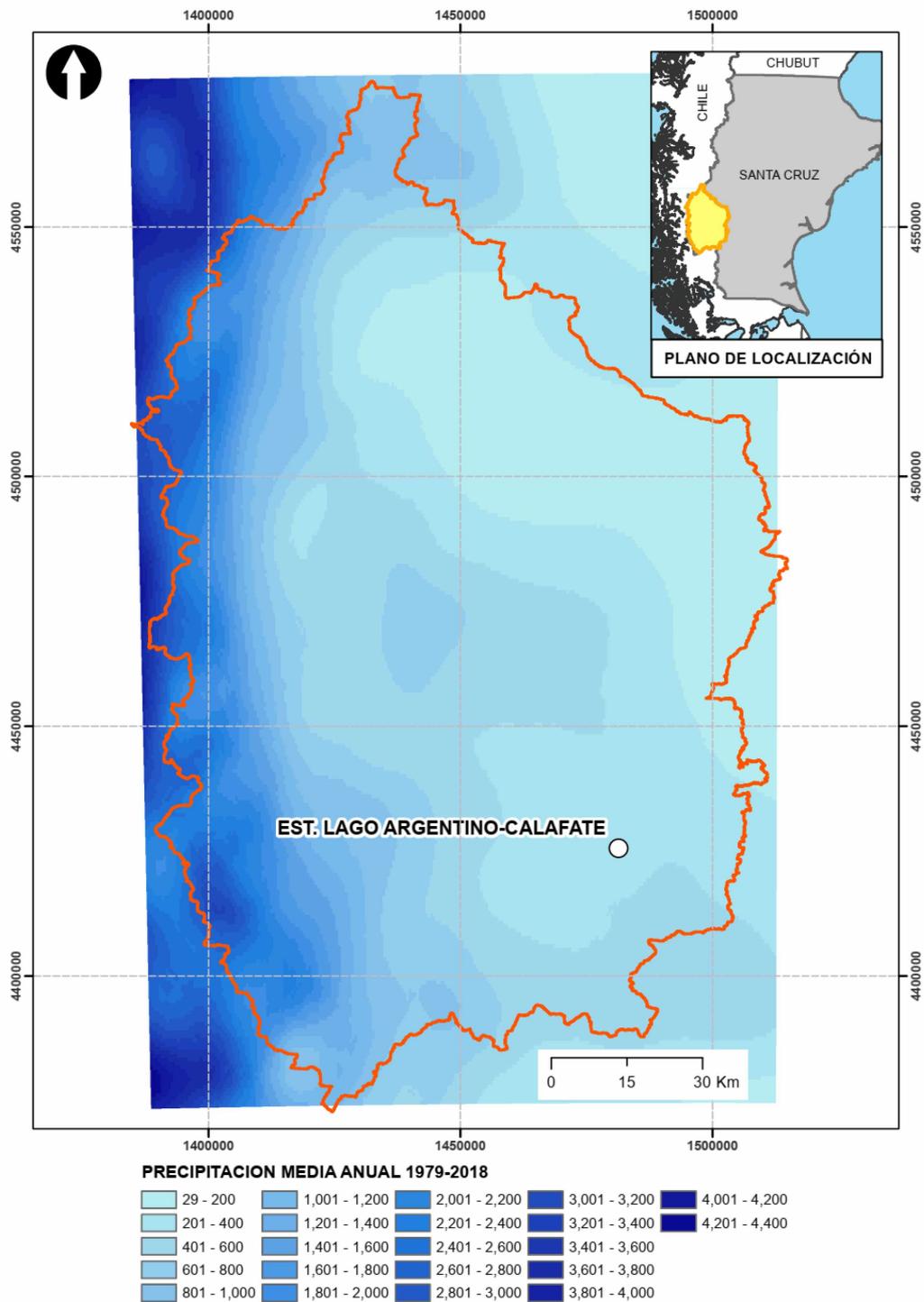


Figura 6.11: Precipitación media anual (1979/2018) - CR2Met.

6.1.6. Precipitaciones. Análisis de frecuencia

a) Precipitaciones máximas mensuales y por períodos

Teniendo en cuenta el período anual con mayores caudales, se maximizaron precipitaciones mensuales de los meses de enero, febrero, marzo y abril, así como también del cuatrimestre en su conjunto.

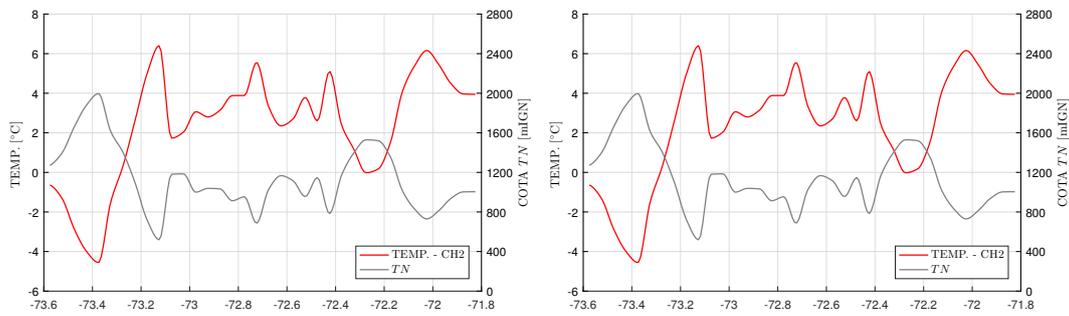


Figura 6.12: Temperatura anual 2008. Comparación CR2Met vs datos observados.

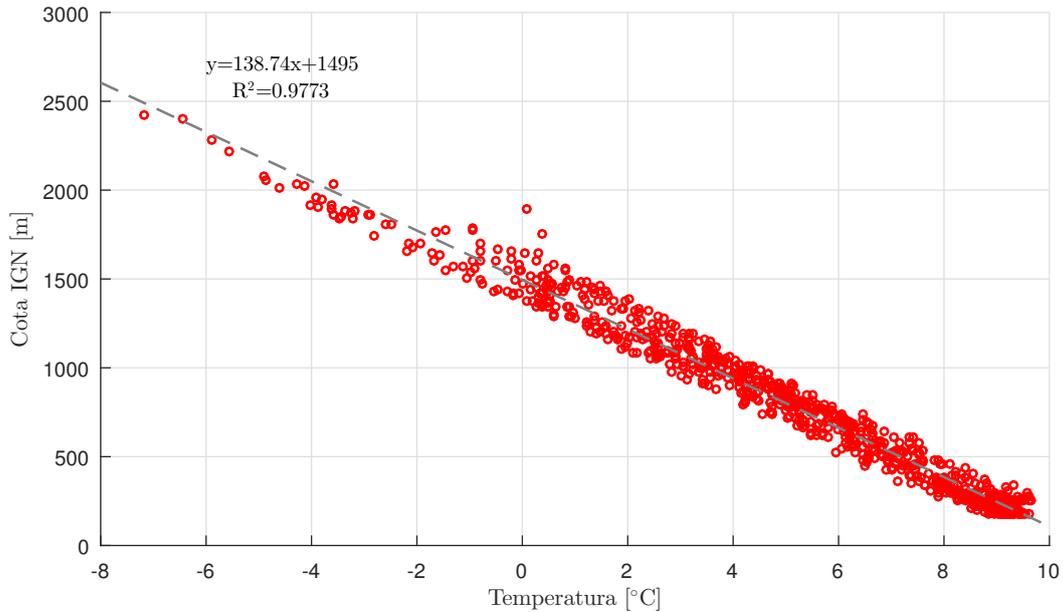


Figura 6.13: Gradiente de Temperatura en función de cotas (mIGN). CR2Met.

Con la finalidad de obtener estimaciones de precipitación para diferentes recurrencias en cada estación se utilizó un procedimiento de análisis de frecuencia regional simplificado, a efectos de contemplar las diferencias hidrometeorológicas entre las estaciones de acuerdo a su ubicación e incrementar la consistencia de los resultados. En función de la cantidad de estaciones, su ubicación, longitudes de registros y parámetros estadísticos, se dividió el análisis en 2 regiones; diferenciando entre estaciones pluviométricas en la base de la cordillera o muy próximas y las estaciones más alejadas de la misma. Se trabajó con la serie setiembre/1962 – agosto/2019, utilizando estaciones que tuvieran 10 o más años con información.

El procedimiento utilizado consistió en:

- Realizar el análisis de frecuencia de precipitaciones en estaciones individuales, obteniendo precipitaciones máximas para diferentes recurrencias.
- Obtener un factor en cada estación entre precipitaciones de distintas recurrencias y la precipitación media en la misma:

$$K_{iT} = \frac{P_{ijT}}{PM_{ij}}$$

Siendo i : estación de medición de precipitaciones, j : mes o período utilizado, T : recurrencia

y PM_{ij} : precipitación media en la estación i en el período j .

- Determinar un factor medio regional (para cada región de trabajo y recurrencia T): $Kmed_{jT}$
- Obtener la precipitación máxima en cada estación en función del factor medio regional para cada recurrencia y la precipitación media de cada estación:

$$Pmax_{ijT} = Kmed_{jT} PM_{ij}$$

A continuación, se presentan resultados para el mes de marzo, acompañándose resultados completos en el Anexo B.

La Tabla 6.2 resume los estadísticos principales para las precipitaciones del mes de marzo. Los mayores valores corresponden a las estaciones ubicadas en el pie de la cordillera o proximidades.

	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	Parque Nac. los Glaciares	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
N	40	19	27	28	39	29	30	16	9	26
X [mm]	16,2	17,2	19,3	37,6	11,3	83,7	36,6	107,0	61,4	59,8
S [mm]	15,8	25,6	23,1	39,2	15,2	42,8	26,3	53,6	29,1	44,4
\mathcal{S}	1,88	2,71	2,84	1,83	2,15	0,45	1,04	0,42	0,34	0,95
\mathcal{V}	0,97	1,49	1,20	1,04	1,35	0,51	0,72	0,50	0,47	0,74

N : cantidad de años con información disponible

X : media

S : desvío estándar

\mathcal{S} : coeficiente de asimetría

\mathcal{V} : coeficiente de variación

Tabla 6.2: Precipitaciones mensuales del mes de marzo. Estadísticos principales.

Como modelo de análisis de frecuencias se utiliza WxAFMULTI (versión actualizada del modelo AFMULTI; FICH, 1993), cuyos detalles se presentan en 7.1.2(b)(i).

En la Figura 6.14 se muestra el ajuste a las precipitaciones mensuales (en mm) de marzo de la estación Lago Dickson, como ejemplo, mientras las Figura 6.15 y Figura 6.16 presentan los factores observados en cada estación ($K_{iT} = P_{ijT}/PM_{ij}$) para el mismo mes en la región Z2 (cordillera) y Z1 (mayormente dentro de la estepa patagónica).

El vector de crecimiento en la región Z1 tiene mayor pendiente, no obstante, debe considerarse que en esta región, las estaciones tienen valores mucho más bajos de precipitación.

Siguiendo con el procedimiento indicado y aplicando los factores regionales correspondientes, se presentan en la Tabla 6.3 las precipitaciones mensuales maximizadas individualmente para enero, febrero, marzo y abril.

De manera similar se obtuvieron precipitaciones maximizadas en el período completo de enero hasta abril (120 días). La Figura 6.17 presenta los datos de precipitación adimensionalizados y los vectores regionales obtenidos, en la Tabla 6.4 se muestran las precipitaciones para diferentes recurrencias en el período que abarca del 01 de enero al 30 de abril.

Se deduce que para la máxima recurrencia analizada (10.000 años) se podrían tener valores

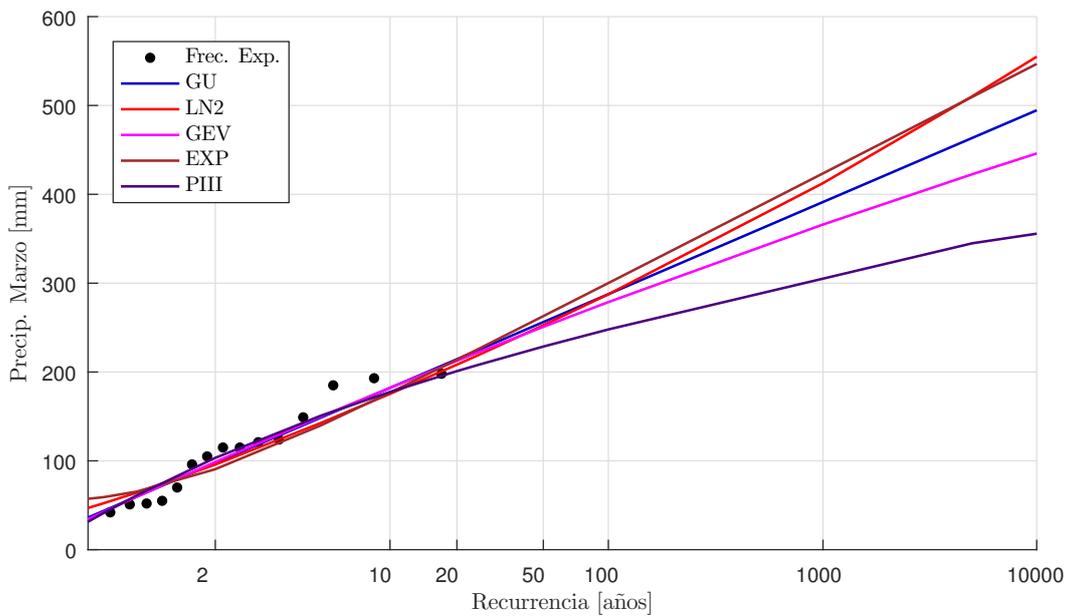


Figura 6.14: Análisis de frecuencia de precipitaciones mensuales (mm) – Marzo – Lago Dickson.

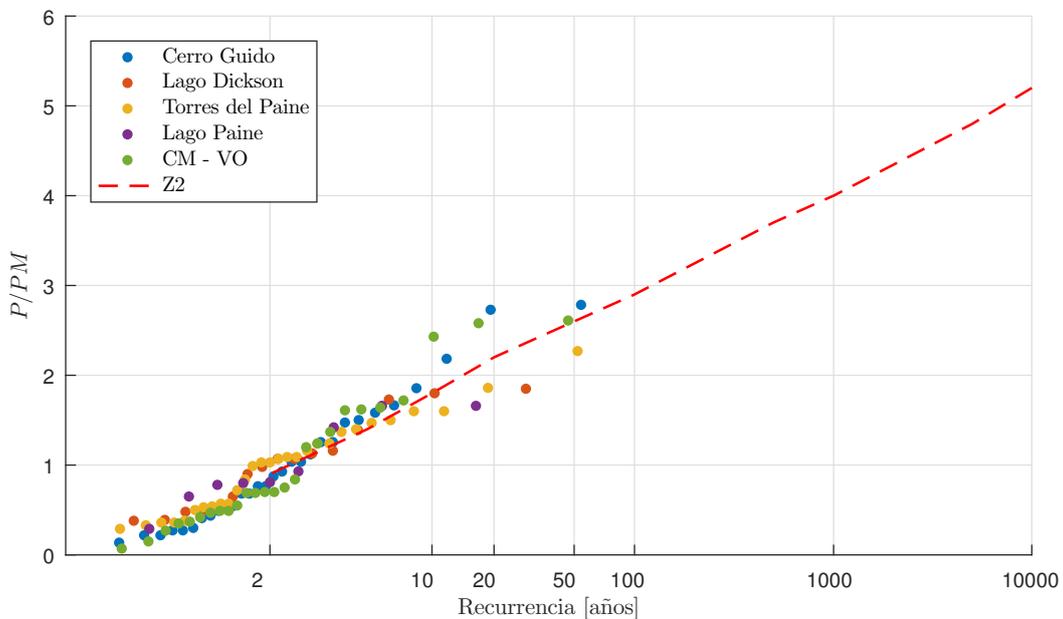


Figura 6.15: Precipitaciones mensuales adimensionales del mes de marzo y vector regional – región Z2.

entre 800 a 1.300 mm al pie de la cordillera en el cuatrimestre enero – abril, y valores del orden de los 300 a 600 mm hacia el este, disminuyendo en la medida que la estación se aleja de la cordillera.

El desarrollo completo para obtener los resultados indicados se presenta en el Anexo B.

b) Precipitaciones máximas diarias

Se seleccionaron precipitaciones máximas diarias anuales (mm), para duraciones de 1 a 5 días, comprendidas en el período setiembre/1962 – agosto/2019, favoreciendo la selección por año hidrológico la independencia estadística entre los eventos. Las precipitaciones máximas selec-

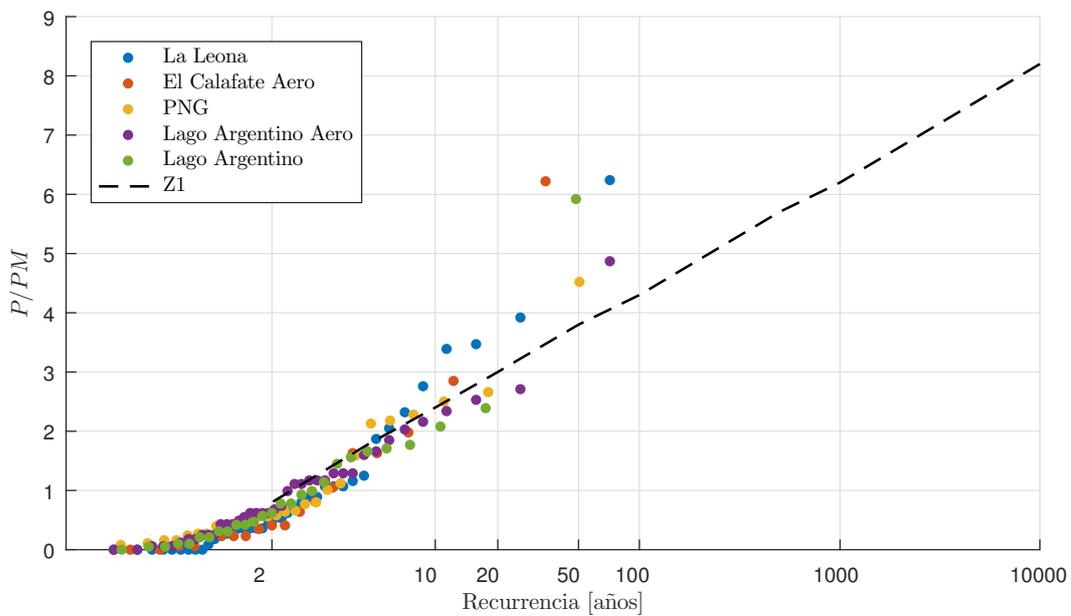


Figura 6.16: Precipitaciones mensuales adimensionales marzo y vector regional – región Z1.

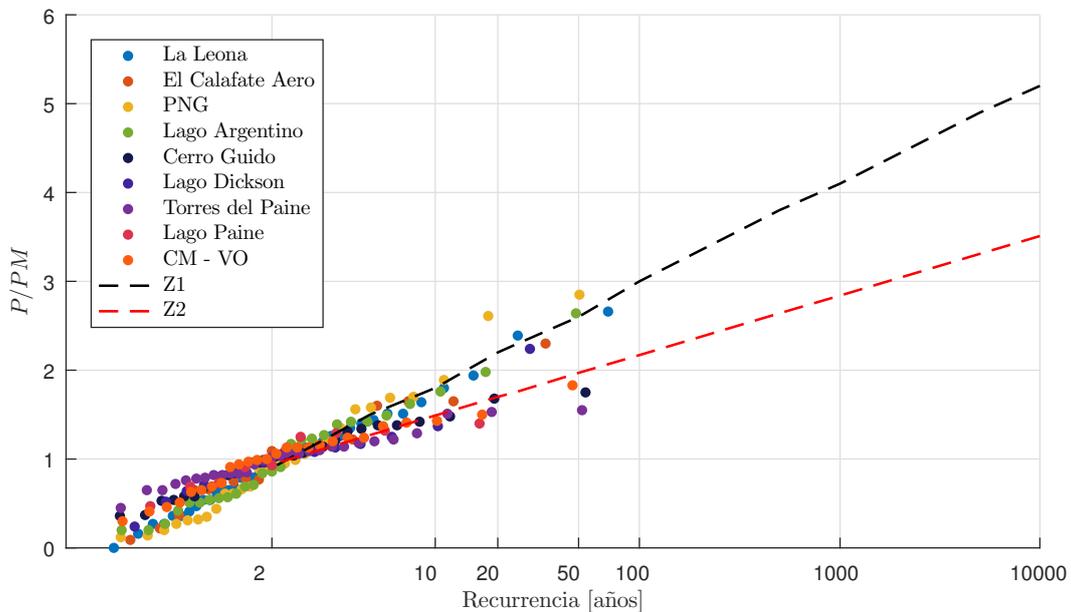


Figura 6.17: Precipitaciones mensuales adimensionales y vector regional (E+F+M+A).

cionadas se presentan en el Anexo B.

Se trabajó con estaciones que tuvieran al menos 10 años con información. Se dispone de estaciones con cantidad de datos variables, con un máximo de 58 años, teniéndose mayor densidad de estaciones en funcionamiento a partir de 1990. Como se indicó en el punto anterior, las estaciones se ubican en regiones hidrometeorológicas diferentes. De manera de tener resultados de mayor consistencia se aplica el método regional simplificado indicado en el punto previo.

Las estaciones fueron dispuestas en 2 grupos, dadas las notables diferencias existentes, entre las estaciones próximas a la cordillera y las que se alejan de la misma hacia el este. La Tabla 6.5 resume los estadísticos principales correspondientes a las precipitaciones máximas diarias de las estaciones ubicadas en la región Z2 (próximas a la cordillera).

ENERO - PRECIPITACIONES MENSUALES PARA DIFERENTES. RECURRENCIAS [mm]

$1 - F$	T [años]	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	Parque Nac. los Glaciares	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	10.000	86	55	75	128	81	294	90	396	212	292
0,0002	5.000	80	51	70	119	75	274	84	370	198	273
0,001	1.000	66	42	57	98	62	230	70	310	166	229
0,002	500	60	38	52	89	56	211	65	285	152	210
0,01	100	45	29	40	68	43	166	51	225	120	166
0,02	50	39	25	35	59	37	147	45	199	106	147
0,04	25	33	21	29	50	31	128	39	172	92	127
0,05	20	31	20	27	47	30	122	37	164	88	121
0,1	10	25	16	22	37	24	102	31	137	73	101
0,2	5	18	12	16	28	18	81	25	109	58	81
0,5	2	9	6	8	13	8	50	15	67	36	49

FEBRERO - PRECIPITACIONES MENSUALES PARA DIFERENTES RECURRENCIAS [mm]

$1 - F$	T [años]	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	Parque Nac. los Glaciares	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	10000	81	110	97	165	62	326	142	477	349	305
0,0002	5000	75	103	90	154	57	305	132	445	326	285
0,001	1000	62	85	74	127	47	254	110	371	271	237
0,002	500	57	77	68	115	43	232	101	339	248	217
0,01	100	44	59	52	89	33	181	79	264	194	169
0,02	50	38	51	45	77	29	159	69	232	170	149
0,04	25	32	44	38	65	24	137	59	200	146	128
0,05	20	30	41	36	61	23	130	56	189	139	121
0,1	10	24	33	29	50	19	107	46	156	114	100
0,2	5	18	25	22	37	14	83	36	122	89	78
0,5	2	9	12	11	18	7	48	21	69	51	44

MARZO - PRECIPITACIONES MENSUALES PARA DIFERENTES RECURRENCIAS [mm]

$1 - F$	T [años]	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	Parque Nac. los Glaciares	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	10000	132	140	157	307	92	432	189	551	317	308
0,0002	5000	123	131	146	286	86	404	177	516	296	288
0,001	1000	101	108	120	235	71	339	148	433	249	242
0,002	500	92	98	109	214	64	311	136	397	228	222
0,01	100	70	75	83	163	49	246	108	314	180	175
0,02	50	61	65	72	141	42	218	95	278	160	155
0,04	25	51	55	61	119	36	189	83	242	139	135
0,05	20	48	51	57	112	34	180	79	230	132	129
0,1	10	39	41	46	90	27	151	66	193	111	108
0,2	5	29	30	34	66	20	121	53	154	89	86
0,5	2	13	14	16	31	9	75	33	96	55	54

ABRIL - PRECIPITACIONES MENSUALES PARA DIFERENTES RECURRENCIAS [mm]

$1 - F$	T [años]	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	Parque Nac. los Glaciares	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	10.000	169	143	131	246	101	475	195	560	355	455
0,0002	5.000	157	133	122	229	94	444	182	524	332	425
0,001	1.000	130	110	101	190	78	373	153	440	279	357
0,002	500	118	100	92	173	71	342	140	403	256	327
0,01	100	91	78	71	134	55	270	111	318	202	258
0,02	50	80	68	62	117	48	239	98	282	179	229
0,04	25	68	58	53	99	41	208	85	245	155	199
0,05	20	64	54	50	94	38	197	81	233	148	189
0,1	10	52	44	40	76	31	165	68	195	124	158
0,2	5	40	34	31	58	24	132	54	156	99	126
0,5	2	21	17	16	30	12	82	33	96	61	78

Tabla 6.3: Precipitaciones mensuales maximizadas. Meses de enero, febrero, marzo y abril.

La Figura 6.18 presenta las precipitaciones máximas en cada estación (adimensionalizadas respecto a su media) en estaciones representativas del sector próximo a la cordillera y el vector K medio determinado (vector regional).

$1 - F$	T [años]	El Calafate Aero	Lago Argentino	Parque Nac. los Glaciares	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	10.000	308	310	578	235	1000	402	1294	799	888
0,0002	5.000	288	290	541	220	943	378	1220	753	837
0,001	1.000	242	243	454	184	809	325	1047	647	718
0,002	500	222	223	416	169	752	302	973	601	667
0,01	100	175	176	328	134	618	248	800	494	549
0,02	50	155	156	291	118	560	225	725	447	497
0,04	25	134	135	252	103	502	201	649	401	445
0,05	20	128	129	240	98	483	194	625	386	429
0,1	10	107	108	201	82	423	170	548	338	376
0,2	5	85	86	160	65	361	145	467	288	321
0,5	2	53	53	99	40	267	107	346	213	237

Tabla 6.4: Precipitaciones máximas período enero – abril para diferentes recurrencias.

	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
N	36	30	16	9	26
X [mm]	35,8	25,4	47,2	38,2	40,6
S [mm]	11,4	11,9	20,3	11,7	11,8
CS	0,52	1,41	1,43	1,24	0,14
CV	0,32	0,47	0,43	0,31	0,29

Tabla 6.5: Precipitaciones máximas diarias (1 día). Estadísticos principales.

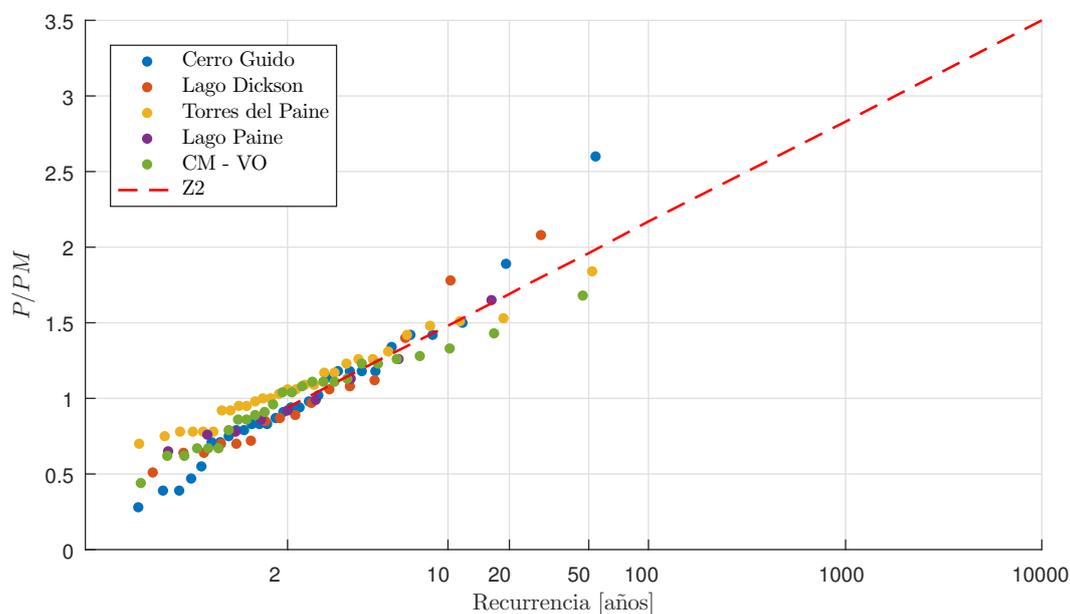


Figura 6.18: Vector K región base cordillera. Análisis regional precipitación máxima, 1 día.

La Tabla 6.6 muestra las precipitaciones máximas diarias anuales (1 día) obtenidas para la subregión próxima a la cordillera, mientras la Tabla 6.7 presenta las precipitaciones máximas anuales con 5 días de duración. La Información utilizada y resultados completos se adjuntan en el Anexo B.

T [años]	Torres del Paine DGA	Cerro Guido DGA	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
10.000	125	89	165	134	142
1.000	102	72	134	108	115
100	78	55	102	83	88
50	70	50	93	75	80
20	61	43	80	65	69
10	53	38	70	57	60

Tabla 6.6: Precipitaciones máximas diarias anuales en 1 día (mm) según meteorología regional – zona base cordillera.

T [años]	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
10.000	239	144	305	225	272
1.000	194	117	247	183	220
100	148	90	189	140	169
50	135	81	172	127	153
20	116	70	149	110	132
10	102	62	130	96	116

Tabla 6.7: Precipitaciones máximas anuales en 5 días (mm) según meteorología regional – zona base cordillera.

6.1.7. Análisis de frecuencia de temperaturas

a) Frecuencia observada de temperaturas

En la Figura 6.19 pueden observarse las frecuencias de temperaturas registradas a lo largo del año. En este caso una temperatura 0.95 (curva violeta superior) indica que el 95% del tiempo se tuvieron valores menores a la temperatura correspondiente, en el mes que se trate, en promedio en la serie 1962 – 2019.

La curva naranja central representa los valores de temperatura en cada mes que se dan el 50% del tiempo en promedio.

En la misma Figura 6.19 se acompaña la evolución de temperaturas en años característicos. Por ejemplo, el año 2011/12 tuvo temperaturas elevadas en la primavera de 2011 y muy altas temperaturas al inicio del verano. En 2007/08 se tuvo invierno y primavera con temperaturas relativamente bajas y altas temperaturas a finales del verano. El año 2017/18 tuvo un comportamiento con altas temperaturas en el mes de julio, valores cercanos a los medios en la primavera y ligeramente por encima al final del verano.

b) Temperaturas máximas mensuales

Se realizó un análisis de frecuencia de temperaturas mensuales, seleccionando la distribución Normal o de Gauss para representar las mismas. En la Figura 6.20 se pueden observar las

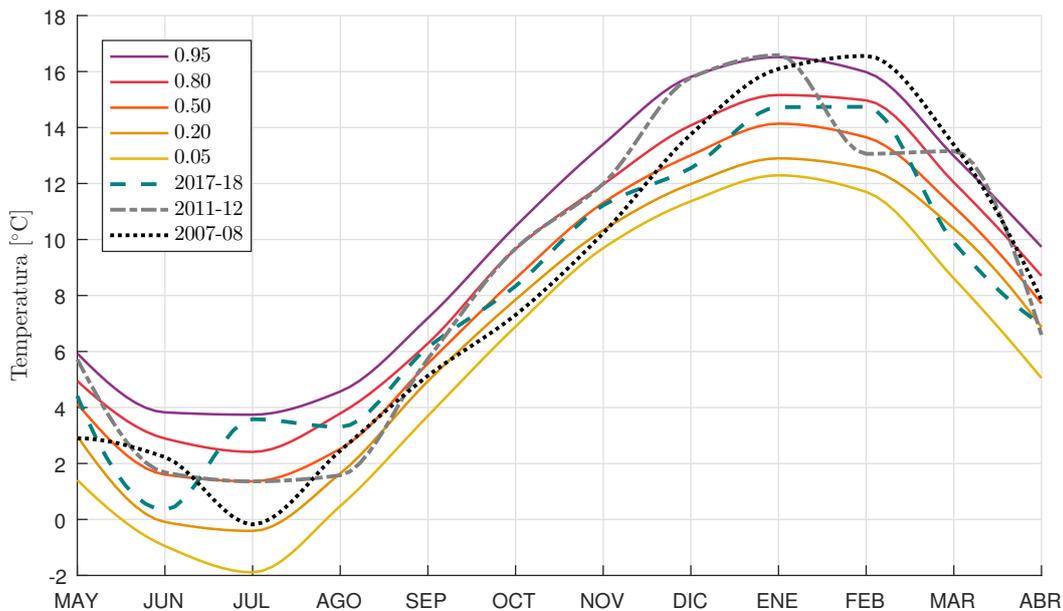


Figura 6.19: Distribución de frecuencias de temperaturas El Calafate SMN.

temperaturas para diferentes recurrencias a lo largo del año, incluyéndose también valores registrados en años característicos.

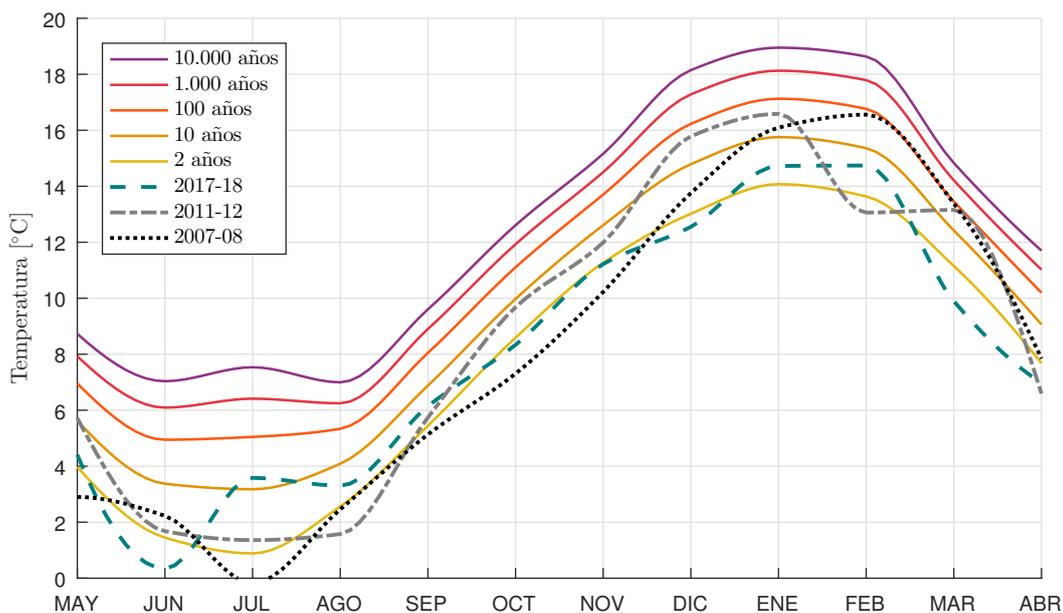


Figura 6.20: Temperaturas mensuales con diferentes recurrencias – comparación con años característicos.

Esta Figura 6.20 permite una mejor caracterización de los eventos registrados, en relación a la probabilidad anual que los valores sean alcanzados o superados o su inversa la recurrencia (expresada en años). Puede indicarse entonces que el año 2011/12 tuvo temperaturas con recurrencias del orden de 5 años en la primavera de 2011 y cercanas a 100 años al inicio del verano. En 2007/08 se tuvo una primavera con temperaturas menores a los 2 años de recurrencia, alcanzándose temperaturas de 100 años de recurrencia a finales del verano. El año 2017/18 tuvo temperaturas con recurrencia entre 10 y 25 años en el mes de julio, valores del orden de 2 años en la primavera y del orden de 5 años de recurrencia al final del verano.

6.2. Caracterización y análisis de consistencia de la serie de caudales en CHF

6.2.1. Continuidad de mediciones y aforos disponibles

La serie de caudales diarios informados por la SIPH se inicia el 19/12/1955 y se mantiene hasta la actualidad con una buena continuidad general de las mediciones. La cantidad de días con datos faltantes respecto al total es del orden del 4,2%. Se tienen faltantes de información de caudales diarios en los siguientes períodos:

- Abril a setiembre 1957.
- Mayo 1958.
- Enero 1963 (3 días)
- Septiembre 1976 a Agosto 1977 (se dispone de aforos puntuales).
- Enero a mayo 1992.
- Septiembre 2017 a Marzo 2018 (se informan alturas de escala y aforos puntuales).

En la estación CHF se dispone de 2.110 aforos de caudales entre enero de 1958 y enero de 2020, realizados por la SIPH (Figura 6.21). El máximo caudal aforado es de 2.254 m³/s (02/03/1966).

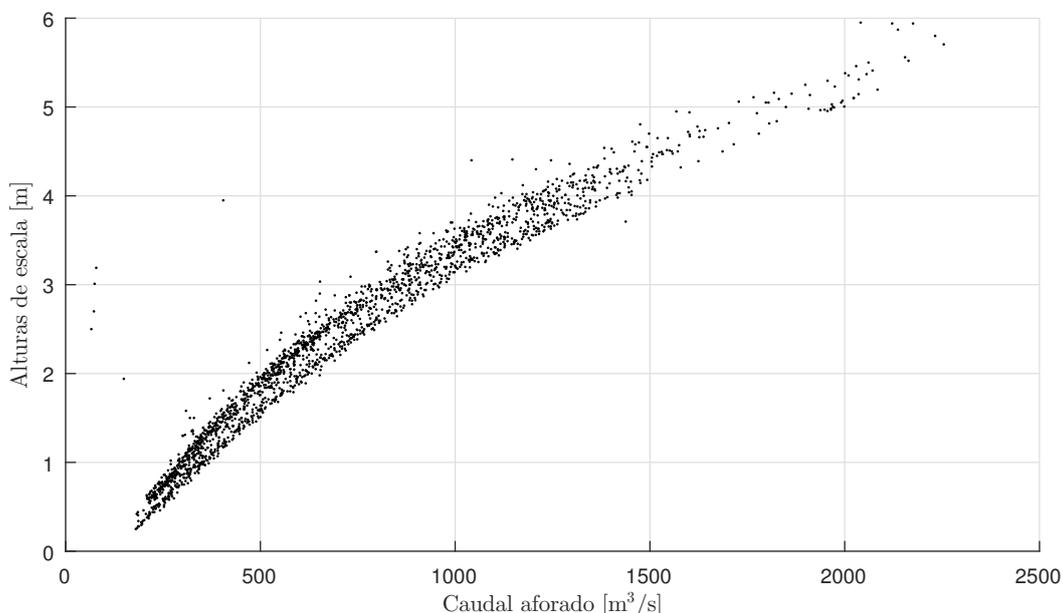


Figura 6.21: Aforos realizados en CHF.

La serie de caudales diarios se deduce obtenida a partir del ajuste de un número considerable de curvas de descarga ($H-Q$). Las variaciones en dichas curvas, normalmente se atribuyen a modificaciones en las condiciones de medición (cambios en la sección transversal o cambios en

la escala de medición, u otro elemento). A su vez, Lara (2016) muestra una posible inconsistencia en la serie de alturas de escala de CHF, por lo que en el punto siguiente se realiza un análisis de consistencia sobre la serie de caudales máximos diarios a efectos de verificar si los potenciales movimientos de escala (u otras alteraciones relacionadas a ajustes de la curva de descarga) tienen efecto significativo sobre los mismos.

Asimismo, teniendo en cuenta la gran cantidad de aforos disponibles se realiza una comparación entre dichos aforos y los caudales máximos de crecidas informados.

6.2.2. Caudales anuales

En la Figura 6.22 se presentan los caudales medios anuales en CHF (Q_{anual}), desde el año 1958/59 hasta 2018/19. En la misma figura se grafica la media histórica del período (Q_{med} , 729,9 m^3/s), la media deslizando cronológica ($Q_{med.cron}$, donde cada valor representa el valor medio de la serie desde el inicio hasta el año considerado) y medias deslizando cada 5 años y 10 años ($Q_{med.des10}$).

Se aprecia un período inicial con caudales anuales alternando por encima y debajo de la media, un período con caudales relativamente bajos entre 1968/69 – 1978/79; un nuevo período con caudales oscilantes alrededor de la media entre 1979/80 – 2007/08 y un último período donde se aprecian caudales anuales crecientes (tendencia positiva). La media anual pasa de 708 m^3/s en la serie 1958/59 – 2007/08 a 729,9 m^3/s en la serie completa. Este período final es todavía temporalmente muy corto para representar una tendencia positiva sostenida de la serie, pero alerta sobre tal posibilidad.

El mayor caudal anual se dio en el año 2017/2018, siguiéndole en magnitud el correspondiente al año 2008/09, luego 2012/13, 1959/60 y 1965/66 considerando los 5 caudales anuales mayores.

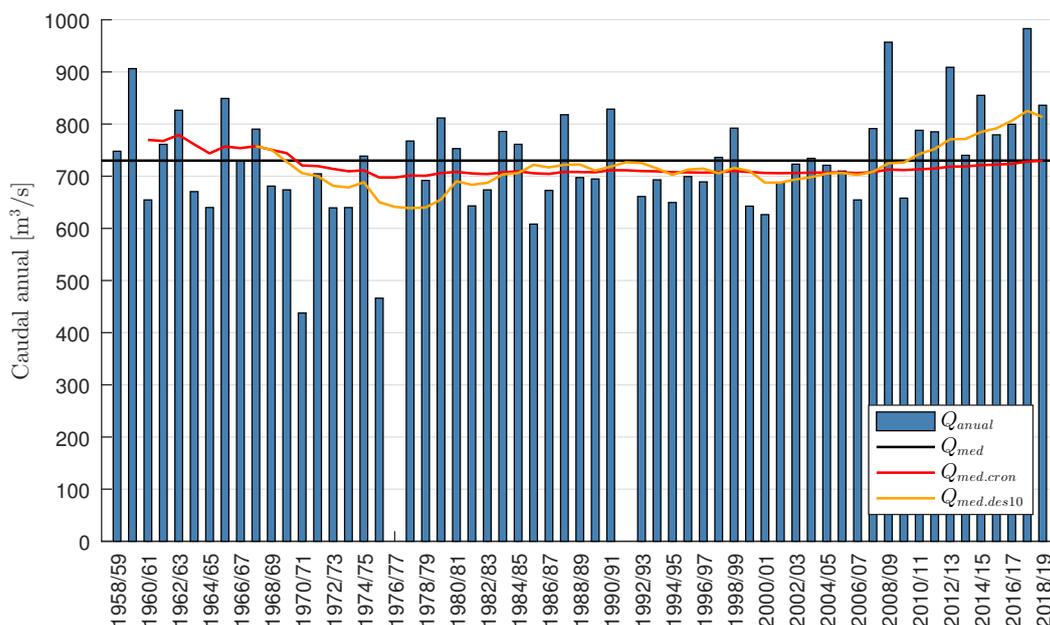


Figura 6.22: Caudales anuales CHF (1958/59 – 2018/19).

Aunque con menor claridad, por la faltante de información, un hecho similar se observa en La Leona (Figura 6.23).

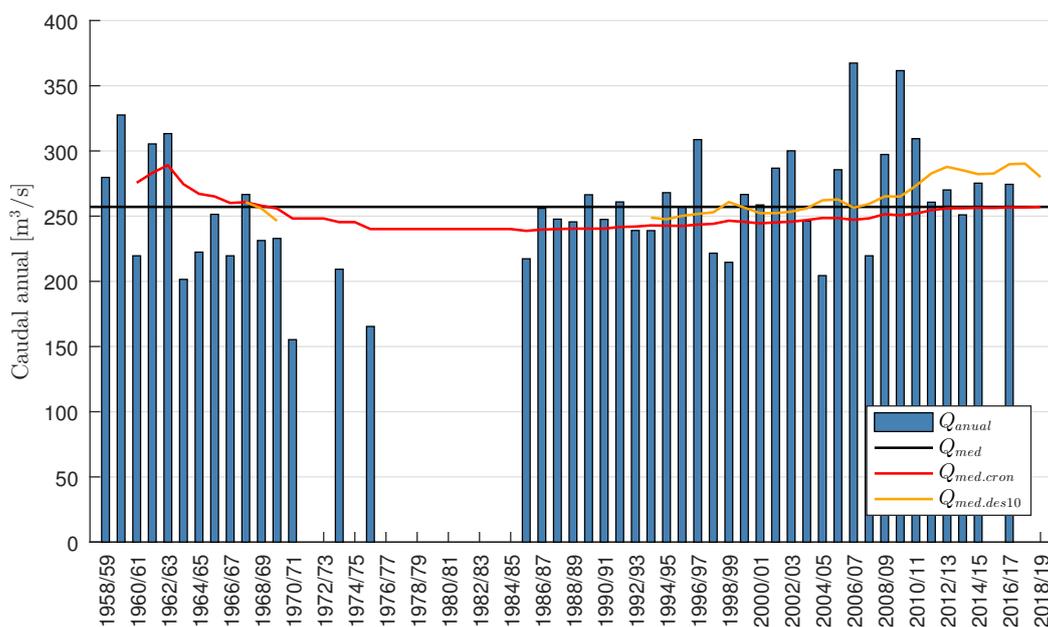


Figura 6.23: Caudales anuales LLEO (1958/59 – 2018/19).

6.2.3. Caudales diarios máximos anuales

Como primer paso para el análisis de frecuencia de extremos, se seleccionaron los caudales máximos diarios anuales, correspondientes al año hidrológico setiembre – agosto, los cuales fueron presentados en la Figura 5.8. En dicha figura se muestran los caudales máximos diarios anuales en la serie 1957/58 – 2018/19 en CHF, resaltándose los años en los que dichos caudales máximos surgen como producto de la rotura del bloqueo causado por el glaciar Perito Moreno.

Del análisis de la serie de caudales se deduce lo siguiente:

- El caudal máximo diario anual corresponde al año 1988 con $2.520 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el mínimo de la serie es de $762 \text{ m}^3/\text{s}$ registrado en 1971.
- De la serie de 60 años, los primeros 8 máximos corresponden a caudales ocasionados por el fenómeno de rotura.
- El mayor caudal máximo “ordinario” o sin presencia de rotura es el del año 2008/09 con $1.808 \text{ m}^3/\text{s}$ (orden 9 en la secuencia ordenada).
- Existen años con roturas donde el caudal máximo alcanzado no resulta significativo (por ejemplo, marzo 2012)
- La frecuencia de eventos con rotura, que producen caudales máximos anuales en CHF, fue mayor en el primer tercio de la serie.

α	0,01	0,05	0,1
V_c	2,33	1,64	1,28

Tabla 6.8: Valores críticos del test de Mann Kendall para niveles de significación de 1 %, 5 % y 10 %.

- Asimismo, se menciona que existen situaciones de rotura que no han originado valores máximos en el año que se produjeron (por ejemplo, la rotura de julio/08 originó en CHF un caudal de solo 800 m³/s, siendo el caudal máximo de 1.618 m³/s registrado en febrero de dicho año; esta situación es producto de la combinación de volumen descargado por el lago Rico y niveles del lago Argentino presentes al momento de la rotura).

6.2.4. Análisis de homogeneidad – caudales diarios máximos anuales en CHF

Se realizaron análisis de homogeneidad o estacionariedad, con el objetivo de detectar si las series de caudales extremos máximos del río Santa Cruz presentan cambios en la distribución de probabilidad o en sus parámetros, que pudieran deberse tanto a causas naturales como artificiales. Se aplicaron tests estadísticos y se realizaron análisis de series móviles.

Se aplicaron dos tests estadísticos no paramétricos, el test de Mann – Kendall y el test de Smirnov (ver Anexo B), para probar la hipótesis nula de que no hay cambios en la serie de crecidas máximas anuales. Los valores críticos del test de Mann Kendall para niveles de significación de 1 %, 5 % y 10 % se muestran en la Tabla 6.8

Los resultados obtenidos de la aplicación de este test se indican en la Tabla 6.9.

Serie	Estadístico V	Observación
CHF (1957/58 – 2018/19)	0,097	No rechaza hipótesis
CHF (1977/78 – 2018/19)	1,105	No rechaza hipótesis

Tabla 6.9: Aplicación del Test de Mann Kendall.

Por otro lado, el test de Smirnov es de interés cuando se sospecha (o conoce) el año a partir del cual se producen interferencias en las series. Es por ello que se aplicó el test considerando al año 1976/77, año con falta de lecturas y a partir de cual se sospechan inconsistencias. Este test tampoco rechaza la hipótesis de homogeneidad planteada para los caudales máximos anuales, tomando como división de submuestra el año 1976/77 y años cercanos.

En la Figura 6.24 se presentan los caudales máximos anuales en CHF ($Q_{\max. \text{anual}}$), desde el año 1958/59 hasta 2018/19. En la misma figura se grafican la media histórica ($Q_{\text{med. max}}$), la media deslizando cronológica ($Q_{\text{med. cron. max}}$) y medias deslizando cada 10 años ($Q_{\text{med. des10. max}}$).

Esta serie no muestra tendencia en los últimos años. Se aprecia en la línea que representa la evolución de las medias cronológicas ($Q_{\text{med. cron. max}}$, línea roja en la Figura 6.24), que la misma se ha mantenido prácticamente sin variaciones en los últimos años. Las medias deslizando alternan

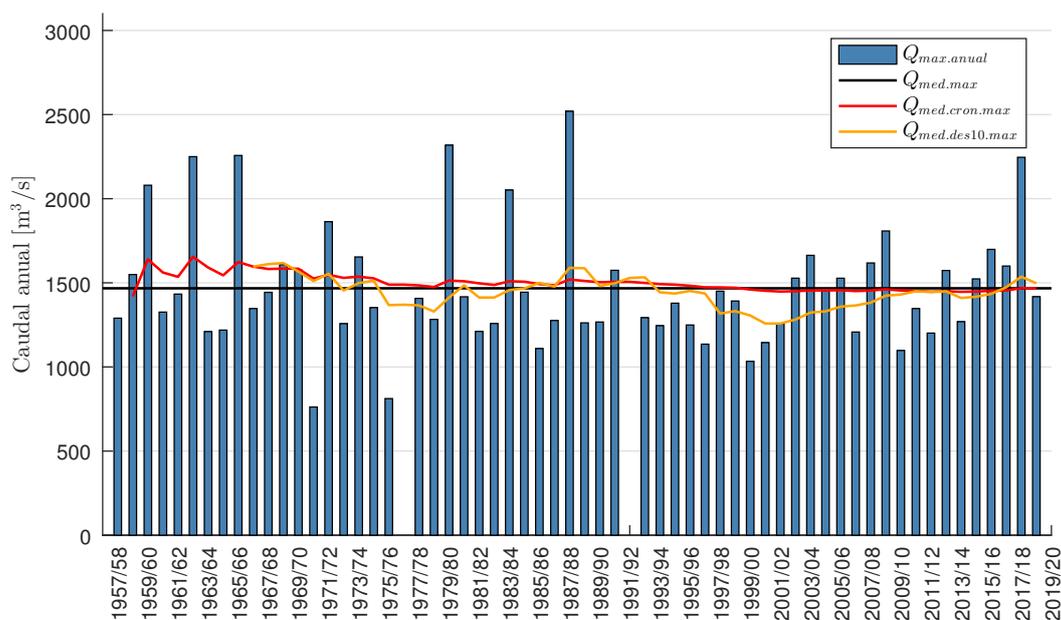


Figura 6.24: Caudales diarios máximos anuales CHF (1958/59 – 2018/19). Medias deslizantes y cronológicas.

por encima y debajo de la media.

A partir de los resultados obtenidos para la estación CHF se concluye que no existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis de homogeneidad, pudiendo considerarse por lo tanto la muestra de caudales máximos anuales analizada homogénea en el tiempo.

6.2.5. Relación entre caudales máximos de crecidas y caudales aforados

La mayoría de las crecidas de la serie han sido monitoreadas a través de numerosos aforos, en particular las del primer tercio de la serie disponible y del período final. Como ejemplo de ello, se presentaron previamente las Figuras para los eventos de 1966 y 2018 (ver Figura 4.3 y Figura 4.5).

Se realizó una comparación entre los caudales aforados y los caudales en períodos de crecida informados (mediante la relación $H-Q$). A efectos de obtener un error de estimación de caudales en los períodos de crecidas, se realizó un ejercicio considerando, para cada evento anual de crecida, una comparación entre el aforo puntual y el caudal diario informado. Para ello se utilizó el aforo realizado en la fecha más cercana al de la ocurrencia del caudal máximo en cada año, (dentro de los 30 días de ocurrencia del Q_{max} como límite y considerando que el caudal no resulte menor al 20% del caudal máximo de crecida). Con estos criterios pudieron considerarse 44 crecidas de las 60 disponibles.

La Figura 6.25 adjunta presenta esta comparación, mostrando un alineamiento adecuado entre los puntos. Se calculó en cada caso un error porcentual, obteniéndose una media de estos errores del 0,4%, y un error medio absoluto del 3%; lo cual da consistencia a las estimaciones.

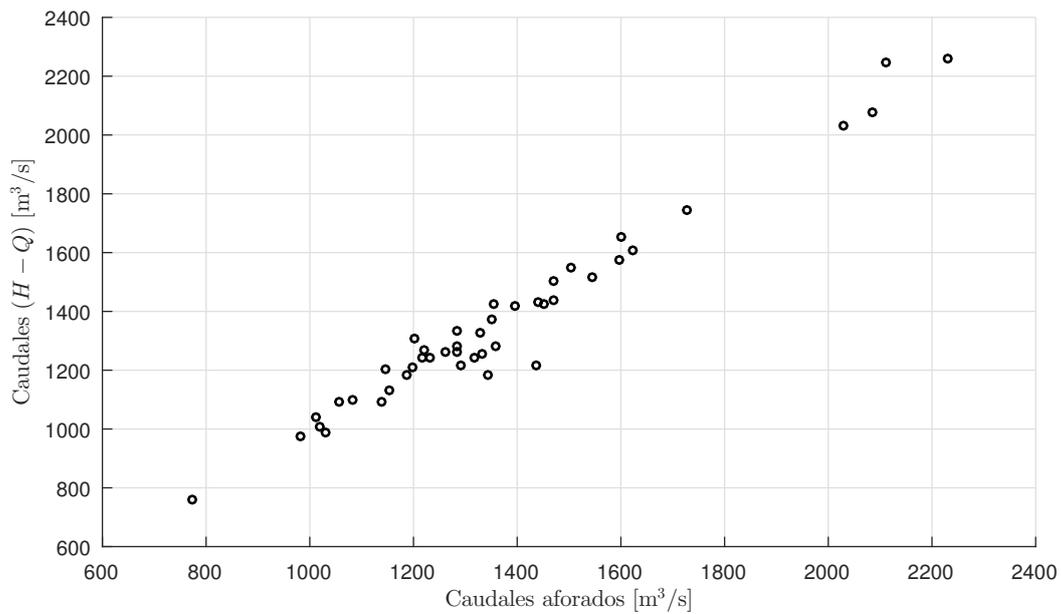


Figura 6.25: Comparación de caudales aforados – caudales informados ($H-Q$) durante eventos de crecidas.

El máximo caudal aforado en la serie es de 2.254 m³/s durante la crecida de 1966.

6.2.6. Relación entre caudales diarios y caudales instantáneos

La SIPH informa los caudales medios diarios, así como caudales instantáneos a partir de 1987. Se calculó un factor de comparación, igual a la relación entre el $Q_{instantaneo}$ y el Q_{diario} , para caudales mayores a 800 m³/s. Dicho factor arrojó un valor medio de 1,006, con un máximo de 1,055.

6.2.7. Relación entre caudales máximos diarios anuales y volúmenes de escurrimiento

A efectos de visualizar las relaciones existentes entre los caudales máximos diarios anuales y los volúmenes de crecidas en distintas duraciones, se presentan ejemplos correspondientes a la estación CHF en las Figura 6.26 y Figura 6.27, y a la estación LLEO en la Figura 6.28. Se puede apreciar una buena correspondencia general, con coeficientes de correlación mayores a 0,93, disminuyendo en la medida que los volúmenes se calculan para mayor duración.

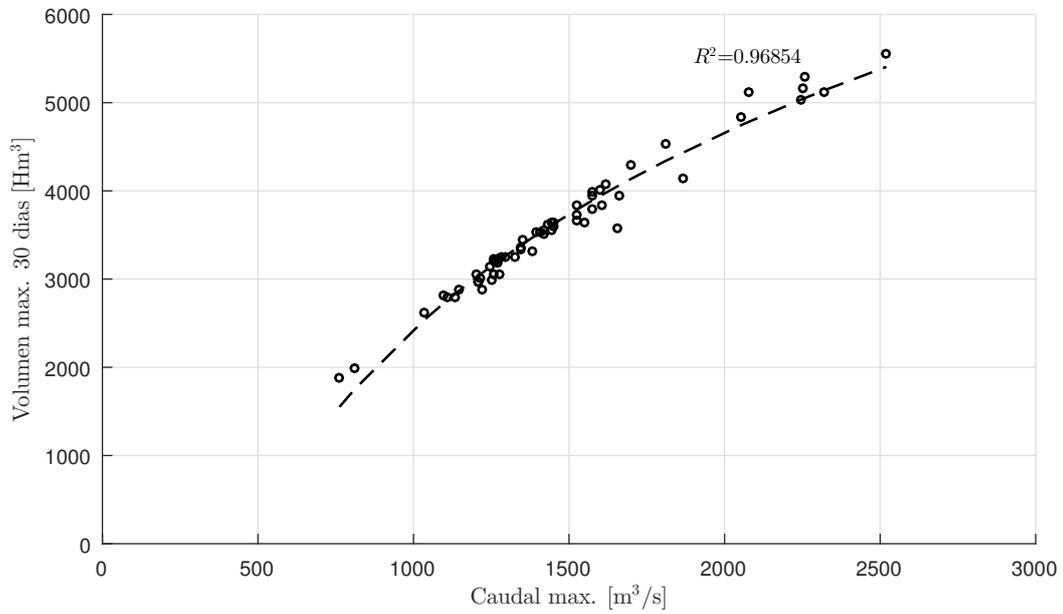


Figura 6.26: Relación entre caudales máximos anuales y volúmenes máximos en 30 días (CHF).

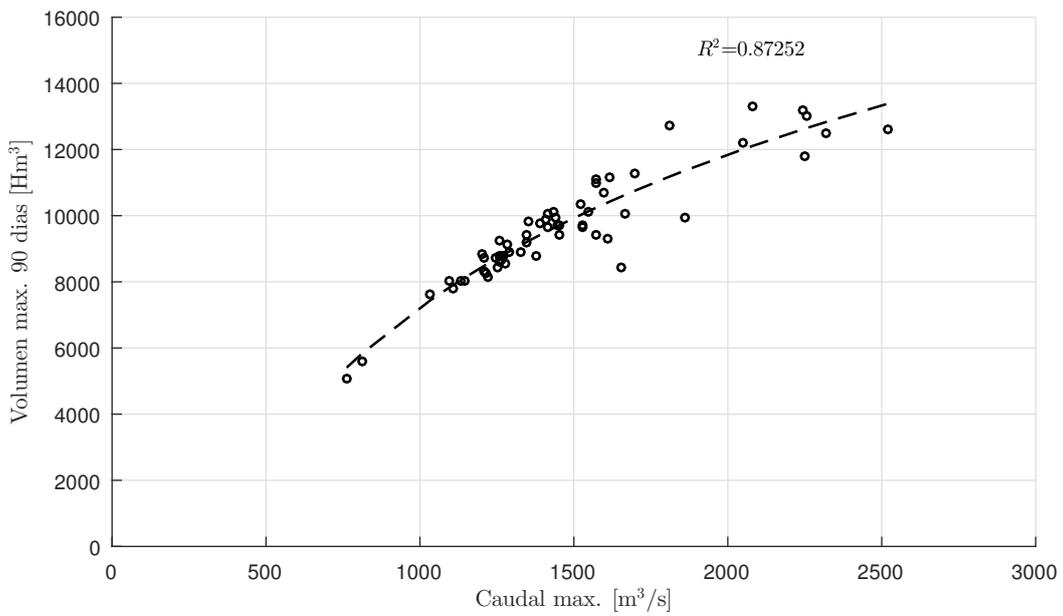


Figura 6.27: Relación entre caudales máximos anuales y volúmenes máximos en 90 días (CHF).

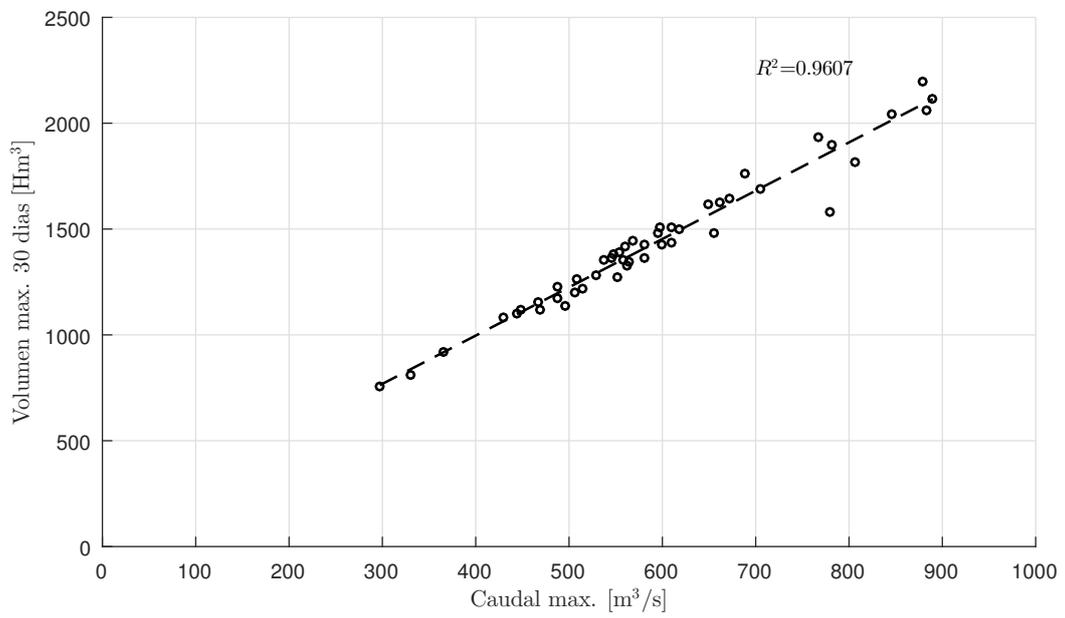


Figura 6.28: Relación entre caudales máximos anuales y volúmenes máximos en 30 días (LLEO).

Capítulo 7

CRECIDA DE DISEÑO CON BASE PROBABILÍSTICA – ESCENARIO BASE

7.1. Análisis de frecuencia de extremos máximos anuales

7.1.1. Introducción

Como se describiera anteriormente, las crecidas que se generan en la cuenca del río Santa Cruz son el producto de diferentes fenómenos hidráulicos – hidrológicos. Los mismos se encuentran asociados a la magnitud y complejidad de la cuenca, que abarca zonas de diferentes características geomorfológicas y climáticas, con un régimen de escurrimiento con fuerte componente de derretimiento nival, aportes de los glaciares y precipitaciones; todo ello asociado a la particularidad que impone el sistema lacustre y los eventuales desembalses rápidos causados por la rotura del cierre de hielo del glaciar Perito Moreno.

Del análisis de información disponible y antecedentes se mencionan los siguientes aspectos principales:

- La síntesis de la complejidad hidrológica de la cuenca es monitoreada en el río Santa Cruz en la estación de medición de caudales Charles Fuhr (CHF), a la salida del lago Argentino. Si bien la estación CHF es la más importante a los fines del estudio, la estación La Leona (LLEO) a la salida del lago Viedma, que monitorea el 42 % de la cuenca en términos areales, se considera de relevante apoyo.
- El Pliego Licitatorio presenta una estimación del caudal máximo de diseño, para 10.000 años de recurrencia, basado en análisis de frecuencia de caudales diarios máximos anuales

en la serie 1958/59 a 2004/05, utilizando distribuciones Gumbel y Pearson III con ajuste de parámetros por métodos tradicionales:

- Si bien se utilizan métodos tradicionales de estimación, no se aprecia mención respecto a análisis de consistencia, homogeneidad, intervalos de confianza, así como tampoco una justificación acabada del valor de 4.100 m³/s seleccionado como caudal de diseño, el cual surge en definitiva de una aproximación empírica. Por otra parte, tal análisis es anterior a la crecida 2017/2018, que ha podido ser monitoreada con adecuada precisión.
- Asimismo, se observa que tampoco se dispone de un hidrograma de diseño, que permita analizar su tránsito por los embalses actualmente en construcción.

Por consiguiente, surge necesario actualizar el análisis de frecuencia a efectos de verificar el caudal máximo de diseño para 10.000 años de recurrencia (y otras recurrencias menores), así como disponer de hidrograma/s de ingreso al embalse para diferentes recurrencias.

Las actualizaciones del análisis de frecuencia resultan aconsejadas en la bibliografía específica. Por ejemplo, ya el Grupo de Trabajo designado por el Subcomité de Hidrología del Interagency Advisory Committee on Water Data, Geological Survey (1982) de los Estados Unidos, en su revisión de las guías para determinación de frecuencias de crecidas indica: “a medida que se dispone de más años de registros en cada lugar, la estimación de la crecida potencial puede cambiar. Por lo tanto, una estimación puede quedar desactualizada a los pocos años de efectuada. Datos adicionales de crecidas pueden ser suficiente razón para recalcular la crecida potencial. Cuando se hace un nuevo cálculo, el análisis debe incorporar una revisión de las primeras estimaciones. Donde aparezcan diferencias, las mismas deben ser reconocidas y explicadas.”

Teniendo en cuenta que las obras en construcción disponen de capacidad de almacenamiento, para el pasaje de las crecidas, además de disponer del caudal máximo de diseño se desprende la necesidad de contar con hidrogramas para el manejo y operación en los embalses. Por lo tanto, es necesario realizar tanto análisis de frecuencia de caudales máximos como de volúmenes máximos con distintas duraciones.

7.1.2. Análisis de frecuencia de caudales diarios máximos anuales en CHF

Para análisis de frecuencia de caudales diarios máximos anuales, se utiliza como estación básica a CHF, siendo esta la estación que sintetiza el funcionamiento hidrológico de la compleja cuenca aguas arriba y que constituye los caudales del río Santa Cruz en su ingreso al sistema de embalses en construcción, obteniéndose también estimaciones en la estación La Leona sobre el río La Leona a la salida del lago Viedma.

(a) Estadísticos muestrales, análisis de submuestras y diagramas de momentos

Los estadísticos de la muestra: X (media), S (desvío estándar), CS (coeficiente de asimetría), CV (coeficiente de variación) y CK (coeficiente de kurtosis), se presentan en la Tabla 7.1 adjunta, para la serie completa disponible en CHF.

Serie	N [años]	X [m ³ /s]	S [m ³ /s]	δ	ν	K
CHF (1957/58 – 2018/19)	60	1.467,4	354,12	1,07	0,24	4,4

Tabla 7.1: Estadísticos principales de la serie de caudales del río Santa Cruz en CHF.

Se realizó también una evaluación de la variación de los parámetros con distintas submuestras posibles de obtener en el período 1957/58 – 2018/19, adoptando un período de análisis de 40 años (para cada submuestra). En la Figura 7.1 se pueden apreciar las relaciones entre los estadísticos CV y CS correspondiente a cada una de las submuestras, junto con los estadísticos teóricos de distribuciones. En la Figura 7.2 se presentan relaciones entre los estadísticos CS y CK

Los resultados obtenidos permiten tener una idea acerca de la variación de los parámetros en submuestras de una longitud que normalmente se considera “apropiada” para el análisis de frecuencia de valores extremos. En la media de las distintas submuestras hay diferencias entre el máximo y el mínimo de solo el 5 %, en el desvío estándar del 22 %, en el coeficiente de variación del 19 % y en el coeficiente de asimetría tal diferencia alcanza el 58 %.

Los estadísticos de la muestra completa (60 años) resultan próximos a los teóricos de la distribución Gumbel (GU), Log-Normal (LN2), o eventualmente Gamma (familia de distribuciones Pearson).

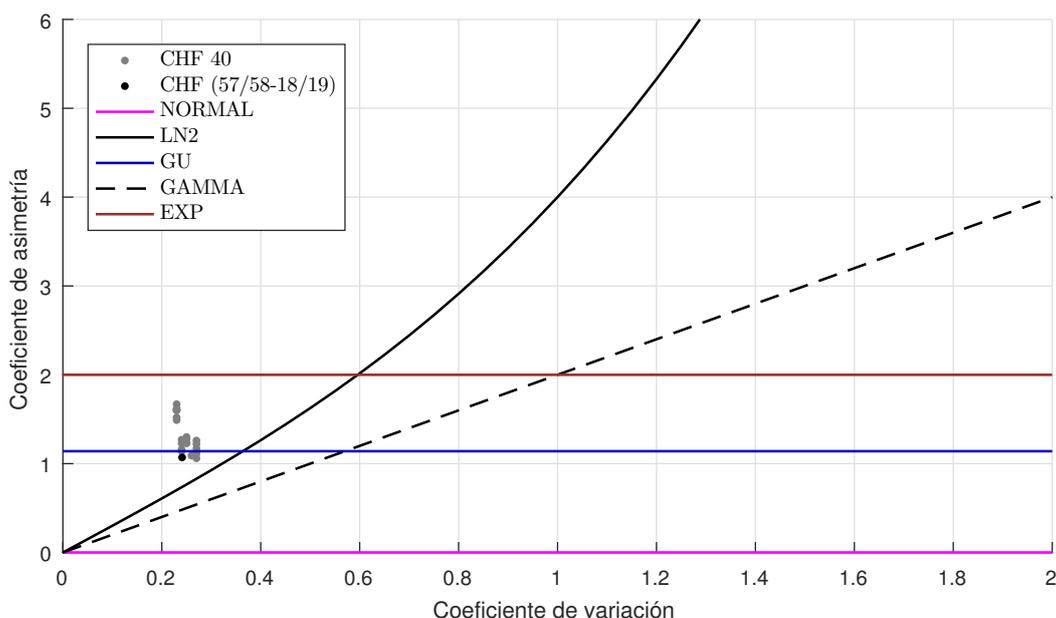


Figura 7.1: Relación coeficiente de variación – coeficiente de asimetría (submuestras 40 años).

Asimismo, se analizó la evolución cronológica de los parámetros estadísticos, tomando como

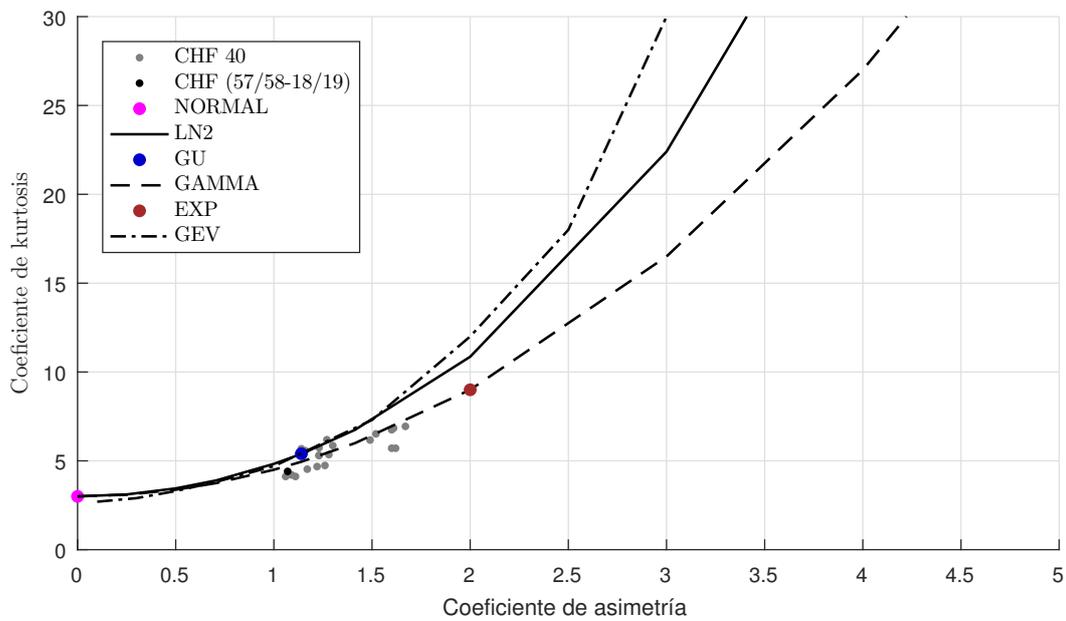


Figura 7.2: Relación coeficiente de asimetría – coeficiente de kurtosis (submuestras 40 años).

inicio una serie de 40 años de longitud que comienza en 1957/58 y se va incrementando hasta alcanzar la longitud total de la serie disponible (60 años).

En este análisis, en la media de las submuestras hay diferencias entre el máximo y el mínimo de solo el 3%, en el desvío estándar del 13%, 12% en coeficiente de variación, y de 10% en el coeficiente de asimetría.

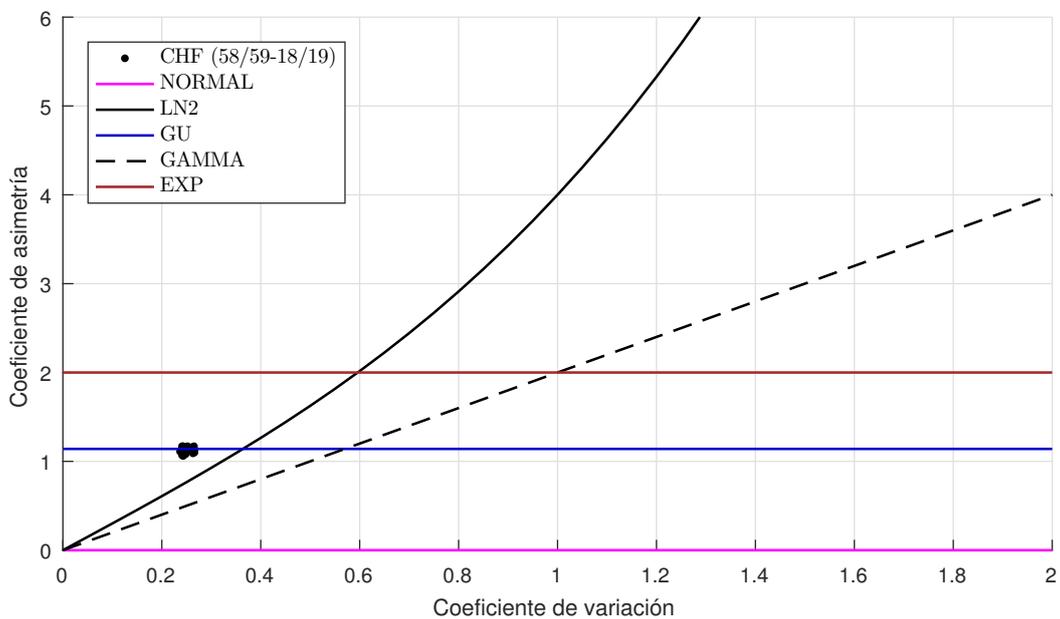


Figura 7.3: Relación coeficiente de variación – coeficiente de asimetría (submuestras cronológicas de 40 a 60 años).

Los resultados permiten deducir la poca variabilidad que ha tenido la muestra, en sus estadísticos, en los últimos 20 años.

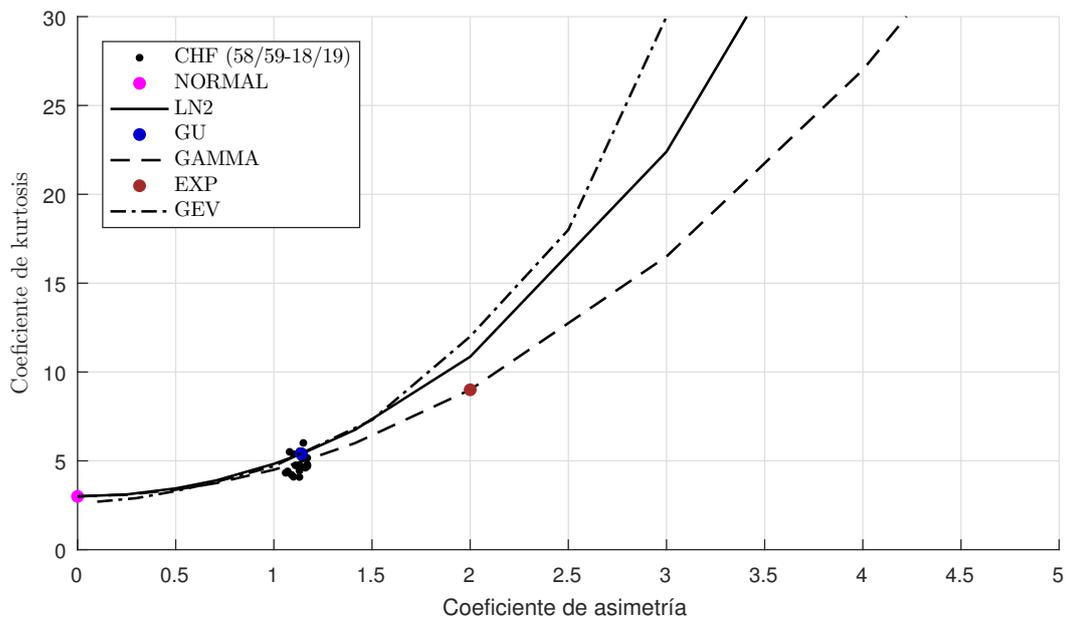


Figura 7.4: Relación coeficiente de asimetría – coeficiente de kurtosis (submuestras cronológicas de 40 a 60 años).

(b) Ajuste de distribuciones probabilísticas

(i) Funciones de distribución y métodos de estimación de parámetros

Sobre las series de caudales máximos anuales obtenidas se efectuó un análisis de frecuencia, utilizando los siguientes procedimientos de estimación (distribución probabilística y método de estimación de parámetros):

<u>Distribución</u>	<u>Método de ajuste de parámetros</u>
i. Log-Normal (LN2)	Máxima verosimilitud (MV)
ii. Gumbel (GU)	Momentos ponderados por probabilidades (MPP)
iv. General de Valores Extremos (GEV)	Momentos ponderados por probabilidades (MPP)
v. Pearson III (PIII)	Máxima verosimilitud (MV)
vi. Log-Pearson III (LPIII)	Momentos mixtos (MxM)
vii. Exponencial (EXP)	Momentos tradicionales (MoM)
viii. Wakeby (WA)	Momentos ponderados por probabilidades (MPP)

El hecho de utilizar cada distribución con un método de ajuste de parámetros, surge a partir de estudios donde se demuestra que no existe un método de estimación de parámetros que sea igualmente eficiente para cada distribución, adoptándose entonces para cada distribución el método de ajuste de parámetros que le resulta más eficiente.

Los modelos probabilísticos utilizados, así como los métodos de ajuste de sus parámetros, son reconocidos en la bibliografía específica internacional y nacional (NERC, 1975; Cunnane, 1989; Kite, 1988; HEC-SSP, 2019), y resultan en general los métodos más recomendados para el análisis de frecuencia de crecidas, en particular para el uso pretendido en altas recurrencias. En el caso de la distribución Gumbel, el método recomendado es el de momentos ponderados por

probabilidades (MPP), (Landwehr et al., 1979; Hosking, 1986; Mahdi et al., 2005).

Como software de análisis de frecuencia de crecidas se utilizó WxAFMULTI (versión actualizada del modelo AFM; FICH, 1998); y como software de apoyo HEC-SSP v2.2 (2019) – Statistical Software Package del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. Se utiliza asimismo de manera complementaria WxAFMOM (versión actualizada de AFMOM; FICH, 1993), que permite realizar ajustes de parámetros por métodos de momentos tradicionales (utilizando para la distribución Gumbel el método de coeficientes variables en función del tamaño de muestra, indicado en la Guía de Prácticas Hidrometeorológicas de la OMM - OMM, 1981). En el Anexo G se presentan todos los resultados obtenidos del modelo WxAFMULTI.

Entre las funciones de distribución probabilísticas posibles de utilizar, no se ha utilizado la distribución Wakeby, la cual en general se recomienda solo para análisis regional (cuando intervienen un conjunto de estaciones) y no para análisis puntuales, ya que la misma consta de 5 parámetros que la hacen poco robusta para sitios individuales – sobre todo para el nivel de extrapolación pretendido.

Asimismo, se calculan errores cuadráticos medios de frecuencia y variable para cada procedimiento de estimación, y los conocidos test de bondad de ajuste de χ^2 (chi-cuadrado) y Kolmogorov – Smirnov. Como frecuencia empírica base (p_i) se utilizó la expresión de Gringorten (Cunnane, 1989):

$$p_i = \frac{(i - 0,44)}{(N + 0,12)} \quad (7.1)$$

Siendo, i : el número de orden que le corresponde a cada elemento de la muestra y N : el tamaño de la muestra.

Asimismo, se hicieron comparaciones con la expresión de Weibull ($p_i = i/((N + 1))$).

Adicionalmente, teniendo en cuenta particularidades observadas de la serie de caudales extremos máximos, formada por años donde sus caudales máximos surgen de fenómenos de roturas del dique de hielo del glaciar Perito Moreno (15 en los 60 años de serie disponible) y años donde no ocurren (crecidas “ordinarias o normales”), se consideró también una distribución de probabilidad de excedencia mixta suponiendo que los valores máximos son generados por distribuciones formadas por dos poblaciones. La distribución mixta es el resultado de la sumatoria de la función de distribución de probabilidad de cada submuestra, afectada por un factor de ponderación que depende del tamaño de cada submuestra:

$$F_1 = \rho F_1 + (1 - \rho) F_2 \quad (7.2)$$

En este caso se utilizó una distribución mixta Gumbel (GU-MIX), donde F_1 y F_2 son las típicas funciones de distribución doble exponencial de 2 parámetros, dando por resultado un modelo de

5 parámetros. Los parámetros de la distribución mixta se estimaron por el método de momentos ponderados por probabilidades.

No se desconoce la existencia en la literatura de otros métodos de estimación (distribuciones y métodos de estimación de parámetros), cuya aplicación depende muchas veces del país o región donde se desarrolló originalmente, así como de las posibilidades de aplicación a sitios puntuales o en análisis regionales; interpretándose que con los métodos utilizados se abarca la gran mayoría de los procedimientos de estimación de mayor utilización actual para casos como el presente.

En la Tabla 7.2 se resumen los resultados de los caudales máximos anuales para las recurrencias desde 2 a 10.000 años de las distintas distribuciones utilizadas, para la muestra completa 1957/58 – 2018/19.

<i>T</i> [años]	CHF – serie 1957/58 – 2018/19							
	LN2 (MV)	GU (MPP)	GEV (MPP)	PIII (MV-MoM)	LPIII (MxM)	EXP (MoM)	GU (MoM)	GU-Mix (MPP)
100	2.481	2.556	2.726	2.422	2.587	2.744	2.688	2.728
1.000	2.975	3.180	3.680	2.848	3.284	3.559	3.384	3.457
10.000	3.454	3.803	4.835	3.238	4.056	4.375	4.078	4.183

Entre paréntesis se indica el método de ajuste de parámetros utilizado en cada caso

Tabla 7.2: Caudales máximos anuales para diferentes recurrencias en CHF (m³/s).

(ii) Selección de la función de distribución

Si bien la selección de las funciones de distribución es tratada en la bibliografía, no existe un criterio común de aplicación a todos los casos. La elección de uno o más modelos probabilísticos es un proceso de toma de decisión, y en la práctica se utilizan en general los siguientes criterios:

- recomendaciones institucionales: por ejemplo, Estados Unidos (LPIII), Inglaterra (GU y GEV), así como resultados de estudios específicos por región;
- relaciones entre propiedades estadísticas de la muestra y distribución teórica;
- gráficos comparativos (frecuencia empírica – función de distribución);
- pruebas de bondad de ajuste (Kolmogorov, chi-cuadrado, etc.) y errores de ajustes a la muestra (*ECMF* y *ECMV*).

Además de los anteriores se menciona la existencia de estudios experimentales de selección de funciones de distribución en base a “criterios robustos”. Estos estudios se dirigen a testear que tan bueno es un modelo y método de ajuste de parámetros para estimar cuantiles de crecidas sin importar la “verdadera” distribución de las crecidas. Una distribución robusta es aquella que, en comparación con otras distribuciones, es capaz de estimar cuantiles de crecidas con menor error, considerando poblaciones de crecidas alternativas. Se pretende con estos criterios disponer del “mejor método” para estimar la magnitud esperada del caudal (u otra variable hidrológica) correspondiente a una determinada probabilidad anual de ocurrencia. Por “mejor método” se entiende tanto a la función de distribución como a la forma de estimar sus parámetros.

Recomendaciones institucionales

En el país no existen recomendaciones institucionales ni estudios estadísticos regionales amplios que apunten hacia la selección de una u otra función de distribución. Igualmente se menciona que, en general, las reglamentaciones estrictas que se formularon en el pasado en otros países se han ido flexibilizando en el tiempo, habiéndose demostrado la imposibilidad de la aplicación de una única función de distribución para todos los casos.

Relaciones entre propiedades estadísticas de las muestras

Según Cunnane (1985) los estadísticos CV , CS y CK podrían ser de gran utilidad al decidir la forma apropiada de la distribución de caudales máximos, si son exactamente conocidos, o sea si se conociera esta característica de la población. Asimismo, se reconoce que estos coeficientes cuando son obtenidos de registros individuales tienen errores estándares relativamente grandes por lo que inferir características de la población a partir de una única estación podría ser erróneo. Aún con el conocimiento de las limitaciones expuestas, la introducción de los estadísticos de la muestra en los diagramas de momentos, se puede utilizar como un elemento más de apoyo al caracterizar una muestra y da indicios de las posibles funciones de distribución a seleccionar. Asimismo, en este punto pueden tenerse en cuenta características distintivas de las distribuciones, por ejemplo: la distribución log-normal puede dar buen resultado cuando los coeficientes de asimetría de los logaritmos son cercanos a cero; la distribución Gumbel cuando dicho coeficiente sea próximo a 1,14 (como en este caso) y la distribución Exponencial cuando sea cercano a 2.

Representación gráfica

En la Figura 7.5 se observa el ajuste que existe entre las distintas funciones probabilísticas utilizadas y los caudales máximos diarios anuales en la estación CHF, en la serie 1957/58 – 2018/19. En esta Figura 7.5 se utiliza como frecuencia experimental la expresión de Gringorten. En recurrencias del orden de 50 – 100 años todas las distribuciones presentan resultados similares, siendo más dispares (como es de esperarse) en las recurrencias elevadas.

En la Figura 7.6 se presentan las distribuciones teóricas en comparación con la frecuencia experimental de Weibull.

De la comparación de las distribuciones con las frecuencias empíricas utilizadas, así como de la aplicación de los test clásicos (USWRC, 1982) no se observa la presencia de outliers o valores que se aparten de la tendencia general de los datos, por lo que no resulta necesaria la aplicación de métodos de estimación que incluyan esta posibilidad.

Ajuste muestral

La Tabla 7.3 muestra los errores cuadráticos medios de ajuste a la muestra, según dos posiciones de ploteo o frecuencias empíricas diferentes.

Comparando resultados entre distribuciones de 2 y 3 parámetros, los menores errores cuadráticos medios en frecuencias ($ECMF$) corresponden a la distribución GEV, siguiéndole en segundo

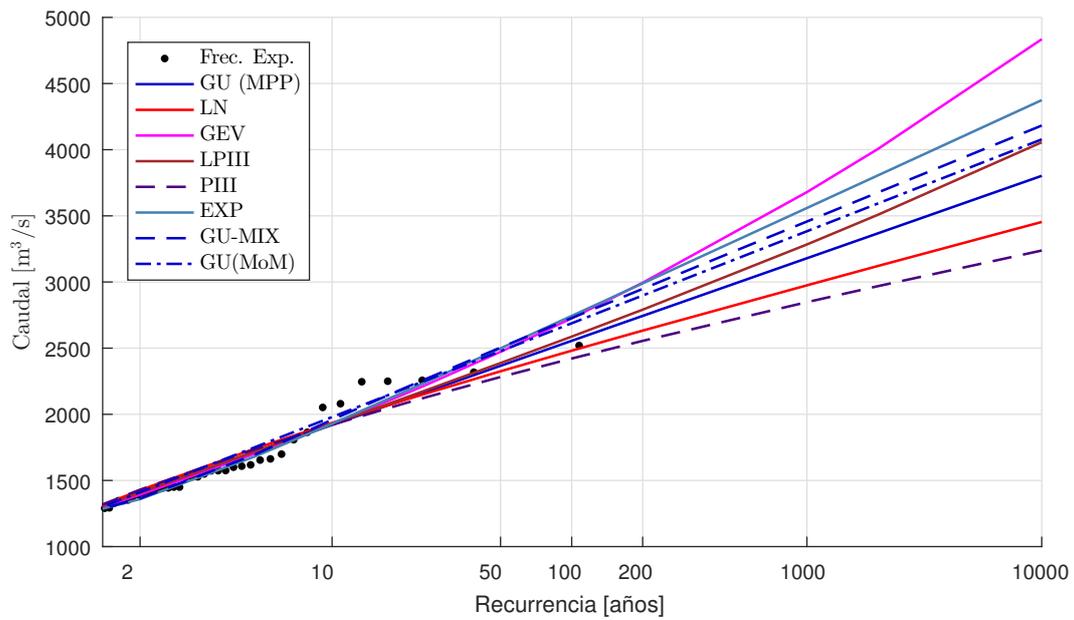


Figura 7.5: Análisis de frecuencia de caudales máximos anuales en CHF (serie 1957/58 – 2018/19). Frecuencia empírica Gringorten.

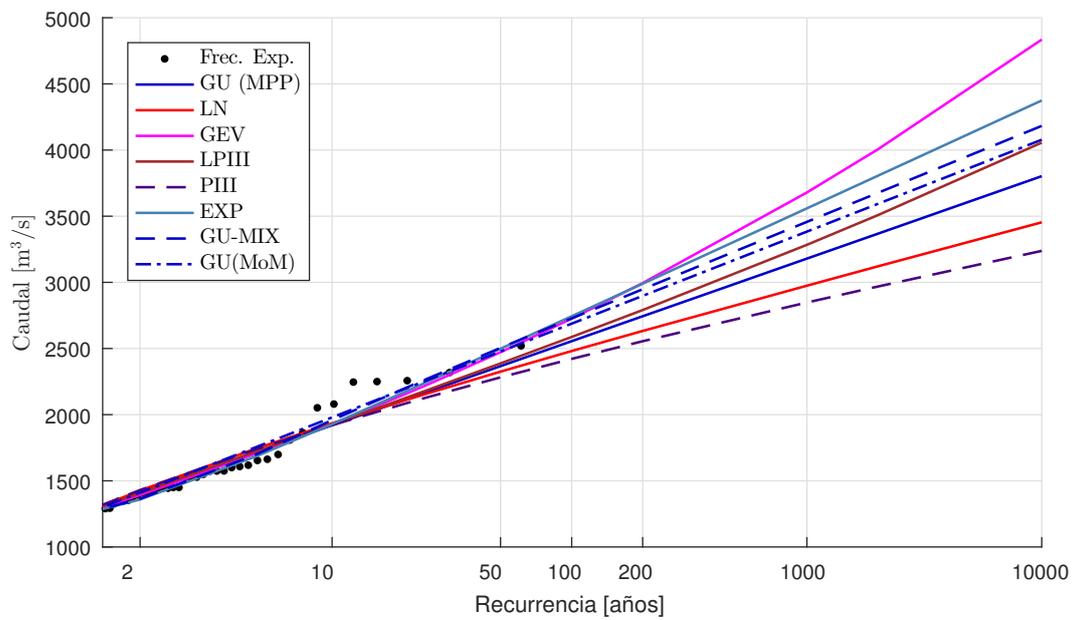


Figura 7.6: Análisis de frecuencia de caudales máximos anuales en CHF (serie 1957/58 – 2018/19). Frecuencia empírica Weibull.

	CHF serie 1957/58 – 2018/19							
	LN2 (MV)	GU (MPP)	GEV (MPP)	PiII (MV-MoM)	LPiII (MxM)	EXP (MoM)	GU (MoM)	GU-Mix (MPP)
\bar{R} (Gringorten)	0,056	0,0429	0,0392	0,0553	0,0443	0,0457	0,0552	0,0390
\bar{R} (Gringorten)	78,82	70,39	71,82	81,72	70,31	87,5	76,48	
\bar{R} (Weibull)	0,054	0,0411	0,0373	0,0536	0,0422	0,0451	0,0526	0,0376
\bar{R} (Weibull)	84,01	76,74	70,36	88,92	75,45	84,93	72,64	

Tabla 7.3: Errores cuadráticos medios.

lugar la distribución GU (MPP), con ambas frecuencias empíricas. Respecto a los errores cuadráticos medios en caudales (*ECMV*) en el caso de la frecuencia de Gringorten resulta con menores valores LPIII y en segundo lugar GU (MPP), mientras que con la frecuencia de Weibull el menor error lo tiene GEV y luego GU (MoM). Entre las distribuciones de 2 parámetros analizadas (LN2, GU y EXP), GU (MPP) es la de mejor ajuste a la muestra.

Experimentos de robusticidad

El concepto de modelos robustos fue introducido por Kuczera (1982), indicando que un modelo robusto debe ser capaz de estimar eventos extremos, prescindiendo cual distribución de caudales máximos rivalizante represente mejor el mundo actual (la muestra), sin desastrosa pérdida de performance. Como antecedentes principales en cuanto a estos experimentos de simulación y sus resultados se menciona:

- Kuczera (1982) sugiere en sus experimentos que el modelo LN2 máximo verosímil resulta robusto, obteniendo con la distribución Gumbel ajustada por máxima verosimilitud o momentos ponderados por probabilidades resultados comparables.
- Lettenmaier (1987) concluye que los resultados de sus experimentos han mostrado que los métodos de estimación de crecidas regional de dos parámetros pueden actuar bien si la forma de la distribución asumida es similar a la población. La distribución GEV tiende a dar estimaciones de crecidas excesivamente variables para aplicaciones a sitios individuales. Sin embargo, cuando ésta es incorporada a un esquema de estimación regional, actúa casi tan bien como los estimadores de dos parámetros.
- ELETROBRAS (1987) concluye que se puede verificar el mal desempeño de los métodos correspondientes a distribuciones de 3 parámetros. Esto se debe al hecho de que las distribuciones de 2 parámetros evitan utilizar la asimetría muestral, que para muestras usuales disponibles (del orden de 30 años) poseen una estadística de gran varianza. En los doce escenarios testeados y para valores milenarios, la distribución EXP presenta los resultados más confiables en 11 de ellos y la distribución GU en el restante.
- Paoli et al. (1991), en un experimento aplicado al río Paraná, indica que las distribuciones de dos parámetros actúan bien en el caso que la cola asumida para la población sea similar a la cola de la distribución de dos parámetros. Si bien los resultados de los experimentos robustos están sujetos a las condiciones establecidas en los mismos (series utilizadas para generación, análisis puntual o regional, recurrencia de interés, rango de variaciones de parámetros asumidas, etc.) se concluye a priori que los mismos tienden a favorecer a las distribuciones de dos parámetros, cuando el interés radica en altas recurrencias.

Posteriormente en otro trabajo (Paoli et al., 1995) se indica que los métodos robustos para selección de funciones de distribución privilegian las distribuciones de dos parámetros puesto que se sustituye información muestral imprecisa por hipótesis más eficientes (asimetrías fijas), concluyéndose que las distribuciones de dos parámetros resultan siempre las más robustas y de entre

ellas serán mejores las que se acerquen más con sus valores de asimetría – kurtosis al rango de valores que están siendo asignados a la población.

Selección de distribución de caudales máximos.

Teniendo en cuenta todos los elementos enunciados (propiedades estadísticas, funciones probabilísticas ajustadas, ajuste visual, errores cuadráticos medios al ajuste, recomendaciones de experimentos para altas recurrencias) se tiene que las distribuciones GU, GEV, LPIII y GU-MIX resultan las de mejor ajuste a la muestra de caudales máximos en CHF, en la serie 1957/58 – 2018/19.

La distribución GEV si bien muestra buen ajuste a la muestra, presenta una elevada variabilidad en sus resultados al hacer análisis de submuestras, tornándose poco robusta para inferir caudales para elevadas recurrencias en este caso. La distribución GU-MIX presenta el inconveniente de necesitar 5 parámetros para su ajuste, lo cual también le confiere poca consistencia a sus estimaciones, si bien permite conceptualizar el fenómeno de las roturas sobre las crecidas ordinarias; mientras que la distribución con menor número de parámetros y buen ajuste a la muestra es GU, teniendo un coeficiente de asimetría teórico muy cercano al de la muestra.

Teniendo en cuenta los elementos mencionados, se recomienda la adopción de la distribución Gumbel (GU), con parámetros obtenidos por momentos ponderados por probabilidades (MPP), como representativa de los caudales máximos anuales en la estación CHF. Los caudales máximos para las principales recurrencias se presentan en la Tabla 7.4.

<i>T</i> [años]	Caudal [m ³ /s] GU (MPP)
2	1.410
5	1.717
10	1.920
25	2.176
50	2.367
100	2.556
1.000	3.180
10.000	3.803

Tabla 7.4: Caudales máximos anuales en CHF, serie 1958/59 – 2018/19, según Gumbel (MPP).

Conociendo que una curva de frecuencia de crecidas calculada es solo una aproximación a la población de crecidas anuales, para medir la precisión de esta aproximación se construyen intervalos que, con un alto grado de confianza, contienen la curva de frecuencia de población. La Figura 7.7 muestra los intervalos de confianza correspondientes a la distribución Gumbel (MPP). Para una recurrencia de 10.000 años los valores límites del intervalo resultan un 13% superiores o inferiores al valor esperado.

Finalmente, se realiza una estimación de cotas en lago Argentino, utilizando la relación que las vincula con los caudales en CHF, para niveles en el lago Argentino mayores a cota 178 mIGN:

$$Q_{CHF} = 83 (N_{LA} - 174,4) \tag{7.3}$$

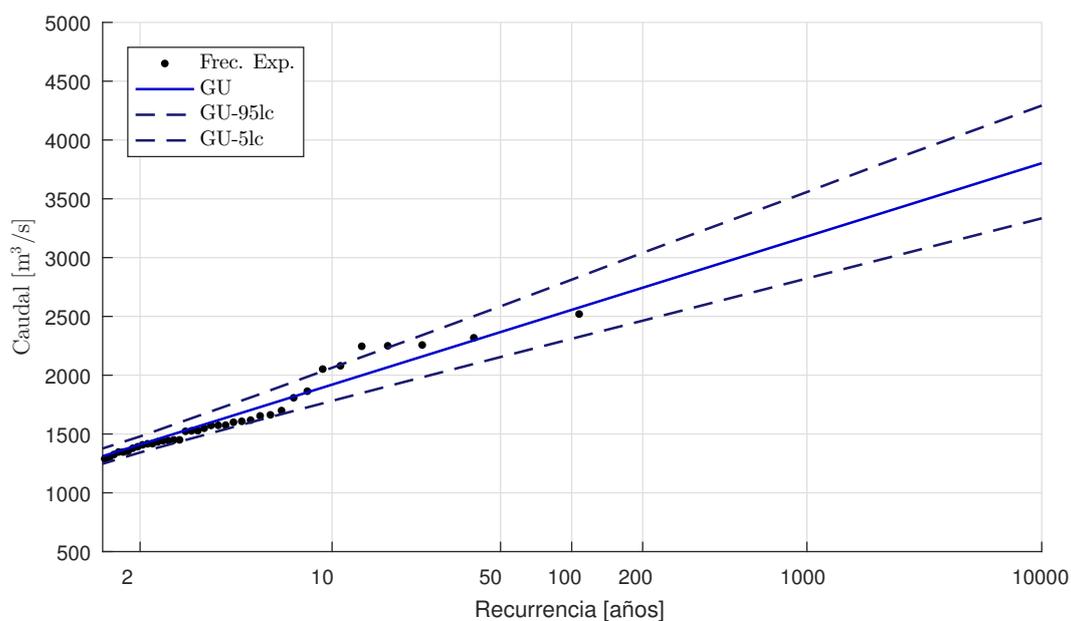


Figura 7.7: Análisis de frecuencia de caudales diarios máximos anuales en CHF (1957/58 – 2018/19). Intervalos de confianza – distribución Gumbel (MPP).

Donde:

Q_{CHF} : caudales en CHF (m^3/s)

N_{LA} : cota en lago Argentino (mIGN)

T [años]	Caudal [m^3/s] GU (MPP)	Cota en lago Argentino [mIGN]
2	1.410	179,69
5	1.717	180,34
10	1.920	180,75
25	2.176	181,23
50	2.367	181,58
100	2.556	181,91
1.000	3.180	182,94
10.000	3.803	183,89

Tabla 7.5: Caudales máximos anuales en CHF y cotas máximas en lago Argentino, serie 1958/59 – 2018/19, según Gumbel (MPP).

7.1.3. Análisis de frecuencia de caudales diarios máximos anuales en LLEO

Con el mismo procedimiento indicado en el punto previo, se realizó un análisis de frecuencia de caudales máximos anuales en LLEO. La Tabla 7.6 resume los estadísticos principales de la serie de máximos anuales y la Tabla 7.7 el ajuste de distribuciones probabilísticas.

Serie	N [años]	X [m^3/s]	S [m^3/s]	δ	ζ	κ
LLEO (1956/57 – 2018/19)	52	593,6	137,21	0,41	0,23	3,1

Tabla 7.6: Estadísticos principales río La Leona en LLEO.

Las distribuciones de mejor ajuste resultan LPIII, LN2 y GEV, mostrando estas distribuciones una tendencia a aplanarse hacia las mayores recurrencias. Entre las distribuciones de 2 parámetros,

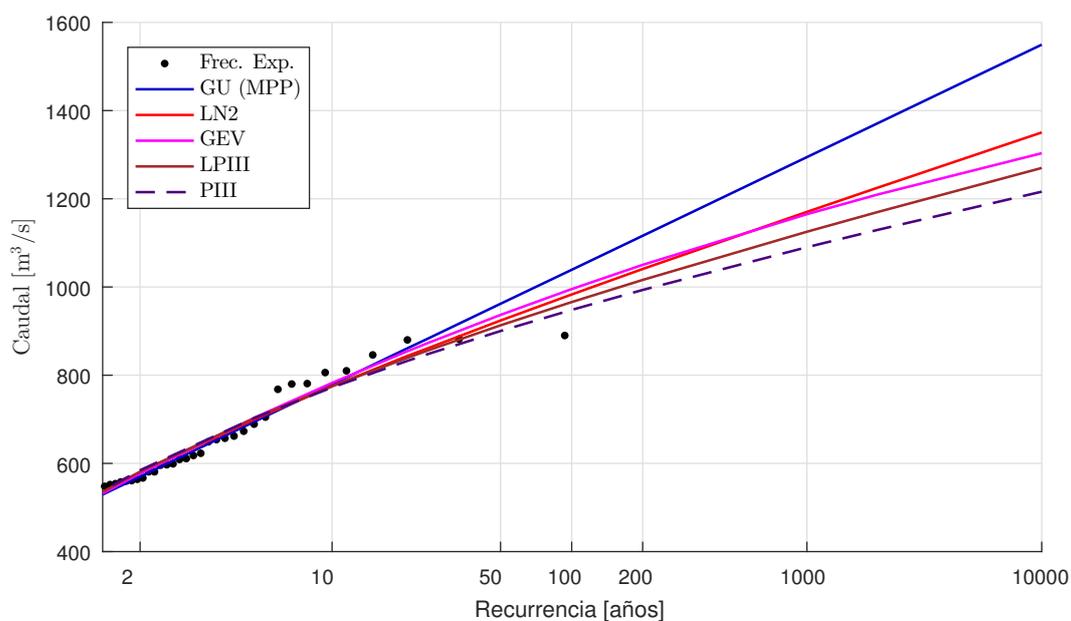


Figura 7.8: Análisis de frecuencia de caudales máximos anuales en río La Leona en LLEO (1956/57 – 2018/19).

LN2 resulta la de mejor ajuste a la muestra.

T [años]	LLEO – Caudales máximos anuales diferentes recurrencias [m^3/s]					
	LN2	GU	GEV	PIII	LPIII	EXP
2	578	570	577	585	581	551
5	701	696	705	704	704	677
10	775	779	783	772	775	772
25	862	884	874	849	857	898
50	924	962	937	900	913	993
100	983	1.039	995	948	966	1088
1.000	1.170	1.295	1.165	1.090	1.125	1.404
10.000	1.350	1.550	1.303	1.216	1.270	1.720

Tabla 7.7: Caudales máximos anuales para diferentes recurrencias en LLEO (m^3/s).

7.2. Análisis de frecuencia de volúmenes máximos anuales

7.2.1. Estación CHF

Se realizó un análisis de volúmenes máximos anuales para diferentes duraciones, de manera de asociarlos luego a un hidrograma de crecidas extremo, a efectos que pueda ser utilizado para la evaluación del funcionamiento de reservorios y mecanismos de evacuación de crecidas de las obras en construcción.

Se obtuvieron volúmenes máximos en diferentes duraciones (7, 15, 30, 60, 90, 120 y 150 días) para la serie de caudales en CHF desde 1957/58 a 2018/19.

La Figura 7.9 muestra los volúmenes máximos anuales obtenidos.

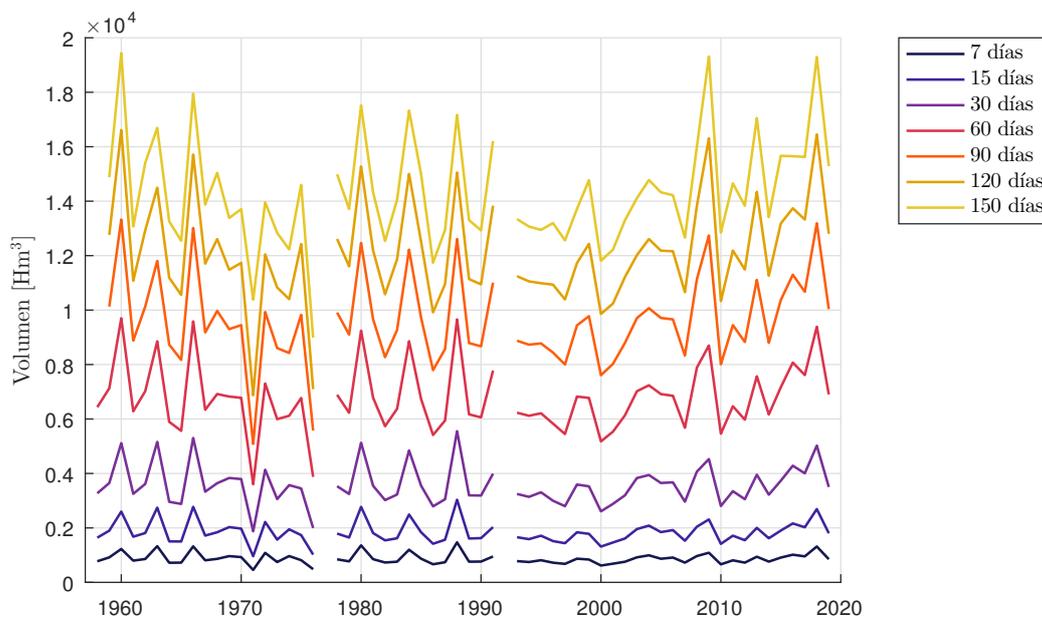


Figura 7.9: Volúmenes máximos anuales en CHF.

(a) Análisis de homogeneidad

Al igual que en caudales máximos, se aplicaron los tests estadísticos no paramétricos de Mann – Kendall y Smirnov, para probar la hipótesis nula de que no hay cambios en la serie de volúmenes máximos anuales. Los resultados obtenidos para los volúmenes máximos en CHF indican que la muestra es homogénea en el tiempo.

(b) Estadísticos muestrales y diagramas de momentos

Los estadístico de la muestra: X (media), S (desvío estándar), CS (coeficiente de asimetría), CV (coeficiente de variación) y CK (coeficiente de kurtosis), se presentan en la Tabla 7.8, para cada duración analizada.

Serie	X [Hm³]	S [Hm³]	δ	ν	K
Vol 7 días	874,6	204,14	0,99	0,233	4,3
Vol 15 días	1.841,4	414,16	0,89	0,225	4,4
Vol 30 días	3.577,6	753,61	0,71	0,211	3,9
Vol 60 días	6.770,4	1.274,1	0,49	0,188	3,8
Vol 90 días	9.612,9	1.654,97	0,23	0,172	3,9
Vol 120 días	12.118,5	1.938,58	0,18	0,160	4,1
Vol 150 días	14.332,4	2.057,50	0,51	0,144	3,9

Tabla 7.8: Estadísticos de volúmenes máximos anuales en CHF (serie 1957/58-2018/19).

Las Figura 7.10 y Figura 7.11 muestran la inclusión de estos estadísticos en los diagramas de momentos tradicionales.

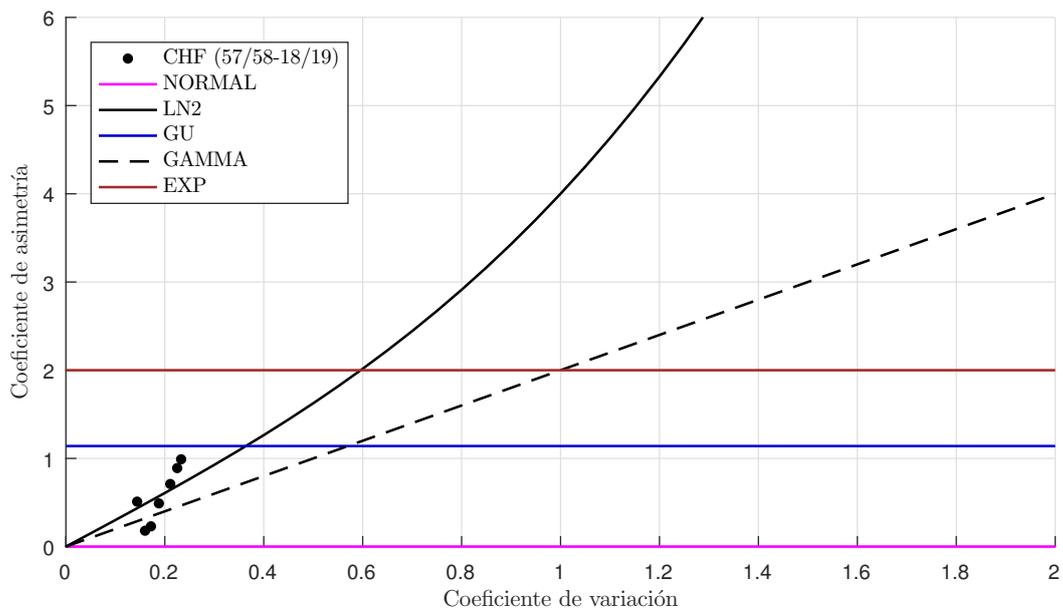


Figura 7.10: Relación $CS-CV$. Volúmenes máximos anuales diferentes duraciones en CHF.

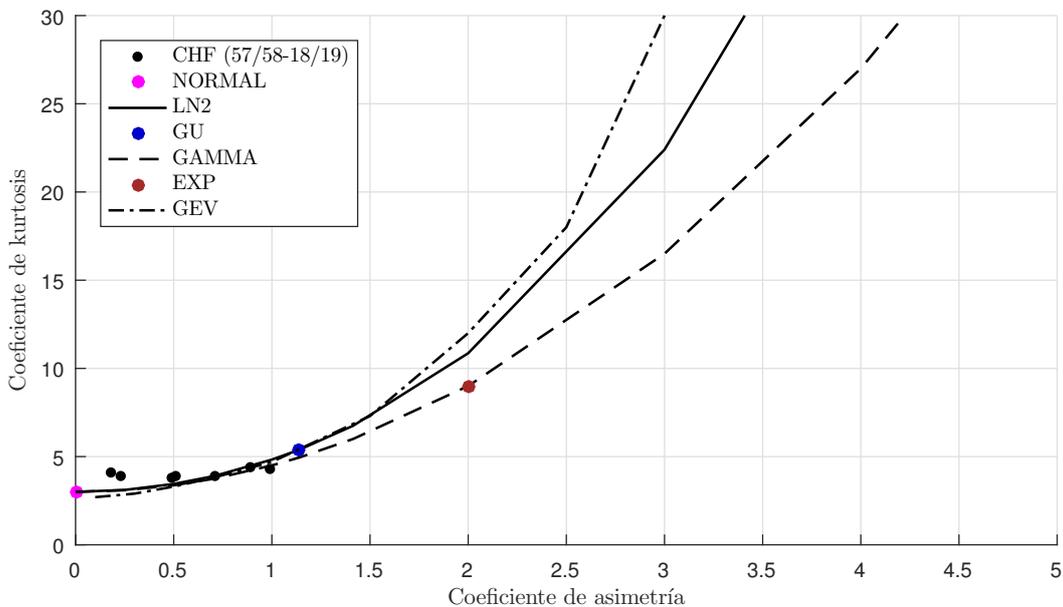


Figura 7.11: Relación $CS-CK$. Volúmenes máximos anuales diferentes duraciones en CHF.

(c) Ajuste de distribuciones probabilística

En las Figura 7.12, Figura 7.13 y Figura 7.14 se puede observar el análisis de frecuencia de volúmenes máximos en 30, 60 y 120 días en CHF respectivamente. Se utilizaron las funciones de distribución probabilística y métodos de estimación de parámetros indicados en 7.1.2(b)(i).

Las distribuciones GEV, LN2, GU y LPIII son las que mejor acompañan los valores de la muestra. Entre estas 4 distribuciones la distribución Gumbel arroja los valores mayores para duraciones de 60 días y superiores; las distribuciones LN2, LPIII los menores valores en todas las duraciones. GEV presenta los mayores valores en las duraciones menores, con volúmenes en un rango intermedio en el resto de las duraciones. En recurrencias del orden de 50 años todas las

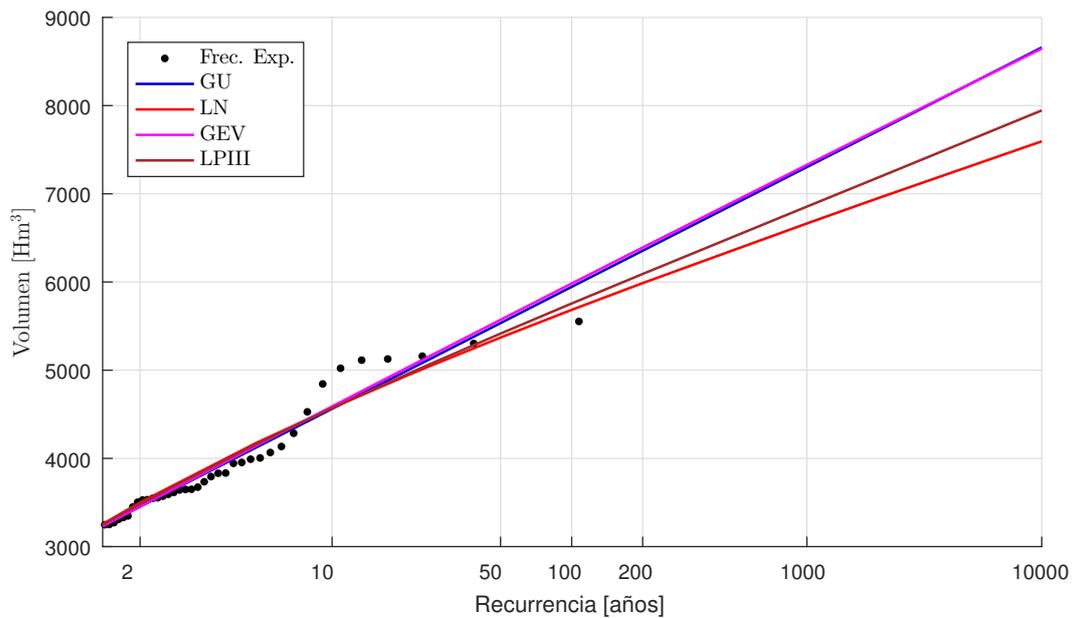


Figura 7.12: Análisis de frecuencia de volúmenes máximos en 30 días. Río Santa Cruz en CHF (1957/58 – 2018/19).

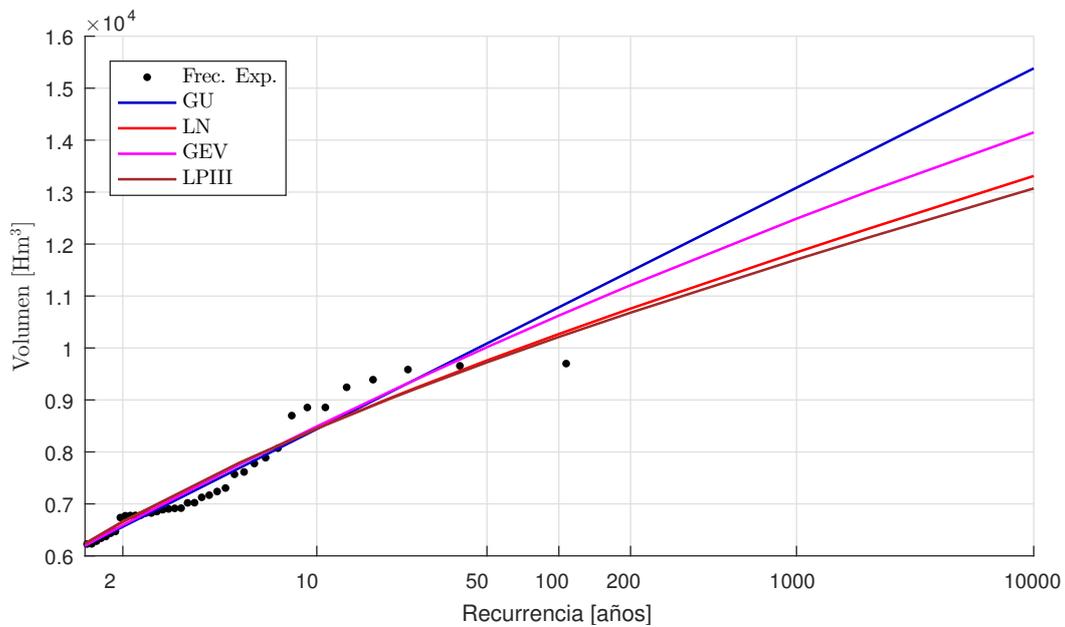


Figura 7.13: Análisis de frecuencia de volúmenes máximos en 60 días. Río Santa Cruz en CHF (1957/58 – 2018/19).

distribuciones presentan resultados similares.

La Tabla 7.9 resume los volúmenes máximos anuales resultantes para las recurrencias desde 2 a 10.000 años, con las distintas distribuciones utilizadas.

(d) Selección de función de distribución

La Figura 7.15 y Figura 7.16 presentan los errores cuadráticos medios resultantes del ajuste a las muestras de volúmenes máximos anuales, utilizando la expresión de Gringorten como frecuencia experimental. En relación al error cuadrático medio en volúmenes, los menores errores

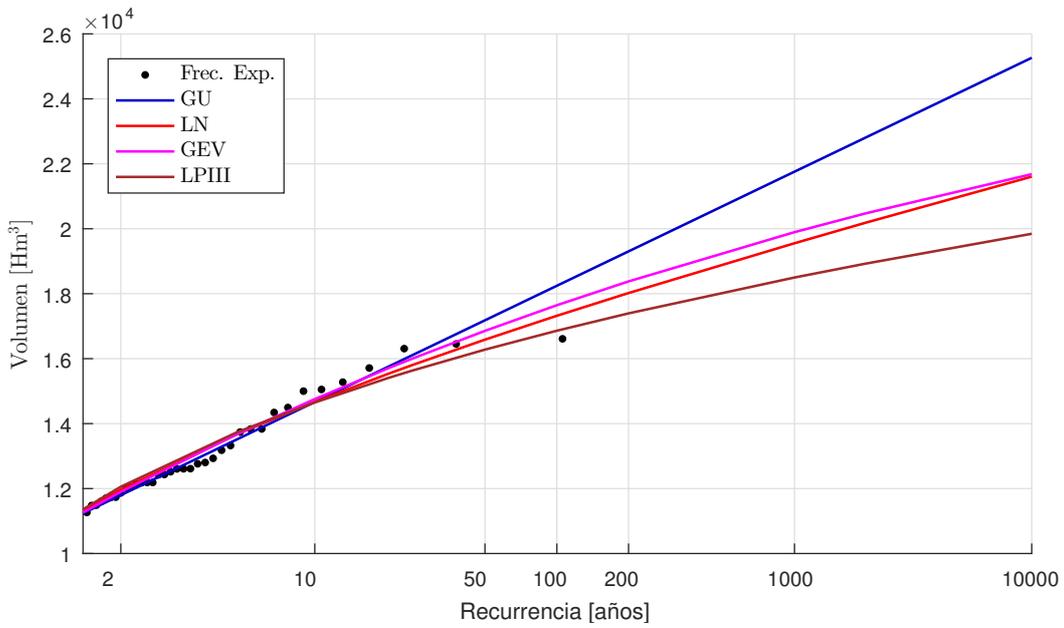


Figura 7.14: Análisis de frecuencia de volúmenes máximos en 120 días. Río Santa Cruz en CHF (1957/58 – 2018/19).

corresponden en la mayoría de las duraciones a GU, LN y LPIII, siguiéndole GEV. En el eje de las frecuencias los menores errores se tienen para las distribuciones GU y GEV.

La Figura 7.17 y Figura 7.18 muestran el mismo cálculo utilizando la expresión de Weibull. En el eje de volúmenes los menores errores son para GEV, siguiéndole GU y LPIII, mientras en frecuencias los menores errores son para GU y luego GEV.

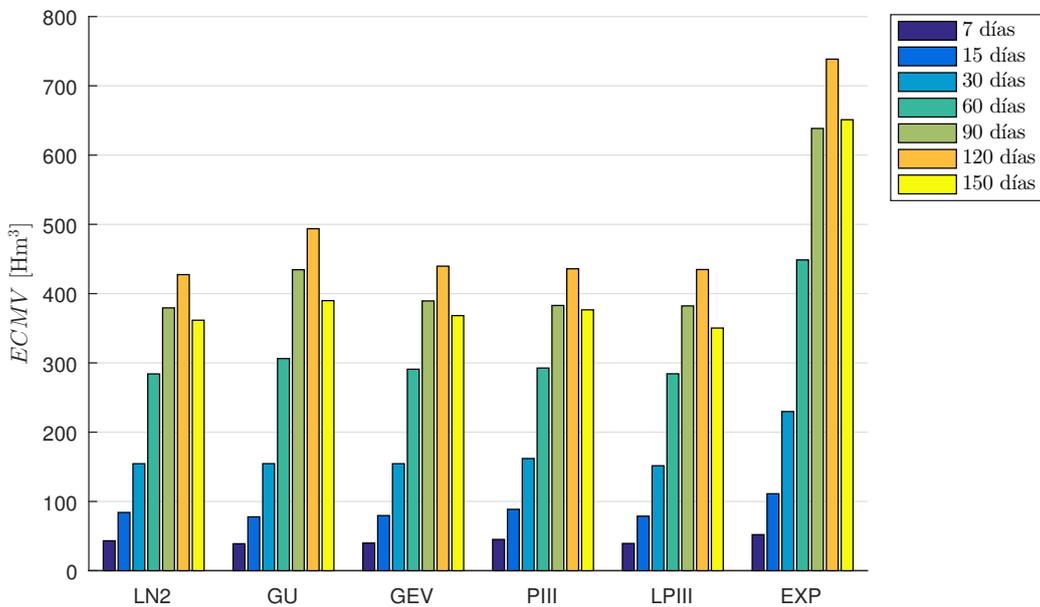


Figura 7.15: Error cuadrático medio volúmenes (Gringorten).

Teniendo en cuenta todos los elementos enunciados (propiedades estadísticas de las muestras, funciones ajustadas, ajuste visual, errores cuadráticos medios al ajuste, recomendaciones de experimentos para altas recurrencias) se propone adoptar a la distribución Gumbel (MPP) como representativa de los volúmenes máximos anuales en la estación CHF.

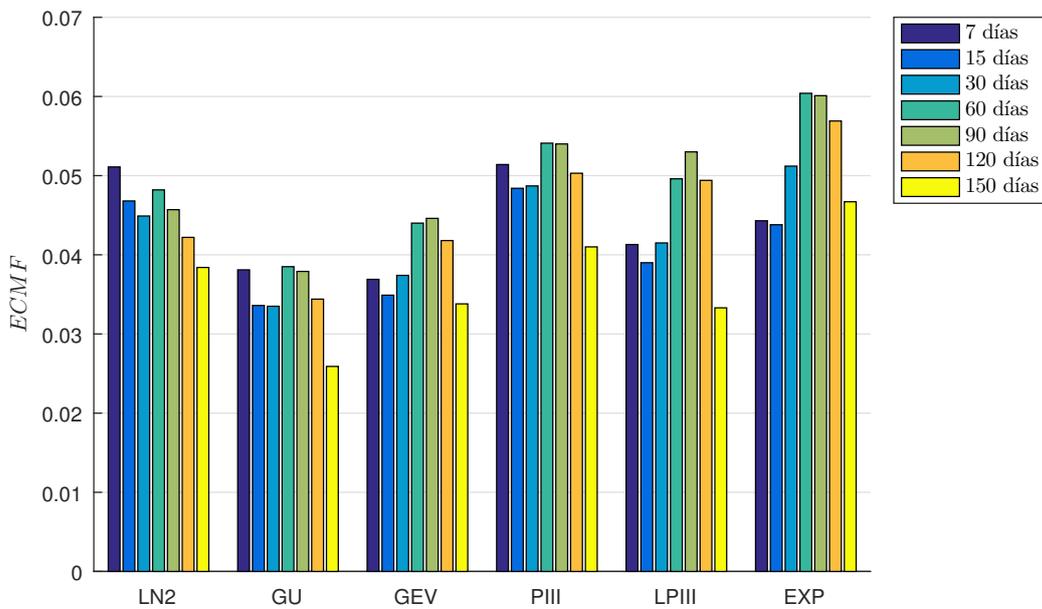


Figura 7.16: Error cuadrático medio frecuencias (Gringorten).

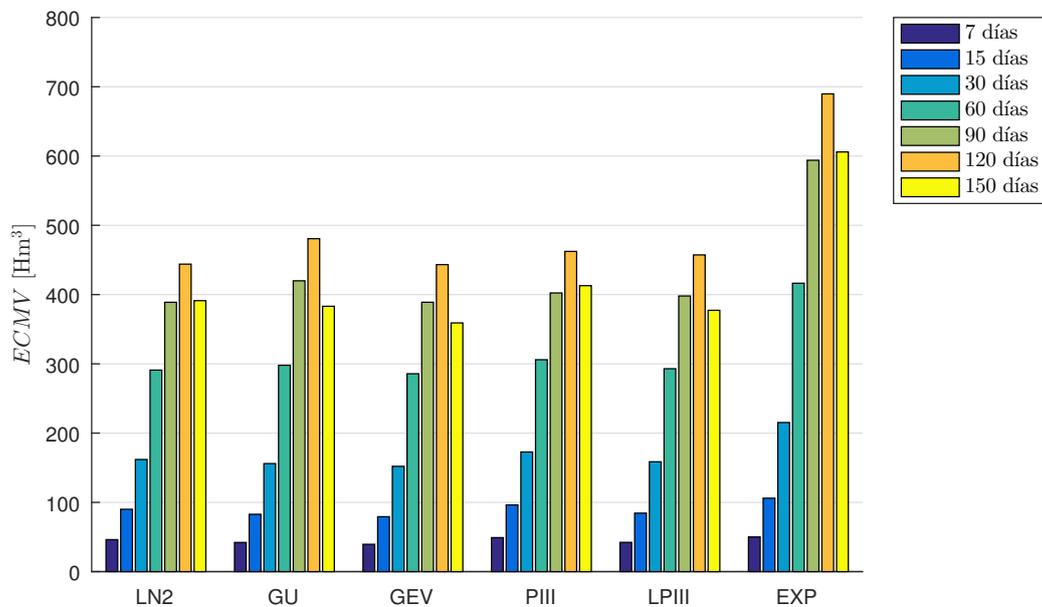


Figura 7.17: Error cuadrático medio volúmenes (Weibull).

La Figura 7.19 presenta las curvas de Volumen máximo – Duración – Recurrencia propuestas para CHF.

7.2.2. Estación LLEO

Repitiendo el procedimiento indicado previamente y ajustando las series de volúmenes máximos anuales en la estación LLEO, pudo construirse la siguiente relación Volumen de crecida – Duración – Recurrencia, en base a la distribución LN2 (MV) (Figura 7.20).

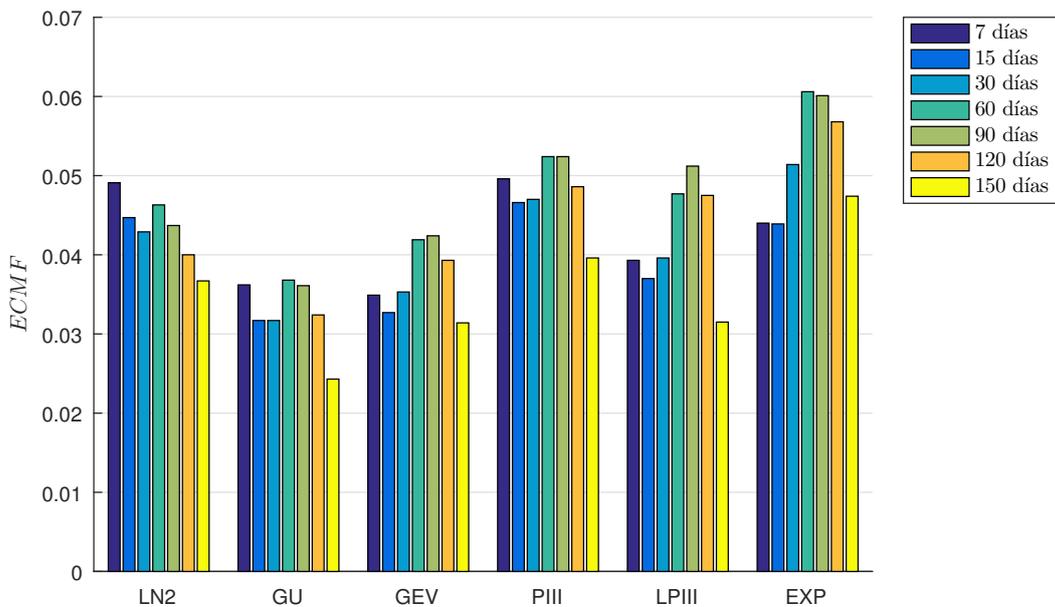


Figura 7.18: Error cuadrático medio frecuencias (Weibull).

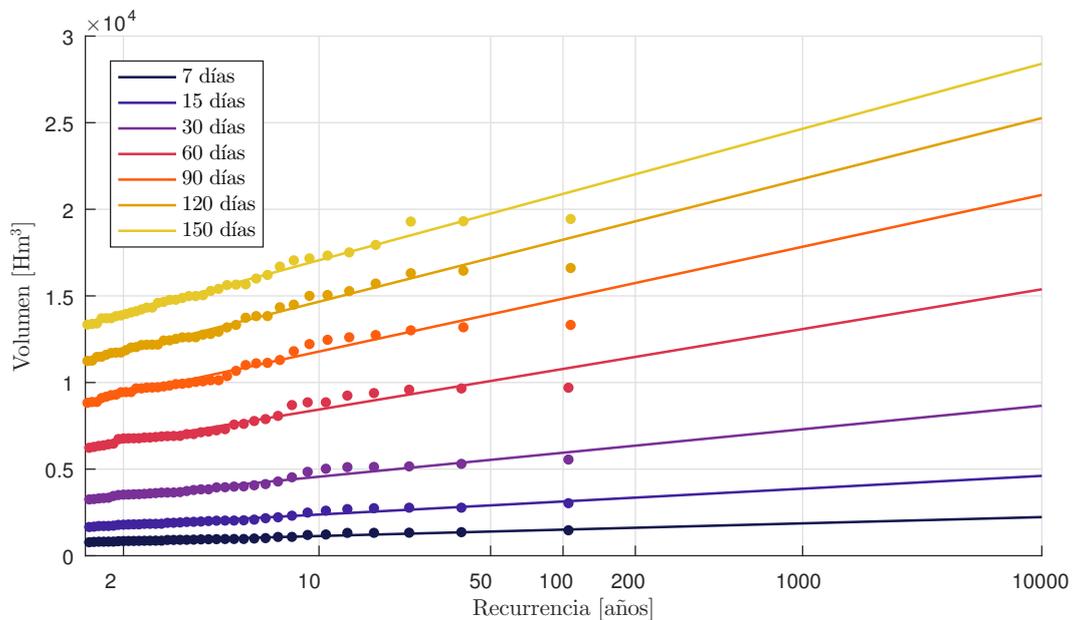


Figura 7.19: Curvas Volumen – Duración – Recurrencia según distribución Gumbel (MPP) en CHF (serie 1957/58 – 2018/19).

7.3. Hidrogramas de diseño estadísticos

7.3.1. Introducción

Partiendo de la disposición de un número considerable de hidrogramas observados, los dos enfoques usuales para obtener hidrogramas de diseño son:

- Hidrogramas críticos observados maximizados.
- Hidrogramas de diseño estadísticos.

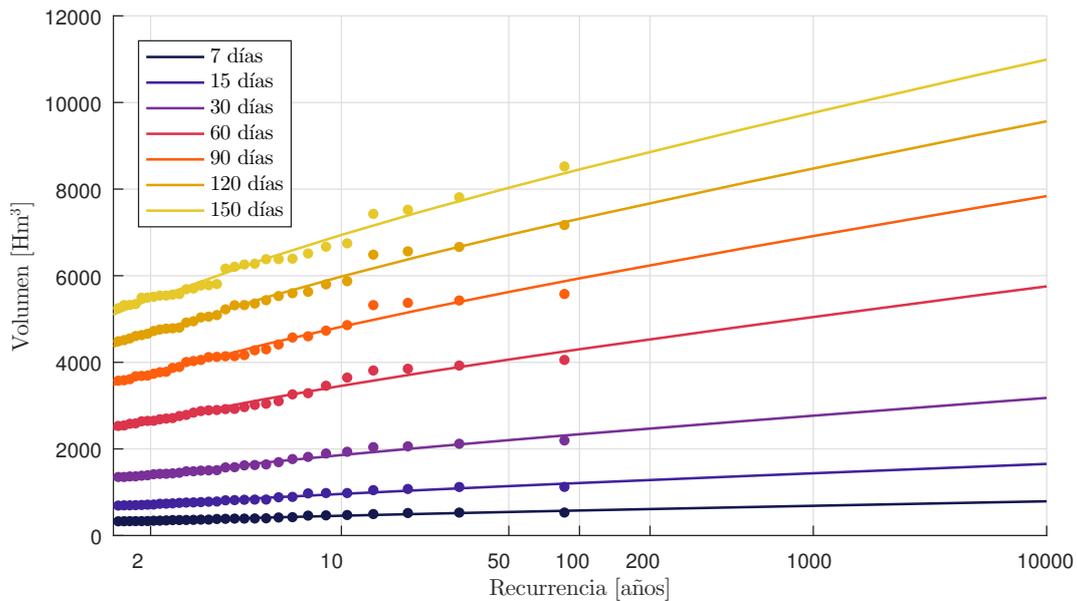


Figura 7.20: Curvas Volumen – Duración – Recurrencia según distribución LN2 (MV) en LLEO.

(a) Hidrogramas críticos observados maximizados

Se utiliza la forma de uno (o varios) hidrogramas observados críticos, asegurando que su maximización estadística preserve características determinadas de la crecida.

Estos hidrogramas mantienen proporcionalmente su forma, siendo escalados generalmente en función a la relación entre los caudales máximos para las recurrencias de interés (y eventualmente en función de relación de volúmenes máximos).

De esta manera, este tipo de hidrograma de diseño presenta el período de retorno deseado para el caudal máximo, y diferentes valores de retorno en cada duración de la crecida que se analice.

(b) Hidrogramas de diseño estadísticos

Se entiende por hidrograma de diseño estadístico a un hidrograma que posee una forma típica obtenida en función de las observaciones de las crecidas de mayor relevancia, y posee su caudal máximo y volúmenes máximos en todas las duraciones analizadas para la recurrencia de interés.

Los pasos para obtenerlo son:

- adimensionalizar los eventos más importantes observados (respecto a su caudal pico),
- seleccionar la ubicación del pico del hidrograma y hacer coincidir los tiempos al pico de los hidrogramas adimensionalizados,
- obtener un hidrograma medio característico adimensional,
- maximizar el hidrograma manteniendo el caudal pico y los volúmenes máximos en diferentes duraciones, para la recurrencia de interés.

Se hace notar que también es habitual la utilización de técnicas de análisis bivariado entre caudal máximo anual – volumen máximo, en especial cuando pueden presentarse caudales máximos con volúmenes muy diferentes (o viceversa). Al tenerse en este caso elevados coeficientes de correlación entre el caudal máximo y el volumen de crecida en diferentes duraciones, tal tipo de análisis pierde relevancia.

7.3.2. Hidrograma de diseño en CHF

En la Figura 7.21 se puede observar el hidrograma tipo adimensional obtenido a partir de las cinco mayores crecidas (respecto a su pico, Q_{max}) en CHF, mientras que en la Figura 7.22 se presentan los hidrogramas maximizados para recurrencias de 25, 50, 100, 1.000 y 10.000 años.

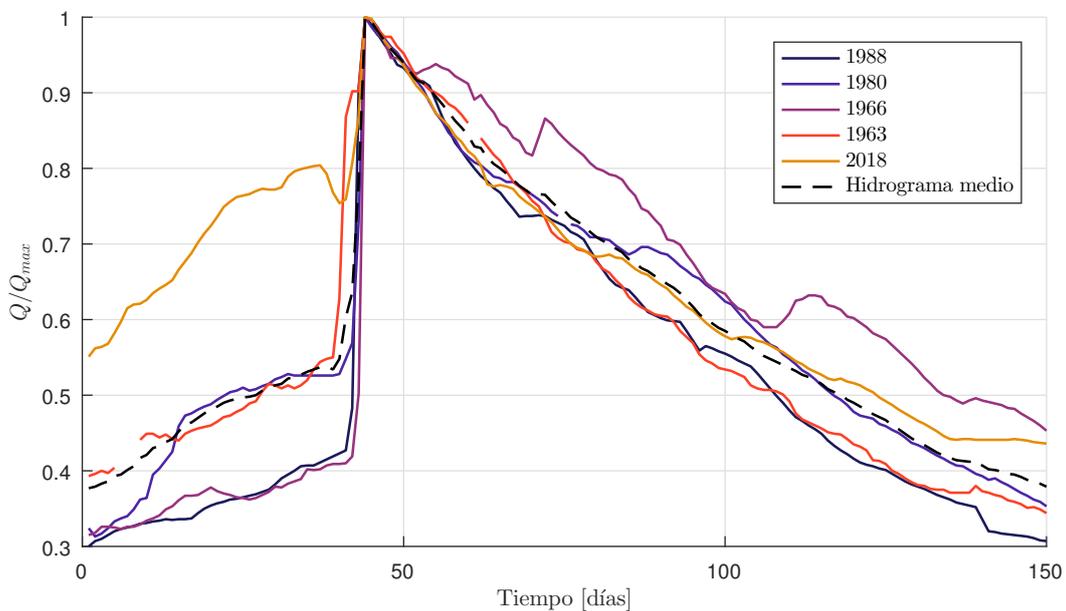


Figura 7.21: Hidrograma tipo adimensional en CHF.

Teniendo en cuenta que se seleccionaron las formas de las crecidas mayores registradas en CHF para obtener una distribución temporal típica, donde el efecto del desembalse rápido de lago Rico es notable y característico, se considera que la forma adoptada del hidrograma es válida para crecidas de recurrencia mayores a 20 años. En recurrencias bajas, pueden existir otras formas de crecidas más suavizadas que no involucran efectos de desembalses rápidos en Lago Rico.

7.3.3. Hidrograma de diseño en LLEO

En la Figura 7.23 se presenta el hidrograma tipo adimensional obtenido a partir de las cinco mayores crecidas (respecto a su pico) en LLEO. Las crecidas seleccionadas fueron las correspondientes a los años 1960 ($Q_{max} = 890 \text{ m}^3/\text{s}$), 2005 ($882 \text{ m}^3/\text{s}$), 2012 ($880 \text{ m}^3/\text{s}$), 2018 (846

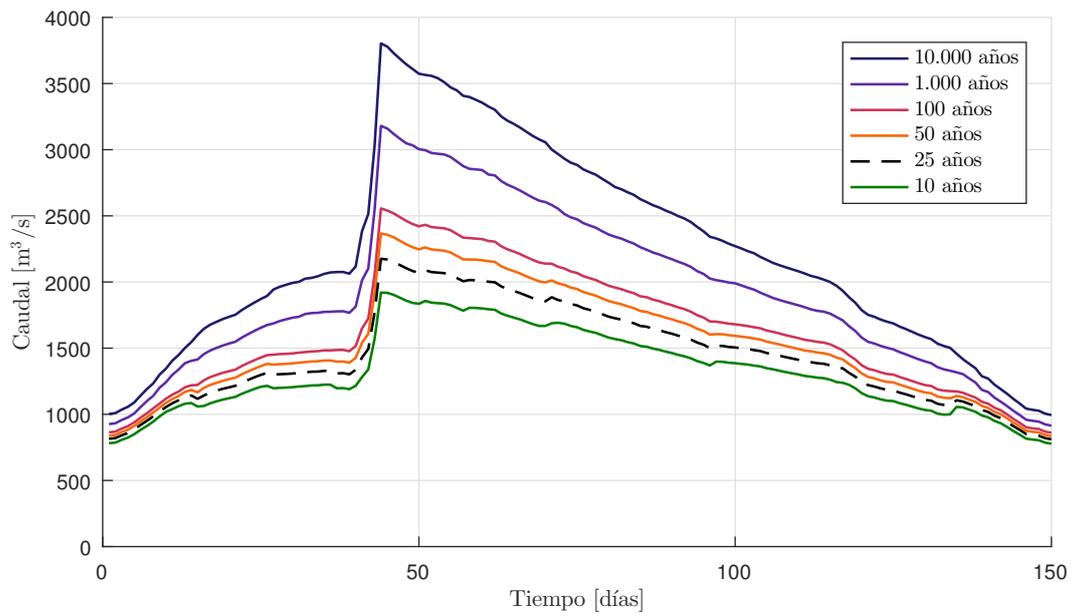


Figura 7.22: Hidrogramas maximizados para distintas recurrencias en CHF.

m³/s) y 1999 (806 m³/s).

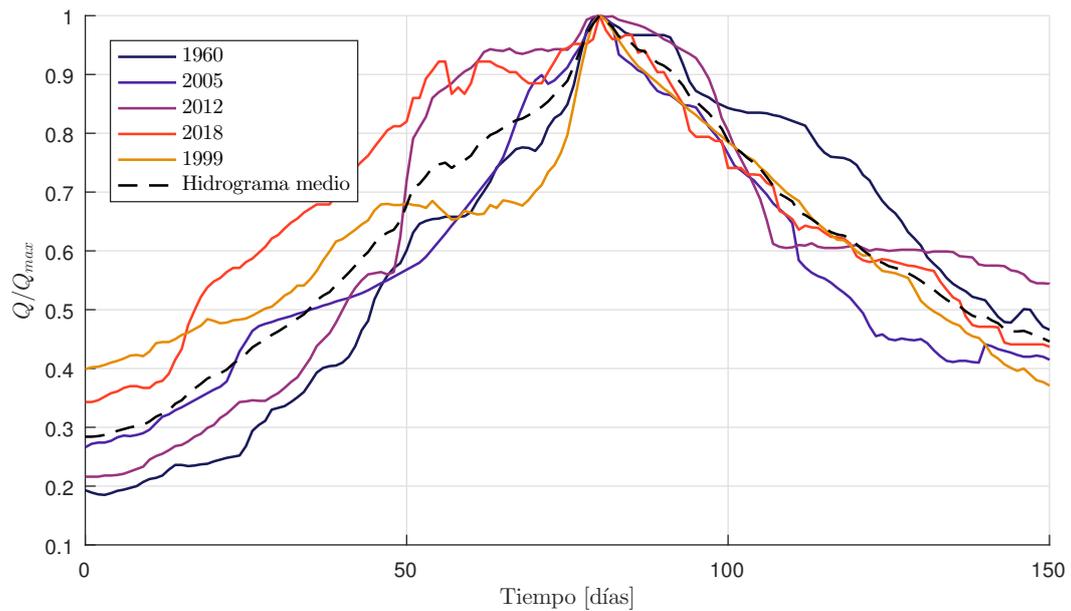


Figura 7.23: Hidrograma tipo adimensional en LLEO.

Respetando los caudales máximos en cada recurrencia, se obtuvieron los hidrogramas de la Figura 7.24, los cuales mantienen los volúmenes maximizados en diferentes duraciones. Claramente estos hidrogramas no presentan crecidas abruptas como las observadas en CHF.

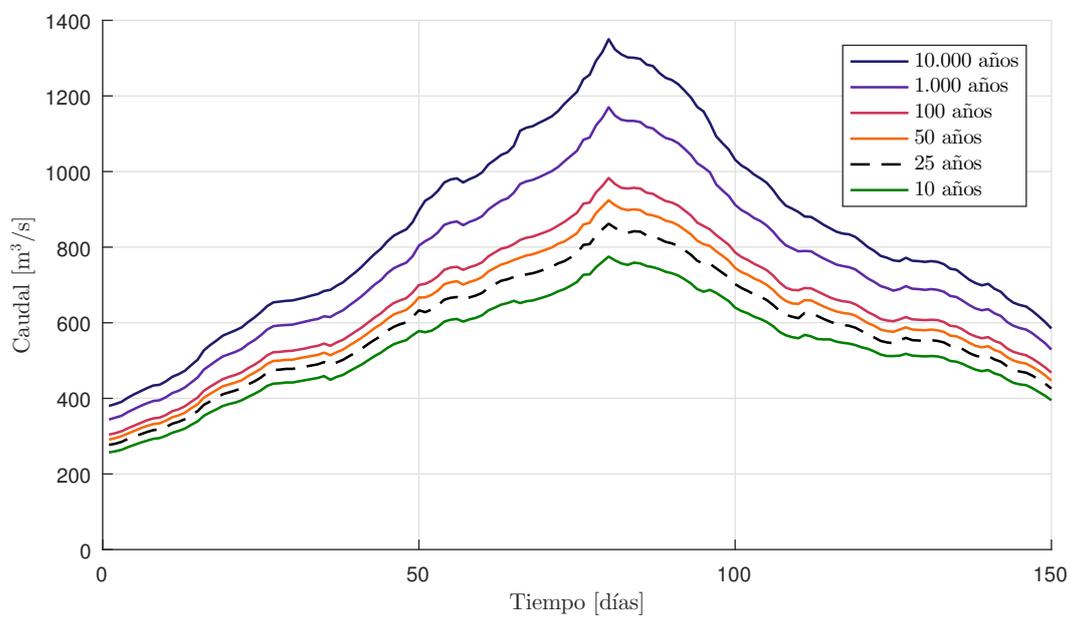


Figura 7.24: Hidrograma de diseño para distintas recurrencias en LLEO.

T [años]	CHF - volúmenes máximos (Hm³) en 7 días – serie 1957/58 – 2018/19					
	LN2	GU	GEV	PIII	LPIII	EXP
2	852	842	834	854	842	812
5	1.034	1.020	1.016	1.032	1.023	999
10	1.144	1.137	1.143	1.137	1.141	1.141
25	1.275	1.286	1.312	1.259	1.288	1.328
50	1.367	1.397	1.444	1.342	1.398	1.469
100	1.455	1.506	1.580	1.421	1.508	1.611
1.000	1.735	1.869	2.072	1.661	1.884	2.081
10.000	2.005	2.231	2.635	1.880	2.291	2.551
	CHF - volúmenes máximos (Hm³) en 15 días – serie 1957/58 – 2018/19					
2	3.501	3.454	3.454	3.522	3.488	3.346
5	4.172	4.121	4.139	4.178	4.159	4.037
10	4.572	4.562	4.589	4.553	4.570	4.559
25	5.042	5.120	5.155	4.978	5.063	5.250
50	5.370	5.534	5.571	5.267	5.415	5.772
100	3.012	3.131	3.228	2.939	3.095	3.335
1.000	3.568	3.872	4.114	3.409	3.798	4.288
10.000	4.102	4.610	5.067	3.834	4.536	5.242
	CHF - volúmenes máximos (Hm³) en 30 días – serie 1957/58 – 2018/19					
2	3.501	3.454	3.454	3.522	3.488	3.346
5	4.172	4.121	4.139	4.178	4.159	4.037
10	4.572	4.562	4.589	4.553	4.570	4.559
25	5.042	5.120	5.155	4.978	5.063	5.250
50	5.370	5.534	5.571	5.267	5.415	5.772
100	5.684	5.945	5.983	5.536	5.756	6.295
1.000	6.664	7.303	7.327	6.340	6.855	8.030
10.000	7.595	8.659	8.646	7.058	7.945	9.765
	CHF - volúmenes máximos (Hm³) en 60 días – serie 1957/58 – 2018/19					
2	6.654	6.560	6.591	6.708	6.664	6.380
5	7.785	7.691	7.755	7.806	7.794	7.547
10	8.451	8.439	8.491	8.416	8.450	8.430
25	9.224	9.385	9.381	9.094	9.205	9.598
50	9.760	10.087	10.016	9.548	9.724	10.481
100	10.269	10.783	10.624	9.967	10.213	11.364
1.000	11.840	13.084	12.489	11.194	11.702	14.298
10.000	13.310	15.381	14.184	12.264	13.071	17.231
	CHF - volúmenes máximos (Hm³) en 90 días – serie 1957/58 – 2018/19					
2	9.474	9.339	9.419	9.576	9.550	9.105
5	10.939	10.812	10.936	10.981	10.995	10.622
10	11.793	11.787	11.857	11.736	11.780	11.769
25	12.778	13.019	12.933	12.557	12.635	13.285
50	13.457	13.933	13.674	13.097	13.195	14.432
100	14.099	14.840	14.362	13.588	13.702	15.579
1.000	16.062	17.838	16.350	14.995	15.140	19.390
10.000	17.881	20.830	17.956	16.187	16.328	23.201

Tabla 7.9: Volúmenes máximos anuales para diferentes duraciones y recurrencias en CHF (continua en la página siguiente).

T [años]	CHF - volúmenes máximos (Hm³) en 120 días – serie 1957/58 – 2018/19					
	LN2	GU	GEV	PIII	LPIII	EXP
	CHF - volúmenes máximos (Hm³) en 90 días– serie 1957/58 – 2018/19					
2	11.966	11.798	11.899	12.085	12.057	11.524
5	13.679	13.524	13.682	13.725	13.742	13.300
10	14.670	14.666	14.756	14.600	14.651	14.644
25	15.806	16.110	16.004	15.549	15.636	16.420
50	16.586	17.181	16.856	16.169	16.279	17.764
100	17.321	18.244	17.645	16.733	16.860	19.107
1.000	19.554	21.758	19.895	18.339	18.499	23.571
10.000	21.605	25.264	21.681	19.692	19.845	28.035
	CHF - volúmenes máximos (Hm³) en 150 días – serie 1957/58 – 2018/19					
2	14.187	13.989	14.039	14.227	14.126	13.701
5	15.999	15.836	15.969	16.002	15.952	15.586
10	17.037	17.059	17.184	16.990	17.042	17.012
25	18.217	18.605	18.653	18.091	18.324	18.898
50	19.023	19.751	19.696	18.828	19.224	20.324
100	19.778	20.889	20.693	19.509	20.081	21.750
1.000	22.055	24.650	23.739	21.507	22.786	26.488
10.000	24.123	28.403	26.430	23.253	25.390	31.225

Tabla 7.9: Volúmenes máximos anuales para diferentes duraciones y recurrencias en CHF.

Capítulo 8

CRECIDA DE VERIFICACIÓN ESCENARIO 1

8.1. Introducción

La crecida de verificación denominada Escenario 1 surge del desembalse máximo del lago Rico, combinado con niveles máximos de la cota de agua del lago Argentino.

A continuación, en la Figura 8.1 se muestran de manera esquemática los procesos que deben producirse para la superposición de los eventos críticos (4 etapas principales). Es importante aclarar que, si bien se muestran de manera separadas, las etapas 1 y 2 se dan en forma simultánea.

Los niveles máximos del lago Argentino se determinan en base a caudales máximos en la estación CHF y la correspondiente relación cota lago Argentino – caudal CHF. Para no duplicar el mismo efecto hidrológico sobre la estación CHF, los caudales máximos a considerar en esta estación deben surgir de un análisis que no considere situaciones de desembalses rápidos desde el lago Rico (rotura). Dicho análisis se presenta en 8.2.

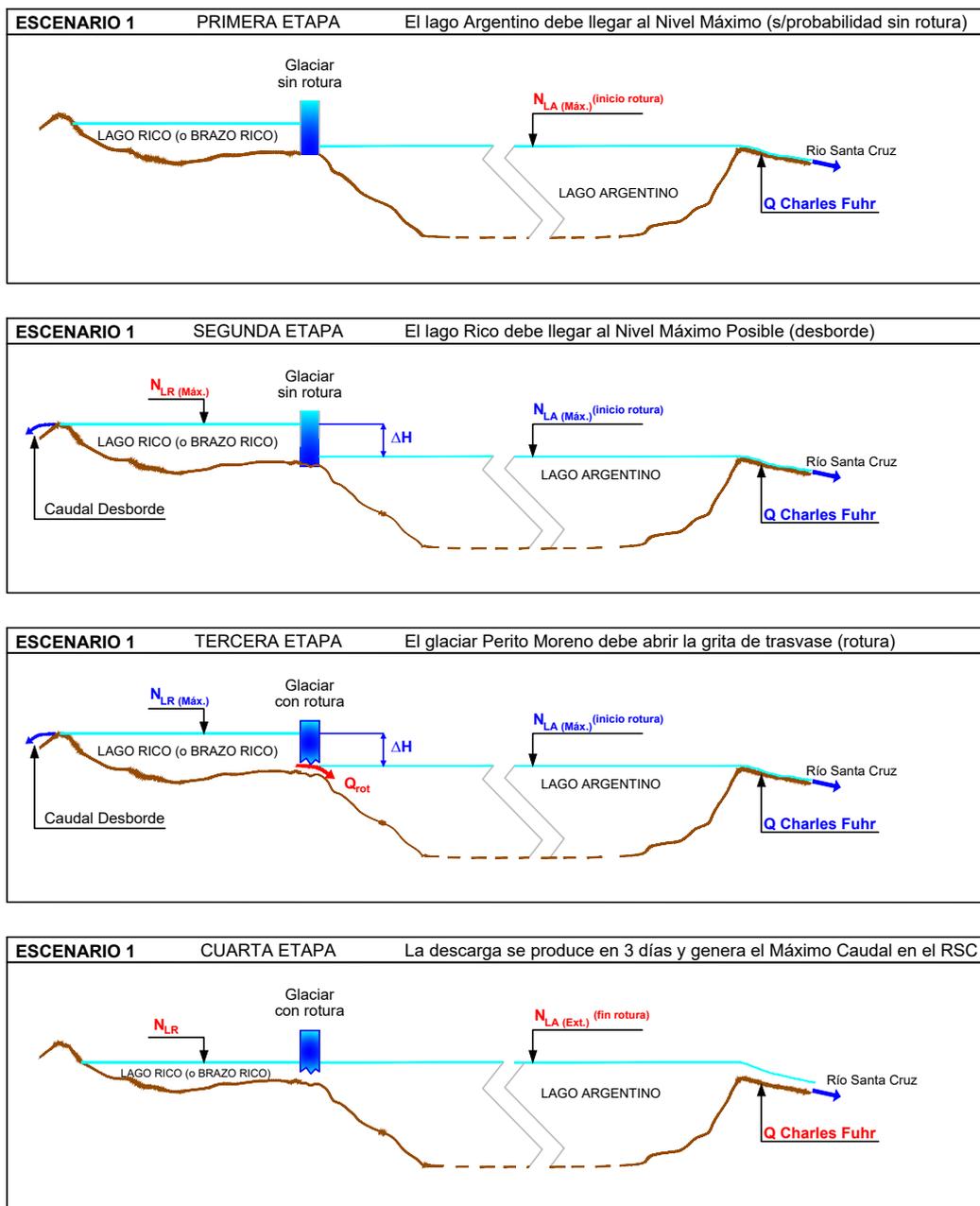


Figura 8.1: Esquematización de eventos críticos. Escenario 1.

8.2. Determinación de niveles máximos en lago Argentino

8.2.1. Análisis de frecuencia de caudales máximos en CHF sin considerar desembalses rápidos en lago Rico

(a) Series analizadas

En este caso, y a efectos de analizar diferencias con respecto a las determinaciones realizadas en el punto 7.1, se realizan análisis de caudales máximos sin contemplar efectos de desembalses rápidos sobre el lago Argentino. Asimismo, esta consideración permite efectuar comparaciones con análisis de caudales máximos realizados en el río La Leona, el cual descarga el lago Viedma

y resulta el principal tributario individual del lago Argentino.

Se realizan análisis de frecuencias a las siguientes series:

- Río Santa Cruz en CHF, serie 1957/58 – 2018/19, considerando solamente los años “normales”, tomando como tales aquellos donde el desembalse rápido del lago Rico no provoca un caudal máximo anual.
- Río Santa Cruz en CHF, serie 1957/58 – 2018/19, separando el efecto provocado por el desembalse rápido del lago Rico (serie truncada).

Para realizar la separación de hidrogramas, entre el hidrograma completo que incluye un evento de rotura y un hidrograma sin dicho evento, se utilizaron diferentes procedimientos en función de la información disponible en cada caso (Figura 8.2). En primer lugar, la separación de hidrogramas se apoyó en correlaciones realizadas entre caudales de las estaciones CHF y LLEO (salida del lago Viedma) para cada año donde debió efectuarse dicha separación, y en otros casos puntuales debió recurrirse a la simplificación de un truncamiento horizontal del hidrograma disponible.

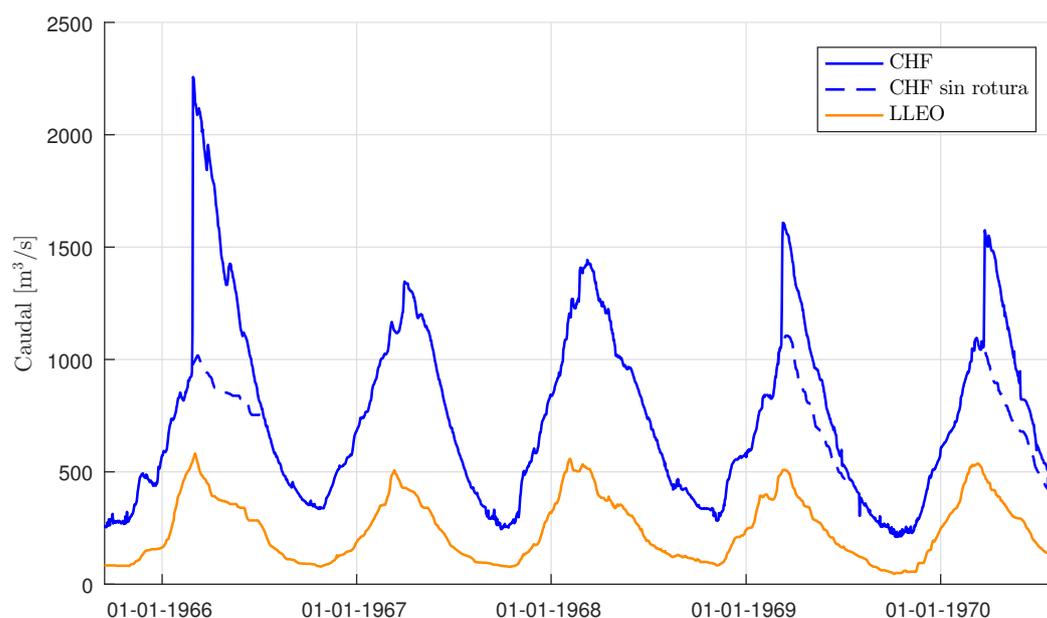


Figura 8.2: Ejemplo separación de hidrogramas.

Luego de la separación de hidrogramas, se redeterminan los caudales máximos anuales, resultando los indicados en la Figura 8.3

Se tiene claro que un análisis estricto no debería considerar ningún aporte desde el brazo Rico en la serie analizada. Considerando la dificultad de separar la contribución de este brazo al caudal máximo en los años donde no existe rotura y teniendo en cuenta que el área de aportes al mismo es reducida en relación al área total de la cuenca (8%), el esquema planteado se considera razonable y conservador en cuanto al fin pretendido.

Este análisis, si bien hipotético y aproximado, permite tener una base sobre la cual considerar y

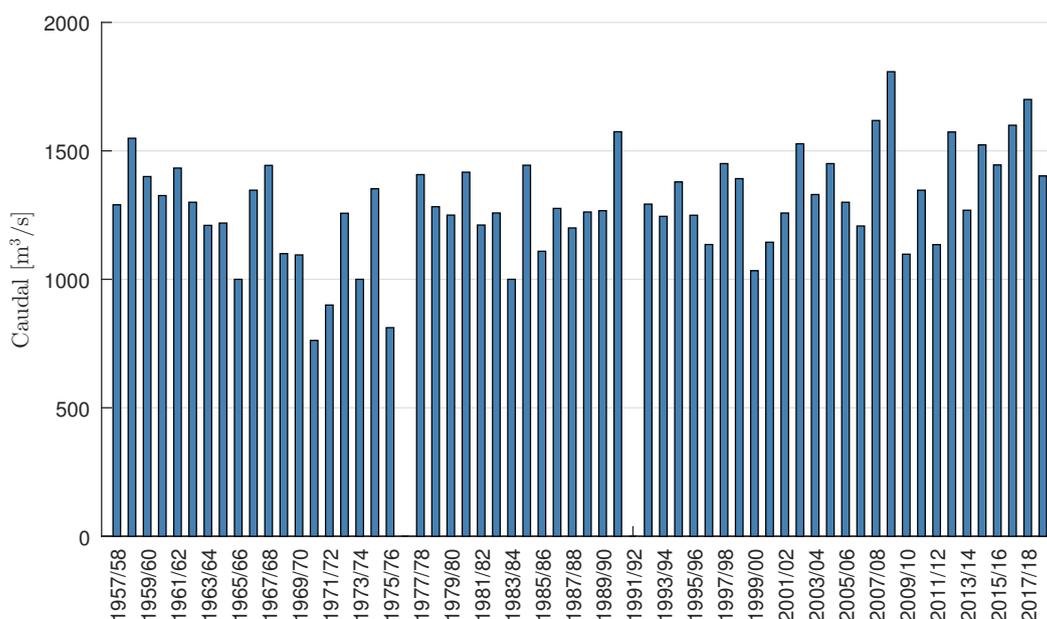


Figura 8.3: Caudales diarios máximos anuales en CHF sin considerar eventos de rotura.

superponer los desembalses rápidos para este Escenario 1.

(b) Estadísticos muestrales

Los estadísticos de la muestra: X (media), S (desvío estándar), CS (coeficiente de asimetría), CV (coeficiente de variación) y CK (coeficiente de kurtosis), se presentan en la Tabla 8.1 adjunta, para la serie completa disponible en la estación CHF y para las series sin considerar eventos de rotura.

Serie	N [años]	X [m³/s]	S [m³/s]	δ	ν	K
CHF (1957/58 – 2018/19) completa	60	1.467,4	354,12	1,07	0,24	4,4
CHF (1957/58 – 2018/19) sin considerar años con eventos de rotura	45	1.322,9	195,33	-0,46	0,15	4,7
CHF (1957/58 – 2018/19) truncando efecto de rotura	60	1.299,5	213,01	-0,18	0,16	3,6

Tabla 8.1: Estadísticos principales de las series de caudales analizadas para el río Santa Cruz en CHF.

(c) Ajuste de distribuciones probabilísticas

La Figura 8.4 y Figura 8.5 muestran el análisis de frecuencia de las series de caudales máximos anuales en CHF. Se utilizaron las funciones de distribución probabilística y métodos de estimación de parámetros indicados en 7.1.2(b)(i).

La forma de las distribuciones se modifica notablemente respecto a las indicadas en el punto 7.1.2(b)(ii); las distribuciones que mejor ajustan la muestra tienden a aplanarse hacia las altas recurrencias. La distribución LN2 es la que mejor ajusta, entre las funciones de 2 parámetros.

En la Figura 8.6 y Figura 8.7 se realiza una comparación entre las estaciones LLEO y CHF (serie

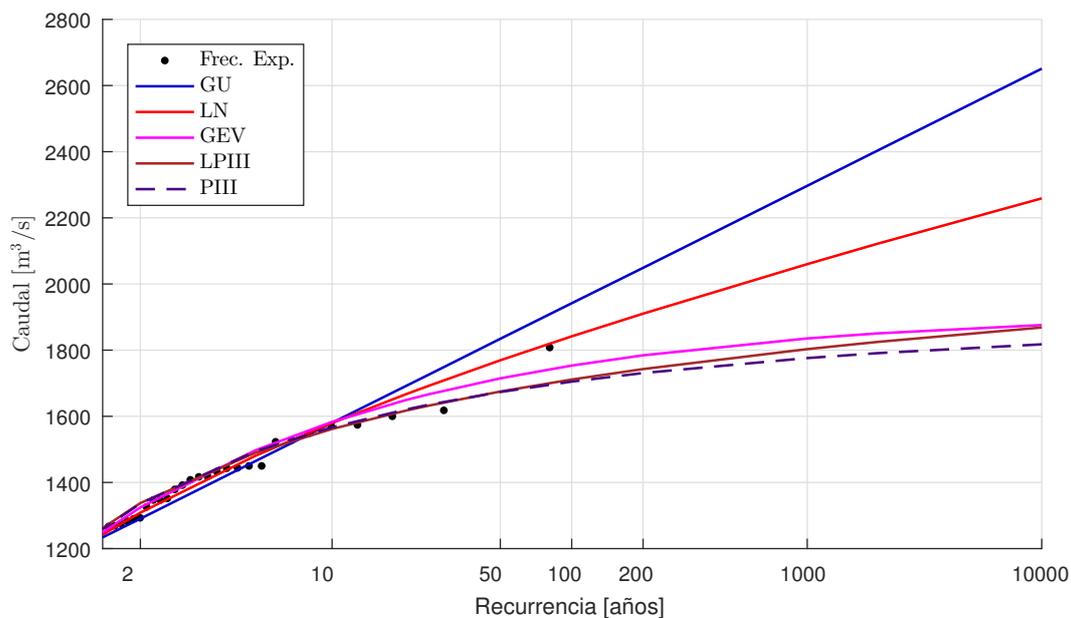


Figura 8.4: Análisis de frecuencia de caudales máximos anuales sin considerar años con eventos de rotura. Río Santa Cruz en CHF (1957/58 – 2018/19) – serie de 45 años.

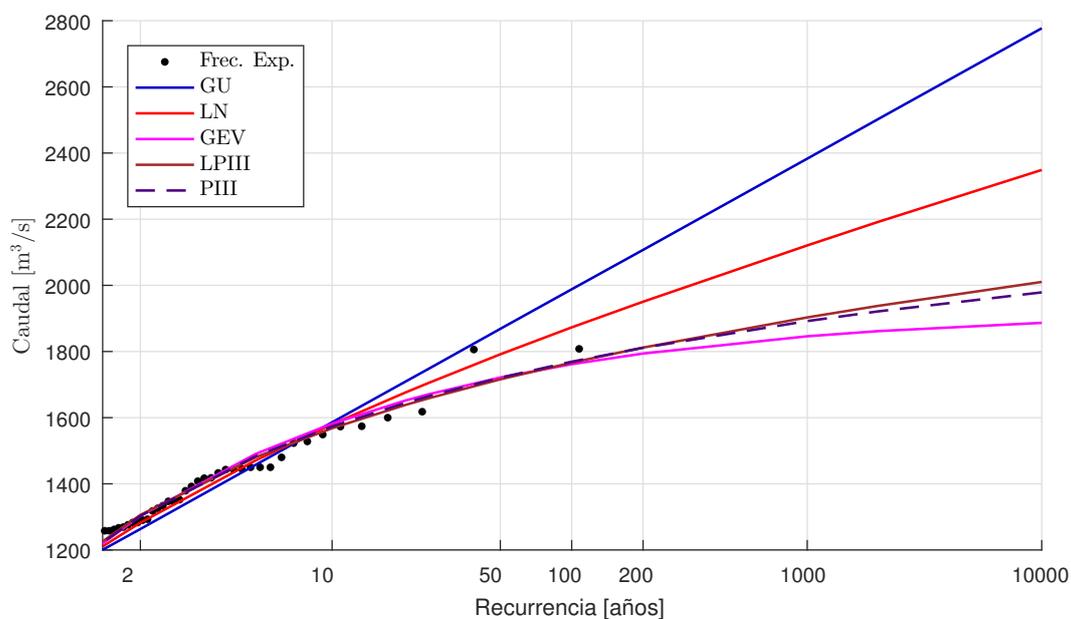


Figura 8.5: Análisis de frecuencia de caudales máximos anuales truncando efecto de rotura. Río Santa Cruz en CHF (1957/58 – 2018/19).

truncando aportes de roturas).

En la Tabla 8.2 se presentan los caudales máximos anuales para las recurrencias de 100, 1.000 y 10.000 años, con las distintas distribuciones utilizadas.

Para la serie CHF serie 1957/58 – 2018/19 (truncando eventos con rotura), se obtienen también caudales correspondientes al límite superior del intervalo de confianza del 90 %, resultando caudales de 1.997 m³/s, 2.297 m³/s y 2.577 m³/s, para las recurrencias de 100, 1.000 y 10.000 años respectivamente.

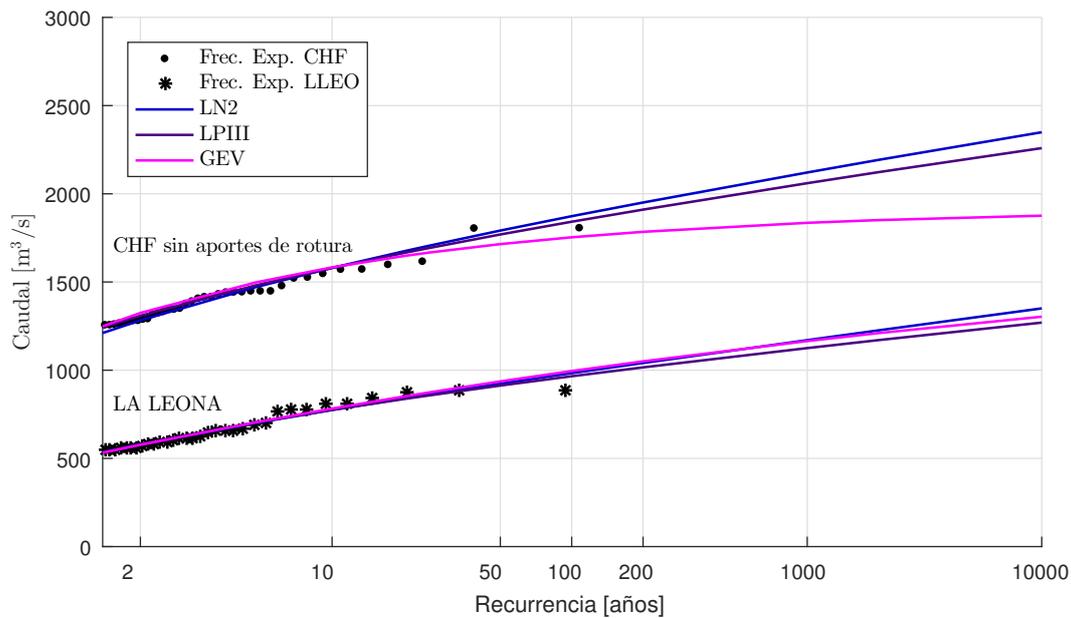


Figura 8.6: Cuenca superior del río Santa Cruz. Comparación análisis de frecuencia de caudales máximos anuales entre LLEO y CHF sin aportes de rotura.

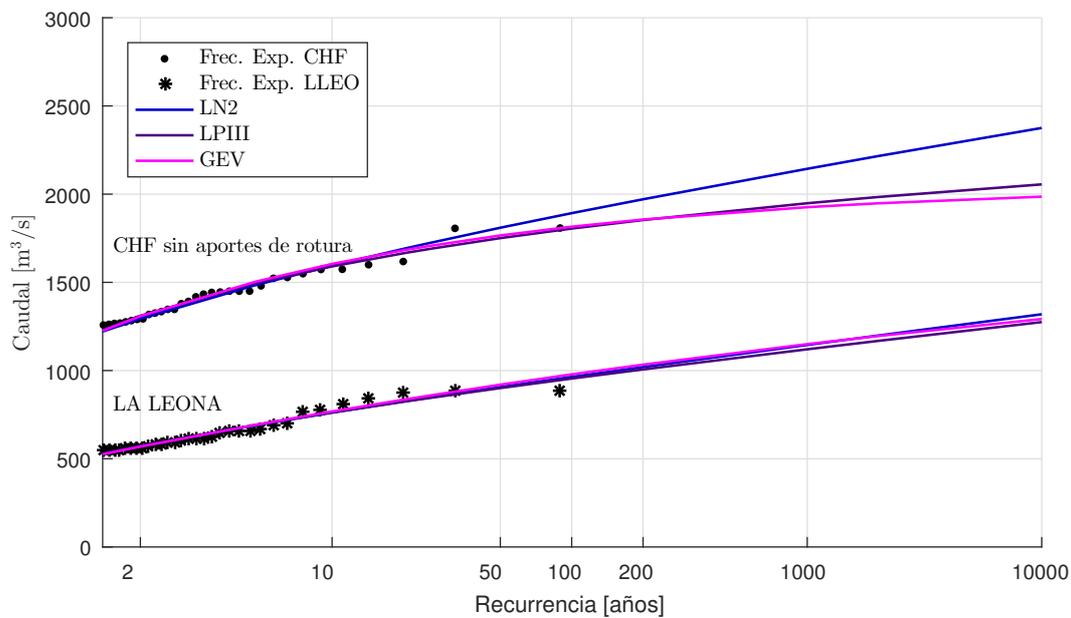


Figura 8.7: Cuenca superior del río Santa Cruz. Comparación análisis de frecuencia de caudales máximos anuales entre LLEO y CHF sin aportes de rotura (series coincidentes).

8.2.2. Niveles máximos en lago Argentino

Considerando la situación hipotética que no existieran desembalses rápidos hacia lago Argentino, se obtuvieron en el punto previo caudales máximos para diferentes recurrencias anuales, a partir de los cuales se determinan niveles del lago Argentino utilizando las ecuaciones indicadas en la Tabla 5.4. En la Tabla 8.3 se presentan los niveles del lago Argentino para diferentes recurrencias sin considerar efectos de rotura.

Adicionalmente, se menciona que para el caudal correspondiente al límite superior del intervalo de confianza del 90 % para 10.000 años de recurrencia ($2.577 \text{ m}^3/\text{s}$) se obtendría una cota en

<i>T</i> [años]	CHF – serie 1957/58 – 2018/19 (sin considerar años con eventos rotura – serie 45 años)					
	LN2	GU	GEV	PIII	LPIII	EXP
100	1.842	1.942	1.753	1.711	1.705	2.027
1.000	2.060	2.297	1.835	1.803	1.776	2.477
10.000	2.259	2.651	1.876	1.869	1.818	2.927
	CHF – serie 1957/58 – 2018/19 (truncando eventos con rotura)					
100	1.873	1.988	1.763	1.766	1.769	2.067
1.000	2.121	2.383	1.846	1.903	1.892	2.558
10.000	2.349	2.777	1.887	2.010	1.979	3.048
	La Leona serie 1956/57 – 2018/19					
100	983	1.039	995	948	966	1.088
1.000	1.170	1.295	1.165	1.090	1.125	1.404
10.000	1.350	1.550	1.303	1.216	1.270	1.720

Tabla 8.2: Caudales máximos anuales para diferentes recurrencias en CHF (sin considerar efectos de rotura del GPM) y en LLEO (m³/s).

<i>T</i> [años]	Caudal LN2 [m ³ /s]	Nivel en el lago Argentino [mIGN]
100	1.873	180,7
1.000	2.120	181,1
10.000	2.349	181,6

Tabla 8.3: Cotas máximas en lago Argentino sin considerar efectos de roturas.

lago Argentino de 181,95 mIGN; 40 cm por encima del valor esperado para dicha recurrencia.

8.3. Crecida del río Santa Cruz: Escenario 1

8.3.1. Hidrograma de la rotura máxima

Se entiende con el nombre de “Hidrograma de la rotura máxima” a aquel hidrograma de desembalse rápido del lago Rico que puede producir los mayores caudales en el río Santa Cruz.

Como ya se ha mencionado, los hidrogramas de crecidas críticas del río Santa Cruz resultan de la superposición de un hidrograma generado por el evento de desembalse rápido del lago Rico sobre niveles máximos del lago Argentino.

A su vez, los caudales que aporta este desembalse corresponden al mayor evento que podría presentarse, en función del nivel máximo que puede alcanzar el lago Rico (dado por limitaciones físicas impuestas por el sistema), el nivel inicial del lago Argentino y la forma y duración del desembalse.

Para determinar el hidrograma de la rotura máxima, es indispensable contar con la curva de variación de niveles del lago Rico durante este evento. Para obtenerla, se escaló la curva adimensional de desembalse media (ver 5.4.2) adoptando los siguientes parámetros:

- Duración del desembalse (*D*) = 3 días.

Se adopta una duración del desembalse de 3 días porque, como se indicó en el punto 5.2, la

mayoría de los eventos de rotura presentan esta duración. Además, como se verifica luego en 8.4.2, la modificación de esta variable no impacta significativamente en el hidrograma de crecida del río Santa Cruz.

- Desnivel del lago Rico (ΔH_{LR}) = 24,8 m

El desnivel del brazo Rico es la diferencia entre el nivel del mismo en el inicio y fin del desembalse:

- El nivel inicial del lago Rico coincide con el nivel máximo que podría alcanzar este lago previo a iniciarse la rotura del GPM, determinado en 5.2 como 209,5 mIGN.
- El nivel final del lago Rico se considera igual al nivel final del lago Argentino, asumiendo que, una vez finalizado el desembalse, el lago Rico y el lago Argentino se comportan como un único gran lago.

El nivel del lago Argentino también ha sufrido modificaciones respecto a su estado inicial debido al evento de desembalse; entonces el proceso se torna iterativo, ya que el volumen desembalsado influirá en el nivel final del lago Argentino y, al mismo tiempo, de éste dependerá el desnivel máximo del lago Rico. Inicialmente se supone un nivel final del lago Argentino y se modifica su valor hasta que coincida con el que arroja como resultado el modelo de simulación de operación de embalse. De esta iteración, surge un desnivel $\Delta H_{LR} = 24,8$ m.

En cuanto al nivel del lago Argentino previo a iniciarse el desembalse, éste dependerá del escenario que se desee modelar. En el denominado Escenario 1 de crecidas máximas del río Santa Cruz, el nivel inicial del lago Argentino es un nivel maximizado probabilísticamente, al cual le corresponde un caudal decamilenario en el río Santa Cruz (sin considerar los aportes de los eventos de rotura), siendo este nivel inicial maximizado probabilísticamente de 181,6 mIGN (Tabla 8.3).

Habiendo definido los parámetros D y ΔH_{LR} , se procede a escalar la curva adimensional de desembalse media, obteniendo la curva de variación de niveles del lago Rico durante la rotura máxima (Figura 8.8).

Finalmente, con la curva de variación de niveles del lago Rico y la curva cota – volumen del mismo lago (Figura 5.21), se determina los hidrograma de la rotura máxima (Figura 8.9) siguiendo el mismo procedimiento detallado en 5.4.2.

8.3.2. Crecida del río Santa Cruz: Escenario 1

Habiendo validado el modelo de simulación de operación de embalse (ver 5.4.4), se hace uso del mismo para predecir el comportamiento de los niveles del lago Argentino y los caudales del río Santa Cruz frente al paso de la crecida provocada por el máximo desembalse rápido del lago Rico. Como ya se ha mencionado, los caudales entrantes están dados por:

- Desembalse rápido del lago Rico.

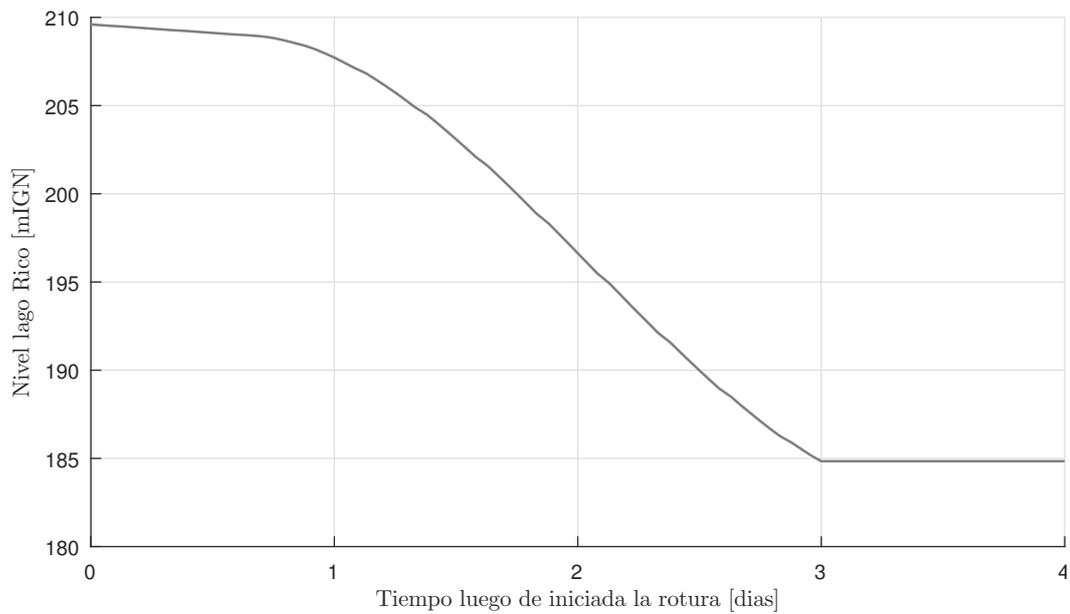


Figura 8.8: Curva de variación de niveles del lago Rico durante el desembalse máximo del Escenario 1.

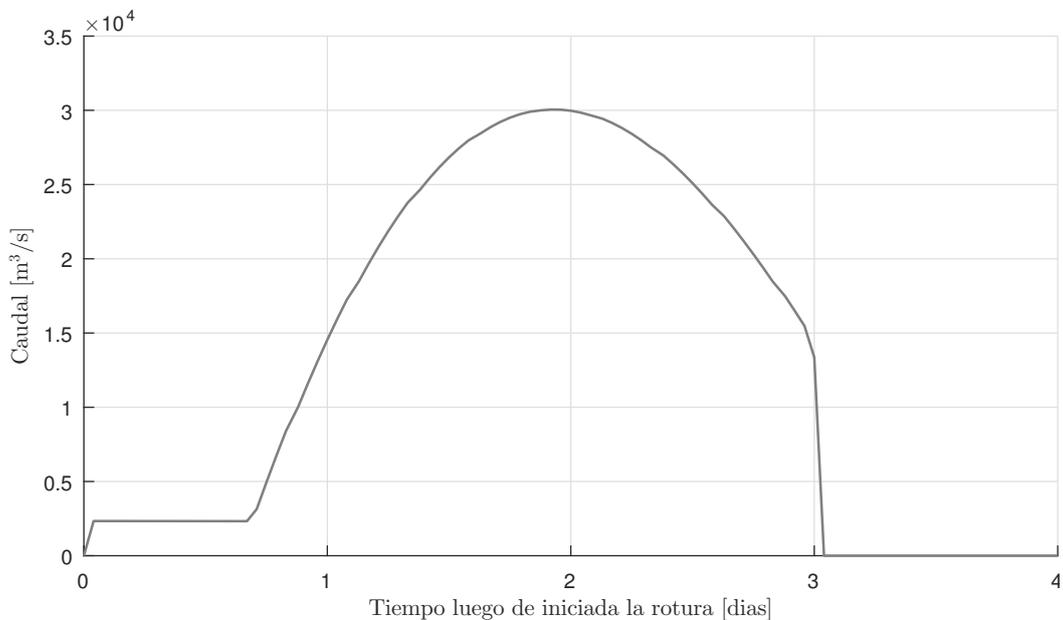


Figura 8.9: Hidrograma de la rotura máxima del Escenario 1.

- Aportes al lago Argentino del resto de la cuenca, incluyendo los caudales que ingresan desde el río La Leona.

Los caudales que aporta el lago Rico en el evento de desembalse se consideran a partir del hidrograma de la rotura máxima (Figura 8.9).

Los aportes del resto de la cuenca del lago Argentino, incluyendo los caudales que ingresan desde el río La Leona, se consideran constantes a partir de un nivel inicial del lago Argentino maximizado probabilísticamente (181,6 mIGN), al cual le corresponde un caudal decamilenario en el río Santa Cruz (sin considerar los aportes de los eventos de rotura).

Los caudales salientes del modelo se obtienen a partir de la ley $N_{LA} - Q_{CHF}$ que relaciona los

niveles del lago Argentino con los caudales en el río Santa Cruz, presentada en la Figura 5.30

Finalmente, se simula en el modelo de embalse el tránsito del hidrograma de rotura máximo del GPM por el lago Argentino con un nivel inicial de 181,6 mIGN, obteniéndose la variación en el tiempo de los niveles del lago Argentino (Figura 8.10) y el hidrograma de la crecida de verificación del Escenario 1 para el río Santa Cruz (Figura 8.11).

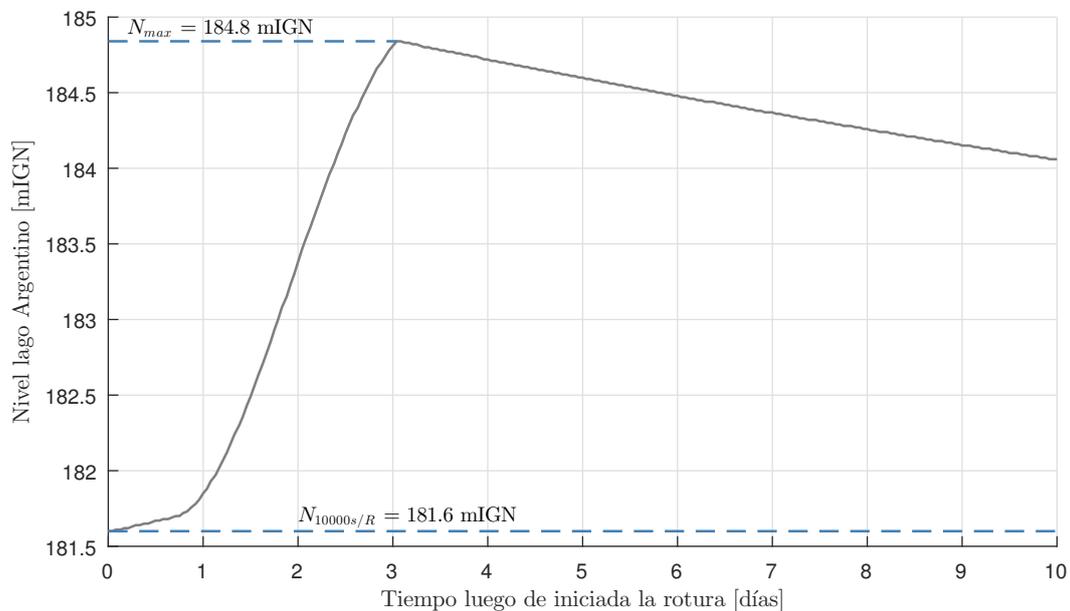


Figura 8.10: Variación en el tiempo de los niveles del lago Argentino durante los quince primeros días luego de iniciado el desembalse.

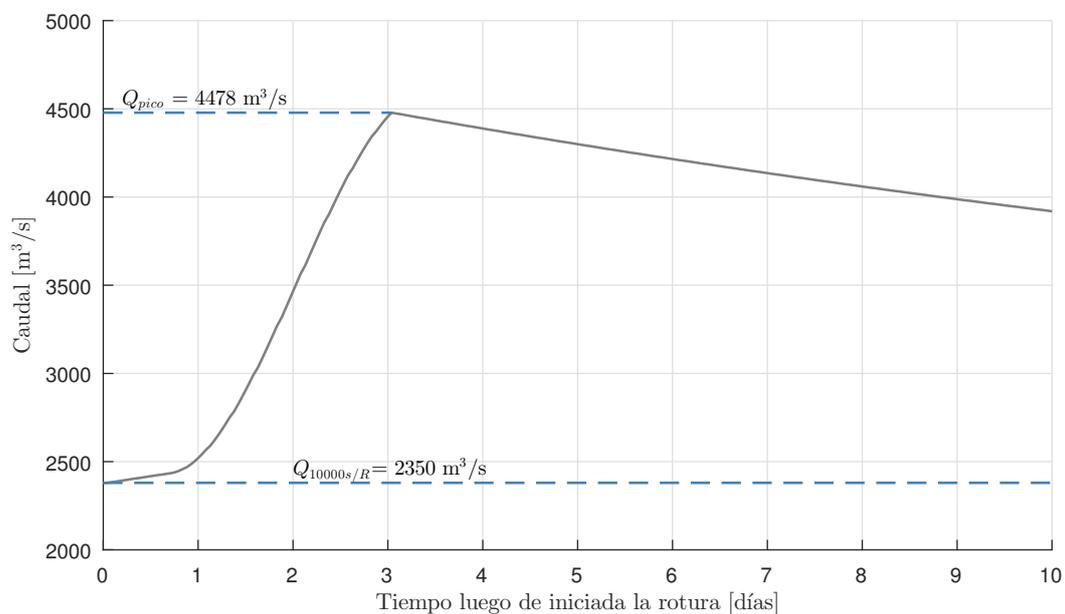


Figura 8.11: Hidrograma de crecida de verificación del río Santa Cruz (Escenario 1) durante los quince primeros días luego de iniciado el desembalse.

8.4. Análisis de sensibilidad del modelo

Se analiza cómo la modificación de una de las variables de entrada al modelo afecta los resultados que éste arroja, con el objetivo de identificar aquellas sobre las cuales corresponde dedicar más esfuerzos para afinar los cálculos y aproximarse a lo que podría ser su verdadero valor, en caso de que fuera necesario. Las variables que se estudian son:

- La forma del hidrograma de rotura.
- La duración del desembalse (D) utilizada para escalar la curva de variación de niveles del lago Rico durante el desembalse.
- Variaciones en las curvas cota – volumen del lago Rico y del lago Argentino.
- Variaciones en la cota inicial adoptada para lago Argentino.

8.4.1. Sensibilidad a la forma del hidrograma de rotura

La construcción de la curva de variación de niveles del lago Rico durante el desembalse puede realizarse en base a cualquiera de las curvas adimensionales, tanto las registradas como la curva adimensional de desembalse media ajustada (Figura 5.25). Si se cuenta con un valor de desnivel máximo en el lago Rico y una duración del desembalse, cualquiera de estas curvas puede ser escalada.

Se construyen hidrogramas de la rotura máxima en base a las curvas adimensionales de desembalse media y de los eventos de los años 1966 y 2018 (Figura 8.12). Para ello, se tienen las siguientes consideraciones:

- El nivel inicial del lago Rico es coincidente con la cota máxima asumida para el desborde del mismo (209,5 mIGN).
- El nivel inicial del lago Argentino es el maximizado probabilísticamente (181,6 mIGN).
- La duración considerada para el desembalse es de 3 días.

Los hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz que resultan de las modelaciones se presentan en la Figura 8.13.

8.4.2. Sensibilidad a la duración del desembalse

Para la construcción del hidrograma de la rotura máxima se consideró una duración de 3 días. Sin embargo, cabe preguntarse por qué no utilizar una duración de 2 días, considerando que existen eventos que han presentado esta duración y significaría una situación más desfavorable.

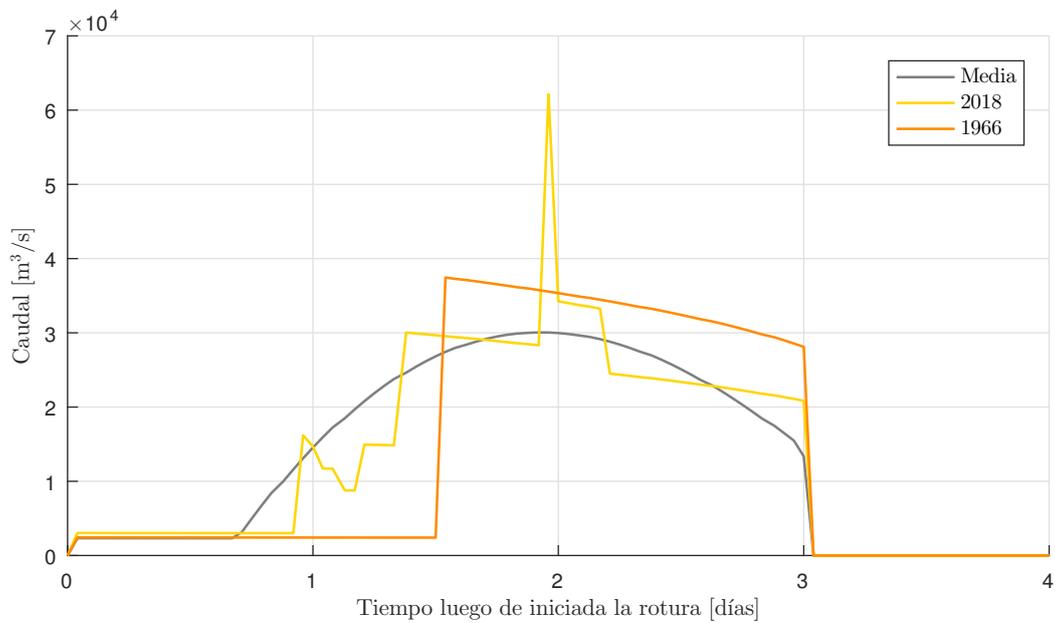


Figura 8.12: Hidrogramas de rotura máxima construidos a partir de la curva adimensional de desembalse media, del año 2018 y del año 1966.

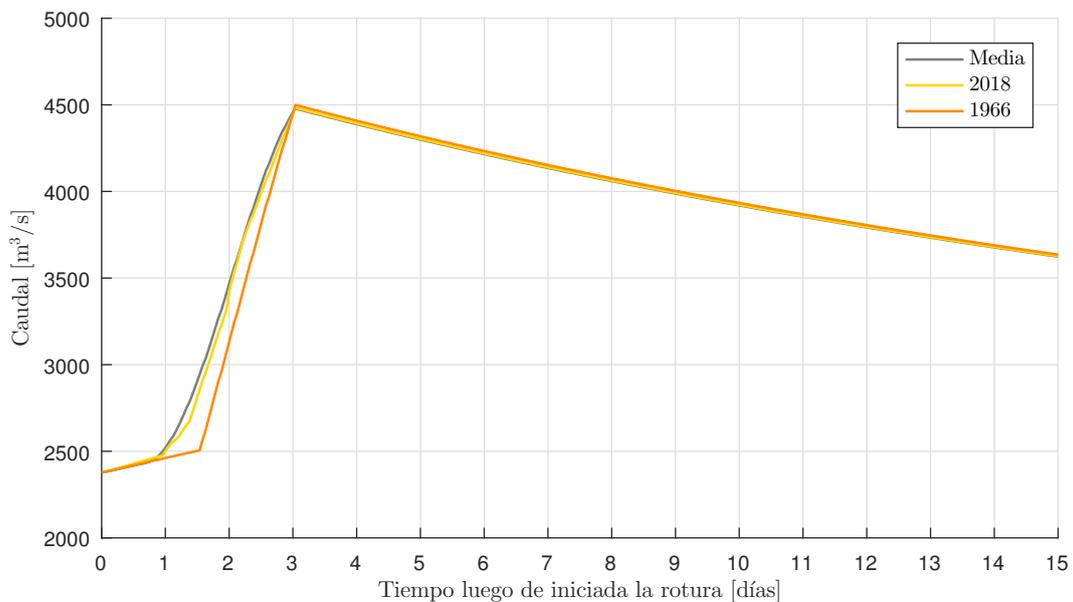


Figura 8.13: Hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura máxima construidos en base a la curva adimensional media, la del año 2018 y la del año 1966.

Por lo tanto, se construyen hidrogramas de rotura máxima con 2, 2,5 y 3 días de duración (Figura 8.14).

Para ello, se tienen las siguientes consideraciones:

- La curva adimensional de desembalse utilizada es la media.
- El nivel inicial del lago Rico es coincidente con la cota máxima asumida para el mismo (209,5 mIGN).
- El nivel inicial del lago Argentino es el maximizado probabilísticamente (181,6 mIGN).

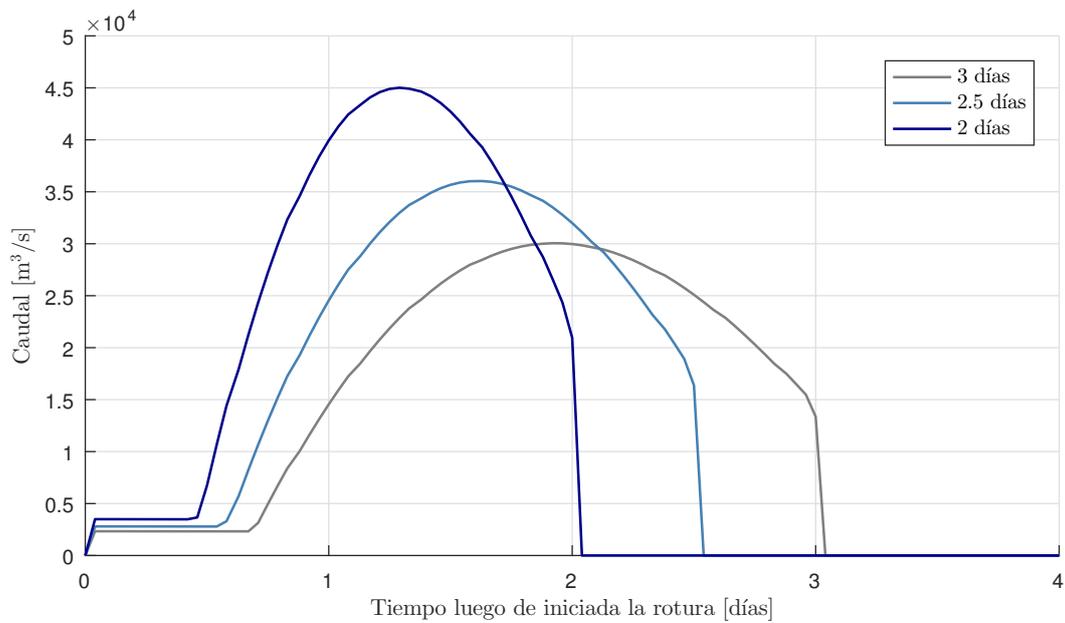


Figura 8.14: Hidrogramas de rotura máxima construidos a partir de la curva adimensional de desembalse media para duraciones de 2, 2,5 y 3 días.

Los hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz que resultan de las modelaciones se presentan en la Figura 8.15.

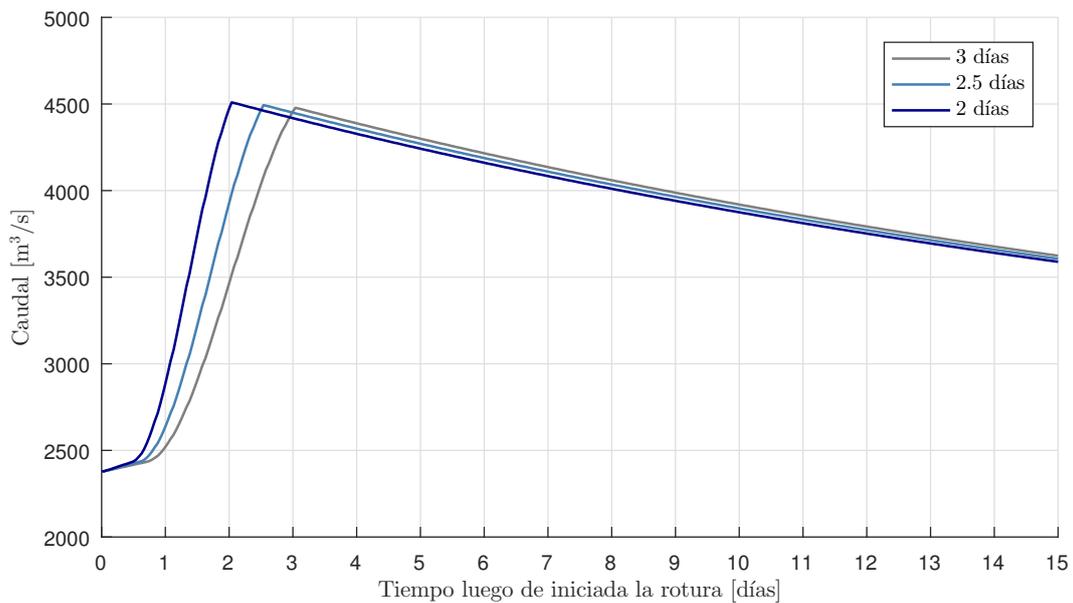


Figura 8.15: Hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura máxima de 2, 2,5 y 3 días de duración.

8.4.3. Sensibilidad a la variación de las curvas cota - volumen

En el Anexo D se indica que existen errores en la estimación de las curvas cota - volumen de $\pm 1,4\%$ para el lago Argentino y $\pm 3,8\%$ para el lago Rico, asociados a la propagación de los errores en la determinación de las relaciones cota - área y al ajuste de los pares de valores cota - volumen.

Entonces, situándonos en el escenario más desfavorable, se construyen dos nuevas curvas cota - volumen:

- Para el lago Argentino, la que surge de considerar un -1,4% del volumen del lago en cada nivel, respecto a la curva original.
- Para el lago Rico, la que se construye con el objetivo de obtener los máximos hidrogramas de rotura. Para ello, la nueva curva ajusta, en su tramo inferior, los puntos que surgen de asumir un -3,8% de volumen, y en su tramo superior, los correspondientes a un +3,8% del volumen del lago respecto a la curva original.

Con estas nuevas curvas, se determina un nuevo hidrograma de la rotura máxima (Figura 8.16) y se simula su tránsito por el lago Argentino, con un nivel inicial de 181,6 mIGN, que permite comparar los resultados con los del Escenario 1 original (Figura 8.17).

Para ello, se tienen las siguientes consideraciones:

- La curva adimensional de desembalse utilizada es la media.
- El nivel inicial del lago Rico es coincidente con la cota máxima asumida para el mismo (209,5 mIGN).
- La duración considerada para el desembalse es de 3 días.

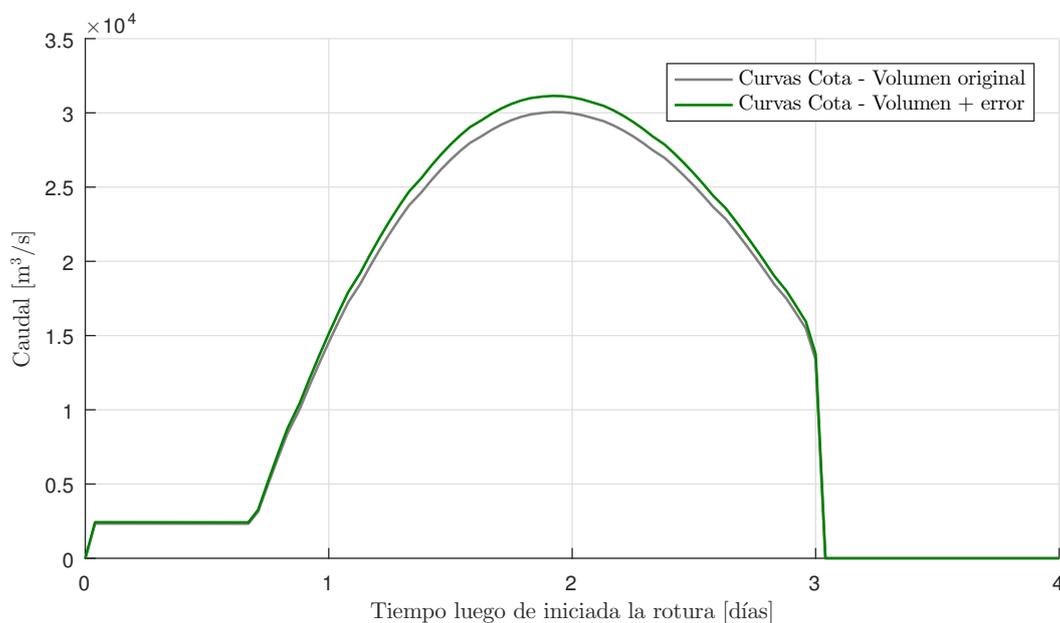


Figura 8.16: Hidrogramas de rotura máxima construidos a partir de la curva adimensional de desembalse media para duración de 3 días, nivel inicial del lago Argentino de 181,6 mIGN, variando las curvas cota - volumen de los lagos Rico y Argentino.

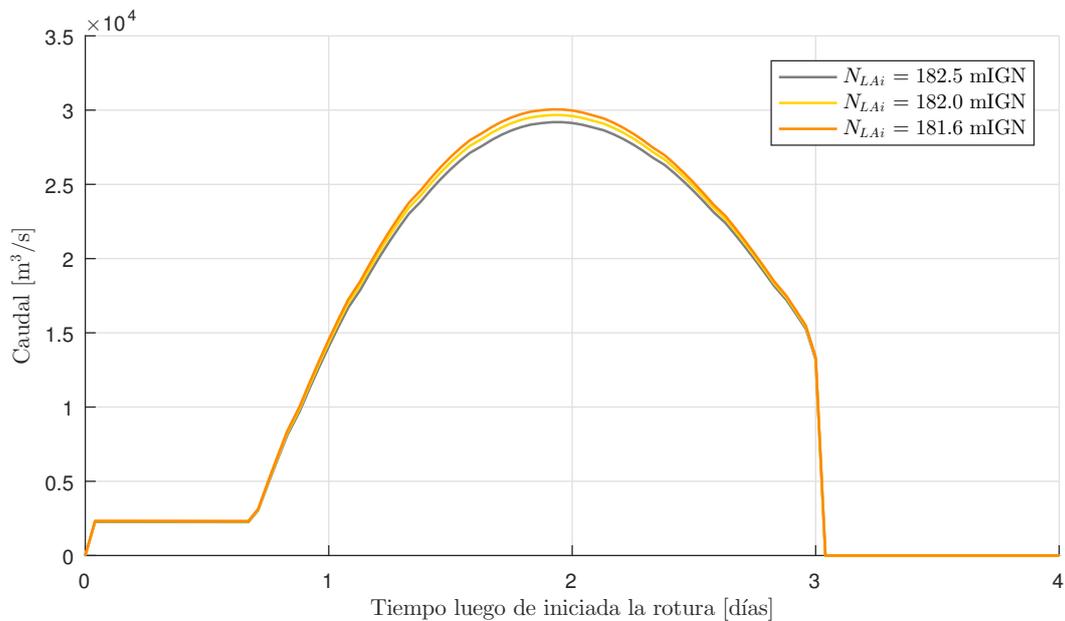


Figura 8.17: Hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura máxima variando las curvas cota - volumen de los lagos Rico y Argentino.

8.4.4. Sensibilidad al nivel inicial de lago Argentino

La variación del nivel inicial del lago Argentino modifica el desnivel máximo del lago Rico (y por lo tanto la forma del hidrograma de rotura) y el tránsito de este hidrograma por el lago Argentino. Entonces, se transitan por el modelo de embalse simplificado los hidrogramas de rotura construidos a partir de niveles iniciales del lago Argentino de:

- 181,6 mIGN, correspondiente al caudal decamilenario del río Santa Cruz sin considerar los aportes de los eventos de rotura ($2.350 \text{ m}^3/\text{s}$).
- 182,0 mIGN, correspondiente al límite superior del intervalo de confianza del 90 % de la estimación probabilística del caudal decamilenario del río Santa Cruz ($2.577 \text{ m}^3/\text{s}$).
- 182,5 mIGN, correspondiente a la estimación determinística del nivel inicial maximizado del lago Argentino ($2.920 \text{ m}^3/\text{s}$). (ver 9.2.5)

Además, se tienen las siguientes consideraciones:

- La curva adimensional de desembalse utilizada es la media,
- El nivel inicial del lago Rico es coincidente con la cota máxima asumida (209,5 mIGN), y
- La duración considerada para el desembalse es de 3 días.

En la Figura 8.18 se presentan los hidrogramas de rotura resultantes y en la Figura 8.19, los hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz.

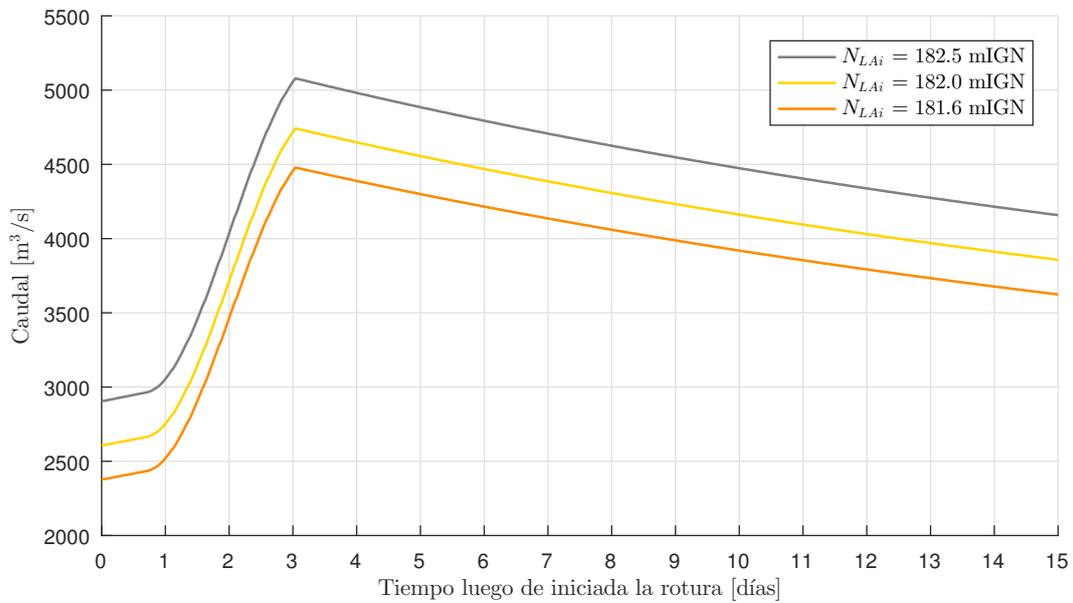


Figura 8.18: Hidrogramas de rotura máxima construidos a partir de la curva adimensional de desembalse media para duración de 3 días y niveles iniciales del lago Argentino de 181,6 mIGN, 182,0 mIGN, 182,5 mIGN.

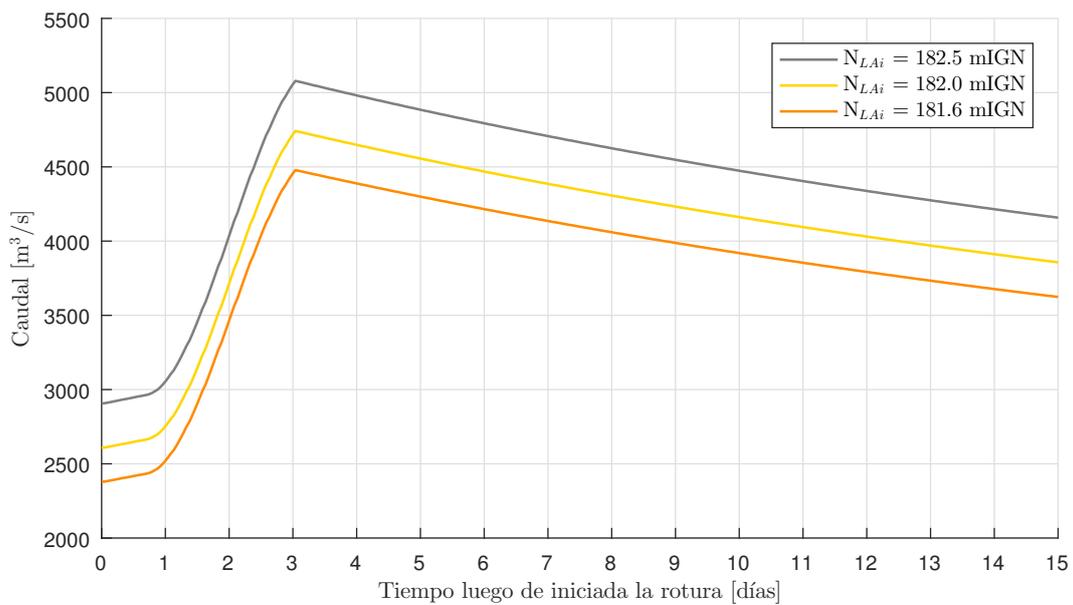


Figura 8.19: Hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura máxima con niveles iniciales del lago Argentino de 181,6 mIGN, 182,0 mIGN, 182,5 mIGN.

8.4.5. Conclusiones

En base a los resultados, se puede concluir que tanto la forma del hidrograma de rotura como la duración del desembalse no impactan significativamente en el hidrograma de crecida del río Santa Cruz. Si se compara el caudal pico resultante de la curva media para un desembalse de 3 días (4.478 m³/s) con el caudal pico que surge de la curva con forma del año 1966 para 2 días de duración (4.524 m³/s), el error máximo en la estimación de caudales es del orden de 1 % (Tabla 8.4).

Duración [días]	Q [m³/s]		
	Media	2018	1966
3	4.478	4.494	4.509
2,5	4.494	4.497	4.511
2	4.509	4.512	4.524

Tabla 8.4: Caudales pico del hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para distintas duraciones y construidos en base a diferentes curvas adimensionales de desembalse.

De hecho, si se considera un desembalse instantáneo (sin laminación) de todo el volumen almacenado en el lago Rico, el error de la estimación del caudal pico del hidrograma es aproximadamente del 2%. En la Tabla 8.5 se presentan los resultados de la simulación de un desembalse instantáneo, del cual resulta un caudal pico en el río Santa Cruz de 4.562 m³/s, que se compara con el caudal pico que surge de un desembalse medio de 3 días de duración (4.478 m³/s).

	Lago Rico		Lago Argentino		Charles Fuhr
	Nivel [mIGN]	Volumen [Hm³]	Nivel [mIGN]	Volumen [Hm³]	Caudal [m³/s]
Inicio del desembalse	209,5	5.699	181,6	7.021	2.350
Fin del desembalse	185,0	1.077	185,0	11.642	4.562

Tabla 8.5: Resultados de niveles, volúmenes y caudales de un desembalse instantáneo.

En cuanto a la sensibilidad del modelo de embalse a la variación de las curvas cota – volumen del lago Rico y del lago Argentino, tanto en la Figura 8.17 como en la Tabla 8.6 se puede observar que, en la situación más desfavorable de modificación de estas curvas, el caudal pico del hidrograma de crecida en el río Santa Cruz podría aumentar un 2,9%.

Q _p [m³/s]		Dif.
Nivel - Volumen + Error	Nivel - Volumen original	%
4.596	4.478	2,9

Tabla 8.6: Resultados de caudal pico del hidrograma de crecida en el río Santa Cruz a la variación de las curvas cota - volumen de los lagos Rico y Argentino.

Si se analizan los resultados de la sensibilidad del modelo de embalse al nivel inicial del lago Argentino, se observa en la Figura 8.18 que al aumentar este nivel se reduce el hidrograma de rotura, debido a la disminución del desnivel del lago Rico considerado para su determinación. Sin embargo, en la Figura 8.19 y la Tabla 8.7 se puede ver que los hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz con mayores niveles iniciales del lago Argentino tienen un caudal pico superior. Esto indica que la modificación en los aportes que origina un aumento del nivel inicial del lago Argentino supera la reducción de los caudales aportados por el desembalse rápido del lago Rico, debida a la disminución del desnivel entre los lagos previo a iniciarse el evento. Este es el motivo por el cual los caudales máximos en el río Santa Cruz se alcanzan cuando se superponen eventos de rotura sobre niveles importantes del lago Argentino.

Nivel inicial Lago Argentino mIGN	Caudal inicial río Santa Cruz [m³/s]	Diferencia de caudal inicial entre simulaciones [m³/s]	Caudal final río Santa Cruz [m³/s]	Diferencia de caudal final entre simulaciones [m³/s]
182,5	2.910	333	5.079	338
182,0	2.577	227	4.742	264
181,6	2.350	-	4.478	-

Tabla 8.7: Resultados de caudales del río Santa Cruz al análisis de sensibilidad del modelo al nivel inicial del lago Argentino.

Capítulo 9

CRECIDA DE VERIFICACIÓN ESCENARIO 2

9.1. Introducción

La crecida de verificación denominada Escenario 2 surge del desembalse máximo del lago Rico, combinado con niveles críticos del lago Argentino, diferenciándose del Escenario 1 básicamente en la manera de obtener los niveles del lago Argentino previo a la rotura y en cómo se comportan los aportes a lago Argentino durante el pasaje de la crecida.

Mientras en el denominado Escenario 1 los niveles máximos que se adoptan para lago Argentino surgen de análisis de frecuencia estadístico (sin considerar eventos de rotura), en el Escenario 2 se realiza una simulación hidrológica continua (precipitación – temperatura (fusión) – caudal) para determinar los aportes a lago Argentino maximizando estos con conceptos de Crecida Máxima Probable (CMP).

Por lo tanto, utilizando el mismo esquema de etapas presentado previamente, las diferencias son los niveles del lago Argentino conforme vayan variando sus aportes. En este escenario se consideran de manera explícita, además del evento de rotura del GPM, los desbordes que podrían ocurrir desde el lago Rico hacia lago Argentino. A continuación, se presentan de manera esquemática los procesos que deben producirse para la superposición de los eventos críticos que originan la Crecida de Verificación Escenario 2 (Figura 9.1).

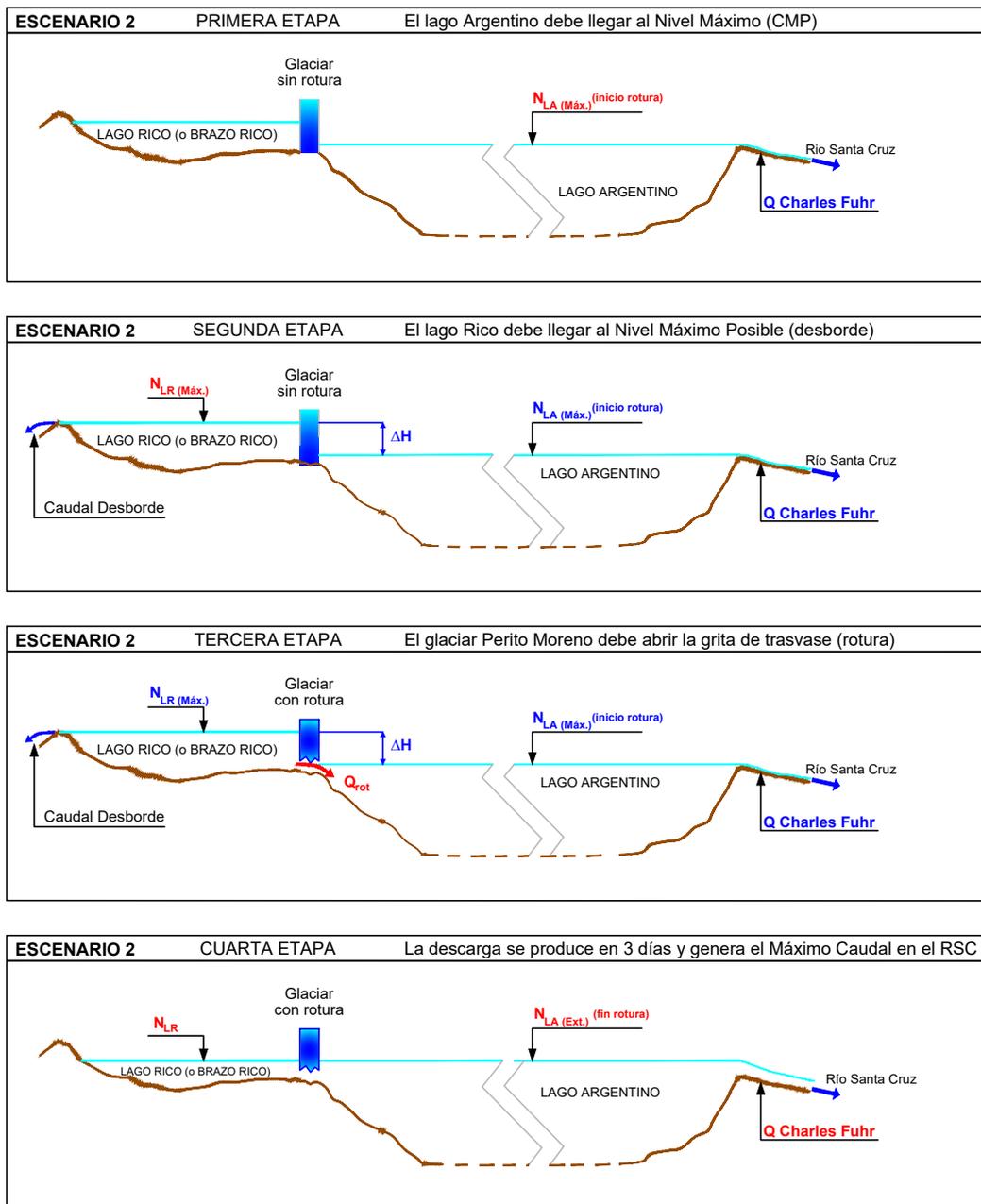


Figura 9.1: Etapas para definición de la Crecida de Verificación 2.

9.2. Simulación hidrológica de crecidas en el río Santa Cruz

9.2.1. Características del modelo de simulación

(a) Introducción

Para la simulación de las crecidas del río Santa Cruz se ha seleccionado como software hidrológico básico el HEC-HMS V.4.5 (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Model System) desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del U. S. Army Corps of Engineers, Davis, California. HEC-HMS está diseñado para simular la escorrentía superficial que resulta de una precipitación y/o del derretimiento nival, mediante la representación de la cuenca como un siste-

ma de componentes interconectados.

Cada componente representa una subcuenca, un tramo de cauce o un embalse, simulando los procesos hidrológicos mediante relaciones matemáticas en función de un conjunto de parámetros específicos. Los resultados de la modelación son los hidrogramas de crecidas en secciones transversales predeterminadas en cursos de agua.

Las versiones actuales del modelo permiten simular tanto eventos de precipitación pluvial como el derretimiento de nieve y hielo. Presentan asimismo la posibilidad de utilizar un modelo de procesamiento continuo, contemplando las variaciones temporales en diferentes almacenamientos del suelo, permitiendo de esta manera simular los procesos de humedecimiento y desecamiento que se producen en las cuencas o subcuencas. Esto resulta útil para la simulación de crecidas que surgen luego de procesos que requieren varios días o meses de formación.

(b) Modelo de humedad de suelo (SMA) del HEC-HMS

En casos como el presente, donde las crecidas son relevantes tanto respecto a su caudal máximo como a su volumen, y donde los procesos de formación de crecidas pueden tomar varios meses, sobre los cuales pueden apoyarse a su vez desembalses repentinos del lago Rico, surge la necesidad de abordar un estudio que contemple la variación de estado de los diferentes almacenamientos en los que se divide el sistema. Asimismo, es necesario incluir tanto períodos lluviosos y/o de acumulación de nieve como otros de ausencia de precipitaciones y derretimiento, visualizando las variaciones de contenido de humedad en cada almacenamiento, y el agua disponible para escurrimiento que surge de cada uno de los ellos. HEC-HMS permite la utilización del modelo SMA (Soil Moisture Account) para estos análisis detallados.

El modelo SMA representa la cuenca mediante un conjunto de almacenamientos, como se muestra esquemáticamente en la Figura 9.2 donde se pueden ver las conexiones entre los diferentes almacenamientos y las salidas del modelo.

El primer almacenamiento representa la porción de precipitación que es interceptada por la vegetación y no llega a alcanzar la superficie del terreno. El siguiente, representa el almacenamiento de agua que se podría acumular en la superficie del terreno, en pequeñas depresiones.

Superada la capacidad de estos almacenamientos el agua ingresa al terreno a través de la infiltración y/o escurre superficialmente (ello en función de una capacidad máxima de infiltración). El primer almacenamiento en el interior del terreno, intenta representar el fenómeno complejo de almacenamiento de agua en la capa superior del suelo. El mismo se divide en dos zonas: una de las cuales está constituida por la parte de suelo que es capaz de perder agua por evapotranspiración y/o percolación, y la otra (tension zone), que representa la parte del suelo que pierde agua exclusivamente por evapotranspiración, diferenciando de esta manera la existencia de agua libre y de agua capilar en el interior del suelo.

Luego el agua puede ingresar a los almacenamientos subterráneos, los cuales pueden representar el flujo subsuperficial y el flujo base propiamente dicho.

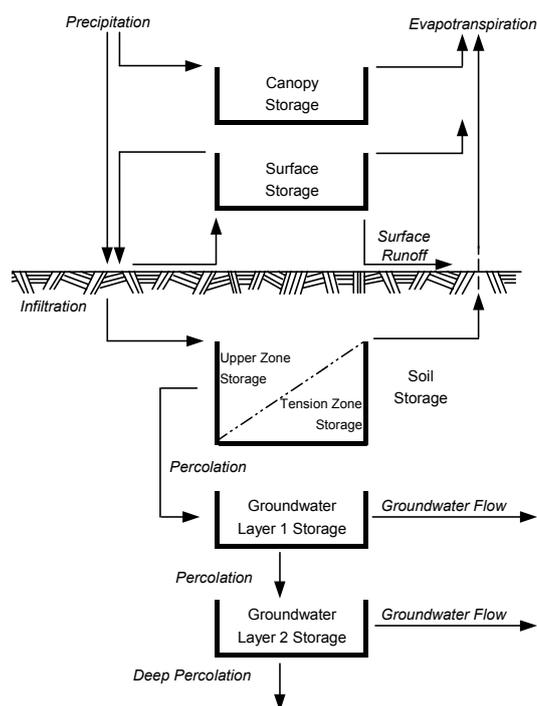


Figura 9.2: Esquema conceptual del modelo SMA.

El modelo SMA calcula el flujo hacia, desde, o entre los almacenamientos indicados, siendo la secuencia de cálculo diferente, según que se consideren períodos de precipitación o de ausencia de precipitación.

El desarrollo completo del proceso que se realiza en el modelo SMA del HEC-HMS se acompaña en el Anexo G.

(c) Modelo de acumulación y derretimiento de nieve / hielo

El derretimiento de nieve/hielo es un componente más del modelo de simulación. A partir de los datos de temperatura asignados a la cuenca permite determinar en primer lugar si la precipitación es líquida o cae en forma de nieve. La acumulación y el derretimiento del paquete de nieve se producen en respuesta a las condiciones atmosféricas, siendo el resultado final el agua líquida disponible en la superficie del suelo (Figura 9.3).

El método determina si la precipitación es lluvia o nieve, realiza el seguimiento de la acumulación y funde el paquete de nieve. El modelo permite la utilización del método del índice de temperatura (Temperature Index), el cual es una extensión del método grado-día (degree-day) para simular el comportamiento de un paquete de nieve, y puede utilizarse con relativamente pocos datos meteorológicos.

Cada subcuenca se divide en bandas de elevación, conteniendo cada banda sus propios parámetros.

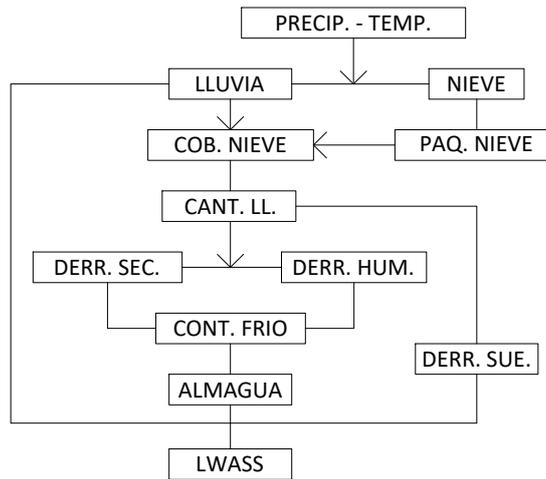


Figura 9.3: Esquematización modelo derretimiento.

(d) Transformación en hidrogramas

A partir de los modelos anteriormente explicitados se puede disponer de las respectivas láminas de escurrimiento, las cuales son transformadas en hidrogramas utilizando los siguientes métodos:

- Flujo superficial: método de hidrograma unitario Clark

Este método calcula el hidrograma de escurrimiento en la sección de salida de la cuenca considerada, trasladando en el espacio y tiempo la lámina disponible para escurrir. El hidrograma unitario de Clark presenta dos parámetros, relacionados con la geomorfología de la cuenca, denominados T_p y K (tiempo al pico y coeficiente de almacenamiento, respectivamente). Para este caso, T_p se estima igual al tiempo de concentración adoptado para la cuenca y K , como primera aproximación igual a $0,88 T_c$ (recomendado en “Diseño Hidrológico”, Fernández y Fattorrelli, 2011).

Si bien existen diferentes fórmulas para la estimación del tiempo de concentración, una de las más recomendadas y utilizadas es la expresión de tiempos de traslado del SCS, donde el tiempo de concentración es la suma de tiempos de traslado sobre diferentes porciones características del recorrido del flujo en la cuenca:

$$T_c = T_{sheet} + T_{shallow} + T_{channel} \quad (9.1)$$

Dónde, T_{sheet} es el tiempo de traslado sobre tramo de flujo en lámina:

$$T_{sheet} = \frac{0,007 (N L)^{0,8}}{P_2^{0,8} S^{0,4}} \quad (9.2)$$

Siendo, L es la longitud de escurrimiento (pies), P_2 es la precipitación de 2 años de recurrencia (pulgadas) y 24 hs de duración, S es la pendiente (adimensional), y N es la rugosidad (adimensional).

Los tiempos de traslado sobre segmentos de cauce de bajo tirante ($T_{shallow}$) se obtienen de:

$$T_{shallow} = \frac{L}{V} \quad (9.3)$$

Dónde, L es la longitud de escurrimiento, V es la velocidad promedio para superficies no pavimentadas:

$$V = 16,1345 S^{0,5} \quad (9.4)$$

Finalmente, el tiempo de traslado sobre segmentos de cauce o canales $T_{channel}$ se obtiene por la siguiente expresión:

$$T_{channel} = \frac{L}{U} \quad (9.5)$$

Dónde, L es la longitud de canal, U es la velocidad media basada en la ecuación de Manning.

- Flujo subterráneo: método de la constante de recesión

(e) Tránsito de hidrogramas

(i) En ríos:

Para el tránsito de ondas de crecidas en ríos, se utilizó el método de Muskingun – Cunge. Este método considera secciones transversales hipotéticas de 8 puntos, donde es posible asignar diferentes coeficientes de rugosidad al cauce principal y a sus márgenes. Se utilizaron valores de rugosidad “n” de Manning de 0,045 y 0,06 para cauce y valle de inundación respectivamente.

(ii) En embalses:

La simulación hidrológica de los lagos Rico y Argentino se realizó considerando las curvas cota - volumen y cota – caudal erogado que se presentaron en 5.2, 5.4.1 y 5.4.3, utilizando el modelo modificado de Puls, disponible en HEC-HMS, el cual básicamente resuelve la ecuación de continuidad $\Delta S/\Delta t = I_m - O_m$ con una aproximación en diferencias finitas, donde:

- I_m : caudal medio ingresante durante el intervalo de tiempo
- O_m : caudal medio saliente durante el intervalo de tiempo
- ΔS : variación del almacenamiento
- Δt : intervalo de tiempo

9.2.2. Delimitación de subcuencas de aporte y características físicas

La delimitación de las subcuencas posibilita la determinación de las características físicas principales de las mismas (área, longitud de escurrimiento, desnivel, etc.) y parámetros a ser posteriormente utilizados en la modelación hidrológica de cada subcuenca.

En la Figura 9.4 se muestra el trazado completo de la cuenca alta del río Santa Cruz (hasta Charles Fuhr), la cual fue dividida en 10 subcuencas de acuerdo a los puntos de interés. En esta subdivisión se ha tenido en cuenta tanto los sitios con mediciones hidrológicas, como las características físicas diferenciadas de las subcuencas.

Las características físicas relevantes de las subcuencas (para la simulación hidrológica) se presentan en la Tabla 9.1.

Para la delimitación de la cuenca y subcuencas se utilizó un Modelo Digital del Terreno obtenido en base a:

- Modelos digitales de elevaciones IGN - resolución espacial de 30 m x 30 m - precisión vertical de aproximadamente 2 m.
- Modelo digital de elevaciones del SRTM (para porciones de la cuenca que no cubre IGN)

A partir del trazado de perfiles de comparación se verificó la compatibilidad de ambos modelos. El mismo fue re proyectado a Gauss Kruger Faja 1 Posgar 2007, para su posterior utilización.

El planteo de la subdivisión de subcuencas considera tanto el objetivo del estudio como las características hidrológicas de la cuenca y la información disponible, de esta manera se plantea:

- un cierre de subcuenca en la estación La Leona, donde se tienen caudales observados correspondiente a la subcuenca del lago Viedma;
- un cierre en la salida del lago Rico, sitio de formación del bloqueo de hielo del glaciar Perito Moreno, y una salida adicional del lago Rico por desbordes del mismo hacia lago Argentino;
- consideración diferenciada del área de glaciares;
- cierre de subcuencas en sitios con observaciones (Centinela, Mitre y río de las Vueltas);
- cierres en los brazos principales de aportes a lago Argentino (Norte y Sur);
- cierre final de la cuenca analizada en la estación Charles Fuhr sobre el río Santa Cruz.

Se determinaron características físicas de las subcuencas de aportes, necesarias para la modelación hidrológica: área, longitud de escurrimiento, desnivel, pendientes, etc. Dichos parámetros se presentan en la Tabla 9.1, y pueden ser asociados a parámetros utilizados en modelos hidrológicos.

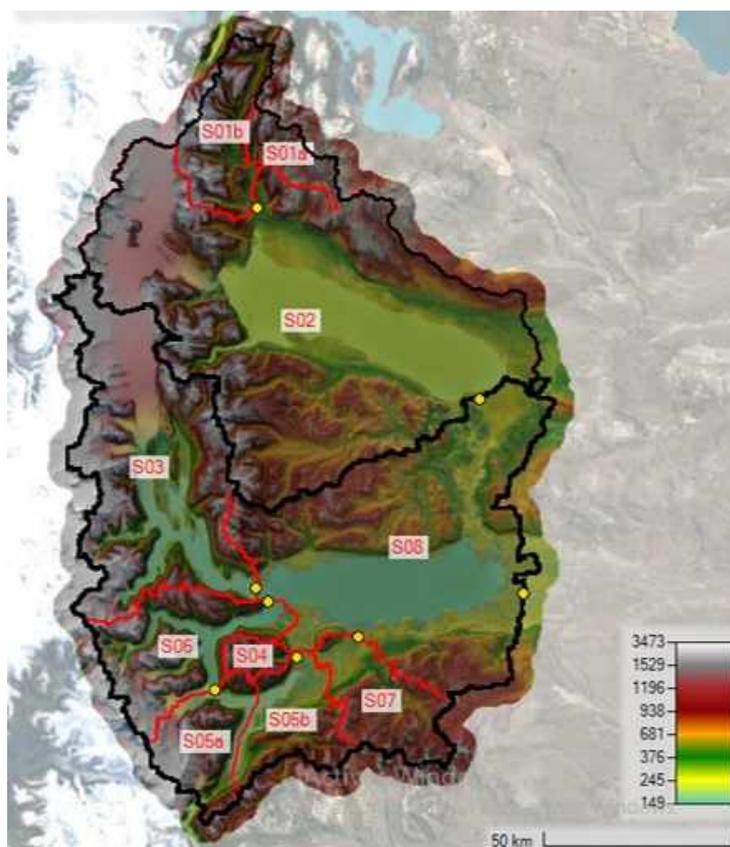


Figura 9.4: Delimitación de las subcuencas de aporte.

	ID Subcuencas	Area [Km ²]	Longitud máx. escurrimiento [Km]	Cota máxima [msnm]	Cota mínima [msnm]	Cota media [msnm]	Desnivel [m]	δ [%]	$\bar{\beta}$ [%]
3 - BRN	S-03	2.664,5	134,1	2.157	179	1.036	1.978	29	1,47
4 - MITR	S-04	139,6	25,0	1.458	209	983	1.249	42	5,00
5 - LRI	S-05	1.274,7	63,3	1.461	252	809	1.209	28	1,91
6 - BRS	S-06	1.078,6	67,5	2.781	179	884	2.602	41	3,86
7 - CENT	S-07	706,2	60,8	2.022	187	844	1.835	23	3,02
8 - LA	S-08	3.891,6	108,7	1.509	179	489	1.330	13	1,22

δ : pendiente de cuenca

$\bar{\beta}$: pendiente media de cauce principal

Tabla 9.1: Parámetros físicos de las subcuencas de aporte al lago Argentino.

A su vez, algunas subcuencas fueron subdivididas a efectos de considerar de mejor manera homogeneidad hidrológica dentro de las mismas (por ejemplo, la cuenca 5 fue subdivida en 5a y 5b al oeste y este del lago Rico).

Para cada subcuenca se obtuvieron curvas hipsométricas, siendo utilizadas fundamentalmente para definir el área de cuenca (o su %) por encima de determinada cota, parámetro de relevancia en la simulación de la acumulación y derretimiento de nieve. Un ejemplo de curva hipsométrica y frecuencia de altitudes se presenta en la Figura 9.5.

Las áreas de glaciares fueron consideradas de manera independiente, a efectos de poder contemplar en las simulaciones parámetros diferenciados en cuanto a la ablación y derretimiento. Se consideró agrupada un área de glaciares para el brazo Sur y un área para el brazo Norte; las

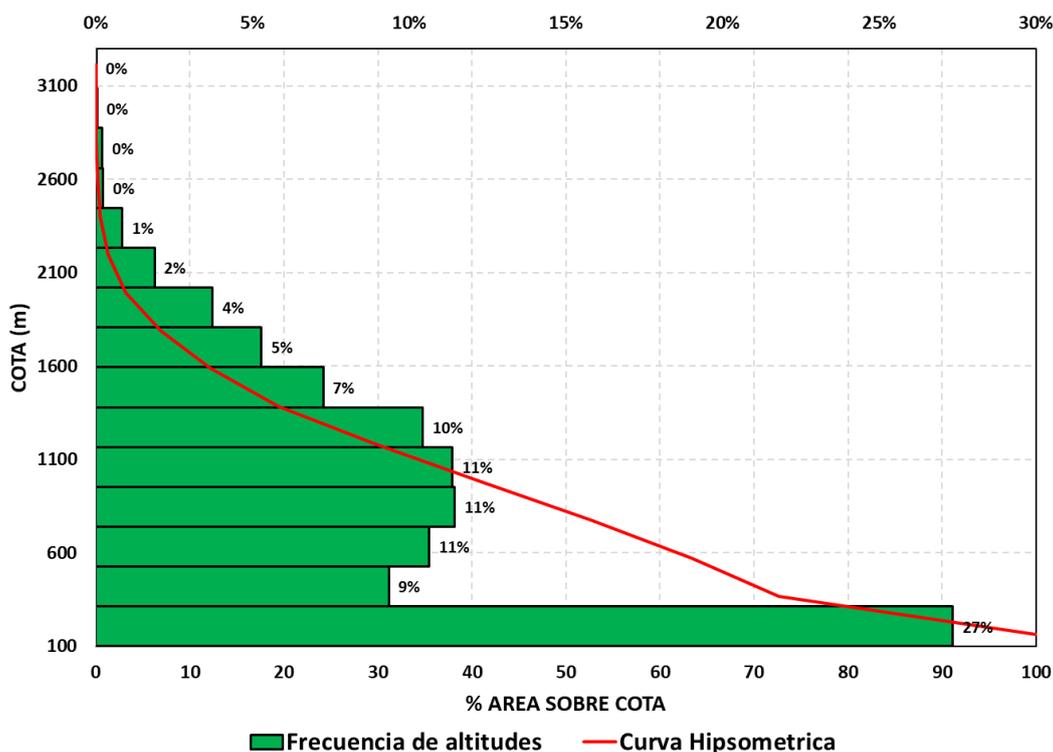


Figura 9.5: Curva hipsométrica frecuencia de alturas (cotas) S06.

áreas de glaciares y curvas hipsométricas de los mismos se obtuvieron del Inventario Nacional de Glaciares, IANIGLA (2018).

En relación a la consideración de cobertura del suelo, se utilizó una estimación inicial a partir de la clasificación mundial de la cubierta terrestre en base a datos del año 2000, desarrollado por Global Vegetation Monitoring (GVM) del Joint Research Centre (JRC), así como también información de imágenes satelitales de libre disponibilidad.

Existe una marcada diferenciación de la cobertura en función de la longitud y altura. Al este, la mayor parte del suelo sólo presenta vegetación arbustiva desértica con amplios sectores con suelos desnudos, incrementándose la vegetación hacia el oeste, de manera notable luego del meridiano de longitud $72^{\circ} 45'$, la cual se ve limitada en altura de acuerdo a los sectores con habitual presencia de nieve o hielo.

Asimismo, se determinó en cada subcuenca el área ocupada por lagos, siendo nulas las mismas en la subcuenca Mitre a un máximo de 22% en la cuenca 8 LA; en promedio en el área modelada de 9.755 Km² (sin considerar el área de aportes a La Leona) se tiene un 16% de la misma cubierta por cuerpos de agua.

Otra información de interés se obtuvo del Mapa de Suelos de la República Argentina en escala 1:500.000, elaborado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), donde indica tipos de suelos (textura) presentes en la cuenca de estudio (en particular en la zona centro y este de la cuenca).

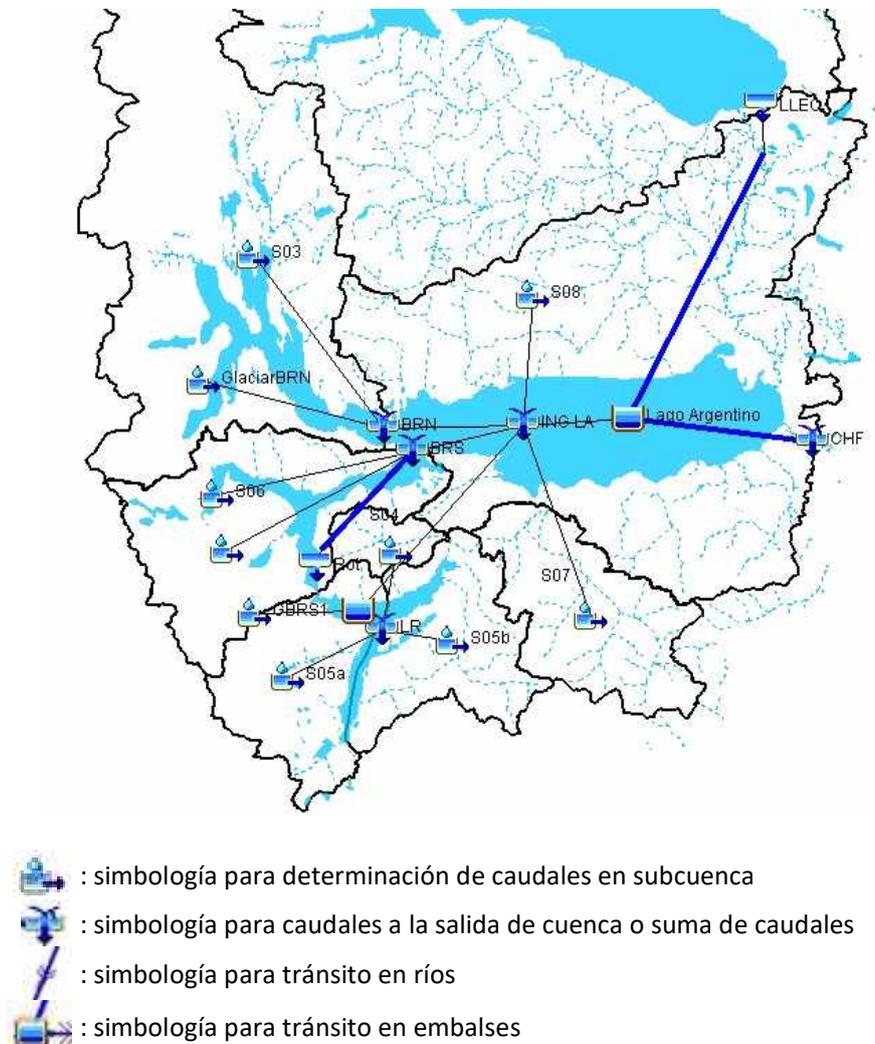
9.2.3. Implementación del modelo hidrológico

(a) Esquemización

La modelación requiere la interpretación del sistema físico a simular, para lo cual se requiere una representación de su geometría a través de la configuración topológica del sistema.

La Figura 9.6 presenta el esquema del modelo hidrológico de simulación de la cuenca del lago Argentino. Se observa que el modelo ha sido dividido en subcuencas, con tramos de propagación de caudales en ríos y en lagos (Argentino y Rico) y sumas de hidrogramas, con sección de salida en CHF.

El sitio correspondiente a la estación La Leona es considerado un ingreso al sistema simulado, considerando en el mismo caudales observados o determinados estadísticamente según corresponda.



(b) Datos hidrometeorológicos e hidrológicos de entrada

El modelo utiliza como datos de entrada valores de precipitación diaria, temperaturas diarias y valores de evapotranspiración potencial mensual.

(i) Precipitación

Se utilizaron las estaciones de precipitación disponibles con paso de tiempo diario, participando por su ubicación respecto a la cuenca y longitud de observaciones las estaciones de El Calafate (SMN), Calafate (SIPH), Parque Nacional Los Glaciares (SIPH), La Leona (SIPH), Lago Dickson (DGA), Lago Paine (DGA) y Cerro Guido (DGA). En cada subcuenca se determinó una estación de precipitación representativa en su base ponderando las estaciones de mayor proximidad y representatividad. Para obtener un gradiente pluviométrico en función de la altitud, se utilizó inicialmente la información antecedente indicada en 6.1.5 y publicaciones científicas (Schwikowski et al., 2013).

(ii) Temperatura

Se utilizaron las estaciones de temperatura de El Calafate Aero (SMN) y datos obtenidos de la EMGPM. Al modelo se le ingresó información a paso de tiempo diario. En cada cuenca se obtuvo una temperatura en la base de la misma, en función de la cota base y se aplicó un gradiente de temperatura para obtener valores medios en cada banda de elevación que se considera en cada subcuenca, ajustada en el proceso de calibración.

(iii) Caudales La Leona

El sitio correspondiente a la estación La Leona representa un ingreso al sistema simulado, considerando en el mismo caudales observados o determinados estadísticamente según corresponda.

(iv) Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial (*ETP*) es una variable de entrada para el modelo de simulación. Para determinar la misma se consideró en primera instancia la evaporación de superficie de agua libre como un estimador de la *ETP*, realizándose luego una estimación en cada una de las subcuencas definidas, ajustando la misma en función de la altura media de cada una. La Figura 9.7 presenta las *ETP* por subcuencas utilizadas. Esta variable se ingresa a nivel mensual en el modelo utilizado.

La *ETP* varía de 360 – 390 mm en las cuencas S03 y S04 (cordillera) a 706 mm en la cuenca S08. Se destaca que durante el invierno esta variable resulta prácticamente nula.

(c) Curvas cota – volumen y cota – caudal en embalses

Se utilizaron las ecuaciones indicadas en 5.2, 5.4.1 y 5.4.3.

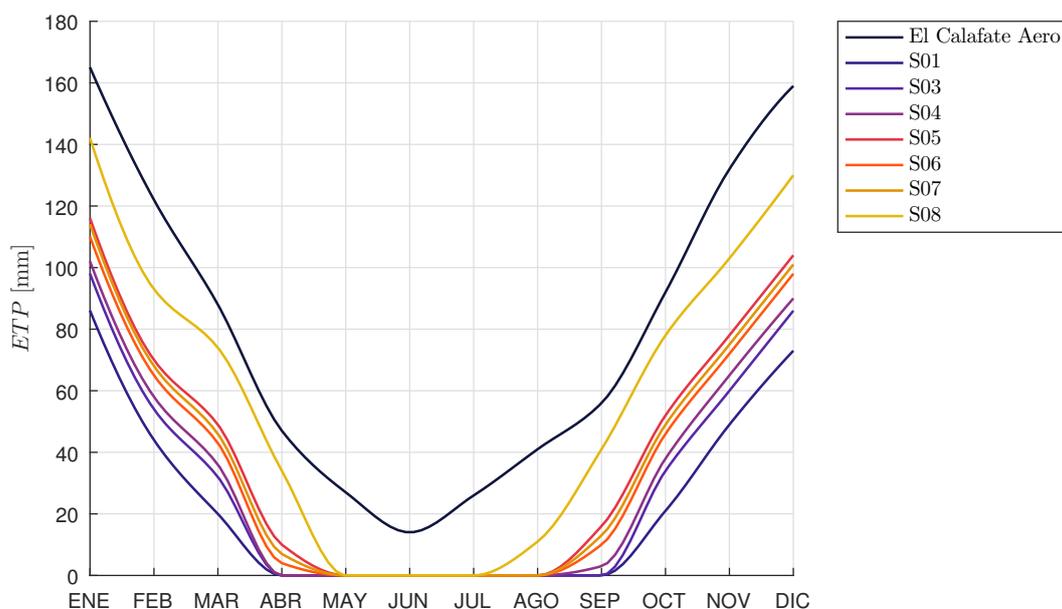


Figura 9.7: Evapotranspiración potencial por subcuencas.

9.2.4. Calibración y verificación del modelo

(a) General

Los eventos utilizados para calibrar el modelo fueron los de 2017/18 y 2015/16. El procedimiento de calibración se realizó a partir de la consideración de parámetros iniciales para todas las variables, ajuste inicial por prueba y error, y calibración automática utilizando los procedimientos disponibles en el modelo HEC-HMS.

A partir de los datos de precipitación, temperatura y ETP ponderados para cada subcuenca, se realizaron sucesivas simulaciones del modelo, ajustando sus parámetros en forma manual y/o automática, de manera de alcanzar los siguientes objetivos:

- diferencias en volúmenes observados: <10 %,
- diferencias en caudales máximos: <10 %

El procedimiento de calibración consistió en lograr en primera medida un ajuste en los volúmenes de escurrimiento (a través básicamente de los parámetros que componen la rutina SMA y del modelo de derretimiento de nieve) para luego proceder al ajuste de la forma del hidrograma, tanto mediante parámetros del derretimiento de nieve y hielo, como de los parámetros K y T_p de Clark de los hidrogramas generados (de menor importancia).

La simulación se inició varios meses antes del pico de la crecida, al inicio del período de acumulación de nieve, y de manera tal que las condiciones iniciales adoptadas en los almacenamientos no interfieran en los resultados. Como condición inicial en los respectivos almacenamientos o depósitos que utiliza el modelo, se adoptó un 50 % de la capacidad total.

Se realizaron en primera medida ajustes de parámetros en subcuencas individuales con alguna información hidrológica (cuencas Mitre, Centinela, e incluso para los aportes al lago Rico en períodos donde el GPM produce el cierre del mismo), para luego trasladar parámetros al resto de las subcuencas vecinas (en forma directa o proporcional según el caso), realizándose un nuevo ajuste integral con la información de caudales en la estación CHF, a la salida de la cuenca. Para la estimación del flujo base se supuso una curva de recesión o agotamiento del almacenamiento base.

(b) Comportamiento del derretimiento de nieve

De suma utilidad resultaron en este caso las mediciones realizadas por IANIGLA indicadas en 2.4.6 relativa tanto a la acumulación de nieve, evolución de temperaturas y otras variables meteorológicas, así como la visualización de secuencias de imágenes satelitales.

La Figura 9.8 presenta resultados del modelo para una simulación continua desde 2014 a 2018. La imagen superior representa las precipitaciones utilizadas y la inferior las temperaturas inferidas en la banda de altura utilizada en este ejemplo.

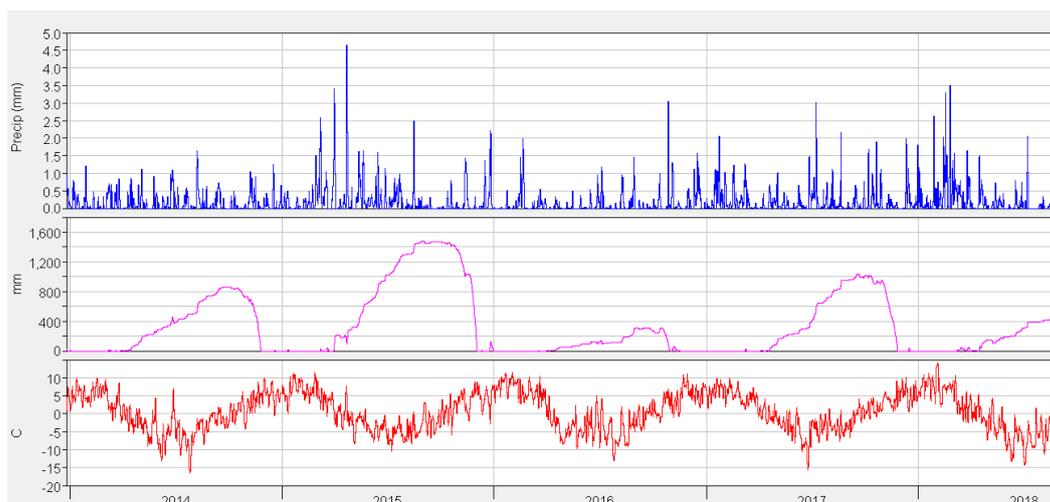


Figura 9.8: Ejemplo de comportamiento de acumulación y comportamiento de nieve – S03 b1200 m.

Se verificó que el modelo represente adecuadamente el ciclo de evolución de nieve, con inicio de acumulaciones en el mes de mayo, máximos acumulados en agosto - setiembre y finalización del derretimiento en noviembre, para bandas de alturas ubicadas en el orden de 1.200 m en esta subcuenca.

La Figura 9.9 presenta el comportamiento del equivalente de agua en nieve simulado para diferentes bandas de altitud en la subcuenca S03 (excluyendo glaciares), en el año 2017-18. La banda inferior (340 m) no presenta acumulaciones relevantes y/o que perduren demasiado tiempo, y en la medida que la banda se ubica a mayor elevación las acumulaciones son mayores y el derretimiento se prolonga en el tiempo. En la banda 2 (800 m) el derretimiento total ocurre en octubre, en la banda 3 (1.200 m) llega a principios de diciembre, en la banda 4 (1.580 m) finaliza a mediados de enero, mientras en la banda superior considerada en la Figura 9.9 (1.900 m) las

acumulaciones disminuyen en el verano, pero permanece nieve durante todo el año. Notar que estas apreciaciones representan un promedio en la cuenca y no un punto particular.



Figura 9.9: Comportamiento acumulación y derretimiento de nieve diferentes bandas de altura.

(c) Evento 2017-2018

En este evento, inicialmente, el lago Rico no realiza aportes a lago Argentino por encontrarse obstruida su salida por el glaciar Perito Moreno. Por lo tanto se consideraron como caudales ingresantes al modelo, valores de 0 m³/s hasta que se produce la rotura y luego los caudales estimados para el desembalse rápido en función del hidrograma deducido de las observaciones (ver Figura 5.22).

La Figura 9.10 muestra la comparación de caudales simulados y observados en CHF. La diferencia en caudal máximo es menor a +5 % mientras que en volúmenes escurridos (considerando desde el 01/01 al 30/04) es menor a -5 %, notando que esta diferencia es mayor en la rama de descenso del hidrograma. Teniendo en cuenta las limitaciones en la información de base para calibrar el modelo, los resultados se consideran apropiados.

En la Figura 9.11 se presenta además el hidrograma descontando el hidrograma de rotura producido en el GPM.

(d) Evento 2016

Se realizó una nueva calibración para un evento de menor magnitud, pero cuyo caudal máximo en CHF surge como consecuencia de un fenómeno de desembalse rápido del GPM (o rotura). En este caso se utilizan los mismos parámetros físicos que en el caso anterior, variando ligeramente parámetros del modelo de derretimiento.

La Figura 9.12 muestra la comparación de caudales simulados y observados en CHF. La diferencia en caudal máximo es de solo +1 % mientras que en volúmenes escurridos (considerando

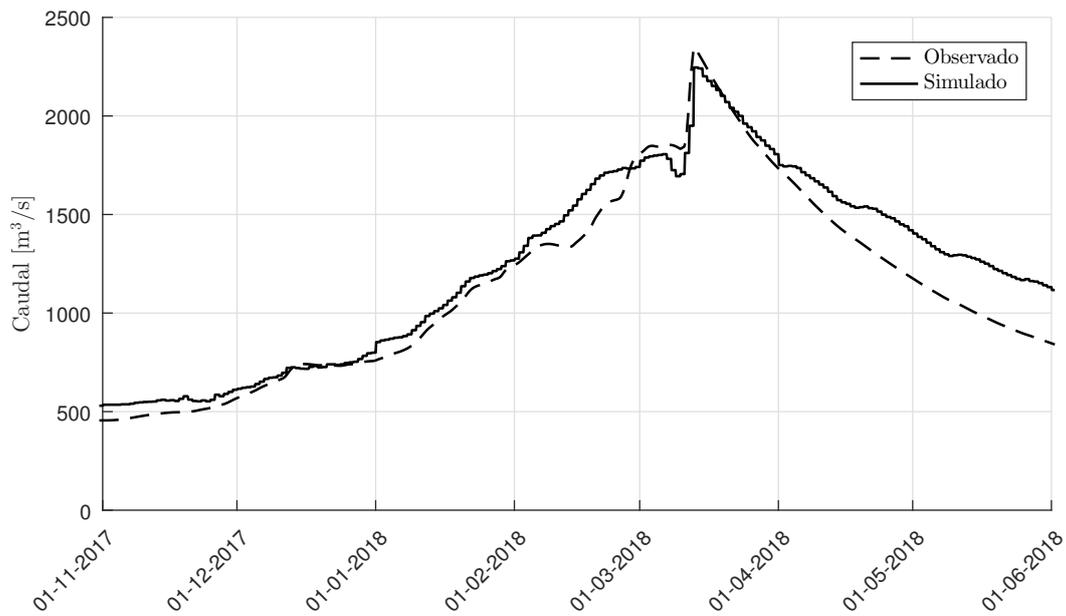


Figura 9.10: Caudales observados y simulados en CHF evento 2017/18.

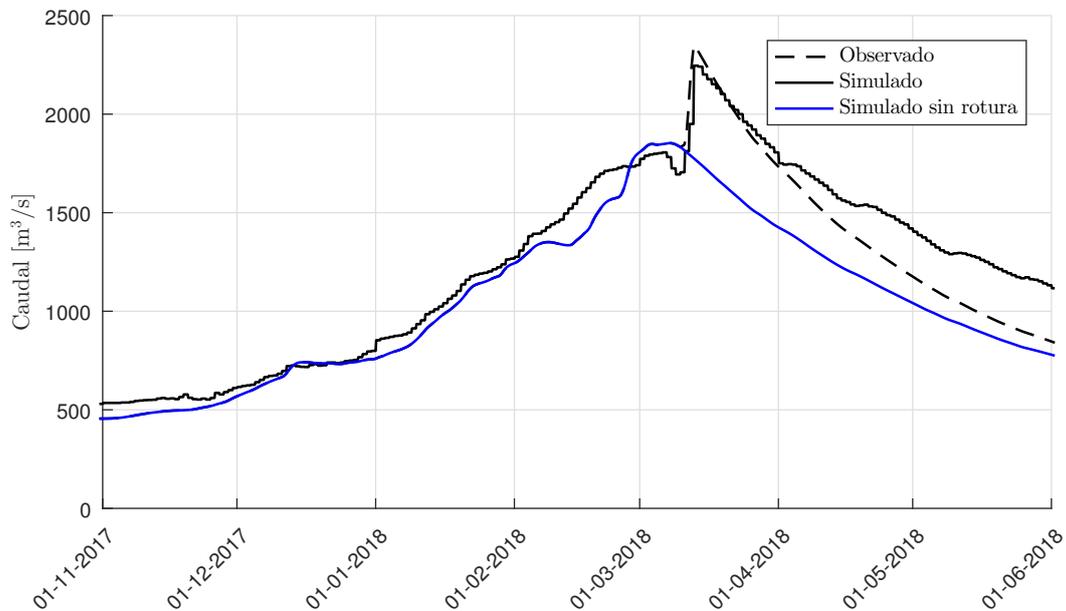


Figura 9.11: Caudales observados y simulados en CHF (con y sin consideración evento rotura 2018).

desde el 01/01 al 30/04) la diferencia porcentual es baja (menor al -1 %), notando la generación de mayor volumen de escurrimiento en la rama ascendente respecto a la descendente.

(e) Verificación

Se realizó una simulación para el evento del año 2008, utilizando iguales parámetros físicos de cuenca que en los casos anteriores y parámetros de derretimiento intermedios entre las simulaciones previas. Este evento presenta la particularidad de encontrarse el GPM cerrando los aportes del lago Rico desde julio 2007 hasta julio 2008, transcurriendo el verano y otoño de 2008 con el GPM bloqueando dichos aportes. La rotura de julio 2008 resultó irrelevante en términos de

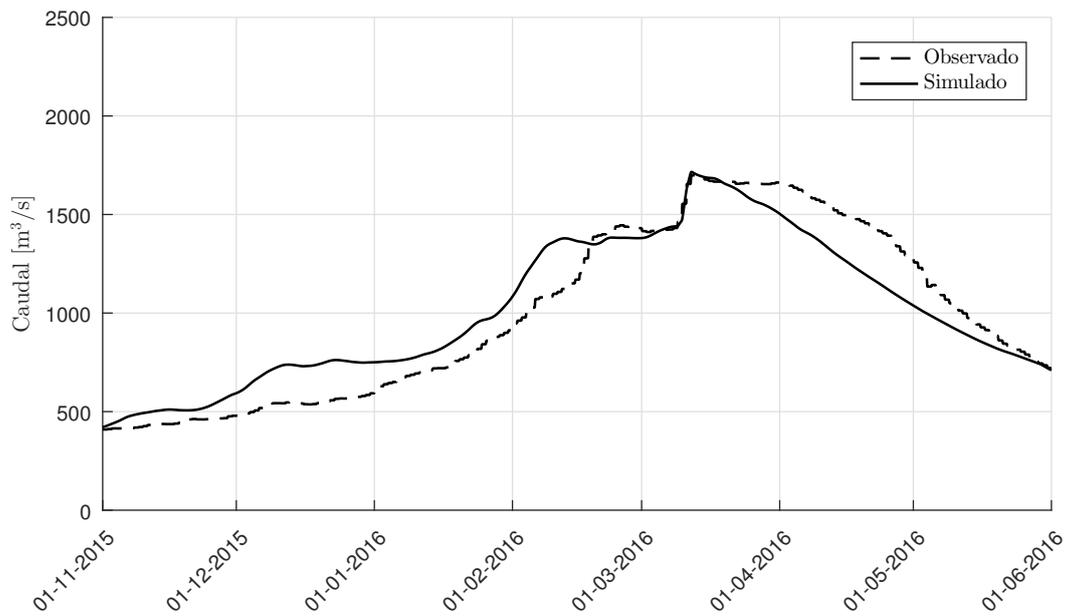


Figura 9.12: Caudales observados y simulados en CHF evento 2015/16.

crecidas del río Santa Cruz en CHF.

La Figura 9.13 muestra la comparación de caudales simulados y observados en CHF. La diferencia en caudal máximo es de solo -1 % mientras que en volúmenes escurridos (considerando desde el 01/01 al 30/04) la diferencia porcentual es del +4 %.

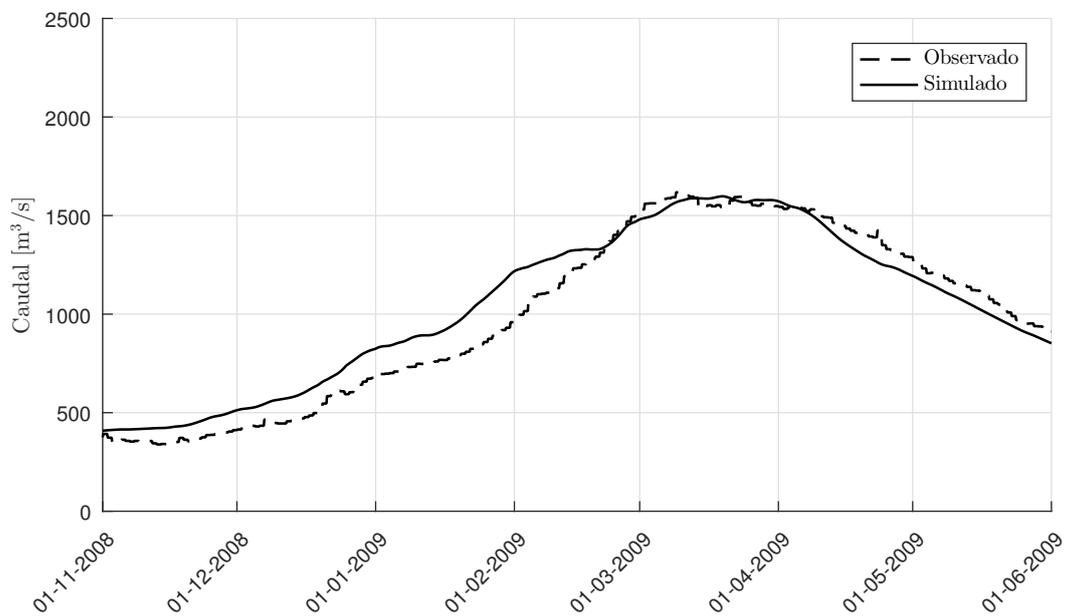


Figura 9.13: Caudales observados y simulados en CHF – primavera – otoño 2008.

En función de la complejidad natural de la cuenca y de la información disponible, se considera que se obtuvieron resultados de calibración del modelo razonables, a los efectos de utilizar el mismo para generar crecidas de diseño del río Santa Cruz.

9.2.5. Explotación – Crecida Máxima Probable

(a) Introducción

En este escenario se considera el concepto de Crecida Máxima Probable (CMP) definida como aquella crecida que se puede esperar en relación con la más severa combinación de condiciones meteorológicas e hidrológicas, razonablemente posibles de acuerdo a las condiciones físicas de la región.

Las crecidas consideradas utilizan:

- maximización de caudales en el río La Leona;
- maximización de temperaturas (2 Variantes);
- maximización de precipitaciones;
- rotura máxima del GPM (desembalses rápidos del lago Rico);
- desbordes del lago Rico hacia lago Argentino previo a la rotura (acordes a la simulación del lago Rico);
- combinaciones.

El evento de crecida 2017/18 fue seleccionado para maximizar aportes, simulando el período 01/May/2017 a 30/Jul/2018, manteniendo la secuencia de las precipitaciones y temperaturas diarias observadas, modificando las mismas en el período del año que se maximizan. Se adoptó este evento por ser uno de los que presenta mayor caudal y volumen escurrido en la serie histórica y por contarse con mayor cantidad de información relevada en su desarrollo. Asimismo, se simula el funcionamiento del lago Rico, considerando dos posibles salidas hacia lago Argentino, debidos a:

- desembalses rápidos o roturas del GPM utilizando el hidrograma de rotura máxima, determinado en base a los niveles máximos a los que llega lago Rico, y el desnivel con lago Argentino;
- desbordes del lago Rico hacia lago Argentino, producto de la simulación del lago Rico en los diferentes escenarios simulados.

Las simulaciones se realizaron en pasos sucesivos, incorporando individualmente las maximizaciones de los diferentes componentes, de manera de analizar su peso relativo en el hidrograma de Charles Fuhr.

(b) Incorporación de hidrograma maximizado en LLEO

Como ingresos desde el río La Leona hacia lago Argentino, se utiliza el hidrograma estadístico indicado en 7.3.3, para 10.000 años de recurrencia, el cual presenta un caudal máximo de 1.350 m³/s.

Este hidrograma se ubica temporalmente de manera tal que provoque (junto con aportes de precipitaciones y derretimiento), los niveles máximos de lago Argentino, previo a la ocurrencia de la rotura.

En primer lugar, se realizó una simulación sin considerar el hidrograma de rotura, para permitir un mejor análisis del peso relativo de cada uno de los componentes que se incorporan a lago Argentino. La Figura 9.14 presenta resultados de la simulación de caudales en CHF, sustrayendo el hidrograma de rotura del GPM, manteniendo precipitaciones y temperaturas como las observadas en 2017/18 e incorporando el hidrograma maximizado del río La Leona ($LLEO_{10000}$). La incorporación de este hidrograma maximizado genera un incremento de caudal máximo de unos 320 m³/s en CHF, respecto a la simulación de 2017/18 sin rotura, y un incremento en volumen (enero-abril) del 17%.

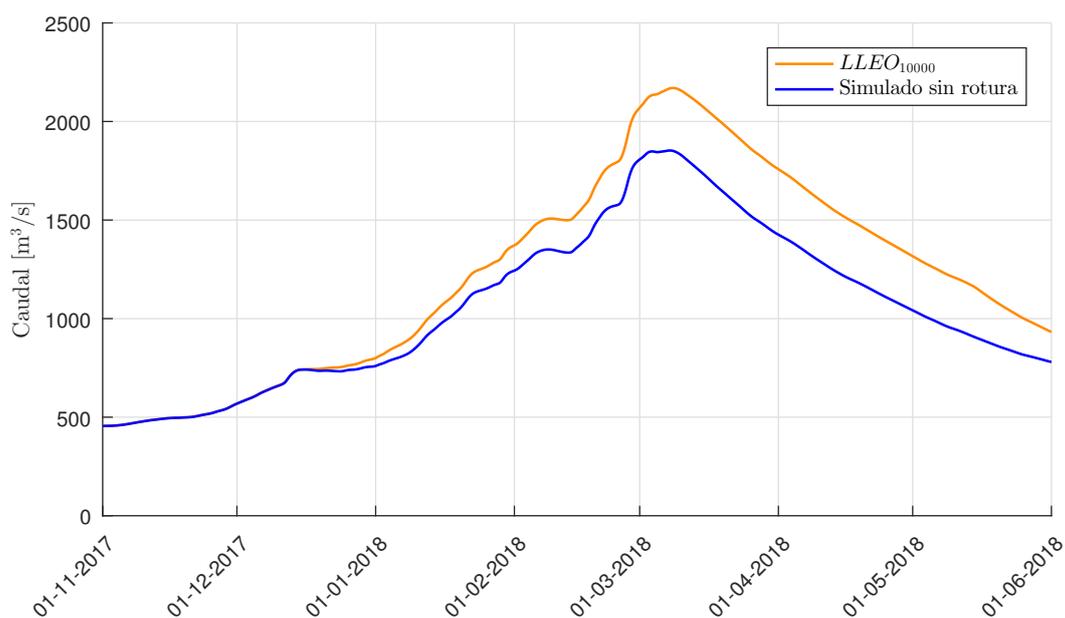


Figura 9.14: Caudales simulados en CHF. Evento maximizado 10.000 años río La Leona (sin rotura).

(c) Incorporación de temperaturas maximizadas

Se seleccionaron 2 variantes para maximizar temperaturas que afecten el derretimiento de nieve.

- Escenario 1: en este caso se incrementan las temperaturas en el período enero - abril, asumiendo que en dicho período se tendrían temperaturas de 10.000 años de recurrencia,
- Escenario 2: se disminuyen las temperaturas en el período de mayor acumulación nival

(mayo – agosto) y se incrementan las mismas en el período enero a abril, con igual consideración que el Escenario 1.

La segunda alternativa busca generar mayor acumulación de nieve en el período principal de acumulación, que estaría disponible para su posterior derretimiento.

Las Figura 9.15 (Escenario 1) y Figura 9.16 (Escenario 2) presentan las temperaturas incorporadas al modelo de simulación y su comparación con las observadas en el evento 2017/18 y con las temperaturas para diferentes recurrencias.

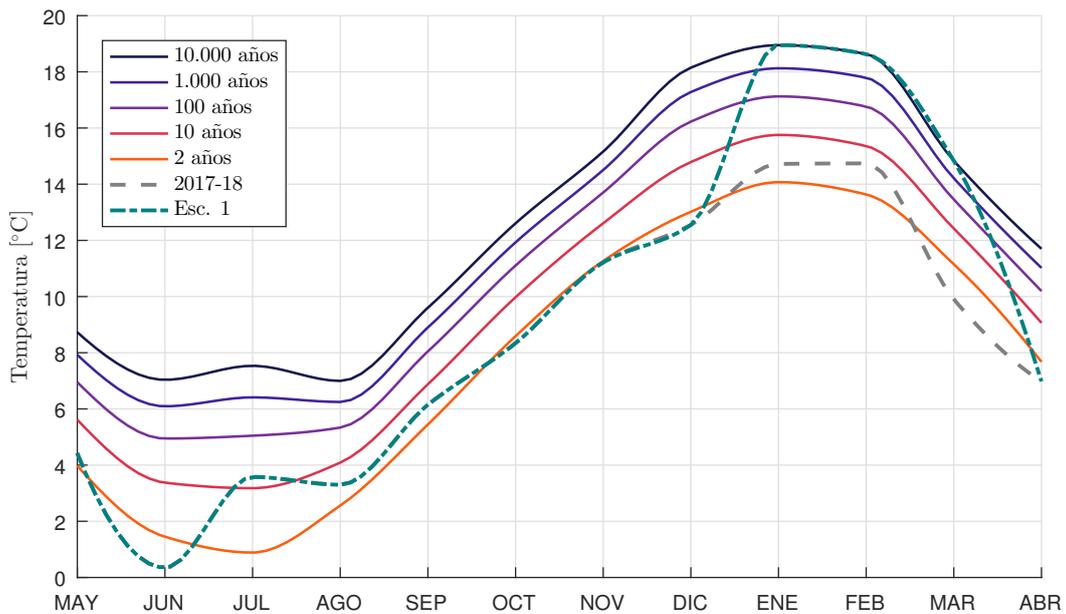


Figura 9.15: Temperaturas mensuales maximizadas – recurrencias. Escenario 1.

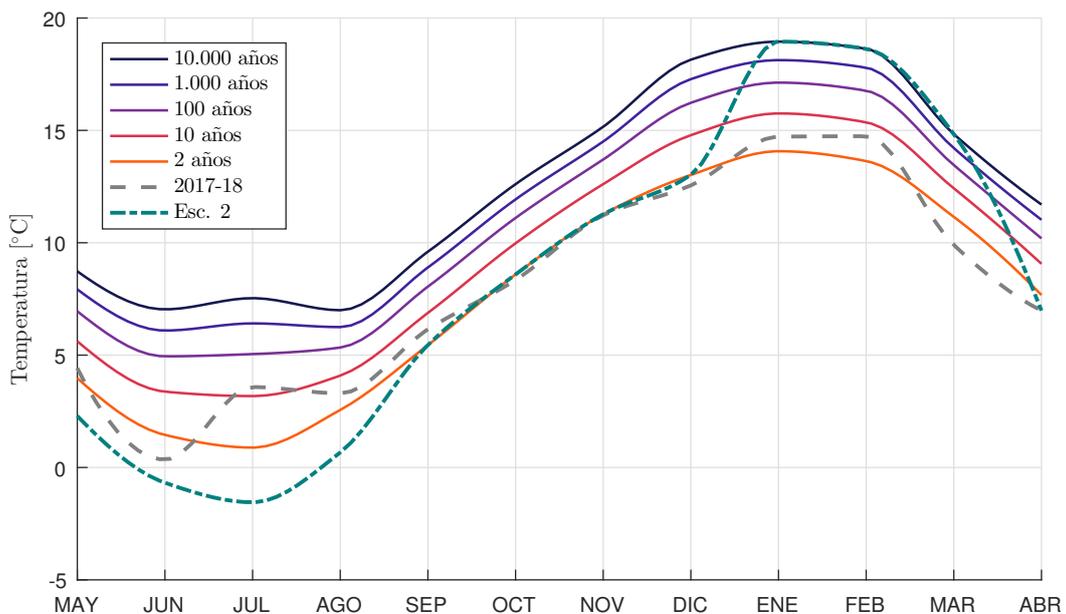


Figura 9.16: Temperaturas mensuales maximizadas – recurrencias. Escenario 2.

Esta segunda variante no introdujo modificación significativa en el caudal máximo final resultante. La Figura 9.17 muestra los resultados de la simulación de caudales en CHF, sustrayendo el

hidrograma de rotura del GPM, manteniendo precipitaciones y caudales desde el río La Leona tal como las observadas en 2017/18, y considerando las temperaturas maximizadas del Escenario 1 (T_{10000})

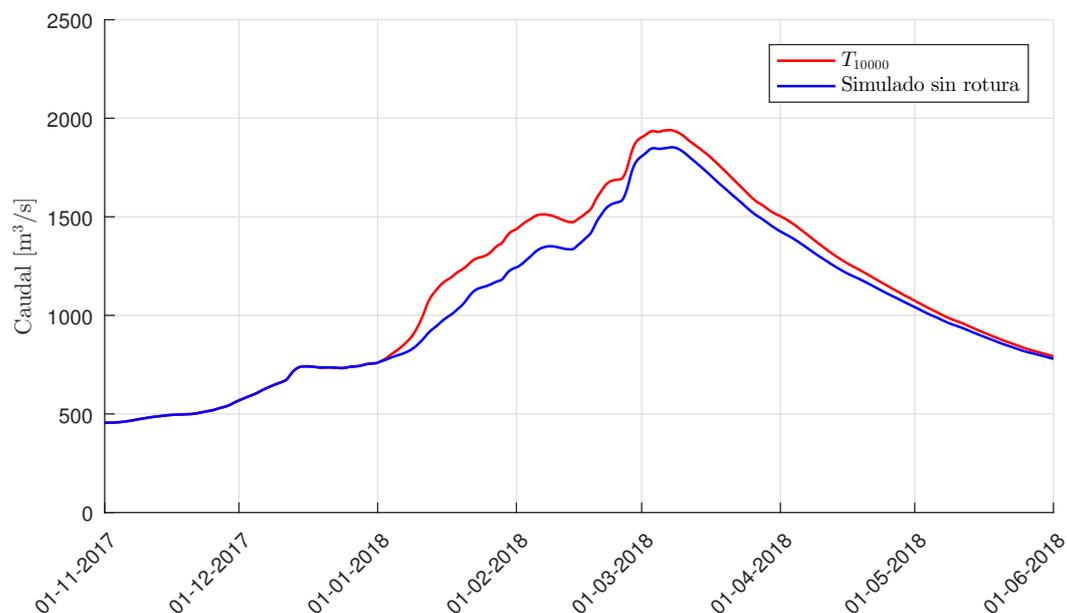


Figura 9.17: Caudales en CHF. Influencia de temperaturas maximizadas Escenario 1 en cuenca del lago Argentino.

En este caso el caudal máximo en CHF se incrementa 90 m³/s producto del mayor derretimiento de nieve en la cuenca respecto a la simulación de 2017/18 sin rotura, y se tiene un incremento en volumen (enero-abril) del 8%.

(d) Maximización precipitaciones

Teniendo en cuenta las características geomorfológicas de la cuenca, con la importante regulación impuesta por los lagos en la generación de caudales salientes de la misma, se observa que tormentas con duraciones de 1 a 5 días inclusive tienen poco efecto relativo en los mismos, y que precipitaciones maximizadas en períodos de mayor longitud pueden presentar condiciones más críticas para la producción de caudales máximos.

En función de la información disponible para maximizar precipitaciones se privilegió una metodología para obtener las mismas a través de análisis probabilístico mediante la obtención de precipitaciones máximas en el período enero – abril, las cuales se presentaron en el punto 6.1.7. Los valores diarios de precipitación observados fueron incrementados proporcionalmente de manera de cumplir con los valores acumulados maximizados para el período.

En la Figura 9.18 se observan los resultados de la simulación de caudales en CHF, sustrayendo el hidrograma de rotura del GPM, manteniendo temperaturas y caudales desde el río La Leona tal como las registradas en 2017/18, y considerando las precipitaciones maximizadas indicadas en Tabla 6.4 (P_{10000})

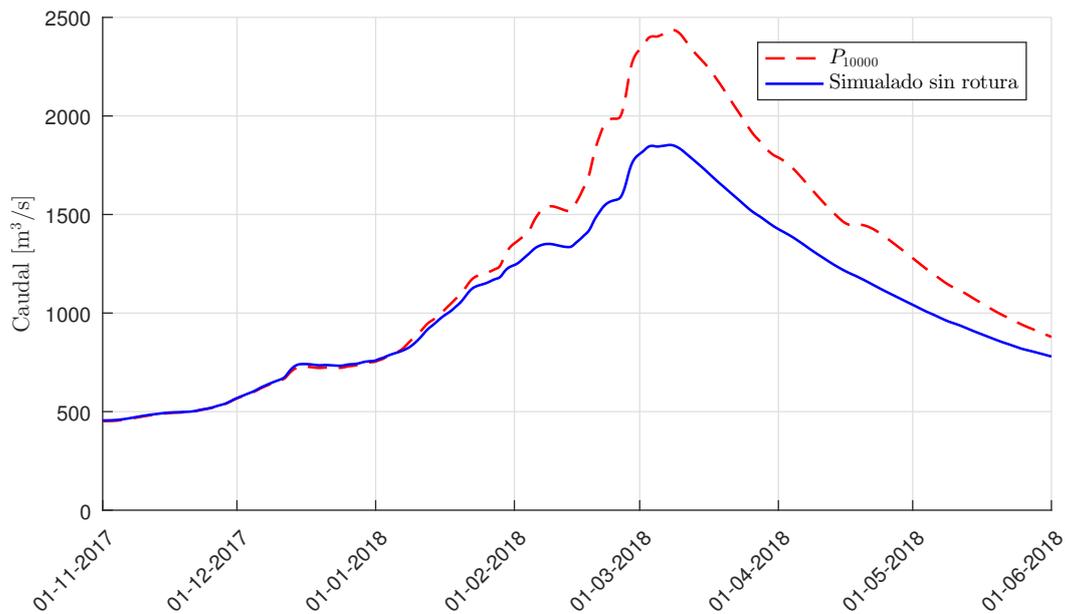


Figura 9.18: Caudales en CHF. Influencia de precipitaciones maximizadas en cuenca lago Argentino.

En este caso el caudal máximo en CHF se incrementa $580 \text{ m}^3/\text{s}$ respecto a la simulación de 2017/18 sin rotura, y se tiene un incremento en volumen (enero-abril) del 20%.

(e) Desbordes del lago Rico

En el punto 5.2 se presentó el límite físico que tiene el sistema denominado lago Rico a su capacidad de regulación, con posibilidad de desbordes hacia lago Argentino.

El evento de 2018 presentó una cota máxima de 191 mIGN en lago Rico, el 10 de marzo de ese año, luego de 8,3 meses de cierre del GPM. Si se considera que no se hubiese producido rotura en dicho momento, al 01/05 los niveles del lago Rico hubieran alcanzado un valor del orden de 193 mIGN. Para la condición de inicio de la simulación hidrológica que brinda las condiciones para la CMP, el 01/05, se adoptó una cota en lago Rico de 195 mIGN, ubicando los resultados en el lado de la seguridad. La Figura 9.19 presenta el hidrograma de caudales desbordantes resultantes de la simulación, suponiendo que no existe rotura del GPM ($Q_{desb.}$). Los caudales máximos alcanzan los $220 \text{ m}^3/\text{s}$.

(f) Hidrogramas de rotura del GPM

Para definir el hidrograma de roturas del GPM se requiere la cota máxima alcanzada en lago Rico, su desnivel (función de cotas de lago Argentino), así como definir la duración del desembalse. De acuerdo a lo presentado en 5.4.2 se adopta una duración de 3 días.

A partir de lo indicado en puntos previos, se realizaron simulaciones iniciales contemplando todos los ingresos a lago Argentino, sin considerar rotura del GPM, a efectos de obtener los niveles máximos en este lago.

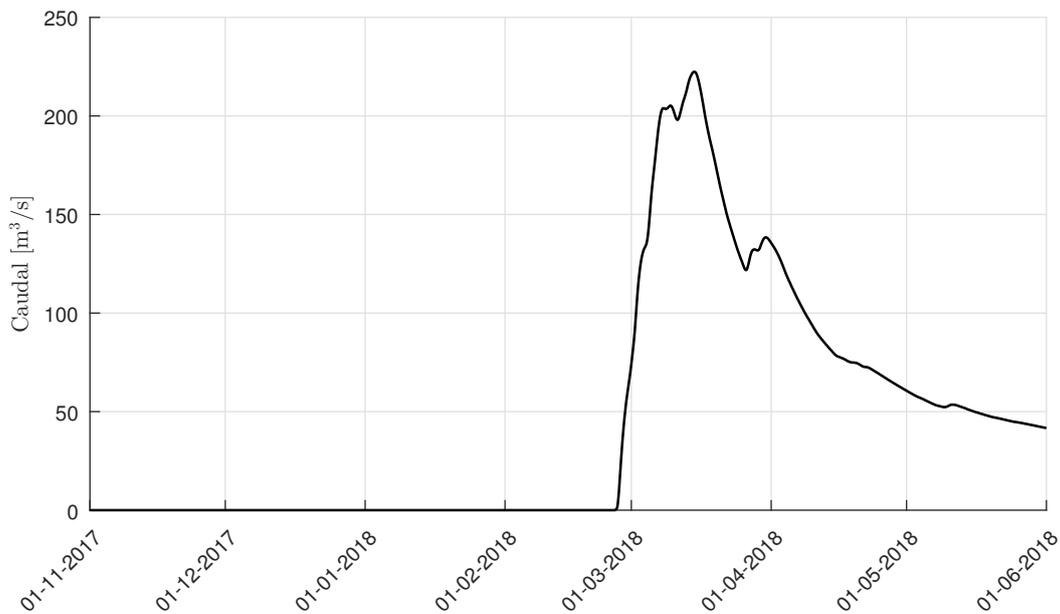


Figura 9.19: Hidrograma de desbordes del lago Rico (sin rotura GPM)

La Figura 9.20 presenta diferentes hidrogramas: el obtenido para la calibración del evento 2017/18 (sin rotura del GPM), el obtenido a partir de la incorporación de las maximizaciones de precipitaciones y temperaturas, el que surge de lo anterior más la incorporación de los caudales maximizados del río La Leona, y el hidrograma superior que incluye además los aportes provenientes de desbordes desde el lago Rico. A partir del caudal máximo en CHF se obtiene una cota de 182,5 mIGN en lago Argentino.

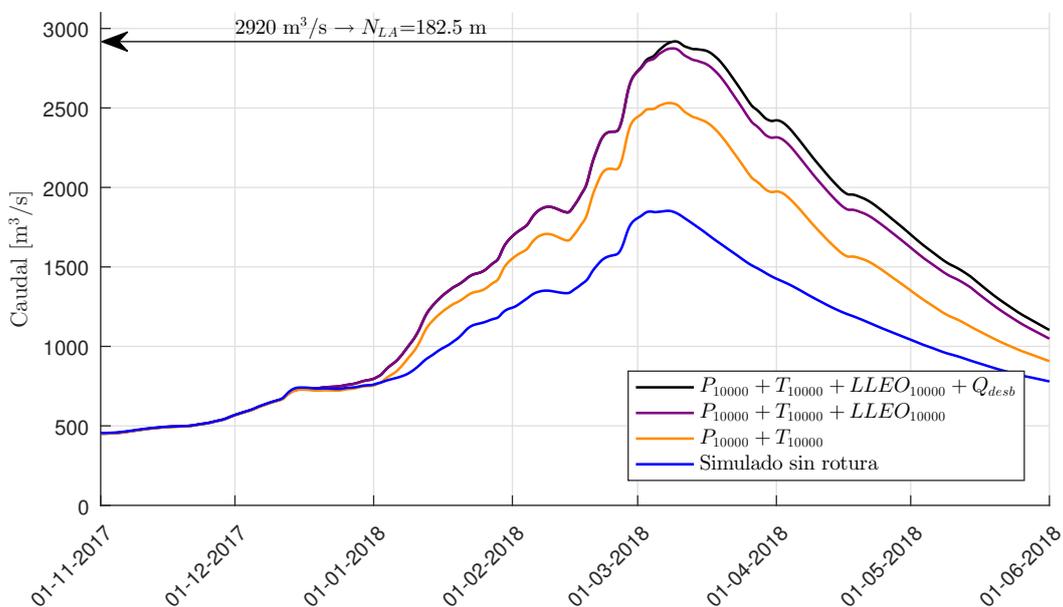


Figura 9.20: Hidrogramas en CHF sin rotura. Maximización de ingresos ($P_{10000} + T_{10000} + LLEO_{10000} + Q_{desb.}$). Desbordes en lago Rico a partir de 25/febrero.

Una vez conocidos los niveles máximos en lago Argentino, y su fecha, se determina el hidrograma de rotura de manera que el mismo se produzca con los máximos niveles en lago Argentino (situación de mayor criticidad para obtener caudales en CHF). Este hidrograma, que se presenta

en la Figura 9.21, es la resultante de considerar la cota de lago Rico igual a 209,5 mIGN, cota lago Argentino 182,5 mIGN, y una duración de 3 días del desembalse. El caudal máximo horario resulta de 29.190 m³/s.

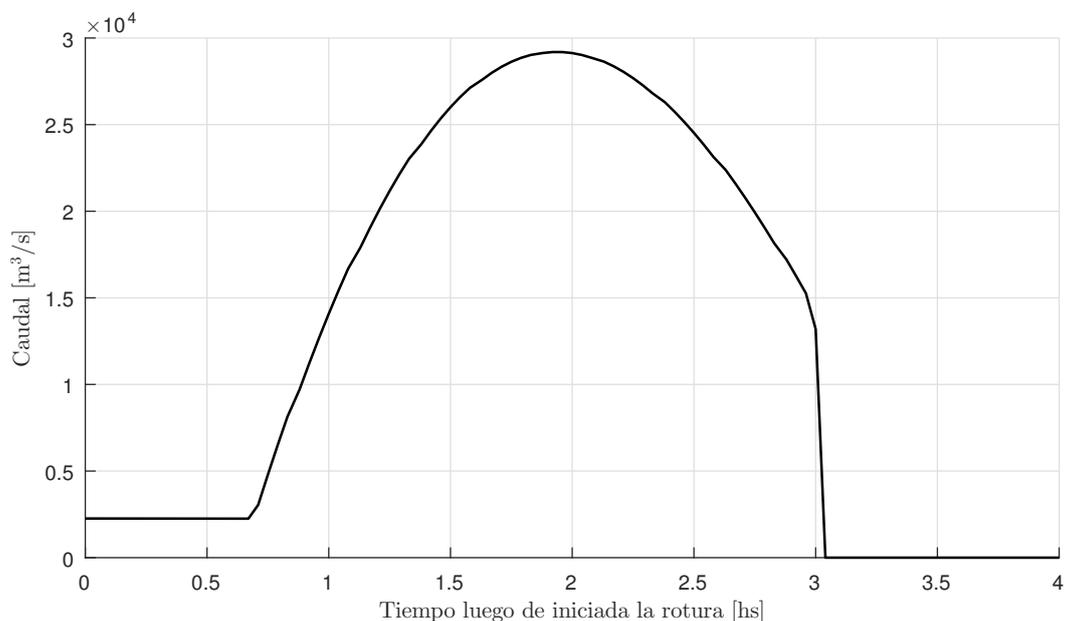


Figura 9.21: Hidrograma de rotura GPM. Escenario 2

(g) Combinación Crítica

El momento en el cual se produce la rotura del GPM se hace coincidir con el momento en el cual se tiene la cota máxima en lago Argentino, producto de las maximizaciones consideradas en todos sus aportes.

Para la combinación de:

- caudales en La Leona para 10.000 años de recurrencia ($LLEO_{10000}$);
- temperaturas y precipitaciones maximizadas para el cuatrimestre enero – abril ($P_{10000} + T_{10000}$);
- cota máxima en lago Rico ($N_{LR} = 209,5$ mIGN);
- desbordes del lago Rico hacia lago Argentino hasta la fecha de rotura (Q_{desb});
- rotura del GPM coincidente con el momento de niveles máximos en lago Argentino ($Q_{rot.max}$)

Se tiene como resultado el hidrograma mostrado en la Figura 9.22, donde se alcanza un caudal máximo en CHF de 5.060 m³/s

Claramente la superposición de los efectos, así como la coincidencia temporal de sus máximos valores aportantes a lago Argentino resultará de extrema baja probabilidad de ocurrencia, y pone a los resultados del lado de la seguridad.

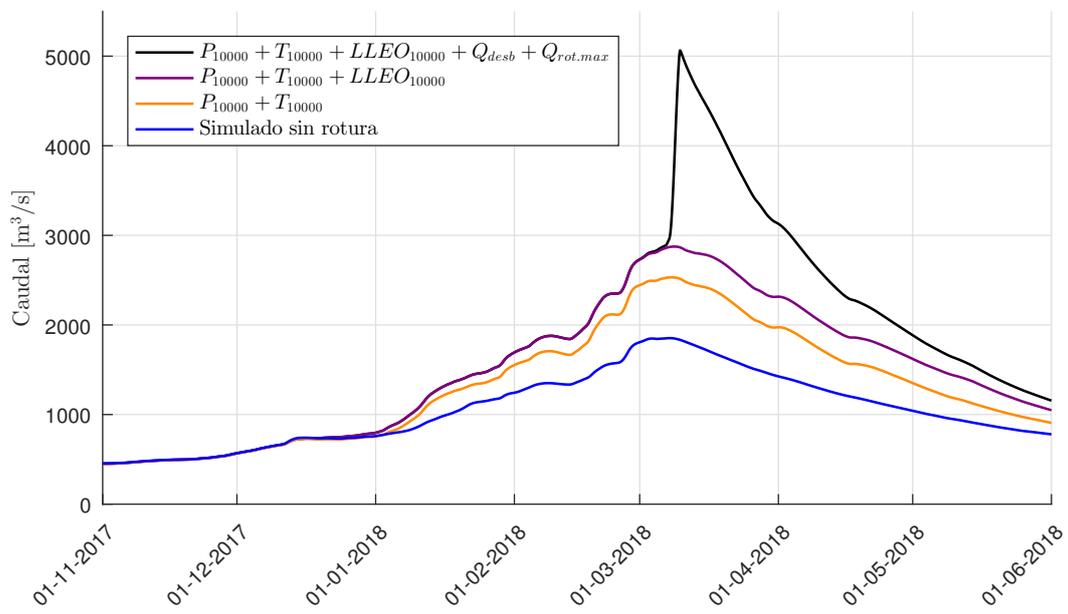


Figura 9.22: Crecida Escenario 2 ($P_{10000} + T_{10000} + LLEO_{10000} + Q_{desb} + Q_{rot.max}$)

Capítulo 10

ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS CRECIDAS DEL RÍO SANTA CRUZ

10.1. Cambio climático. Generalidades

Existe evidencia científica respecto a modificaciones del patrón de precipitaciones y temperaturas, así como de otras variables hidrometeorológicas, tanto a nivel global como en el país. Tales modificaciones tienen signo creciente, decreciente o neutro en función de la variable en estudio, región de análisis, así como del escenario futuro previsto del comportamiento de emisiones de gases y de los modelos climáticos utilizados.

Entre las causas del calentamiento global, Barros et al. (2005) dice “En el último siglo y medio, como consecuencia de la actividad humana hubo un aumento del 30 % de la concentración del CO₂, un 150 % del metano y un 16 % del óxido nitroso en la atmósfera. Por otra parte, en los últimos 150 años también hubo un aumento de 0,6 °C en la temperatura de la superficie terrestre en ambos hemisferios.”

En la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (SAyDS, 2015), en el capítulo 4 “La Vulnerabilidad al cambio climático e impactos observados” (CIMA, 2015), se indica que en la Patagonia el aumento de temperaturas (en relación al período 1960 – 2010) fue mayor al resto del país, llegando en algunas zonas a superar 1 °C; indicándose también un aumento de los días al año con olas de calor en la mayor parte de la Provincia de Santa Cruz. En relación a las precipitaciones anuales, se indica que sobre los Andes patagónicos las precipitaciones tuvieron un cambio negativo en el período 1960 – 2010.

En la región que abarca la cuenca superior del río Santa Cruz, la perspectiva en el futuro mediato es tener mayores temperaturas que las actuales y a su vez menores precipitaciones (SAyDS, 2015)

10.2. Región Patagónica

10.2.1. Temperaturas

En el estudio llevado a cabo por el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera para la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CIMA, 2015) se analizaron las temperaturas en la región patagónica: “La Temperatura media anual aumentó significativamente entre 0,5 °C y 1 °C en el centro de la región (confianza alta) y 0,4 °C en promedio para toda la Patagonia. En verano e invierno, el cambio anual entre 1960 y 2010 llegó hasta 1,4 °C, principalmente localizado sobre el oeste de la región”.

En la Tabla 10.1 se muestran los valores medios y cambios observados en la temperatura media para la provincia de Santa Cruz en cada uno de los trimestres analizados.

		Temperaturas en Santa Cruz entre los años 1960 – 2010 [°C]				
		DEF ¹	MAM ²	JJA ³	SON ⁴	Anual
Temperatura media	Medio	13,2	7,6	1,9	8,1	7,7
	Cambio	0,9	0,6	0,3	0,3	0,5

¹ Diciembre, enero y febrero.

² Marzo, abril y mayo.

³ Junio, julio y agosto.

⁴ Septiembre, octubre, noviembre.

Tabla 10.1: Parámetros físicos de las subcuencas de aporte al lago Argentino.

En la cuenca superior del río Santa Cruz, la variación de temperatura media anual indicada fue entre 0 °C a +0,5 °C.

En el informe CIMA (2015) se indica que la temperatura mínima media anual ha tenido un aumento significativo entre 0,4 a 0,8 °C (confianza alta) en casi toda la región, siendo los mismos principalmente mayores en verano. En la Provincia de Santa Cruz se indica un aumento en las mínimas anuales de 0,5 °C, con los mayores valores en verano (0,9 °C) y menores en el invierno (0,1 °C), no presentando modificaciones esta variable para la cuenca superior del río Santa Cruz.

Por otro lado, las temperaturas máximas medias han aumentado entre 0,5 °C a 1 °C en la mayor parte de la región Patagonia entre 1960 y 2010, con incrementos en la Provincia de Santa Cruz de 0,6 °C, nuevamente con los mayores valores en el verano (0,9 °C) y menores en el invierno (0,4 °C). En la cuenca superior del río Santa Cruz, la variación anual está entre 0 °C a +0,5 °C.

10.2.2. Precipitaciones

En el mismo estudio de referencia (CIMA, 2015), se indica que dentro de la región patagónica argentina, en base a los datos CRU TS utilizados no hubo cambios significativos en la mayor parte de la Patagonia, destacándose las limitaciones en los datos disponibles. No obstante, se menciona una significativa disminución de precipitación anual sobre la cordillera (al norte de la cuenca del río Santa Cruz), mientras en la cuenca del río Santa Cruz no se observan variaciones.

En la Tabla 10.2 se muestran los valores medios y cambios observados en las precipitaciones estacionales y anuales para la provincia de Santa Cruz en cada uno de los trimestres analizados.

		Precipitaciones en Santa Cruz entre los años 1950 – 2010 [mm]				
		DEF	MAM	JJA	SON	Anual
Precipitación media	Medio	50,2	66,6	63,4	40,4	220,6
	Cambio	-6,4	2,2	2,7	5,9	4,4

Tabla 10.2: Valores medios y cambios de precipitaciones en la Provincia de Santa Cruz (CIMA, 2015).

Se observa los bajos valores absolutos (mm) indicados en los “cambios” observados.

No hay indicaciones respecto a la evolución de las precipitaciones extremas en la cuenca del río Santa Cruz.

10.3. Proyecciones del clima para el siglo XXI

10.3.1. General

Para establecer proyecciones del clima se utilizan modelos climáticos regionales (MCR). La Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (SAyDS, 2015), muestra escenarios climáticos promedio de 42 experimentos para dos horizontes temporales:

- Futuro cercano: 2015 – 2039 (para políticas de adaptación)
- Futuro lejano: 2075 – 2099 (carácter informativo)

Asimismo, establece dos escenarios de futuras concentraciones de gases de efecto invernadero: RCP4.5 (crecimiento moderado) y RCP8.5 (crecimiento con las tendencias actuales), seleccionando para cada una de las regiones en las que se dividió el país, los modelos que mejor representan el clima regional.

Como es esperado, en el futuro lejano el escenario de mayores emisiones (RCP8.5) muestra mayor calentamiento (2,5 °C en la región patagónica sur), mientras en el futuro cercano los dos escenarios mostrarían resultados similares, con incrementos en la región patagónica sur del orden de 0,5 °C.

En cuanto a la precipitación (anual), la comunicación indica: “los cambios proyectados no son grandes”, excepto para el escenario RCP8.5 en el futuro lejano. En el futuro cercano y en el futuro lejano en el escenario de menores emisiones las variaciones se encuentran en el entorno del 10 %. En la región patagónica, en cualquiera de los escenarios, se proyecta que la precipitación anual se mantendrá con variaciones entre 0 a -10 %.

10.3.2. Proyecciones del clima para el siglo XXI en la región patagónica

Los modelos climáticos utilizados para la región, presentan mejor ajuste a las observaciones históricas para temperaturas (del orden de 0,25 °C) que para precipitaciones, con valores de hasta 30 %. Utilizando los dos modelos que mejor representan el clima regional, se proyecta un calentamiento moderado de 0,5 a 1 °C para este siglo (Figura 10.1), con la excepción del escenario de mayores emisiones (RCP8.5) en el cual el incremento sería superior (2 °C).

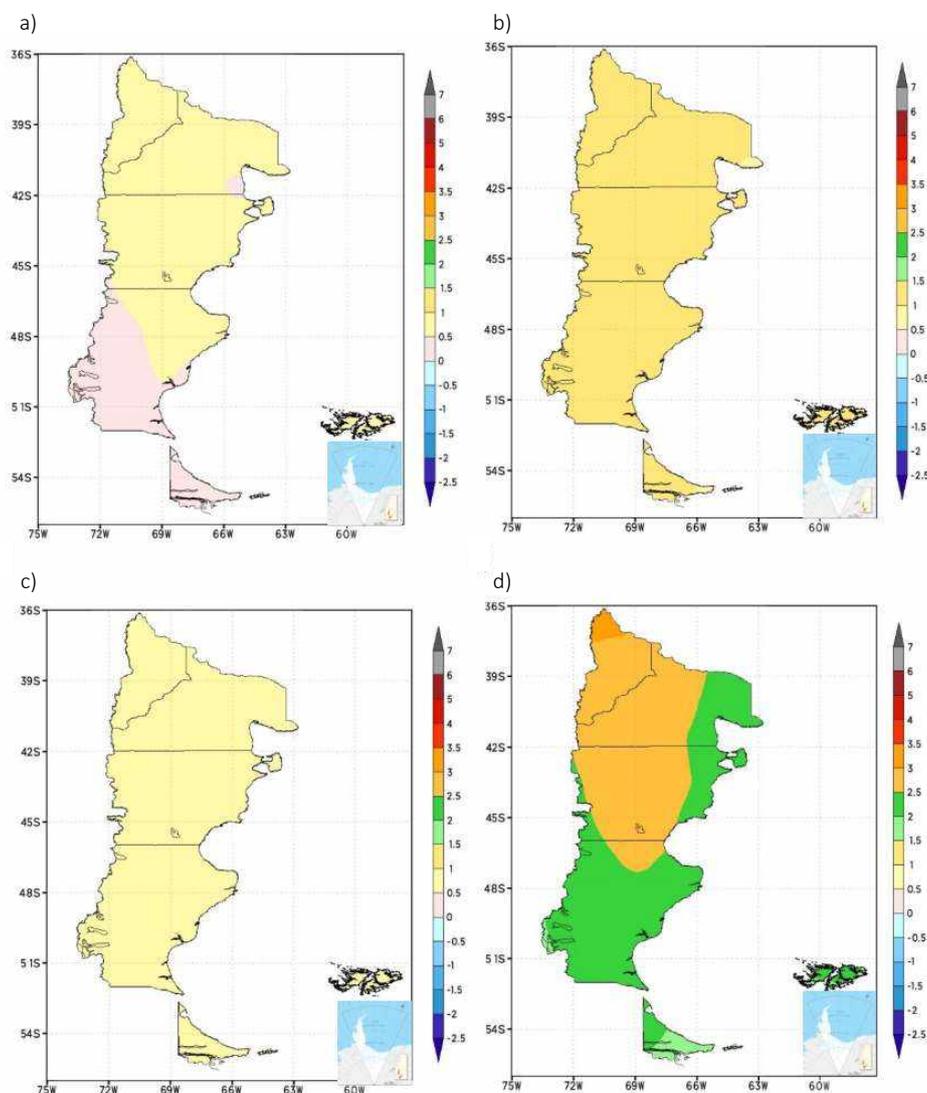


Figura 10.1: Cambios en la temperatura media anual con respecto al período 1986-2005. Promedio de los modelos CSIRO-Mk3-6-0 Y GFDL-ESM2G: a) escenario RCO4.5, futuro cercano (2015 - 2039); b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099); c) escenario RCP8.4, futuro cercano (2015 - 2039); escenario RCP8.4, futuro lejano (2075-2099). (CIMA, 2015)

En las temperaturas mínima y máxima, para los escenarios RCP, el calentamiento y distribución geográfica sería similar al de la temperatura media.

Con relación a las precipitaciones anuales no hay diferencias entre los escenarios RCP, con una reducción en el futuro cercano entre 0 – 10 %, incrementándose hacia el futuro lejano entre 10 – 20 %.

Finalmente, indica el reporte que la región comparte con el resto del país la tendencia al aumento de las precipitaciones intensas pese a la proyección de una disminución generalizada en la media, aunque se aclara que las escasas observaciones disponibles solo permiten estimar cambios en los índices de precipitaciones extremas en la franja cordillerana de Neuquén a Chubut.

10.3.3. Cuenca superior del río Santa Cruz

(a) Temperaturas. Estimación con datos proyectados del CIMA

El análisis de las temperaturas anuales y mensuales, considerando los datos históricos, del futuro cercano y del futuro lejano, se realizó a partir de la información de la base de datos del CIMA (Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera). Se procedió a tomar datos de los sitios con información dentro de la cuenca superior del río Santa Cruz, según se observa en la Figura 10.2; en círculo rojo se indica el punto cercano a El Calafate.



Figura 10.2: Sitios con información de modelos climáticos regionales (MCR) en la cuenca superior del río Santa Cruz.

Desde el sitio web del CIMA se realizó la descarga y el posterior análisis de las variables temperatura mensual y precipitación, disponibles en los siguientes períodos:

- Datos históricos: 1961 – 2010 (1990).
- Futuro cercano: 2015 – 2039.
- Futuro lejano: 2075 – 2099.

Los modelos climáticos regionales (MCR) disponibles en el CIMA para la región donde se inserta la cuenca del río Santa Cruz son los siguientes:

- CSIRO-Mk36-0: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence. Simulaciones originalmente elaboradas por la institución de referencia para el proyecto WCRP/CMIP5, y procesadas para la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de la Argentina por el CIMA/UBA-CONICET.
- GFDL-ESM2.6: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. Simulaciones originalmente elaboradas por la institución de referencia para el proyecto WCRP/CMIP5, y procesadas para la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de la Argentina por el CIMA/UBA-CONICET.
- REMO-ECHAM5: Max-Planck-Institute for Meteorology. Simulaciones originalmente elaboradas por la institución de referencia para el proyecto CLARIS-LPB, y procesadas para la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de la Argentina por el CIMA/UBA-CONICET.
- MM5-HadCM3: Centro de Investigaciones del Mar y la Atmosfera CIMA. Simulaciones originalmente elaboradas por la institución de referencia para el proyecto CLARIS-LPB, y procesadas para la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de la Argentina por el CIMA/UBA-CONICET.

Se descargaron datos correspondientes al escenario RCP8.5 (escenario de extremo calentamiento al que se llegaría si no hubiera restricciones a las emisiones globales), por ser más crítico que el RCP4.5 (emisiones moderadas).

Se analizó en primer lugar el punto de coordenadas 50°25', 72°25' cercano a El Calafate, para realizar comparaciones con la estación del SMN disponible. Los valores medios mensuales observados, y obtenidos por los Modelos Climáticos pueden observarse en la siguiente Tabla 10.3.

Temperatura mensual [°C]													Anual
Período	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Datos observados (1962 – 2010)	14,0	13,6	11,1	7,8	4,0	1,4	0,8	2,6	5,5	8,6	11,3	13,0	7,8
CSIRO-Mk36-0	11,8	11,6	10,0	7,1	3,1	0,6	0,4	2,1	4,5	7,8	9,9	11,2	6,7
GFDL-ESM2.6	11,9	11,7	10,0	7,2	3,6	1,3	0,0	3,4	4,8	7,7	9,6	11,5	6,9
REMO-ECHAM5	12,0	11,9	10,1	6,9	3,5	1,1	0,0	1,9	4,2	7,5	10,0	10,9	6,7
MM5-HadCM3	12,1	11,0	9,5	6,9	2,8	0,6	0,5	1,9	4,1	7,3	9,5	11,1	6,4
Media modelos	11,9	11,5	9,9	7,0	3,2	0,9	0,2	2,3	4,4	7,6	9,8	11,2	6,7

Tabla 10.3: Valores medios de temperaturas mensuales observadas en El Calafate y simuladas en el período histórico por los MCR.

Los valores simulados para el período histórico por estos MCR resultan ligeramente inferiores a los observados en El Calafate. El valor medio anual simulado por los 4 modelos utilizados en el período 1962-2010 resulta de 6,7 °C mientras la media observada en igual período resultó de 7,8 °C. Debe tenerse en cuenta que los modelos climáticos representan un valor de un pixel de 0,5°

x 0,5° mientras el observado tiene representatividad areal limitada (estrictamente puntual), este hecho podría justificar en parte algunas diferencias.

La Figura 10.3 permite apreciar la comparación de temperaturas mensuales simuladas y observadas.

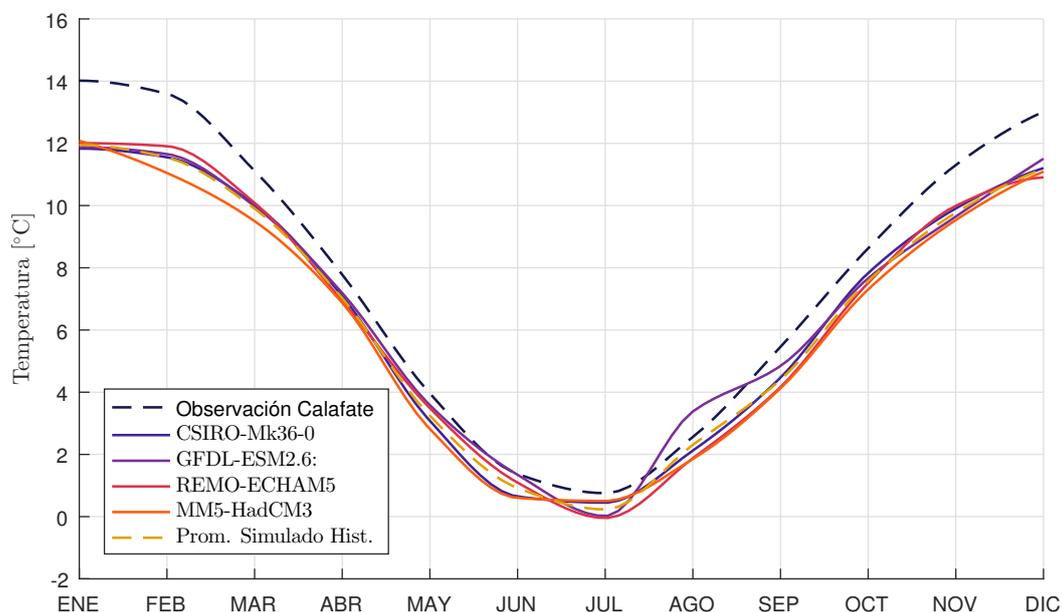


Figura 10.3: Temperaturas mensuales. Comparación simulaciones MCR vs observaciones período histórico.

Los modelos climáticos presentan comportamiento similar, siguiendo la estacionalidad de las observaciones, aunque teniendo mayores alejamientos respecto a los valores observados en los meses más cálidos.

Las tablas adjuntas (Tabla 10.4 a Tabla 10.7) presentan las temperaturas simuladas por los modelos climáticos, tanto para el futuro cercano como para el lejano. En las Figura 10.4 y Figura 10.5 se muestra una comparación entre las observaciones del período histórico y los valores modelados del futuro cercano y lejano respectivamente.

Modelo	Temperatura mensual [°C]												Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
CSIRO-Mk36-0	13,1	13,1	10,9	8,2	4,2	1,8	1,9	3,0	5,2	8,4	10,6	12,2	7,7
GFDL-ESM2.6	12,5	13,0	10,3	7,6	4,5	2,2	0,9	3,8	5,6	8,0	10,2	12,6	7,6
REMO-ECHAM5	12,6	12,0	10,3	7,3	5,1	1,8	1,3	2,3	4,5	8,3	10,3	11,2	7,2
MM5-HadCM3	12,9	11,8	10,7	8,1	4,6	1,7	2,1	2,4	4,4	7,5	10,2	11,5	7,3
Media	12,8	12,5	10,6	7,8	4,6	1,9	1,5	2,9	4,9	8,0	10,3	11,9	7,5

Tabla 10.4: Valores medios de temperaturas mensuales simuladas. Futuro cercano (2015-2039).

En todos los modelos, las variaciones son positivas para todos los meses. Para el futuro cercano se tienen los mayores incrementos de temperatura en el primer semestre.

Para este período la temperatura media anual se incrementaría en 0,8 °C, con un incremento de 0,6 °C para el modelo REMO-ECHAM5 y un máximo de 1 °C para el modelo CSIRO-Mk36-0. Los incrementos se toman respecto a los valores históricos simulados por cada modelo.

Temperatura mensual [°C]													Anual
Modelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
CSIRO-Mk36-0	1,3	1,6	0,8	1,1	1,1	1,2	1,5	0,9	0,7	0,5	0,7	1,0	1,0
GFDL-ESM2,6	0,6	1,4	0,4	0,4	0,9	0,8	0,9	0,5	0,8	0,4	0,5	1,1	0,7
REMO-ECHAM5	0,6	0,0	0,2	0,4	1,6	0,7	1,3	0,4	0,3	0,7	0,3	0,3	0,6
MM5-HadCM3	0,8	0,7	1,2	1,2	1,8	1,1	1,6	0,5	0,3	0,2	0,7	0,5	0,9
Media	0,8	0,9	0,7	0,8	1,4	0,9	1,3	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8

Tabla 10.5: Diferencias en temperaturas (°C) entre futuro cercano (2015-2039) y período histórico (1962-2010).

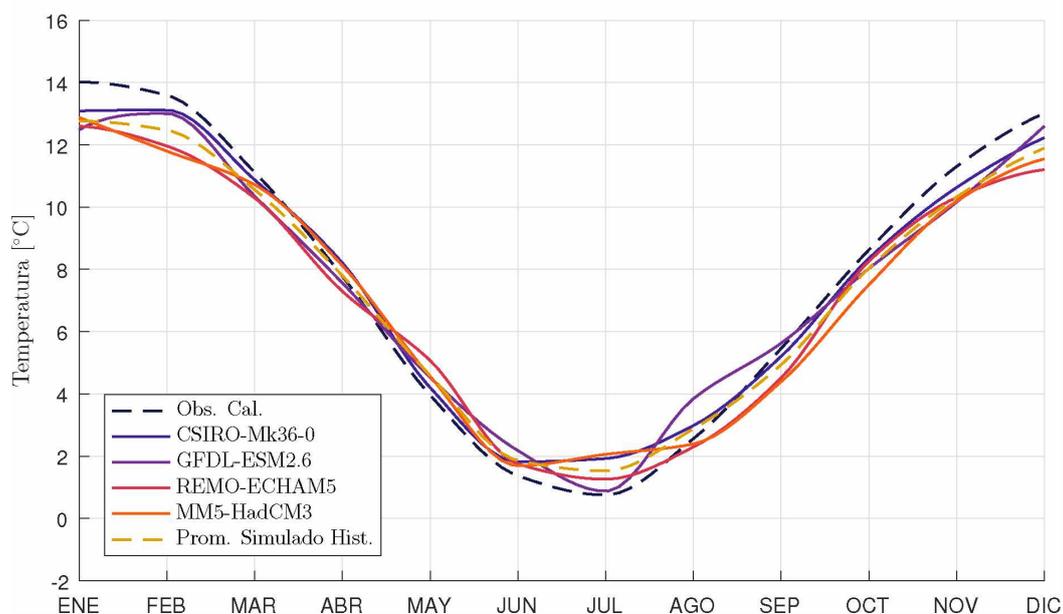


Figura 10.4: Temperaturas mensuales. Comparación simulaciones MCR (futuro cercano) vs observaciones período histórico.

Temperatura mensual [°C]													Anual
Modelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
CSIRO-Mk36-0	16,2	15,8	12,4	9,3	5,6	4,2	3,7	4,4	7,0	10,3	11,8	14,8	9,6
GFDL-ESM2.6	14,5	14,8	11,2	9,2	5,6	2,6	2,5	5,7	6,6	9,1	11,7	14,1	9,0
REMO-ECHAM5	13,6	14,1	11,3	8,6	7,2	3,1	2,2	4,2	5,5	9,2	11,8	12,8	8,6
Media	14,7	14,9	11,7	9,1	6,1	3,3	2,8	4,8	6,4	9,5	11,8	13,9	9,1

Tabla 10.6: Valores medios de temperaturas mensuales simuladas. Futuro lejano (2075-2099).

Temperatura mensual [°C]													Anual
Modelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
CSIRO-Mk36-0	16,2	15,8	12,4	9,3	5,6	4,2	3,7	4,4	7,0	10,3	11,8	14,8	9,6
GFDL-ESM2.6	14,5	14,8	11,2	9,2	5,6	2,6	2,5	5,7	6,6	9,1	11,7	14,1	9,0
REMO-ECHAM5	13,6	14,1	11,3	8,6	7,2	3,1	2,2	4,2	5,5	9,2	11,8	12,8	8,6
Media	14,7	14,9	11,7	9,1	6,1	3,3	2,8	4,8	6,4	9,5	11,8	13,9	9,1

Tabla 10.7: Diferencias en temperaturas (°C) entre futuro lejano (2075-2099) y período histórico (1962-2010).

Al igual que para el futuro cercano, en todos los modelos se tienen incrementos de temperaturas para todos los meses. En este caso, a nivel anual se tiene un incremento de 2,3 °C, lo cual significa un incremento de un 35% respecto a los valores medios simulados para el período histórico.

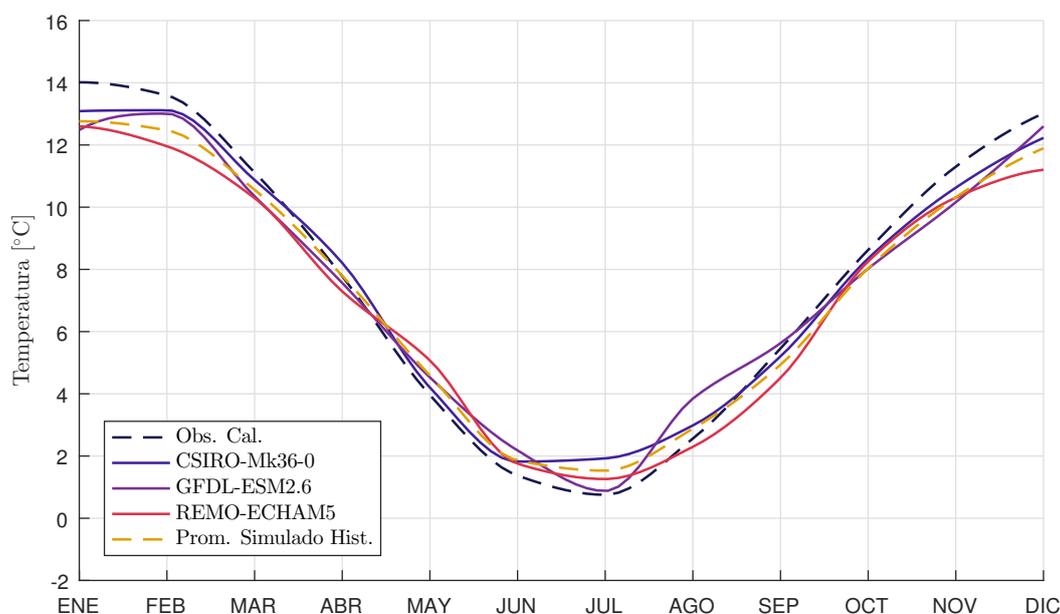


Figura 10.5: Temperaturas mensuales. Comparación simulaciones MCR (futuro lejano) vs observaciones período histórico.

Si se consideran los valores absolutos simulados, y su relación con las temperaturas de El Calafate, se tendría un incremento a nivel anual de un 16 %.

En función de lo expresado previamente, y teniendo en cuenta las limitaciones de las proyecciones climáticas, se propone realizar simulaciones que contemplen el cambio climático (CC) incrementando las temperaturas utilizadas en las simulaciones hidrológicas de crecidas por un factor de 1,25 (promedio entre las relaciones encontradas) que permita reflejar el comportamiento esperado del futuro lejano, horizonte a 2100.

Asimismo, este crecimiento de la temperatura debería reflejarse en un incremento de la *ETP* de la cuenca.

(b) Precipitaciones máximas con cambio climático

El análisis de precipitaciones mensuales, considerando los datos históricos, del futuro cercano y del futuro lejano, se realizó también a partir de la información de la base de datos del CIMA, para los mismos sitios indicados en la Figura 10.2, e iguales escenarios y modelos indicados previamente.

Para realizar comparaciones se analizó el punto de coordenadas 50°25', 72°25' cercano a El Calafate. Los valores medios mensuales observados, y obtenidos por los MCR se presentan en la siguiente Tabla 10.8.

Los valores simulados para el período histórico por CSIRO-Mk36-0 y GFDL-ESM2.6 resultan superiores a los observados en El Calafate, mientras que MM5-HadCM3 presenta valores inferiores. Los valores resultantes de REMO-ECHAM5 no serán utilizados por presentar valores muy alejados respecto a los observados.

Período	Precipitación mensual [mm]												Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Datos observados (1961 – 2000)	10,5	10,6	16,2	24,1	28,5	22,6	26,8	21,5	16,9	13,1	8,5	12,6	212,1
CSIRO-Mk36-0	16,0	9,3	21,9	31,6	33,4	22,2	26,6	20,7	14,4	13,7	11,3	15,2	236,4
GFDL-ESM2.6	17,7	11,5	23,6	28,9	33,4	25,4	29,4	26,5	18,3	14,3	11,9	17,7	258,5
REMO-ECHAM5	3,0	1,9	3,2	8,5	5,9	4,5	5,5	4,7	2,2	2,9	2,7	2,8	47,7
MM5-HadCM3	8,3	8,8	7,1	31,5	21,0	21,4	9,7	11,5	5,7	12,5	8,6	11,7	157,6
Media modelos (*)	14,0	9,9	17,5	30,7	29,3	23,0	21,9	19,6	12,8	13,5	10,6	14,9	217,5

(*) En la estimación de la media no se utiliza REMO-ECHAM5 por presentar valores muy alejados respecto a los observados

Tabla 10.8: Valores medios de precipitaciones mensuales observadas en El Calafate.

El valor medio anual simulado por los 3 modelos utilizados en el período 1962-2010 resulta de 218 mm, muy similar al valor medio observado.

La Figura 10.6 permite apreciar la comparación de precipitaciones mensuales simuladas y observadas. Las simulaciones siguen el patrón temporal de precipitaciones, con valores simulados por encima de los observados.

MM5-HadCM3 solo brinda simulaciones para el período cercano, por lo que tampoco será utilizada.

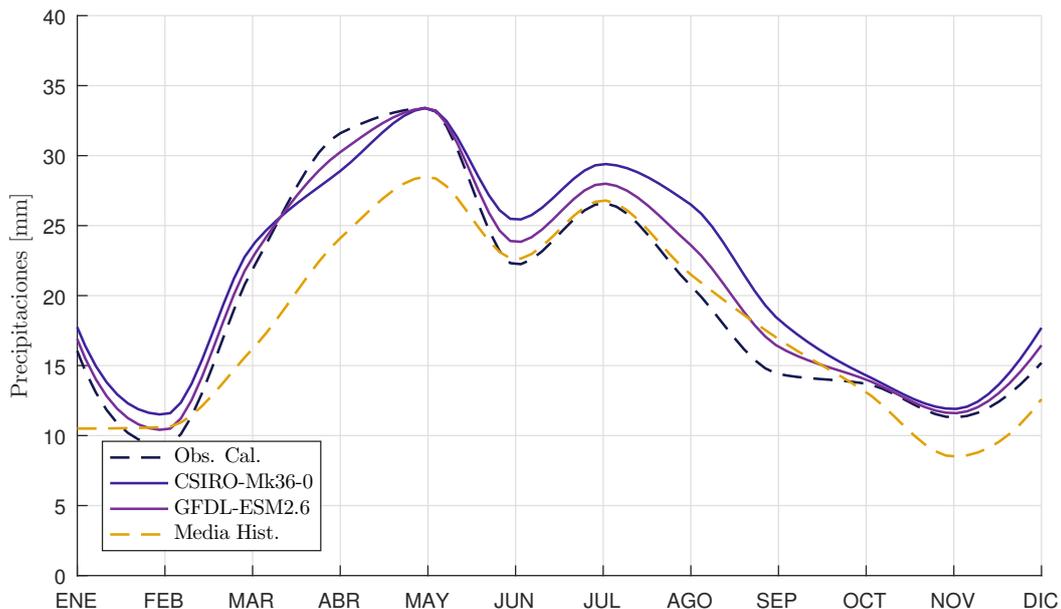


Figura 10.6: Precipitaciones mensuales simuladas y observadas en período histórico.

Las siguientes tablas (Tabla 10.9 y Tabla 10.10) resumen las precipitaciones simuladas por los modelos climáticos, tanto para el futuro cercano como para el lejano. En la Figura 10.7 se comparan los valores obtenidos por los modelos climáticos para el futuro lejano y las observaciones en el período histórico.

En valores anuales todos los modelos indican variaciones negativas. A nivel mensual las únicas excepciones la constituyen los meses de junio, agosto y septiembre, resaltándose que los valores absolutos resultan muy bajos.

Temperatura mensual (°C)													Anual
Modelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
CSIRO-Mk36-0	9,6	7,7	20,9	27,2	27,3	21,4	23,2	23,8	15,8	13,6	8,7	13,7	212,8
GFDL-ESM2.6	10,8	10,4	25,5	22,3	31,5	28,4	25,3	29,8	21,0	12,9	10,0	16,4	244,3
Media	10,2	9,1	23,2	24,8	29,4	24,9	24,3	26,8	18,4	13,3	9,4	15,1	228,6

Tabla 10.9: Valores medios de precipitaciones mensuales simuladas. Futuro cercano (2015-2039).

Temperatura mensual (°C)													Anual
Modelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
CSIRO-Mk36-0	-6,5	-1,6	-0,9	-4,4	-6,1	-0,8	-3,5	3,1	1,3	-0,1	-2,5	-1,5	-23,6
GFDL-ESM2.6	-6,9	-1,1	1,9	-6,6	-1,8	3,0	-4,1	3,3	2,7	-1,4	-1,9	-1,2	-14,2
Media	-6,7	-1,4	0,5	-5,5	-4,0	1,1	-3,8	3,2	2,0	-0,7	-2,2	-1,4	-18,9

Tabla 10.10: Diferencias en precipitaciones (mm) entre futuro cercano (2015-2039) y período histórico (1962-2010).

Temperatura mensual (°C)													Anual
Modelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
CSIRO-Mk36-0	8,0	6,8	22,7	25,7	25,3	23,0	22,9	24,5	15,9	12,0	9,1	12,7	208,6
GFDL-ESM2.6	8,7	8,0	22,8	25,9	35,3	30,4	29,6	34,5	22,2	12,2	8,9	14,3	252,9
Media	8,4	7,4	22,8	25,8	30,3	26,7	26,3	29,5	19,1	12,1	9,0	13,5	230,8

Tabla 10.11: Valores medios de precipitaciones mensuales simuladas (mm). Futuro lejano (2075-2099).

Temperatura mensual (°C)													Anual
Modelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
CSIRO-Mk36-0	-8,0	-2,6	0,8	-5,8	-8,1	0,8	-3,8	3,8	1,5	-1,6	-2,2	-2,5	-27,8
GFDL-ESM2.6	-9,0	-3,5	-0,7	-3,0	2,0	5,0	0,2	8,0	3,9	-2,2	-3,0	-3,4	-5,6
Media	-8,5	-3,05	0,05	-4,4	-3,1	2,9	-1,8	5,9	2,7	-1,9	-2,6	-2,95	-16,7

Tabla 10.12: Diferencias en precipitaciones mensuales simuladas (mm) entre futuro lejano (2075-2099) y período histórico (1962-2010).

CSIRO-Mk36-0 presenta una tendencia a la disminución de las precipitaciones respecto a las series simuladas en el período histórico, en la mayoría de los meses, con una diferencia anual de -28 mm. GFDL-ESM2.6 muestra una alternancia de meses con mayores y menores valores, no indicando tendencias definidas.

10.4. Crecida de Verificación Escenario 2 (CMP) con incorporación de cambio climático

En función de lo expresado previamente, y considerando las limitaciones de las proyecciones climáticas, se propone realizar simulaciones que contemplen el cambio climático (CC), dentro de la Crecida de Verificación Escenario 2 (CMP), teniendo en cuenta lo siguiente:

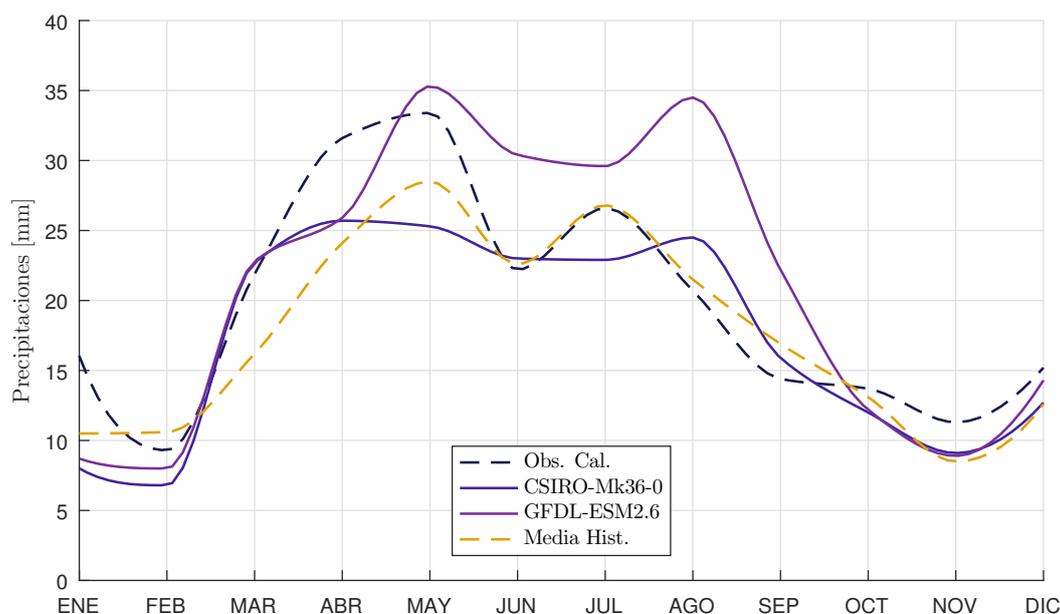


Figura 10.7: Precipitaciones mensuales. Comparación simulaciones MCR (futuro lejano) vs observaciones período histórico.

- Incrementar las temperaturas utilizadas en las simulaciones hidrológicas de crecidas por un factor de 1,25 (promedio entre las relaciones encontradas) que permita reflejar el comportamiento esperado del futuro lejano, horizonte a 2100 (T_{CC})
- No realizar cambios respecto a las precipitaciones, habida cuenta de la leve tendencia decreciente que existiría y la gran incertidumbre existente en la región con esta variable (P_{10000}).
- Incremento de ETP , en función del incremento de temperatura considerado.
- Incremento de caudales en río La Leona con un factor de 1,1, a efectos de considerar similar incremento del escurrimiento resultante en lago Argentino ($LLEO_{CC}$).
- Ajuste del hidrograma de rotura según niveles máximos alcanzados en los lagos previo a la rotura.

La Figura 10.8 presenta la simulación de la crecida de verificación del Escenario 2 incluyendo las consideraciones enumeradas respecto al cambio climático previsto. Se obtiene un caudal máximo de $5.420 \text{ m}^3/\text{s}$, observándose un incremento del 7% respecto a igual esquema de simulación sin las consideraciones de cambio climático, y en el volumen escurrido del 14% (entre el 1° septiembre y el 31 de mayo).

Esta estimación puede considerarse conservadora respecto al comportamiento de glaciares, ya que asume a los mismos estáticos sin el efecto de retracción observado en la mayoría de ellos, teniendo en cuenta que de producirse el incremento de temperaturas los mismos buscarán un equilibrio a mayor altura, con disminución de su volumen.

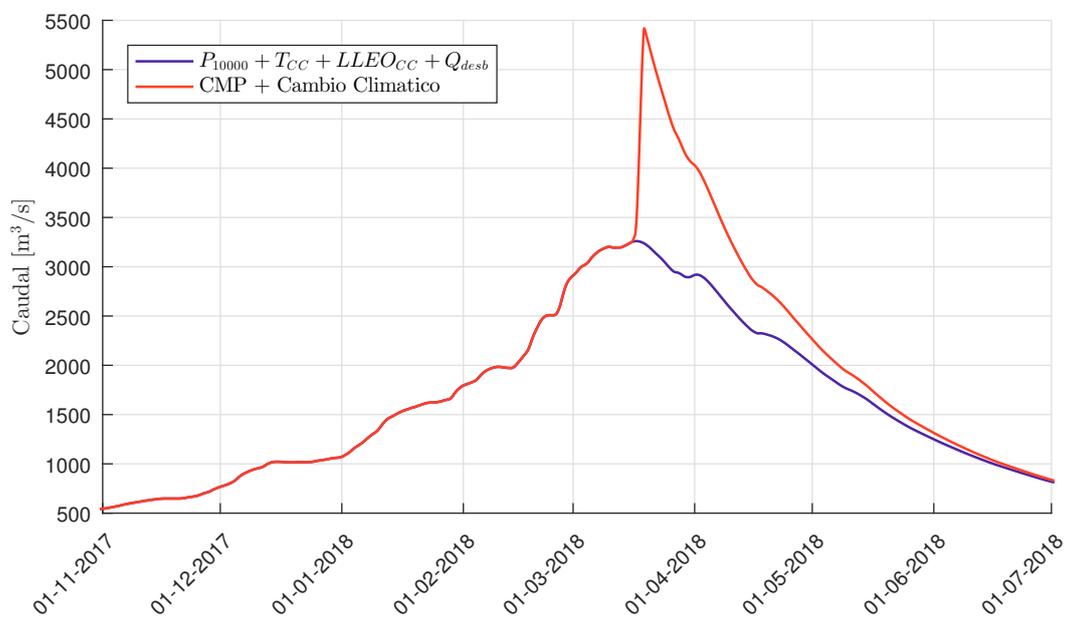


Figura 10.8: Crecida Escenario 2 (CMP) + Cambio Climático.

Capítulo 11

COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON ESTUDIOS PREVIOS - CONCLUSIONES

11.1. Crecida de diseño para las obras de alivio de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz

En relación a la crecida decamilenaria, 7.1.2(b)(ii), se recomienda la adopción de la distribución Gumbel, con parámetros obtenidos por momentos ponderados por probabilidades, como representativa de los caudales máximos anuales en la estación CHF, con un valor de 3.803 m³/s.

La Figura 11.1 muestra los intervalos de confianza correspondientes a la distribución Gumbel MPP, junto con el valor de recurrencia de 10.000 años de 4.160 m³/s indicado en el pliego.

Teniendo en cuenta los intervalos de confianza indicados en la Figura 11.1, y la comparación con el valor del pliego del caudal decamilenario, se aconseja mantener este valor $Q_{10,000} = 4.160$ m³/s como caudal máximo para el dimensionamiento de las obras de alivio.

Asimismo, respetando el caudal máximo para 10.000 años de recurrencia indicado en Pliego, se ajustó el hidrograma de 10.000 años de recurrencia, manteniendo los volúmenes maximizados en diferentes duraciones, el cual se presenta en la Figura 11.2

11.2. Crecida Máxima Probable

En relación a la adopción de la Crecida Máxima Probable (CMP) definida como aquella crecida que se puede esperar en relación con la más severa combinación de condiciones meteorológicas

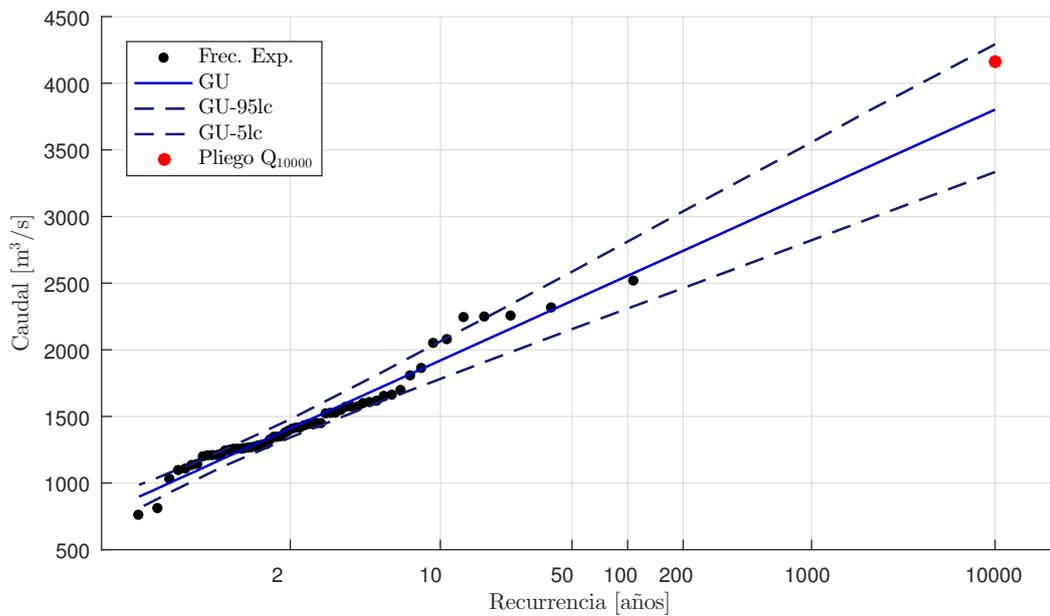


Figura 11.1: Análisis de frecuencia de caudales diarios máximos anuales en CHF (1957/58 – 2018/19). Intervalos de confianza – distribución Gumbel (MPP). Caudal de Pliego (punto rojo).

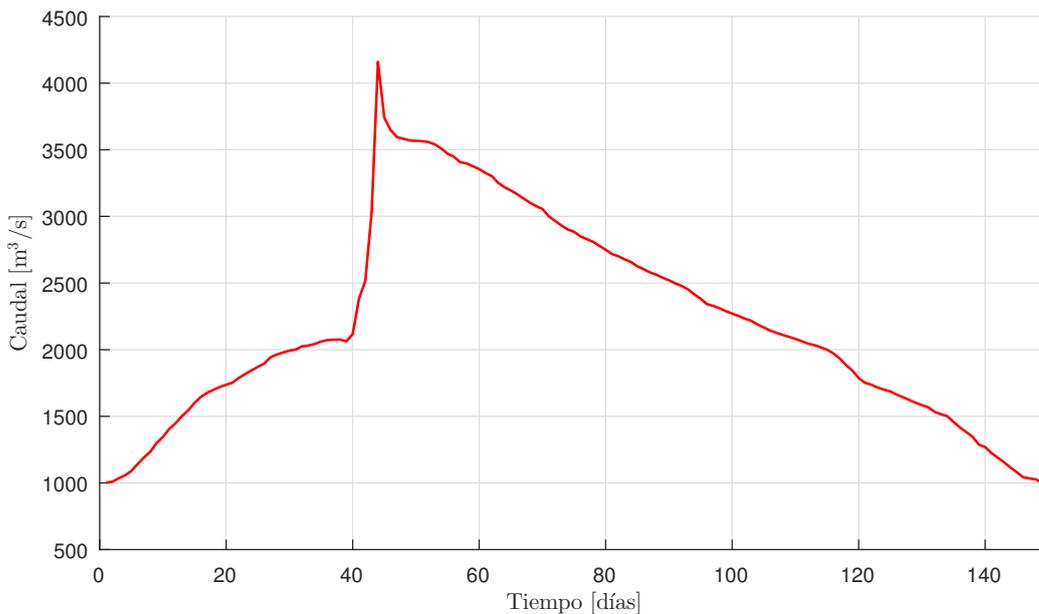


Figura 11.2: Hidrograma decamilenario para diseño de Obras en el río Santa Cruz

e hidrológicas, razonablemente posibles de acuerdo a las condiciones físicas de la región, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- se presentan resultados de 2 escenarios; el Escenario 1 de mayor simplicidad pero a su vez de gran robustez en cuanto a las variables involucradas (hidrograma rotura GPM - cotas Lago Argentino) y el Escenario 2 con mayor desarrollo conceptual de los procesos hidrológicos e hidrometeorológicos involucrados en el desarrollo de grandes crecidas;
- las simulaciones realizadas se efectúan en un contexto con escasa información relativa, en particular respecto a información hidrometeorológica abarcativa en la alta cordillera, en una cuenca con las particularidades previamente expuestas de sus glaciares, deshielos y de-

retimientos de nieve, precipitaciones, interacción con lagos, a lo cual se suma la dinámica del GPM y los desembalses rápidos del lago Rico producto de la rotura del cierre de hielo;

- se ha podido determinar con suficiente certeza las relaciones cota - volumen en lagos Rico y Argentino, fundamentales para la generación del hidrograma de rotura y tránsito del mismo;
- se han realizado combinaciones de eventos aportantes a lago Argentino, buscando coincidencia temporal de los caudales máximos, las que si bien estimadas con muy baja probabilidad de ocurrencia, resultan posibles de contemplar en el escenario de una CMP.

En función de las simulaciones y resultados encontrados se aconseja tomar como CMP del río Santa Cruz, al hidrograma que arroja un caudal máximo un $5060 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente al denominado Escenario 2, ubicando los resultados del lado de la seguridad en comparación con las simulaciones realizadas para el Escenario 1.

Finalmente, se recomienda que este valor sea actualizado una vez que se obtenga mayor información hidrológica e hidrometeorológica dentro de la cuenca y se mejore el conocimiento de la dinámica de cierre del GPM y rotura del mismo. Ello temporalmente puede darse en un plazo de 5 a 10 años, o luego que se produzca una crecida de gran magnitud en la cuenca.

En el Anexo G se presenta un análisis de sensibilidad y una comparación con otras CMP en regímenes nivales o pluvio-nivales en Argentina.

Capítulo 12

PASAJE DE HIDROGRAMAS DE CRECIDAS POR LOS APROVECHAMIENTOS DEL RÍO SANTA CRUZ

12.1. Introducción

En este apartado se presenta el análisis del pasaje de las crecidas extremas, que fueron determinadas en los capítulos anteriores, por los embalses Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner y Gdor. Jorge Cepernic.

El objetivo de este análisis es determinar el grado de seguridad hidrológica que presentan los Aprovechamientos Hidroeléctricos del Río Santa Cruz frente a los nuevos escenarios estudiados. En este sentido, se seleccionaron los siguientes 3 hidrogramas para ser transitados por los embalses:

- Crecida decamilenaria ($Q_{max.} = 4.160 \text{ m}^3/\text{s}$): es el hidrograma decamilenario definido para el diseño de las obras de alivio de los AHRSC. Respetando el caudal máximo de Pliego, y manteniendo los volúmenes maximizados en diferentes duraciones, se obtiene el hidrograma de la Figura 11.2.
- Crecida Máxima Probable o CMP ($Q_{max.} = 5.060 \text{ m}^3/\text{s}$): de acuerdo a lo establecido en el numeral 11.2, la CMP del río Santa Cruz queda establecida como el evento más crítico analizado, en relación con la más severa combinación de condiciones meteorológicas e hidrológicas, razonablemente posibles de acuerdo a las condiciones físicas de la región. Este evento corresponde al hidrograma de la Figura 9.22.

- CMP + Cambio Climático ($Q_{max.} = 5.420 \text{ m}^3/\text{s}$): en función de lo señalado en el numeral 10.4, se propone un hidrograma que contemple los efectos del Cambio Climático sobre las condiciones más severas analizadas (CMP). De este modo, queda definido el hidrograma de la Figura 10.8.

Teniendo en cuenta el desfase que existe en la construcción de las dos obras, en el caso del aprovechamiento Gdor. Jorge Cepernic el análisis del pasaje de las crecidas se realiza considerando tanto la hipótesis de que el aprovechamiento Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner este en operación, como la hipótesis de que se encuentre en etapa constructiva.

12.2. Metodología de cálculo

La metodología de trabajo contempla la utilización de un modelo de simulación de embalses, en el cual se resuelve numéricamente la siguiente ecuación de continuidad:

$$Q_{e(t)} \Delta t + Q_{s(t)} \Delta t + \Delta V_e = 0 \quad (12.1)$$

Donde:

$Q_{e(t)}$: caudales entrantes al embalse durante el período de tiempo Δt .

$Q_{s(t)}$: caudales salientes desde el embalse durante el período de tiempo Δt . Se considera únicamente el vertedero como órgano de descarga durante el evento de crecida.

ΔV_e : variación del volumen del embalse durante el período de tiempo Δt .

Para poder resolver la ecuación de continuidad es necesario contar, además de los hidrogramas de crecida, con las curvas de descarga de los vertederos y las leyes de altura-volumen de los embalses. En las siguientes Figura 12.1 a Figura 12.4 se presenta esta información, obtenida de los documentos elaborados para el Proyecto Ejecutivo e Ingeniería de Detalle de las Obras.

Finalmente, al momento de realizar las simulaciones se tuvieron en cuentas las siguientes hipótesis generales de cálculo:

- el paso de tiempo es de 1 día para la crecida decamilenaria, y de 3 horas para la CMP y la CMP + Cambio Climático;
- el caudal entrante al embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner es igual a los hidrogramas presentados en el numeral 12.1;
- el caudal entrante al embalse Gdor. Jorge Cepernic es igual al caudal saliente del embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner en el caso de que ambos embalses estén en operación, y resulta equivalente al caudal los hidrogramas presentados en la sección 12.1 para el caso de que el embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner se encuentre en fase constructiva;

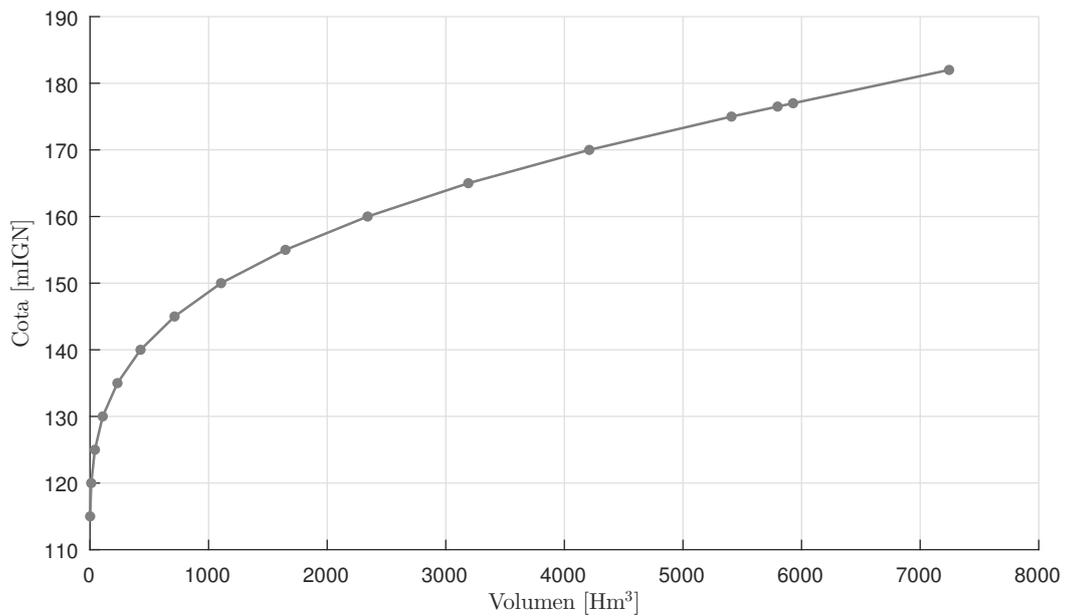


Figura 12.1: Relación cota - volumen. Embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner. (Fuente: UTE, 2016)

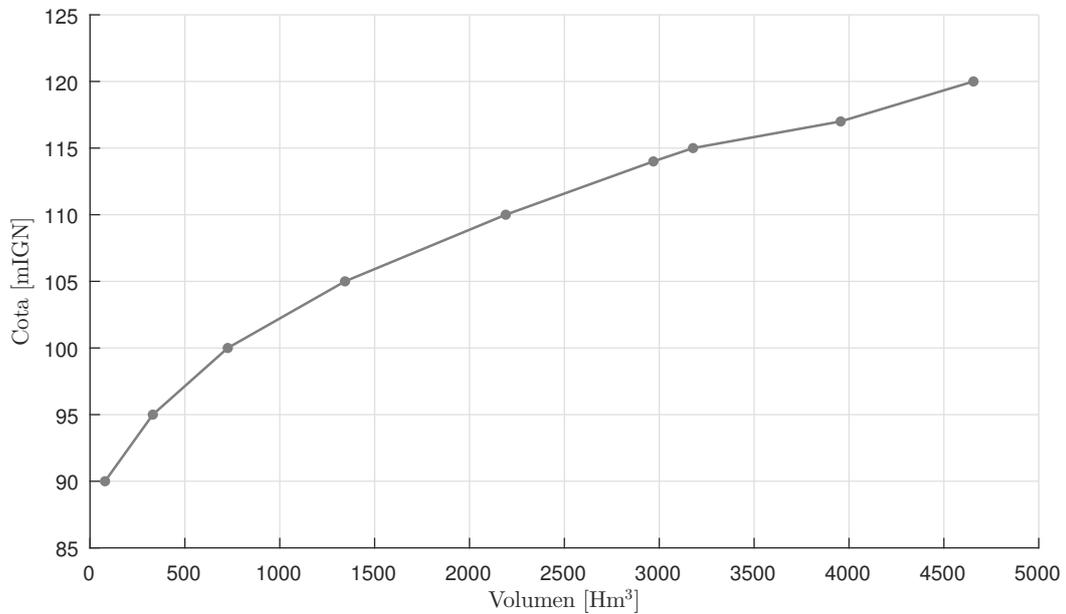


Figura 12.2: Relación cota - volumen. Embalse Gdor. Jorge Cepernic. (fuente: UTE, 2016)

- se considera únicamente el aporte de caudales por vertedero, como caudal saliente de los embalses. Se utiliza la ley de descarga libre de los vertederos sin ningún tipo de restricción por apertura máxima de compuerta;
- el nivel en el embalse se mantiene igual al Nivel Máximo Normal (NMN) hasta que el caudal ingresante sea igual o mayor al caudal del vertedero con descarga libre.

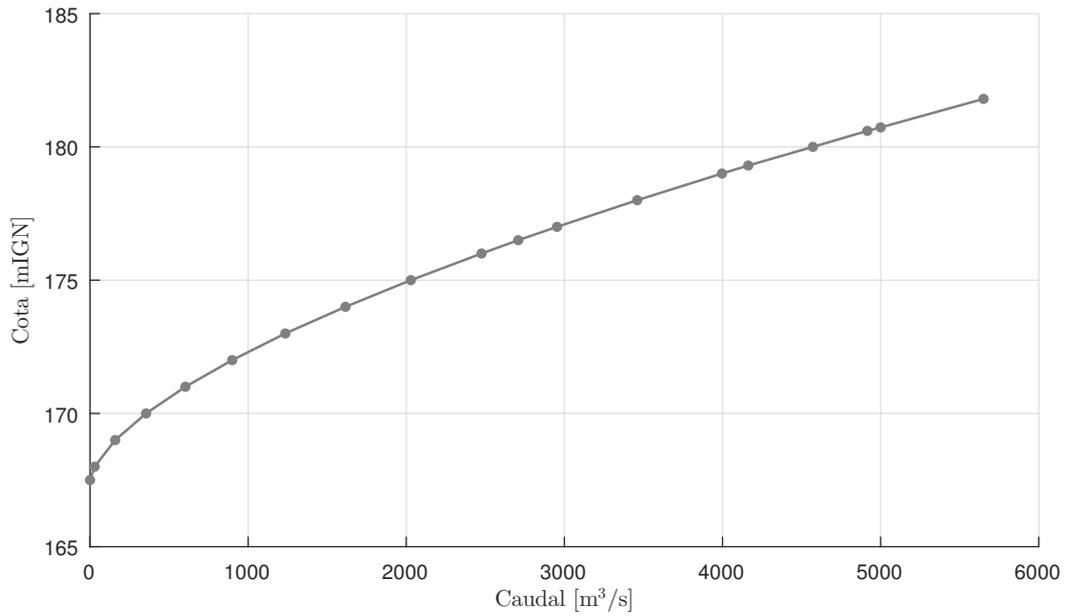


Figura 12.3: Ley de descarga del vertedero libre. Aprovechamiento Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner. (fuente: UTE, 2020)

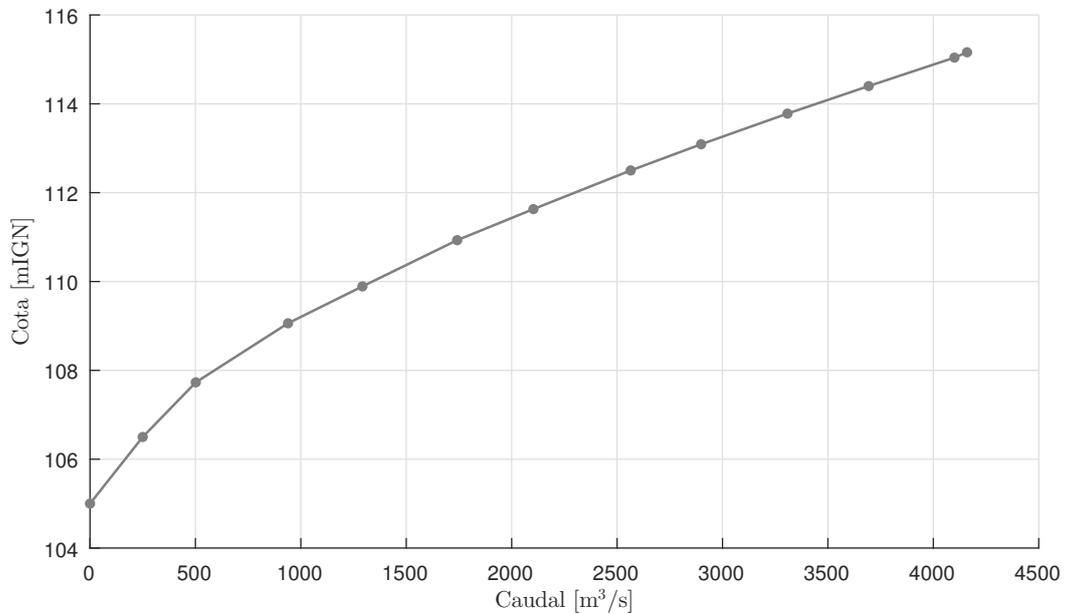


Figura 12.4: Ley de descarga del vertedero libre. Aprovechamiento Gdor. Jorge Cepernic. (fuente: UTE, 2019)

12.3. Resultados obtenidos

Previamente a analizar los resultados obtenidos en las simulaciones de embalse, resulta conveniente recordar los niveles característicos de los aprovechamientos que fueran expuestos en la Tabla 1.1 y Tabla 1.2. En la Figura 12.5 se indican los siguientes niveles: Nivel Máximo Normal (NMN), Nivel Máximo Extraordinario (NME), nivel de coronamiento y nivel superior muro rompeolas.

En la Figura 12.6 se muestra la evolución de los niveles y caudales en el tiempo para el pasaje de la crecida decamilenaria a través de ambos embalses. Del mismo modo, en la Figura 12.7 se

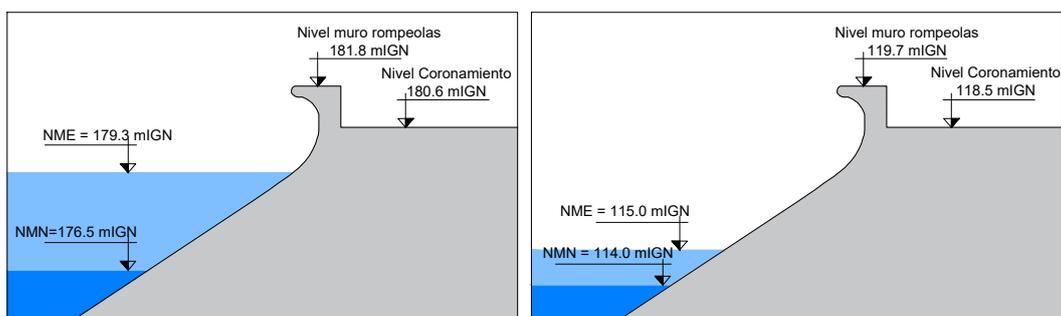


Figura 12.5: Niveles característicos de los embalses: Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (izquierda), Gdor. Jorge Cepernic (derecha).

pueden observar los resultados para la Crecida Máxima Probable, y en la Figura 12.8 se muestra el análisis para la condición de CMP + Cambio Climático.

En la Tabla 12.1 se resumen los resultados obtenidos para los diferentes escenarios estudiados. A partir del análisis realizado se concluye:

- la presencia de los embalses genera una laminación de las crecidas analizadas, con una reducción del pico de los hidrogramas que alcanza al 17% en el caso del aprovechamiento Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner y 16% para el aprovechamiento Gdor. Jorge Cepernic;
- esta laminación genera que los niveles de embalse se encuentren por debajo del NME para el caso de la crecida decamilenaria. Incluso, para el aprovechamiento Gdor. Jorge Cepernic, considerando el embalse NK operativo, el nivel de embalse se mantiene constante e igual al NMN;
- si bien para las situaciones más exigentes (CMP y CMP + Cambio Climático) los niveles de embalse superan el NME, siempre se mantienen por debajo del nivel superior del muro rompeolas. Esto garantiza que, bajo las hipótesis estudiadas, no haya situaciones de vertido por sobre el coronamiento de las presas.

	Escenario	Caudal entrante máximo (m ³ /s)	Caudal saliente máximo (m ³ /s)	Atenuación del pico %	Nivel embalse máximo (mIGN)	Revancha al muro rompeolas (m)	Revancha al coronamiento (m)
Presa Pte. Dr Néstor Carlos Kirchner	Crecida 10.000 años	4.160	3.470	17	178,0	3,8	2,6
	CMP	5.060	4.220	17	179,4	2,4	1,2
	CMP + Cambio	5.420	4.490	17	179,9	1,9	0,7
Presa Gdor. Jorge Cepernic (con NK en operación)	Crecida 10.000 años	3.470	3.460	0	114,0	5,7	4,5
	CMP	4.220	4.100	3	115,0	4,7	3,5
	CMP + Cambio	4.490	4.280	5	115,3	4,4	3,2
Presa Gdor. Jorge Cepernic (sin NK en operación)	Crecida 10.000 años	4.160	3.660	12	114,3	5,4	4,2
	CMP	5.060	4.360	14	115,5	4,2	3,0
	CMP + Cambio	5.420	4.530	16	115,7	4,0	2,8

Tabla 12.1: Resumen de resultados del tránsito de hidrogramas de crecida por los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz.

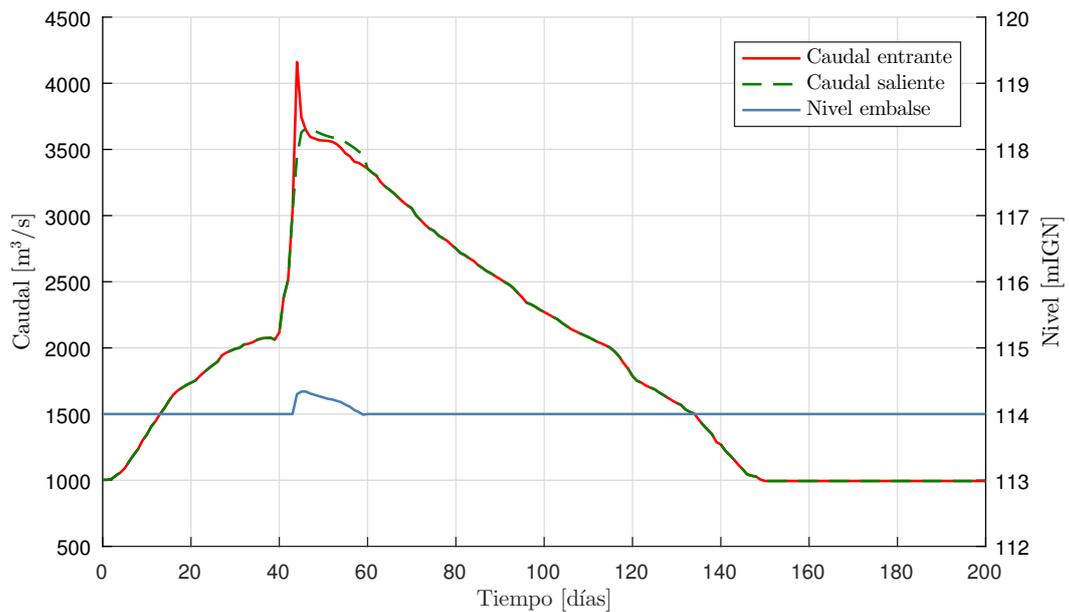
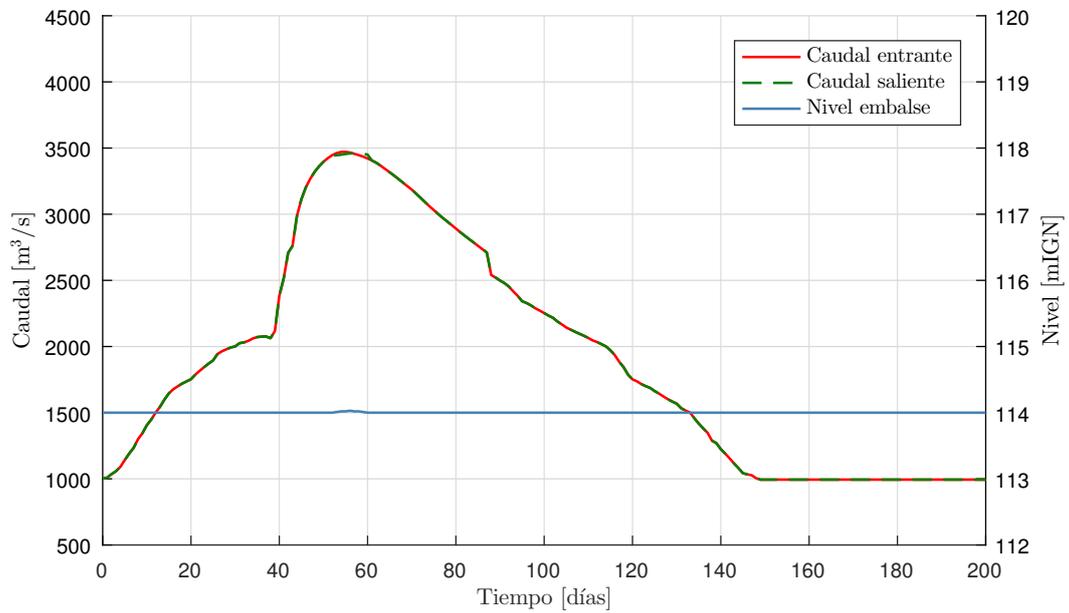
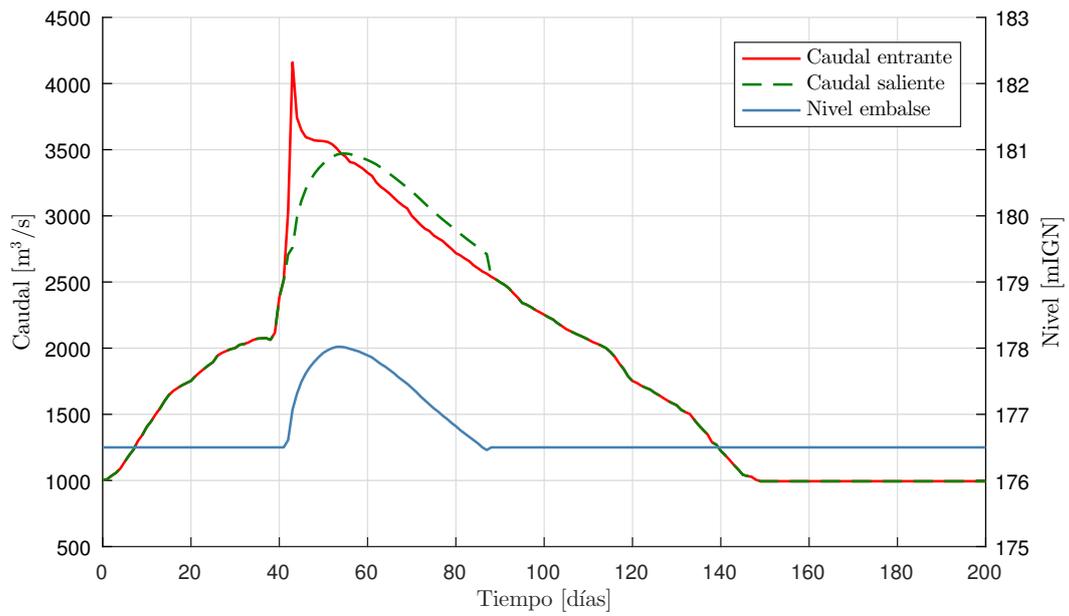


Figura 12.6: Resultados simulación de embalse, crecida decamilenaria: embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (superior); embalse Gdor. Jorge Cepernic con operación de NK (medio); embalse Gdor. Jorge Cepernic sin operación de NK (inferior).

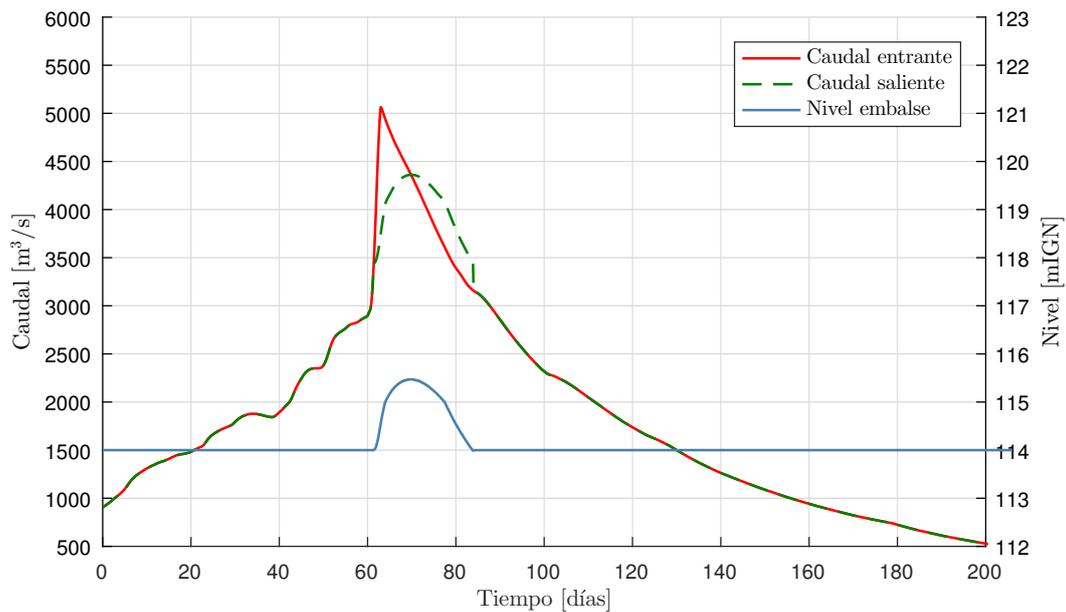
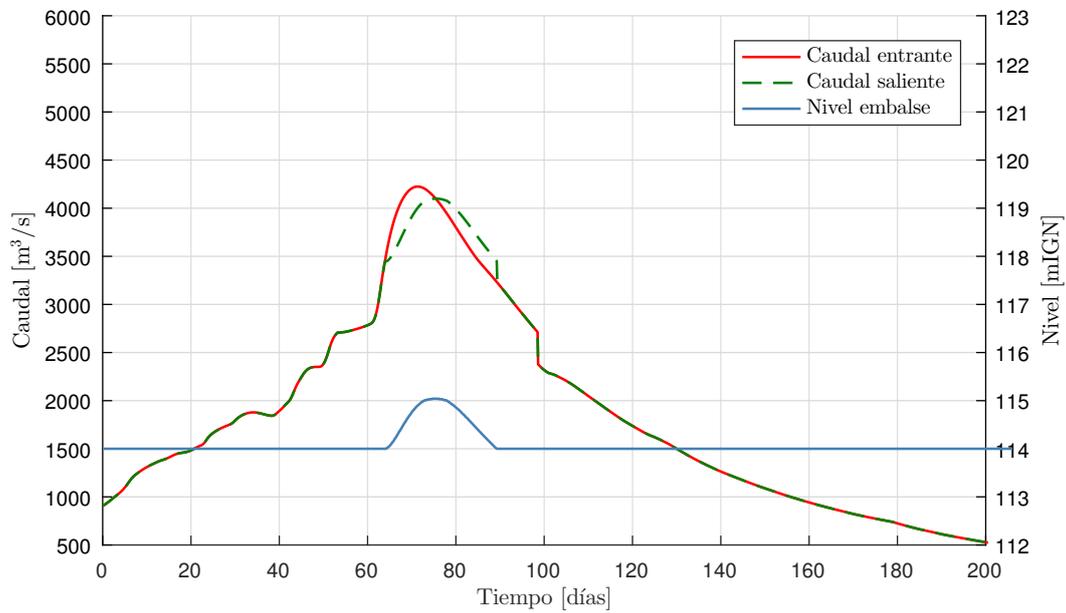
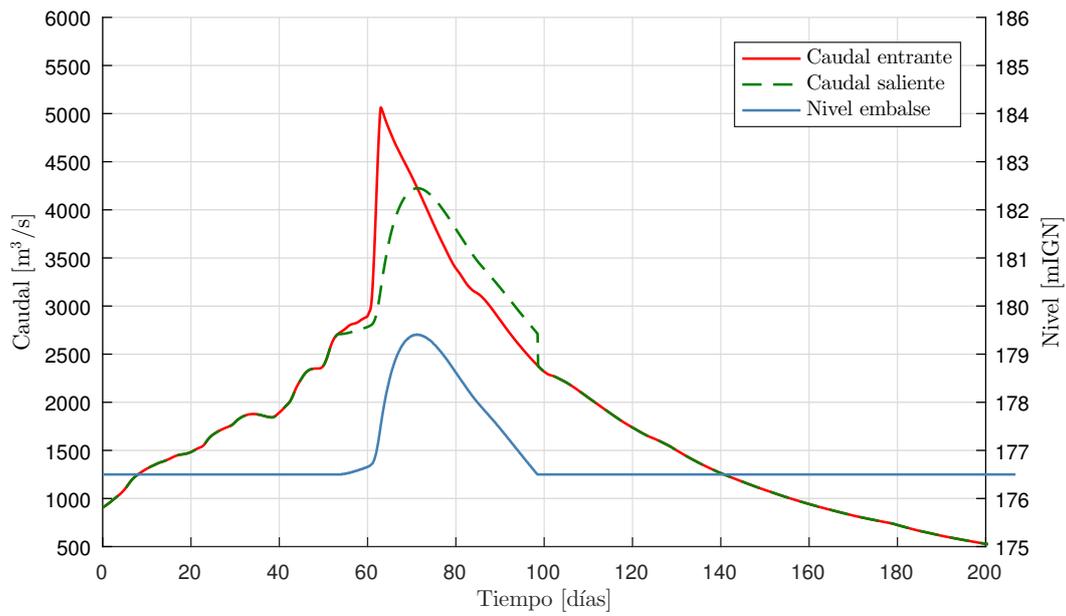


Figura 12.7: Resultados simulación de embalse, crecida decamilenaria: embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (superior); embalse Gdor. Jorge Cepernic con operación de NK (medio); embalse Gdor. Jorge Cepernic sin operación de NK (inferior).

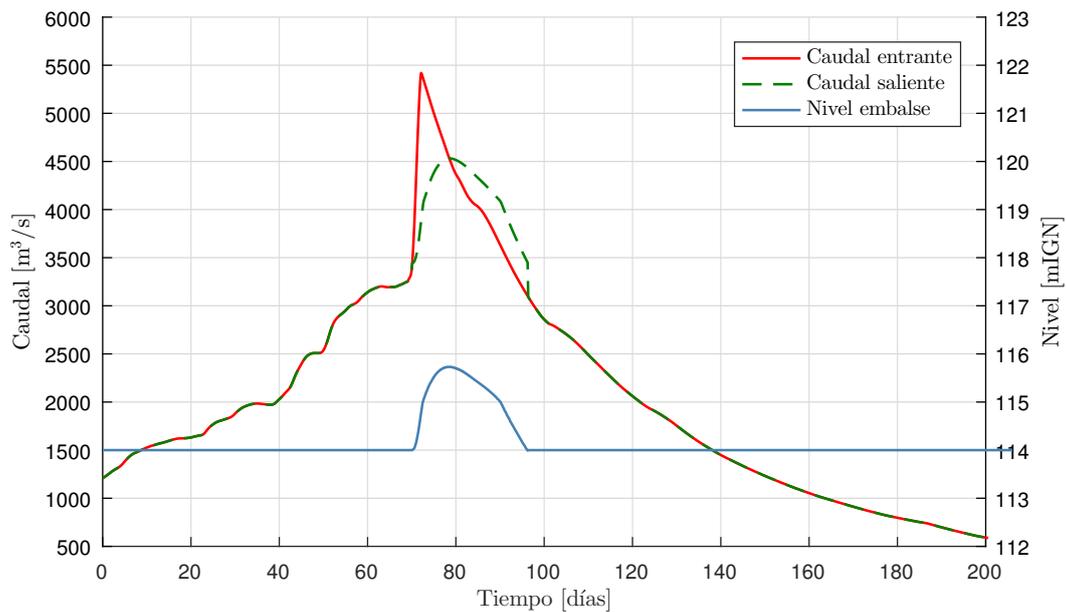
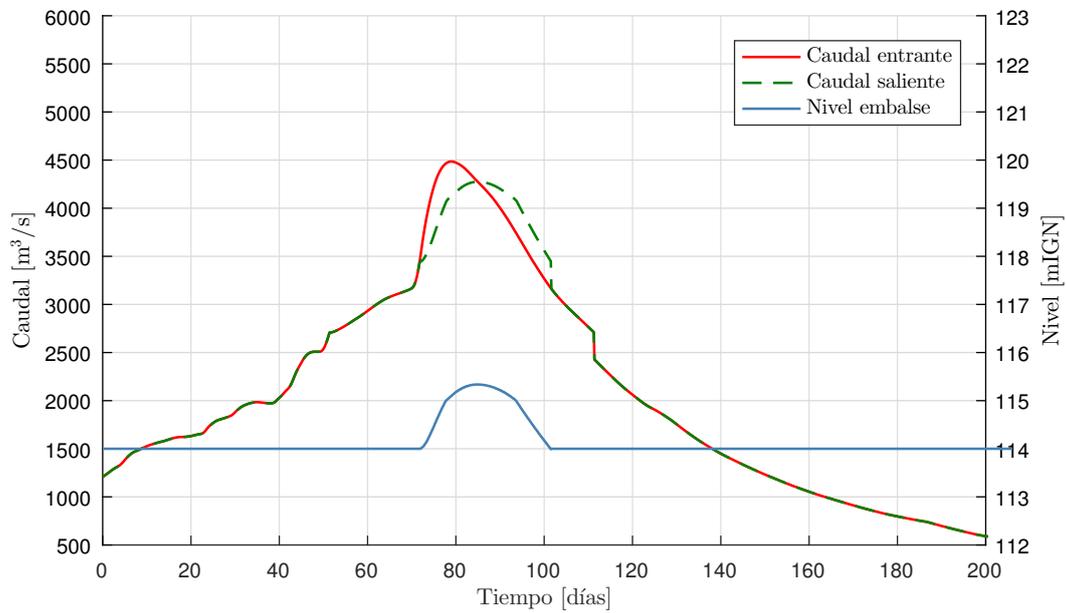
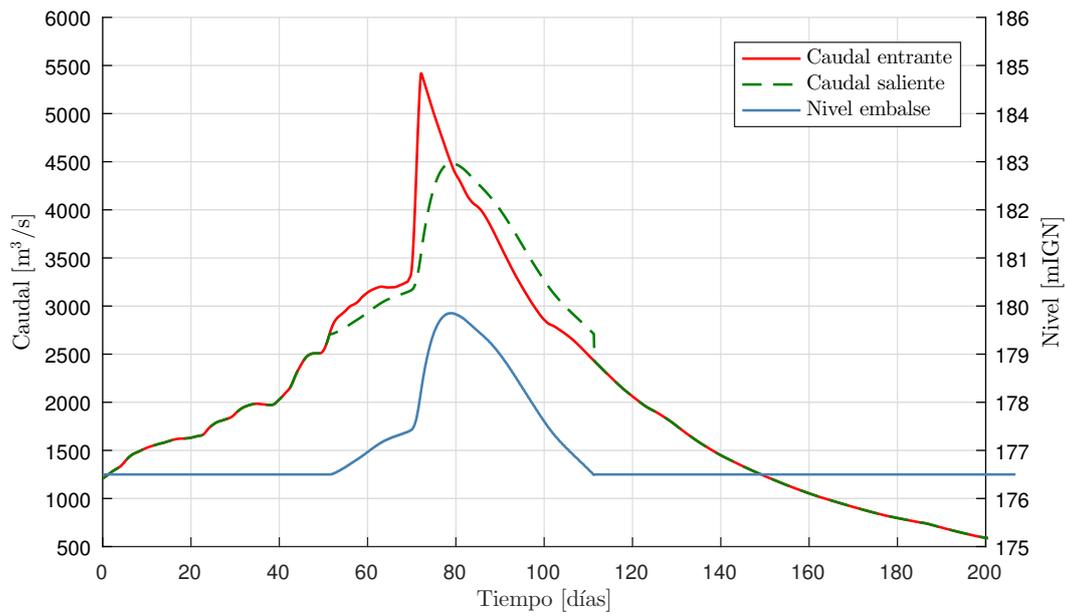


Figura 12.8: Resultados simulación de embalse, CMP + Cambio Climático: embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (superior); embalse Gdor. Jorge Cepernic con operación de NK (medio); embalse Gdor. Jorge Cepernic sin operación de NK (inferior).

Capítulo 13

PREDICCIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS EN EL RÍO SANTA CRUZ

El modelo de simulación de operación de embalse simplificado del lago Argentino, presentado en el apartado 5.4.4, hace posible la predicción de hidrogramas de crecidas abruptas en el río Santa Cruz.

A partir del registro de los niveles del lago Argentino en la estación El Calafate (N_{LAi}) y del lago Rico en la estación Parque Nacional Los Glaciares (N_{LRi}), y adoptando una duración del desembalse, se puede obtener el hidrograma de crecida en el río Santa Cruz si se produjera la rotura del Glaciar Perito Moreno en esas condiciones.

Entonces, suponiendo diferentes niveles de los cuerpos de agua previos al evento de rotura, se construyen curvas que informan el caudal máximo que caracterizaría al hidrograma de crecida en el río Santa Cruz provocado por una rotura de esas características iniciales.

En la Figura 13.1 se presentan los resultados de este análisis para una duración total del desembalse de 3 días e hidrogramas de rotura contruidos a partir de la curva de desembalse media (Figura 5.26).

La Figura 13.1 es un gráfico de doble entrada al cual se ingresa en el eje de las ordenadas con el registro del nivel del lago Rico hasta chocar con la curva que coincide con el nivel que presenta el lago Argentino en ese mismo instante, para obtener en el eje de las abscisas el caudal máximo que transitaría por el río Santa Cruz si el desembalse rápido se iniciara en esas condiciones.

Se observa que también han sido graficados los puntos $N_{LRi} - Q_{max}$ para las roturas de los años 1966, 2004 y 2018 y las curvas que corresponden a los niveles que presentó el lago Argentino previo a estos eventos. Los puntos de registro se ubican muy próximos a las curvas correspondientes, indicando que la predicción realizada a través del modelo es satisfactoria.

Finalmente, resulta importante destacar que los límites aplicación de la Figura 13.1 son: niveles

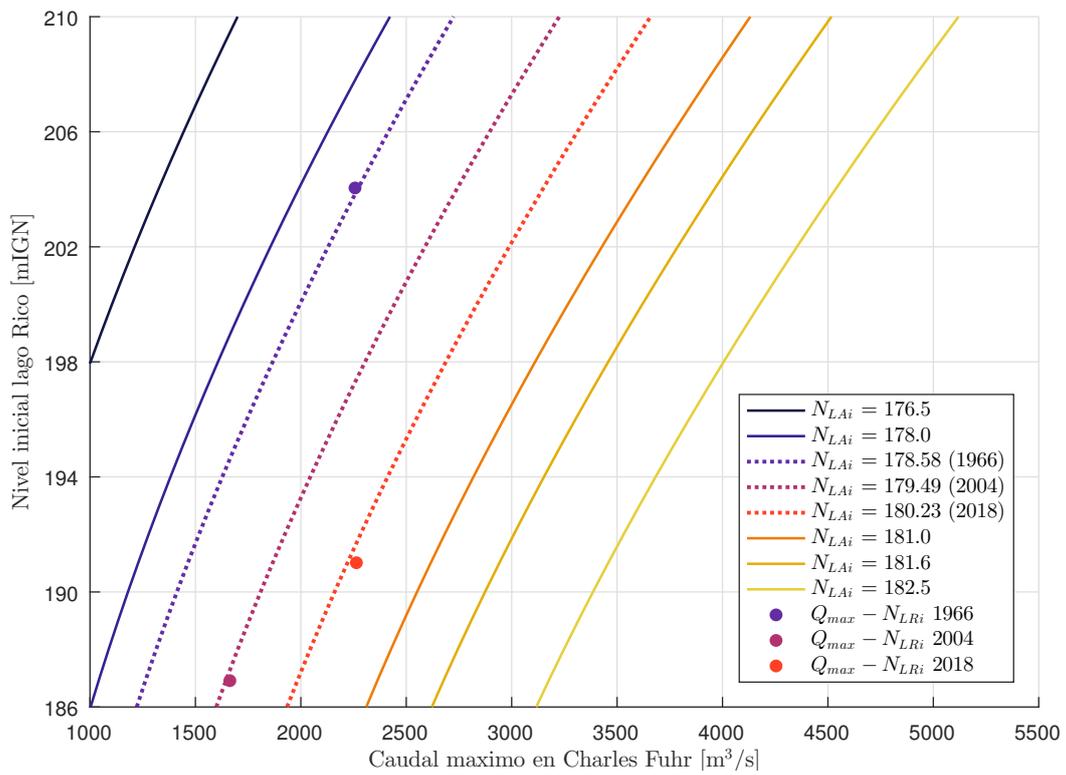


Figura 13.1: Curvas de pronóstico de caudales en el río Santa Cruz en función de los niveles en el lago Rico y el lago Argentino (publicado en Vath et al., 2021)

del lago Argentino entre 176,50 y 183,10 mIGN; niveles del lago Rico entre 186,00 y 210,00 mIGN; y roturas del GPM con duraciones menores o iguales a 3 días.

Bibliografía

Aniya, M., Skvarca, P. . (1992). Characteristics and variations of Upsala and Moreno. *Bulletin of Glacier Research* 10, 39–53.

Barros, V., Menéndez, A., Natenzon, C., Codignotto, J. O., Kokot, R., Bischoff, S. . (2005). El cambio climático y la costa del Río de la Plata. Fundación Ciudad.

Bertone, M. (1972). Aspectos Glaciológicos de la Zona del Hielo Continental Patagónico. Contribución del Instituto Nacional del Hielo Continental Patagónico. Ministerio de Cultura y Educación. Buenos Aires.

CIMA. (2015). La Vulnerabilidad al cambio climático e impactos observados. En S. d. (SAyDS), Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (págs. 99-147). Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera.

Cunnane, C. (1985). Factors Affecting Choice of Distribution for Flood Series. *Journal Hydrological Sciences*, 30(1), 25-36.

Cunnane, C. (1989). Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis. World Meteorological Organization (WMO).

Depetris, P. J., Pasquini, A. I. (2000). The hydrological signal of the Perito Moreno Glacier damming of Lake Argentino (southern Andean Patagonia): the connection to climate anomalies. *Global and Planetary Change*, 26(4), 367-374.

DGA. (1988). Balance Hídrico de Chile. Santiago, Chile: Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas.

ELETROBRAS. (1987). Guia para cálculo de cheia de proyecto de vertedores. Ministerio das Minas e Energia. Rio de Janeiro.

Fernandez, P., Fattorrelli, S. (2011). Diseño Hidrológico.

Feruglio, L. (1944). Estudios Geológicos y glaciológicos en la Región del lago Argentino. *Bol. Ac. Nac. de Ciencias*. Córdoba.

Greenwood, J., Landwehr, J., Matalas, N., Wallis, J. (1979). Probability weigthed moments: defi-

nition and relation to parameters of several distributions expressable in inverse form. *Water Resources Research*, 15(5), 1049-1054.

Guerrido, C. M. (2014). *Respuestas del bosque patagónico a inundaciones recurrentes*. Universidad Nacional del Comahue. Heim, A. (1951). *Informe sobre un estudio glaciológico en el Parque Nacional Los Glaciares*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Nación, Administración General de Parques Nacionales. Buenos Aires.

Heisheimer, G. (1954). *Der Durchbruch des Morenogleschers, Lago Argentino, Patagonien*. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, III/1, 33–45.

Hosking, J. (1986). *The theory of probability weighted moments*. New York: Research Report RC12210, IBM Thomas J. Watson Research Center.

IANIGLA. (2017). *Efecto del Cambio Climático en el régimen hidrológico. Río Santa Cruz - Versión preliminar*. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales.

IANIGLA. (2018). *Inventario Nacional de Glaciares*. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales.

Kite, G. (1988). *Frequency and risk analyses in hydrology*. Colorado, U.S.A.: Water Resources Publications. Kuczera, G. (1982). *Robust flood frequency models*. *Water Resources Research*, 18(2), 315-324.

Landwehr, J., Matalas, N., Wallis, J. (1979). *Probability weighed moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles*. *Water Resources Research*, 15(5), 1055-1063.

Lannutti, E., Lenzano, M. G., Durand, M., VECCHIO, A., Moragues, S., Lenzano, L. (2020). *MODELADO NUMÉRICO DE LAS OSCILACIONES FRONTALES Y OCURRENCIA DE FORMACIÓN DE DIQUES DE HIELO DEL GLACIAR PERITO MORENO, CAMPO DE HIELO PATAGÓNICO SUR*. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 46(1).

LARA, A. (2016). *Evaluación de la influencia del Proyecto Hidroeléctrico Néstor Kirchner sobre los niveles de agua del Lago Argentino*. Subsecretaría de Energía Hidroeléctrica de la Nación.

Lenaerts, J. T. M., van den Broeke, M. R., van Wessem, J. M., van de Berg, W. J., van Meijgaard, E., van Uft Lambertus H, Schaefer, M. (2014). *Extreme precipitation and climate gradients in Patagonia revealed by high-resolution regional atmospheric climate modeling*. *Journal of climate*, 27(12), 4607-4621.

Lenzano, M. G., Lannuttia, E., Tothb, C., Lenzanoa, L., Lo Vecchioa, A., Falaschia, D., Vich, A. . (2018). *Analyzing the oscillations of the Perito Moreno Glacier, using time-lapse image sequences*. *Cold Regions Science and Technology*, 146, 155-166.

Lettenmaier, D., Wallis, J., Wood, E. (1987). *Effect of regional heterogeneity on flood frequency estimations*. *Water Resources Research*, 23(2), 313-323.

Liss, C. (1970). Der Morenogletscher in der Patagonischen Kordillere: sein ungewöhnliches Verhalten seit 1899 und der Eisdamm durchbruch des Jahres 1966. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, VI(1-2), 161-180.

Mahdi, S., Cenac, M. (2005). Estimating parameters of Gumbel distribution using the methods of moments, probability weighted moments and maximum likelihood. Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones, 12(1-2), 151-156.

Malagnino, E. C. (2008). Un pasado, un presente y un futuro incierto. El Campo de Hielo Patagónico Sur. Buenos Aires: Sitios de Interés Geológico de la República Argentina. TOMO II - SUR. doi:ISSN 0328-2325

Mercer, J. (1968). Variations of some Patagonian glaciers since the Late-Glacial. American Journal of Science, 266, 91–109.

Minowa, M., Sugiyama, S., Sakakibara, D., Skvarca, P. (2017). Seasonal Variations in Ice-Front Position Controlled by Frontal Ablation at Glaciar Perito Moreno, the Southern Patagonia Icefield. Frontiers in Earth Science, 5, 1.

MINPLAN. (2012). APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ (Pte. KIRCHNER y Gdor. CEPERNIC) TÍTULO V – Documentación Técnica. CAPÍTULO I – Hidrología. Pliego Licitación Pública. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. Secretaría de Obras Públicas. Subsecretaría de Recursos Hídricos.

NERC. (1975). Flood Studies Report. Hydrological studies (Vol. I). Reino Unido.: Natural Environment Research Council.

Nichols, R.L., Miller, M.M. (1952). The Moreno Glacier, Lago Argentino, Patagonia. Advancing glaciers and nearby simultaneously retreating glacier. Journal of Glaciology 2, 41–46.

OMM. (1981). Guía de Prácticas Hidrometeorológicas. Organización Meteorológica Mundial.

Paoli, C., Bolzicco, J., Cacik, P. (1991). Análisis de frecuencia de crecidas del Río Paraná. Santa Fe: Convenio Agua y Energía Eléctrica – Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (PNUD – ARG 85/003). Publicación FICH-UNL (serie SAT N° 02/91).

Paoli, C., Cacik, P., Bolzicco, J. (1995). Aplicación de Métodos Robustos para la determinación de máximas crecidas del Río Paraná. Revista Internacional Información Tecnológica, 6(6), 169-178. doi: ISSN 0716-8756

Raffo, J. M., Colqui, B. S., Madejski, M. E. (1953). Glaciar Moreno. Revista Meteoros. Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional.

Rignot, E., Rivera, A., Casassa, G. (2003). Contribution of the Patagonia Icefields of South America to sea level rise. Science, 302(5644), 434-437.

SAyDS. (2015). Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco

de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

Schaefer, M., Machguth, H., Falvey, M., Casassa, G., Rignot, E., (2015). Quantifying mass balance processes on the Southern Patagonia Icefield. *The Cryosphere*, 9(1), 25–35.

Schwikowski, M., Schläppi, M., Santibañez, P., Rivera, A., Cassasa, G. (2013). Net Accumulation Rates Derived From Ice Core Stable Isotope Records Of Pio Xi Glacier, Southern Patagonia Icefield. Obtenido de <https://doi.org/10.5194/tc-7-1635-2013>

Skvarca, P. (2002). Importancia de los Glaciares del Hielo Patagónico Sur para el desarrollo regional. XV Congreso Geológico Argentino. El Calafate.

Stuefer, M. (1999). Investigations on Mass Balance and Dynamics of Moreno Glacier based on Field Measurements and Satellite Imagery. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.

UNLP. (2015). Estudio del Funcionamiento del sistema Lago Argentino – Río Santa Cruz – Embalse Néstor Kirchner. Universidad Nacional de La Plata.

USACE. (2019). HEC-SSP. Statistical Software Package. User´s Manual. U.S. Army Corps of Engineers. Institute For Water Resources. Hydrologic Engineering Center.

UTE. (2016). TOPOGRAFÍA CURVAS ALTURA - VOLUMEN DE LAS REPRESAS (GE-A.CV-MT.TP-(OG-01-01)-P001-0). UTE CGGC ELING HCSA.

UTE. (2019). LA BARRANCOSA - EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS ESTRUCTURAS DE DESCARGA DE LA PRESA LA BARRANCOSA (LB-A.CV-IL.HD-(OG-00-00)-D001-0C). UTE CGGC ELING HCSA.

UTE. (2020). REPRESA CÓNDOR CLIFF - VARIANTE CON 4 VANOS DE LA OBRA DE DESCARGA - ALTERNATIVA 3-C – CIERRE AGUAS ARRIBA. (CC-A.CV-MT.HD-(OG-00-00)-D503-0B). UTE CGGC ELING HCSA.

Vath, B., Sergio, O.L., de Dios, M., Cacik, P. (2021). INFLUENCIA DE LOS EVENTOS DE ROTURA DEL GLACIAR PERITO MORENO EN LAS CRECIDAS DEL RÍO SANTA CRUZ, ARGENTINA. XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA.

Volpi, A.C., Grandi, A.L. (1940). El Ventisquero Moreno. *La Ingeniería*, Tomo XLIV, págs. 54-63. Buenos Aires.

Willis, M.J., Melkonian, A.K., Pritchard, M.E., Rivera, A. (2012). Ice loss from the Southern Patagonian Ice Field, South America, between 2000 and 2012. *Geophysical research letters*, 39(17). doi:10.1029/2012GL053136

Anexos

Anexo A

INFORME DE VISITA AL ÁREA DE ESTUDIO

Durante los días 22/02/21 al 26/02/21 se realizó una visita a la cuenca superior del río Santa Cruz con el objetivo de realizar un reconocimiento de la misma y observar características de las subcuencas que la componen, así como visualizar las estaciones de medición hidrológica e hidrometeorológicas principales existentes.

La Figura A.1 permite apreciar el recorrido realizado el día 23/02, partiendo de El Calafate por RP11, visitando:

- Estación hidrométrica río Centinela (RP11) de la SIPH (Figura A.2a.).
- Estación hidrométrica río Mitre (RP11) de la SIPH (Figura A.2.).
- Estación hidrométrica lago Rico de la SIPH.
- Parque Nacional Los Glaciares, zona de cierre lago Rico – canal de los Témpanos (Figura A.2c.)
- Parque Nacional Los Glaciares, estación meteorológica abandonada en la casa de guarda-parques (Figura A.2d.)
- RP60 (entre RP11 y RP15), área de posibles desbordes del lago Rico (FigurasA.2.e y FigurasA.2.f)
- RP15 desde RP60 a estancia Nibepo Aike (margen oriental del lago Rico)

En la Figura A.2 se presentan fotografías ilustrativas de los sitios visitados.

Los hechos destacables observados fueron:

- La presencia de nubosidad y precipitaciones en la cordillera, en algunos sectores durante varias horas, en ocasiones localizadas en un frente de unos 10 - 15 Km (estimado) y en



Figura A.1: Recorrido día 23/02/21

otras ocasiones abarcando todo el frente cordillerano. En estos casos no se observó caída de agua al pie de la misma (sobre los lagos) o fue insignificante.

- El incremento de vegetación en sentido Este – Oeste, en forma notable a partir de longitud $72^{\circ} 45'$ hacia el oeste, la cual se ve limitada en altura de acuerdo a los sectores con habitual presencia de nieve.
- El glaciar Perito Moreno no se encuentra bloqueando totalmente la descarga del lago Rico, pero se observa que limita la misma dejando el pasaje de caudal por un canal de unos pocos metros de ancho (10 - 15 m) con profundidad desconocida, ocasionando desniveles menores en dicho canal e incremento de velocidades. Personal guardaparque indicó que durante este ciclo hubo un cierre en el mes de diciembre que no se mantuvo.
- La presencia de nieve en el período de visita (prácticamente al final del verano) se limita a las zonas más elevadas de los cerros en la cabecera de cuenca oeste, y glaciares presentes.
- El guardaparque (Juan) informó que la única estación meteorológica operativa es la ubicada inmediatamente al sur del glaciar Perito Moreno, operada por Pedro Svarska.

La Figura A.3 permite apreciar el recorrido realizado el día 24/02, partiendo de El Calafate por RP11, luego RN40, visitando:

- Estación hidrométrica y meteorológica Charles Fuhr de la SIPH (Figuras A.4a., A.4b. y A.4c.)
- Río Santa Cruz en puente RN40 (Figura A.4d.)
- Estación hidrométrica y meteorológica La Leona de la SIPH (Figuras A.4e., A.4f. y A.4g.)
- Puente RN40 aguas abajo de la estación de mediciones La Leona (Figura A.4h.)



a. Estación hidrométrica río Centinela (SIPH)



b. Estación hidrométrica río Mitre RP11 (SIPH)



c. Sector de cierre lago Rico – canal de los Témpanos



d. Estación meteorológica inactiva PNG



e. Alcantarilla RP60 (a 1.6Km RP11)



f. Alcantarilla RP60 – zona posibles desbordes Lago Rico (vista hacia Lago Rico)

Figura A.2: Fotografías día 23/02/21

- Recorrida por margen izquierda del lago Argentino (norte) a través de la RP19, 25 Km (Figura A.4i.)
- Río La Leona en Puente La Leona RN40 (Figura A.4j.)
- Estación hidrométrica (Figura A.4k.) y meteorológica (Figura A.4l.) El Calafate de la SIPH

En la Figura A.4 se presentan fotografías ilustrativas de los sitios visitados.

Las estaciones de CHF y LLEO cuentan con instrumental tradicional, así como con sensores

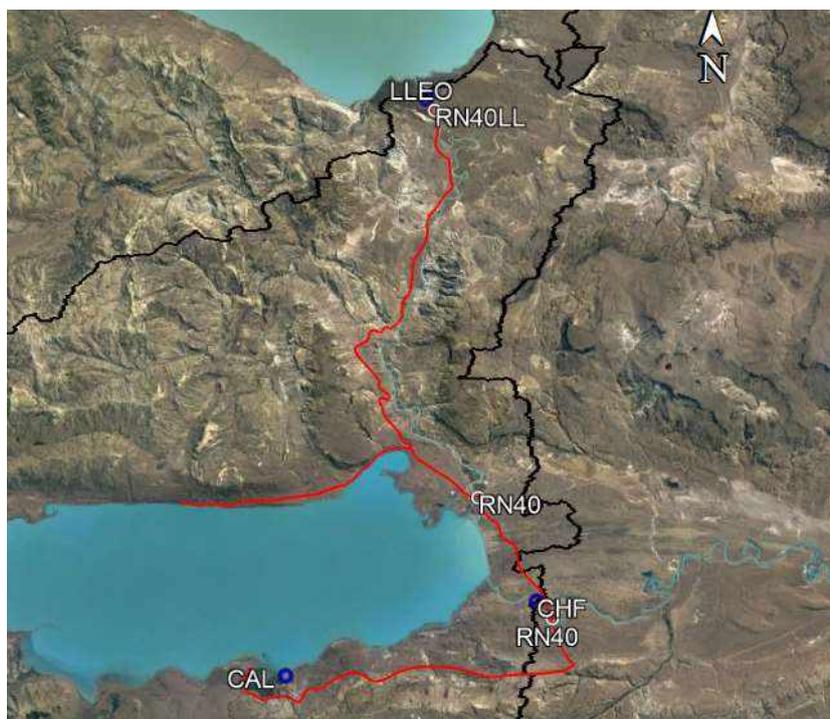


Figura A.3: Recorrido día 24/02/21

hidrométricos que permiten la transmisión del dato a distancia (actualmente en la web on line), por lo que se pudo constatar la correspondencia entre el valor de escala observado y el presentado en la web.

A partir de las relaciones $H - Q$ disponibles para una altura de escala observada en CHF de 3,95 m se estima un caudal de uno 1300 m³/s y en LLEO para una altura de escala de 2,45 m un caudal de aproximadamente 520 m³/s.

Se menciona que el río La Leona en puente de RN40 mostraba zona de desbordes aguas arriba y velocidades estimadas de manera expeditiva entre 1,0 a 1,2 m/s.

Cabe acotar que durante este día la estación meteorológica del SMN ubicada en el Aeropuerto de El Calafate indicó vientos entre 60 - 70 Km/h. A las 17 hs la estación de la SIPH en Calafate indicaba 35 Km/h.

El día 25/02 se realizó una visita de obra al sitio de la presa Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner, por RP11, RN40 y RP9 (Figura A.5). El único afluente de margen derecha con caudales presentes se observó en el arrollo Bote; todos los otros afluentes se encontraban sin flujo e incluso en muchos de ellos no existía alcantarillado en la ruta (aparentemente en vías de colocación), lo que refleja su baja relevancia en relación a los caudales del río Santa Cruz.



a. Estación hidrométrica Charles Fuhr – SIPH (escalas y antiguo cable para vagoneta)



b. Estación metereológica Charles Fuhr – SIPH (sensor hidrométrico y pluviómetro)



c. Estación de mediciones Charles Fuhr - SIPH (antigua vagoneta para mediciones)



d. Río Santa Cruz en puente RN40



e. Estación hidrométrica y meteorológica La Leona – SIPH (sensor hidrométrico y pluviómetro)



f. Estación de mediciones La Leona - SIPH (antigua vagoneta para mediciones)

Figura A.4: Fotografías día 24/02/21 (continua en la página siguiente)



g. Estación de mediciones La Leona - SIPH (antiguas escalas hidrométricas)



h. Puente RN40 aguas debajo de la estación de mediciones La Leona



i. Vista de margen norte del lago Argentino



j. Puente La Leona en RP40



k. Estación hidrométrica lago Argentino (SIPH – costanera El Calafate)



l. Estación meteorológica lago Argentino (SIPH – costanera El Calafate)

Figura A.4: Fotografías día 24/02/21



a. Talud húmedo y pantalla impermeabilización en construcción (margen izquierda)



b. Talud húmedo en construcción (margen izquierda)



c. Vista del río Santa Cruz (desde margen derecha) y terraplén de cierre en construcción

Figura A.5: Fotografías día 25/02/21

Anexo B

INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

La información hidrometeorológica de la República Argentina fue recibida directamente del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), y descargada de la página web del Sistema Nacional de Información Hídrica (<https://snih.hidricosargentina.gob.ar>) de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (anteriormente SSRH), así como también obtenida de publicaciones científicas (Stuefer, 1999; Minowa, 2017).

La información de estaciones ubicadas en la República de Chile se descargó vía internet de las páginas <https://dga.mop.gob.cl/servicioshidrometeorologicos/Paginas/default.aspx> y <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>, de la Dirección General de Aguas (DGA), para las regiones de Aisen de Gral. Carlos Ibañez, y Magallanes y Antártica Chilena, para estaciones ubicadas entre latitud 46° y 52°, más la estación Punta Arenas. Posteriormente, la información de precipitaciones y temperaturas diarias en sectores próximas a la cuenca fue completada y verificada a través del denominado explorador climático (<http://explorador.cr2.cl>) desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 de la Universidad de Chile (institución patrocinante).

B.1. Disponibilidad

En la Tabla B.1 se muestra el listado de las estaciones de mediciones hidrometeorológicas recopiladas para el presente estudio.

Estación nombre	Latitud	Longitud	Cota aprox. [m]	Variables	Propiedad
Charles Fuhr (CHF)	50°15' 08"	71°54' 28"	182	<i>P, T</i>	SIPH
La Leona (LLEO)	49°47' 50"	72° 3' 51"	250	<i>P, T</i>	SIPH
Parque Nac. Los Glaciares (PNG)	49°20' 36"	72°51' 39"	390	<i>P</i>	SIPH
Lago Argentino (CAL)	50°19' 12"	72°15' 39"	185	<i>P, T, E, Vto</i>	SIPH
Villa Mañihuales	46° 04' 48"	72° 06' 24"	150	<i>P, T</i>	DGA
Villa Cerro Castillo	46° 07' 16"	72° 09' 31"	345	<i>P</i>	DGA
Río Ibañez en Desembocadura	46° 16' 06"	71° 59' 19"	220	<i>P</i>	DGA
Puerto Ibañez	46° 17' 21"	71° 56' 01"	215	<i>P, T</i>	DGA
Bahía Murta	46° 27' 21"	72° 40' 21"	240	<i>P, T</i>	DGA
Río Exploradores en Nacimiento	46° 30' 08"	73° 09' 02"	150	<i>P</i>	DGA
Chile Chico	46° 32' 36"	71° 41' 58"	215	<i>P, T</i>	DGA
Lago General Carrera Fachinal	46° 32' 36"	72° 13' 35"	18	<i>P</i>	DGA
Laguna San Rafael	46° 38' 39"	73° 51' 27"	8	<i>P</i>	DGA
Lago General Carrera en Puerto Guadal	46° 50' 31"	72° 41' 50"	205	<i>P</i>	DGA
Puerto Guadal	46° 50' 33"	72° 42' 21"	210	<i>P, T</i>	DGA
Lago General Carrera en Desague	46° 50' 47"	72° 48' 12"	210	<i>P</i>	DGA
Estancia Valle Chacabuco	47° 07' 07"	72° 29' 38"	343	<i>P</i>	DGA
Río Baker en Angostura Chacabuco	47° 08' 28"	72° 43' 32"	160	<i>P, T</i>	DGA
Río Nef antes Junta Estero el Revalse	47° 08' 30"	73° 05' 23"	281	<i>P</i>	DGA
Lago Cachet 2 en Glaciar Colonia	47° 11' 56"	73° 14' 60"	427	<i>P</i>	DGA
Aeródromo Cochrane	47° 14' 39"	72° 34' 59"	200	<i>P, T</i>	DGA
Río Cochrane en Cochrane	47° 15' 05"	72° 33' 52"	140	<i>P</i>	DGA
Río Colonia en Nacimiento	47° 20' 35"	73° 07' 03"	146	<i>P</i>	DGA
Caleta Tortel	47° 47' 43"	73° 31' 55"	10	<i>P</i>	DGA
Río Pascua Ante Junta Río Quetru	48° 09' 32"	73° 05' 17"	20	<i>P, T</i>	DGA
Río Mayer Reten	48° 12' 30"	72° 19' 22"	450	<i>P, T</i>	DGA
Fiordo Jorge Montt	48° 15' 16"	73° 27' 35"	170	<i>P</i>	DGA
Villa O'Higgins	48° 28' 09"	72° 33' 32"	270	<i>P, T</i>	DGA
Lago O'Higgins en Villa O'Higgins	48° 28' 17"	72° 33' 37"	300	<i>P, T</i>	DGA
Candelario Mancilla	48° 52' 39"	72° 44' 22"	300	<i>P, T</i>	DGA
Glaciar O'Higgins en Punta Nahuelcar	48° 55' 50"	73° 08' 08"	5	<i>P</i>	DGA
Fiordos Témpanos	48° 50' 08"	74° 10' 59"	20	<i>P</i>	DGA

Tabla B.1: Listado estaciones de medición hidrometeorológica (continua en la página siguiente).

Estación nombre	Latitud	Longitud	Cota aprox. [m]	Variables	Propiedad
Rio Punta Eva en Puerto Eden	49° 06' 37"	74° 24' 43"	10	<i>P</i>	DGA
Puerto Eden	49° 07' 26"	74° 24' 25"	10	<i>P, T</i>	DGA
Fiordo Andrew	50° 22' 40"	73° 33' 37"	10	<i>P</i>	DGA
Lago Dickson	50° 49' 26"	73° 06' 45"	200	<i>P</i>	DGA
Lago Paine	50° 50' 20"	72° 49' 54"	446	<i>P</i>	DGA
Laguna Azul	50° 52' 44"	72° 43' 58"	240	<i>P, T</i>	DGA
Cerro Guido	50° 56' 28"	72° 27' 20"	230	<i>P, T</i>	DGA
Fiordo Amalia	50° 57' 40"	73° 46' 04"	30	<i>P</i>	DGA
Rio Paine en Parque Nacional 2	50° 57' 47"	72° 47' 31"	90	<i>P</i>	DGA
Rio Las Chinas en Cerro Guido	51° 01' 00"	72° 30' 18"	75	<i>P, T</i>	DGA
Lago Sarmiento	51° 02' 46"	72° 53' 29"	110	<i>P</i>	DGA
Lago Pehoe	51° 04' 26"	73° 05' 34"	40	<i>P</i>	DGA
Lago Grey	51° 06' 43"	73° 06' 44"	50	<i>P</i>	DGA
Glaciar Tyndall en Campamento Zapata	51° 07' 01"	73° 16' 57"	345	<i>P</i>	DGA
Torres del Paine	51° 10' 29"	72° 57' 14"	25	<i>P, T</i>	DGA
Estancia Rio Paine	51° 14' 10"	72° 54' 08"	150	<i>P</i>	DGA
Cerro Castillo	51° 15' 20"	72° 20' 42"	130	<i>P, T</i>	DGA
Rio Tindall en Desembocadura	51° 15' 38"	73° 09' 33"	18	<i>P</i>	DGA
Rio Rincon en Ruta Y-290	51° 18' 54"	72° 49' 51"	36	<i>P</i>	DGA
Rio Serrano en Desembocadura	51° 20' 13"	73° 06' 44"	25	<i>P</i>	DGA
Glaciar Balmaceda	51° 25' 15"	73° 05' 60"	5	<i>P</i>	DGA
Casas Viejas	51° 42' 01"	72° 19' 34"	230	<i>P</i>	DGA
Puerto Natales	51° 44' 21"	72° 27' 34"	45	<i>P, T</i>	DGA
Rio Talcahuano en Peninsula Antonio Varas	51° 45' 02"	72° 54' 10"	14	<i>P</i>	DGA
Rio Tranquilo en Ruta N°9	51° 50' 07"	72° 09' 39"	30	<i>P</i>	DGA
Punta Arenas	53° 07' 48"	70° 53' 15"	5	<i>P, T</i>	DGA
Estación Meteorológica Glaciar Perito Moreno (EMGPM)	50° 29' 22"	73° 02' 48" (aprox)	200 (aprox)	<i>T, P, HR, Wd</i>	
Santa Cruz Aero	50° 1' S	68° 34' O	111	<i>P, T, T_r, HR, W_o, H_e</i>	SMN
Lago Argentino Aero	50° 20' S	72° 18' O	220	<i>P, T, T_r, HR, W_o, H_e</i>	SMN
El Calafate Aero	50° 16' S	72° 3' O	204	<i>P, T, T_r, HR, W_o, H_e</i>	SMN
Esquel Aero	42° 56' S	71° 9' O	797	<i>P, T, T_r, HR, W_o, H_e</i>	SMN
Gobernador Gregores Aero	48° 47' S	70° 10' O	358	<i>P, T, T_r, HR, W_o, H_e</i>	SMN
Perito Moreno Aero	46° 31' S	71° 1' O	429	<i>P, T, T_r, HR, W_o, H_e</i>	SMN
San Julián Aero	49° 19' S	67° 47' O	62	<i>P, T, T_r, HR, W_o, H_e</i>	SMN
Río Gallegos Aero	51° 37' S	69° 17' O	19	<i>P, T, T_r, HR, W_o, H_e</i>	SMN

Tabla B.1: Listado estaciones de medición hidrometeorológica (continua en la página siguiente).

Estación nombre	Latitud	Longitud	Cota aprox. [m]	Variables	Propiedad
Aonikenk (glaciar de los Tres)	49° 16' 41"	72° 59' 41"	1200	P, T, N, H, W, R	IANIGLIA
Epulef (glaciar Milanesio)	49° 03' 08"	72° 57' 02"	900	P, T, N, H, W	IANIGLIA
Río Toro inferior (estacionamiento)	49° 06' 28"	72° 55' 16"	465	T	IANIGLIA
Col del Picante (Paso Inferior)	49° 16' 07"	73° 00' 04"	1620	T	IANIGLIA
Punta Velluda	49° 16' 11"	73° 00' 51"	1905	T, H	IANIGLIA
Madsen	49° 16' 24"	72° 59' 49"	1405	T	IANIGLIA
Torre	49° 19' 41"	73° 00' 56"	870	T	IANIGLIA
Seccional Viedma APN	49° 20' 17"	72° 52' 56"	400	T, W	IANIGLIA
Pliegue Tumbado inferior	49° 21' 29"	72° 54' 14"	780	T	IANIGLIA
Pliegue Tumbado superior	49° 22' 45"	72° 56' 11"	1070	T, H	IANIGLIA
Pliegue Tumbado	49° 22' 45"	72° 56' 12"	1070	T, N	IANIGLIA
Valle Túnel	49° 23' 06"	73° 00' 04"	615	T, H	IANIGLIA

E : evaporación; H : heliofanía efectiva; H : humedad relativa; N : nieve; P : precipitación; P : presión atmosférica; R : radiación; T : temperatura; T_p : temperatura del punto de rocío; W : viento.

Observaciones: El SMN informó que la estación El Calafate Aero se inaugura en diciembre de 2000 en reemplazo de la estación Lago Argentino

Tabla B.1: Listado estaciones de medición hidrometeorológica.

B.1.1. Precipitaciones

Se presenta la disponibilidad de información de variables hidrometeorológicas, utilizándose un paso de tiempo mensual para su representación. En primer lugar, se presenta la disponibilidad de precipitaciones en estaciones argentinas con más de 5 años de registros (Figura B.1), y luego la recopilada en Chile (Figura B.2 a Figura B.5)

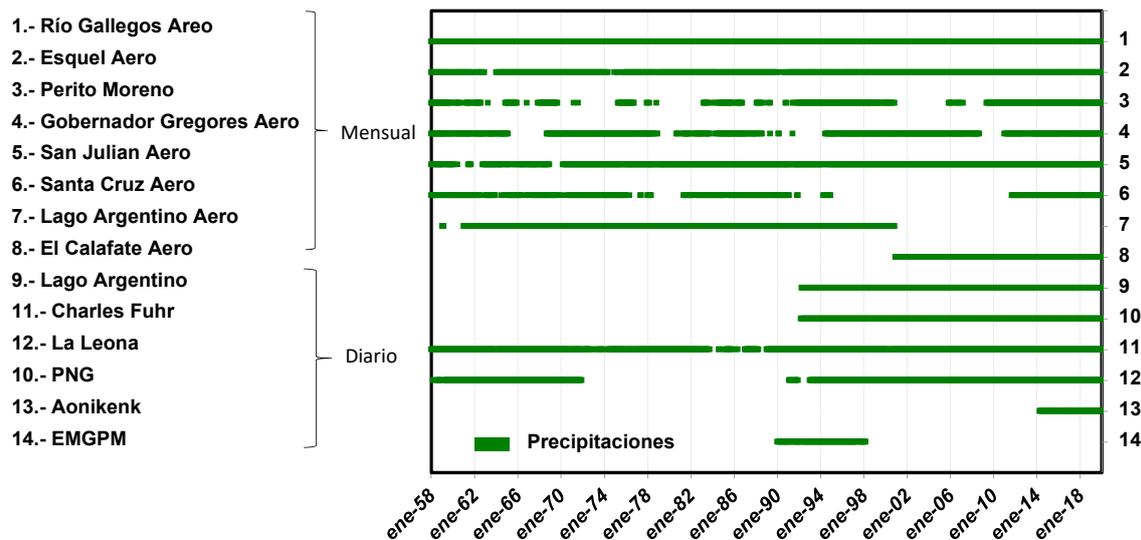


Figura B.1: Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Argentina). Estaciones con más de 5 años de registros

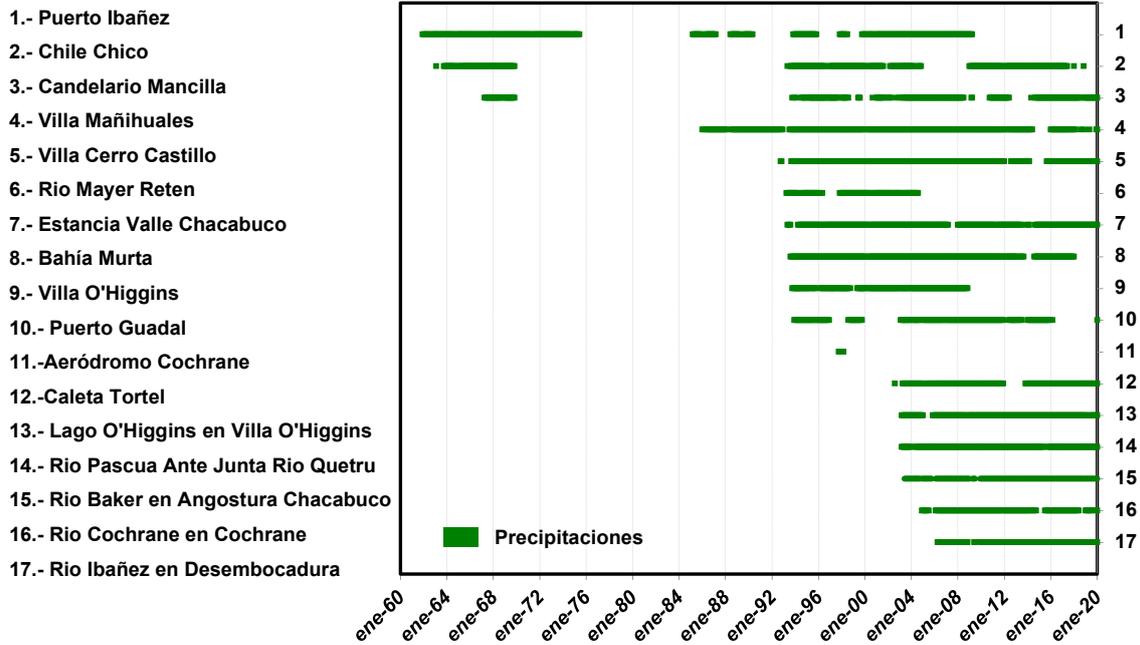


Figura B.2: Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Carlos Ibañez – Chile DGA) (1)

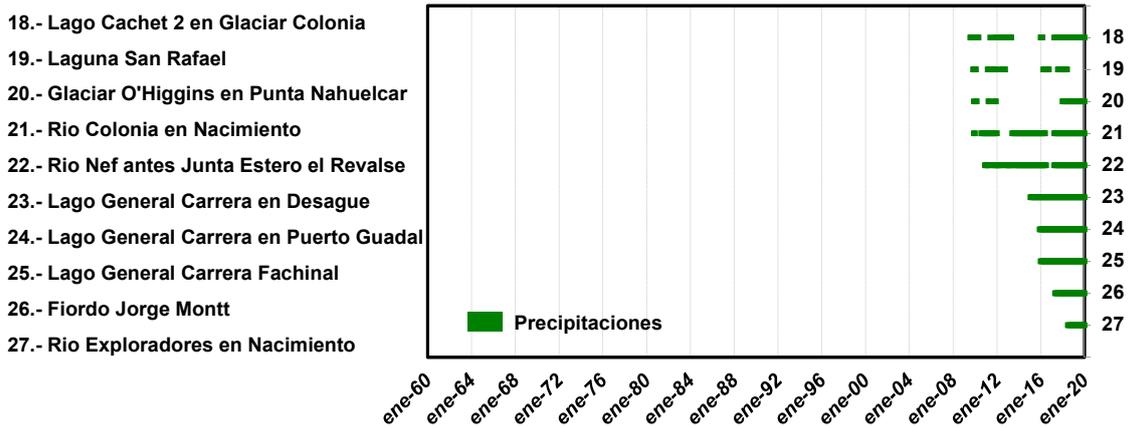


Figura B.3: Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Carlos Ibañez – Chile DGA) (2)

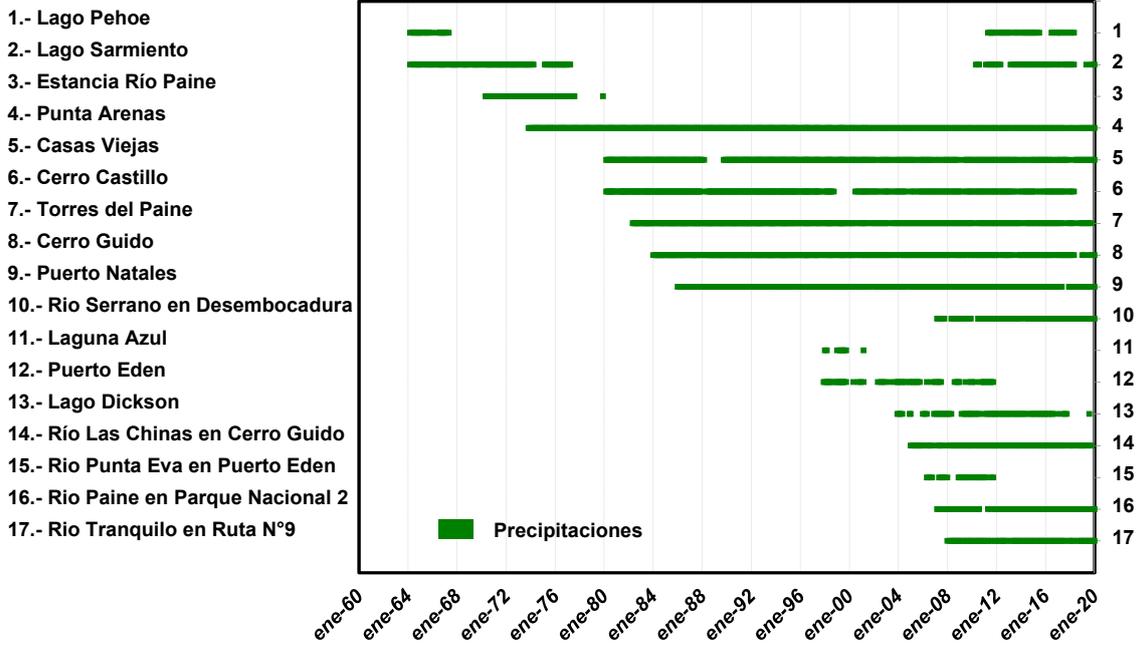


Figura B.4: Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Magallanes – Chile DGA) (1)

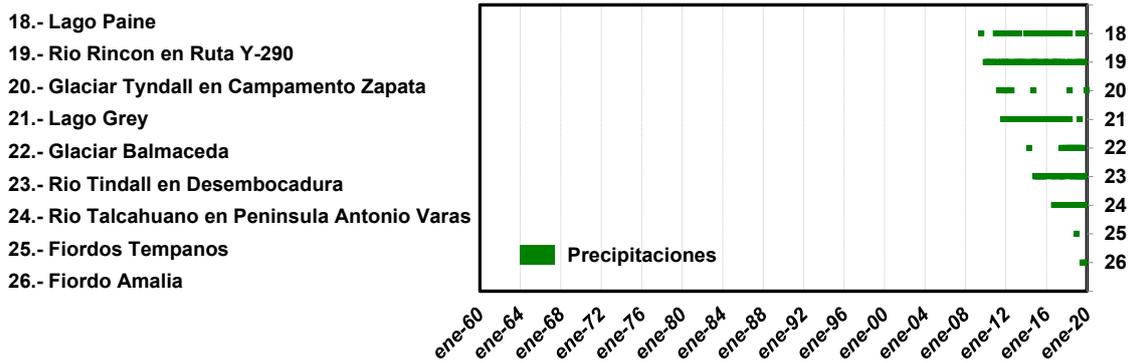


Figura B.5: Disponibilidad temporal de información de precipitaciones (Magallanes – Chile DGA) (2)

B.1.2. Temperaturas medias (Figura B.6 a Figura B.8)

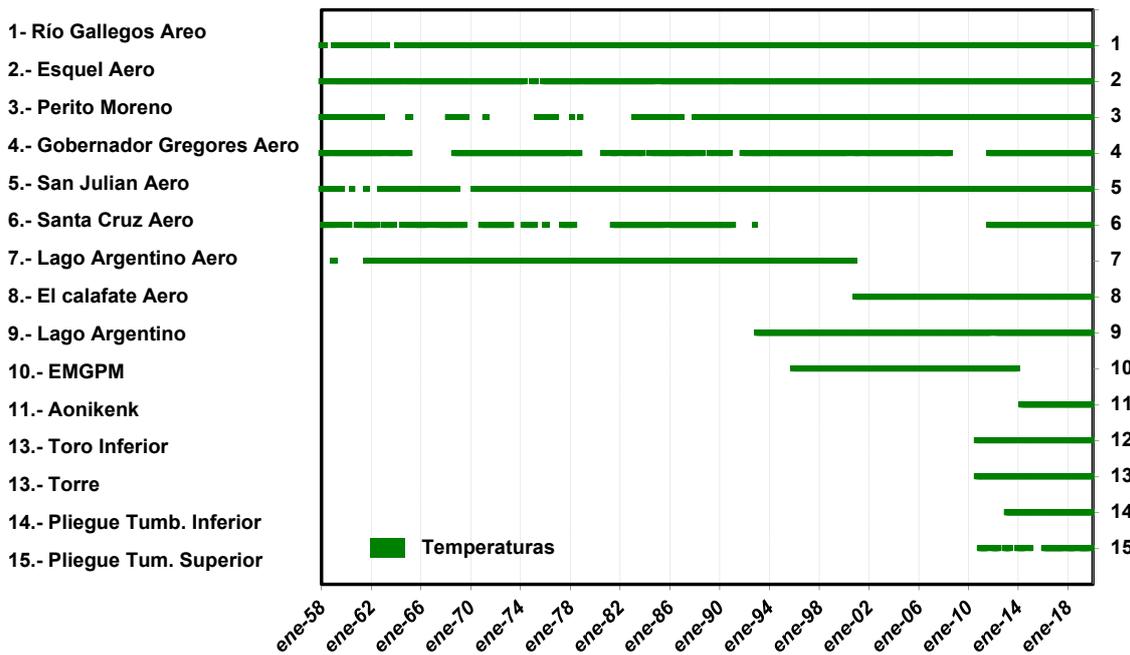


Figura B.6: Disponibilidad de información de temperaturas (Argentina). Series de mayor longitud.

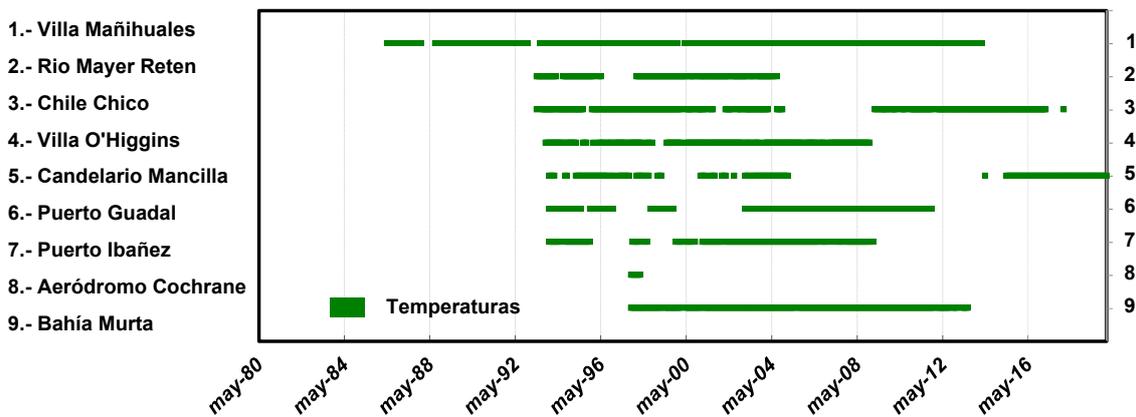


Figura B.7: Disponibilidad temporal de información de temperaturas (Carlos Ibañez – Chile DGA)
 (*) Estaciones con menos de 1 año de información no fueron incluidas

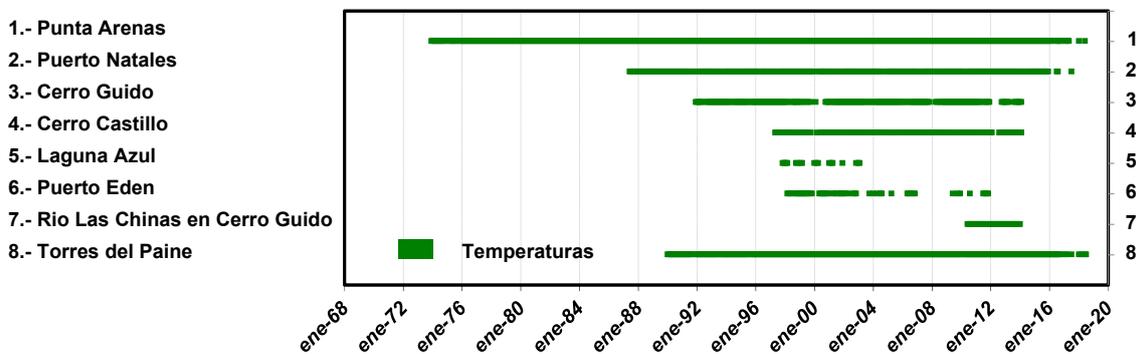


Figura B.8: Disponibilidad temporal de información de temperaturas (Magallanes – Chile DGA)

B.1.3. Velocidad de viento (Figura B.9)

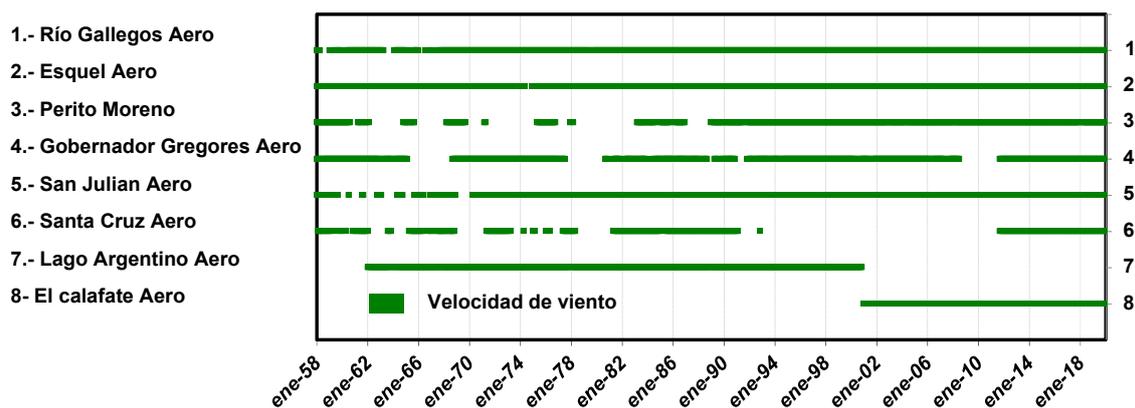


Figura B.9: Disponibilidad de información de velocidad de viento (SMN - Argentina).

Asimismo, se dispone de información de velocidad de viento a nivel diario en el período 26/03/93 a 29/02/2008 y con 3 lecturas diarias en el período 29/02/2008 a 31/07/2020 (con algunos datos faltantes) de la estación meteorológica Lago Argentino (El Calafate) de la SIPH.

B.1.4. Humedad relativa (Figura B.10)

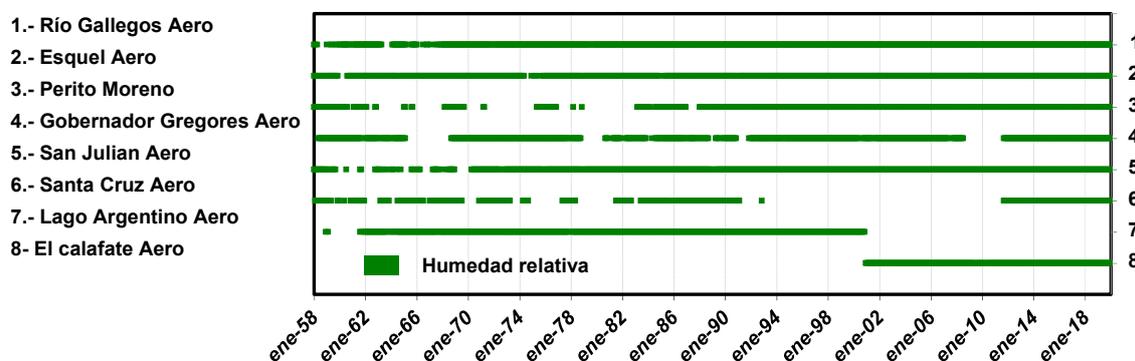


Figura B.10: Disponibilidad de información de humedad relativa (SMN - Argentina).

B.1.5. Heliofanía efectiva (Figura B.11)

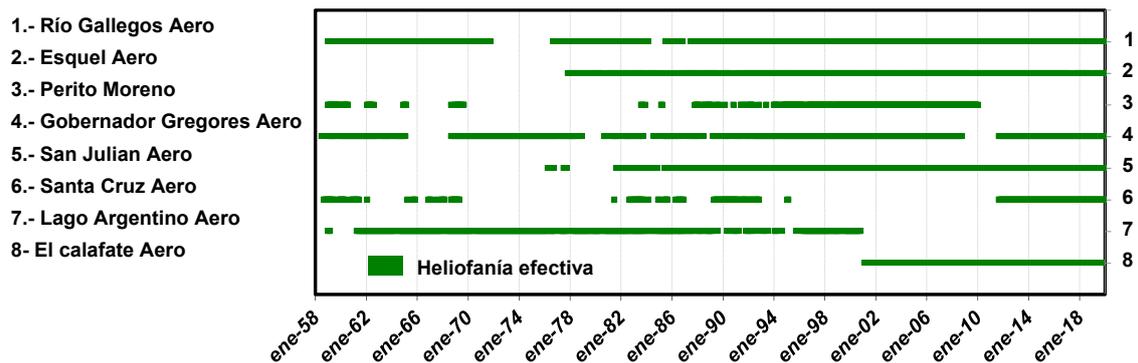


Figura B.11: Disponibilidad de información de heliofanía efectiva (SMN - Argentina).

B.1.6. Evaporación de tanque y temperatura del punto de rocío (Figura B.12 y Figura B.13)

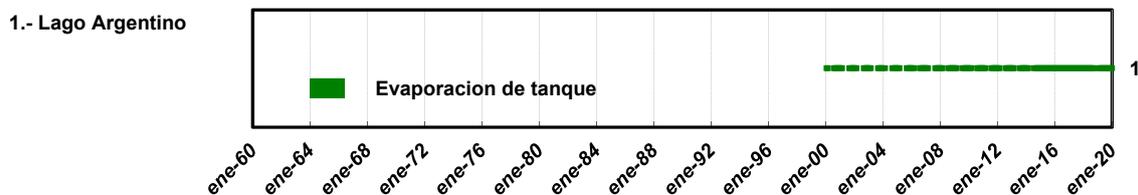


Figura B.12: Disponibilidad de información de evaporación de tanque (SIPH - Argentina).

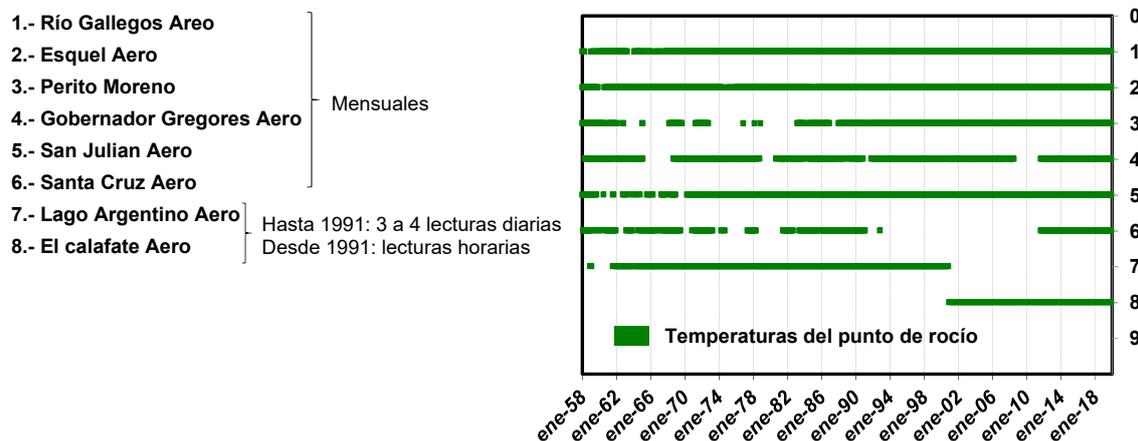


Figura B.13: Disponibilidad de información de temperatura punto rocío (SMN- Argentina).

Además, se descargaron datos de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos, de las estaciones de Villa O´Higgins (Agosto 2013 – octubre 2020) y Teniente Gallardo (Diciembre 2011 – octubre 2020). <https://climatologia.me-teochile.gob.cl/application/informacion>. El paso de tiempo es horario pero existe gran cantidad de datos faltantes.

B.1.7. Caudales y niveles en lagos (Figura B.14)

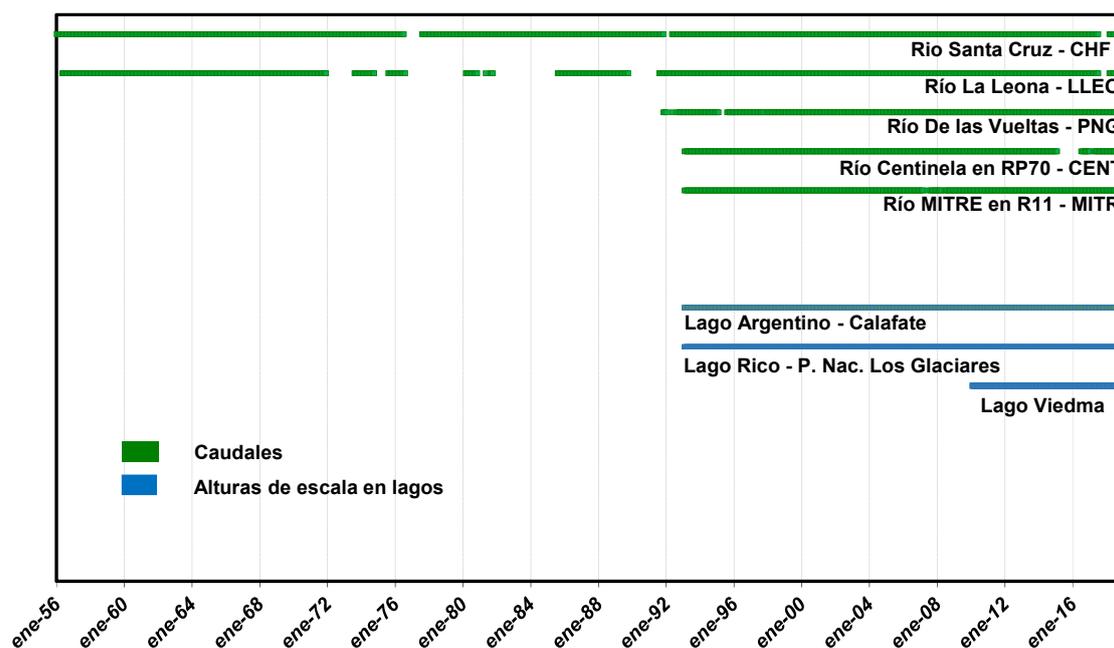


Figura B.14: Disponibilidad de información de caudales y niveles hidrométricos en lagos (SIPH).

B.2. Consistencia y completamiento

Toda serie de observaciones hidrometeorológicas, además de las fluctuaciones debido a las variaciones naturales de la magnitud que se mide, puede contener “errores de medición” los cuales se dividen en dos clases principales:

- al azar o puntuales,
- sistemáticos

Los primeros responden a causas fortuitas que provocan alejamientos del valor verdadero, se presentan en forma aislada y pueden ser de diferente signo. Se supone que en una gran masa de datos los mismos se distribuyen en forma aproximadamente simétrica alrededor del valor verdadero y al calcular promedios, los errores son compensados y su influencia en dicho promedio no es relevante.

Por otro lado, los errores sistemáticos son aquellos que hacen que los valores observados se aparten de los verdaderos durante cierto período de tiempo debido a una causa que actúa permanentemente durante dicho período. El error resulta de un mismo signo, positivo o negativo, hasta que se corrija o se elimine la fuente de error.

El primer paso en el análisis de consistencia se conoce como “depuración primaria”, el cual se efectuó sobre los datos originales, es decir con los datos tal como fueron observados o registrados. Este hecho permitió detectar o indicar valores sospechosos (identificar errores gruesos o

la ausencia de observación) al comparar registros de estaciones vecinas en las mismas fechas, teniendo siempre en cuenta las características del fenómeno que los origina.

El segundo paso consistió en la utilización del método de dobles masa o dobles acumulaciones, el cual básicamente se utiliza para comparar series de valores que naturalmente son proporcionales. Se utilizaron para ello acumulaciones anuales y comparaciones entre las estaciones de medición, así como con respecto a una Estación Tipo. La Estación Tipo puede constituirse con los datos promedio, de la variable en estudio, de varias estaciones próximas, donde se supone que cualquier apartamiento del alineamiento (proporcionalidad) corresponde a las estaciones individuales; así como también la Estación Tipo o de comparación la puede constituir una estación meteorológica de alta categoría (ej. estaciones meteorológicas en aeropuertos del SMN).

Los controles de calidad mencionados se realizaron en forma previa a la utilización de las estaciones preseleccionadas, realizando graficación de las series temporales (considerando estaciones próximas), análisis de dobles acumulaciones y consistencias regionales, a nivel anual y mensual. Teniendo en cuenta la ubicación de las estaciones se realizaron análisis por grupos.

A continuación, se presentan ejemplos de análisis de dobles acumulaciones de precipitaciones anuales, con sus datos originales.

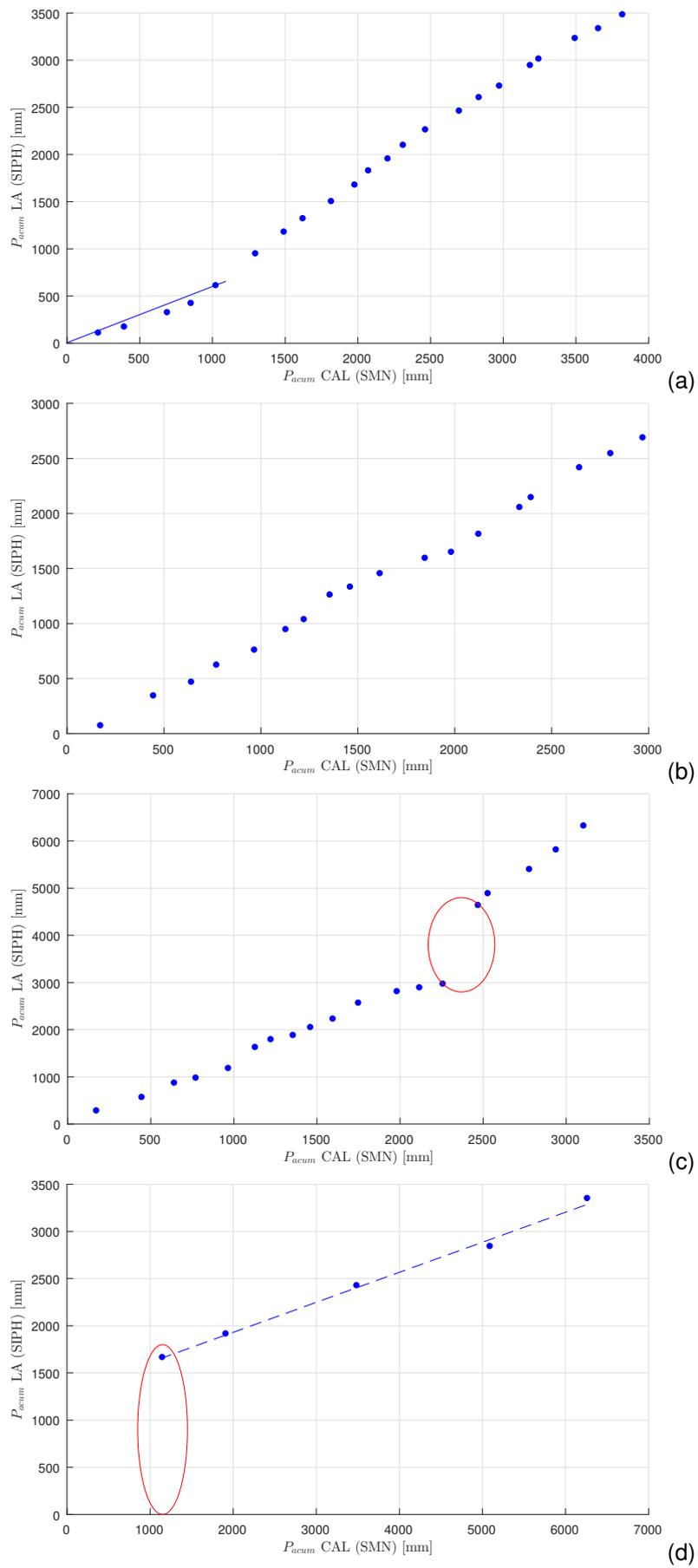


Figura B.15: Ejemplos de análisis de dobles acumulaciones de precipitaciones anuales, con sus datos originales

La primera comparación presentada (Figura B.15a) corresponde a la estación Lago Argentino (SIPH) versus las mediciones completas del SMN en Lago Argentino y El Calafate Aero (asumiendo continuidad de registros) en el período total coincidente de datos 1993 – 2019. Se observa un quiebre marcado de pendiente o proporcionalidad entre las mediciones correspondiente al año 2001, indicando una diferencia sistemática en las mediciones. Ello es atribuible al cambio de pluviómetro del SMN a la actual posición del aeropuerto El Calafate.

La Figura B.15b presenta las acumulaciones de precipitaciones anuales de la estación Charles Fuhr (SIPH) y Aeropuerto El Calafate (SMN), en el período 2001 – 2019. Pese a que las estaciones se encuentran próximas (11 Km), se observan períodos con falta de proporcionalidad entre las mismas a lo largo del tiempo. Teniendo en cuenta que la estación del SMN es de mayor categoría, y la proximidad entre las estaciones, la estación CHF no será considerada.

La Figura B.15c presenta una comparación entre las estaciones Parque Nacional Los Glaciares (SIPH) – El Calafate (SMN), en el período 2001 – 2019. Pese a estar alejadas estas estaciones (120 Km), se realiza este análisis que permite visualizar un error puntual en PNG en el año 2015. Este mismo error se observa en la Figura B.15d al comparar PNG (SIPH) con Aonikenk (IANIGLA).

En general, las principales inconsistencias detectadas corresponden a períodos indicados con valor 0 mm cuando en realidad debería haberse indicado dato faltante, así como también la existencia de valores mal anotados o transcritos. Algunos casos, relacionando la información con estaciones vecinas, pudieron ser detectados y corregidos o rellenados.

Luego de este primer análisis, los datos de las estaciones seleccionadas fueron completados cuando fue necesario con:

- nueva búsqueda de información (ej. explorador climático, <http://explorador.cr2.cl> - Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 - de la Universidad de Chile).
- estaciones vecinas más próximas (en función de la disponibilidad y ubicación de estaciones se utilizaron 1 a 3 estaciones vecinas para el rellenamiento de información)

De esta manera se logró conformar series de precipitaciones diarias aptas para la modelación hidrológica. Finalmente, de manera de verificar que las tareas realizadas de rellenamiento y/o completamiento o combinaciones de series no introdujeran inconsistencias en las series de trabajo, se realizó un nuevo análisis de dobles acumulaciones. Las Figura B.16 y Figura B.17 presentan resultados de este análisis para estaciones más próximas a la zona cordillerana, a partir del año 2000, utilizando los datos de precipitación anual acumuladas de cada estación respecto al acumulado de la Estación Tipo, obtenida como el promedio de las estaciones involucradas en el análisis. Se observa un buen alineamiento general de los puntos. En estas figuras, en la medida que los puntos de cada estación presentan mayor pendiente, indica mayor precipitación media en la estación.

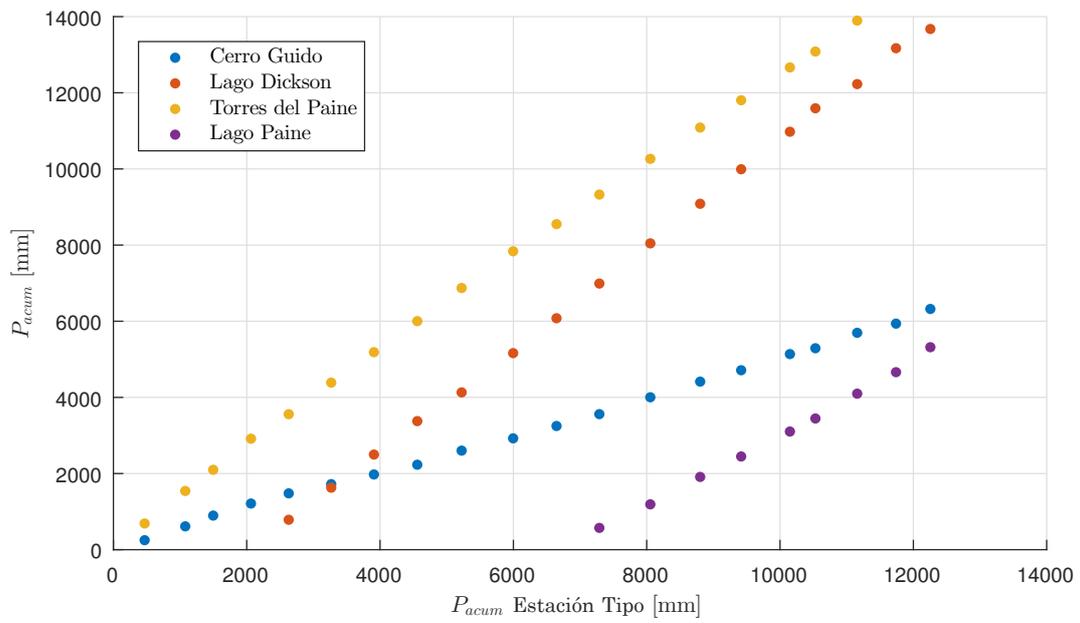


Figura B.16: Análisis de dobles acumulaciones – series a partir del año 2000 zona Cordillera Sur.

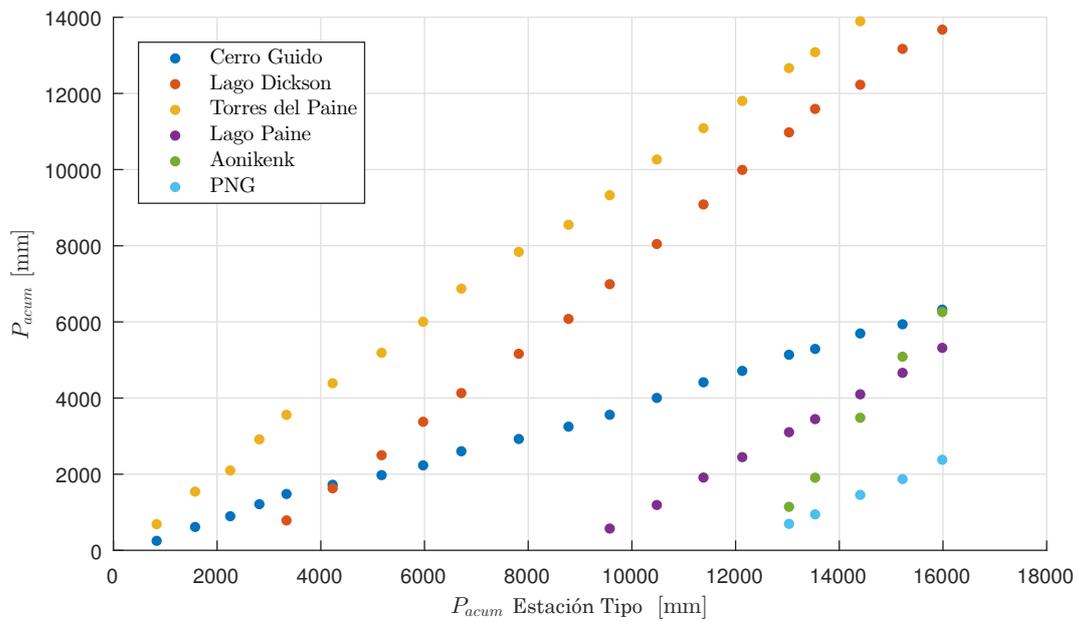


Figura B.17: Análisis de dobles acumulaciones – zona Cordillera Sur y Norte

Finalmente, se acompaña la Tabla B.2 con las precipitaciones mensuales y el acumulado anual en las estaciones utilizadas.

	Serie	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	PREC. ANUAL
La Leona	1993 - 2019	9,5	10,7	7,6	6,3	8,6	9,9	12,6	13,7	10,4	11,4	8,4	14,5	124
Lago Argentino	1993 - 2019	12,8	6,9	8,3	9,2	12,9	19,2	18,0	19,2	12,6	11,2	14,2	0,0	144
PNG	1992 - 2019	12,4	20,9	17,4	13,6	15,5	21,8	38,7	34,4	32,3	28,1	26,6	26,9	289
Cerro Guido	1990 - 2019	17,4	25,8	20,8	22,1	17,0	23,5	36,5	37,2	27,9	20,8	18,8	23,6	291
Lago Dickson	2004 - 2019	43,9	71,5	63,8	67,6	75,0	79,2	107,0	107,2	71,9	72,8	42,0	53,1	855
Torres del Paine	1990 - 2019	50,3	70,2	53,7	59,4	55,1	53,9	82,6	91,1	73,0	54,5	56,2	59,0	759
Lago Paine	2011 - 2019	30,1	37,1	43,7	51,8	40,0	58,0	61,4	68,0	51,7	54,2	42,4	52,6	591
CM - VO (#)	1994 - 2019	45,8	60,9	60,2	58,8	55,2	50,6	59,7	87,1	99,8	77,2	67,7	66,6	790
El Calafate Aero	2001 - 2019	12,0	13,7	6,5	9,6	6,6	14,6	17,1	20,5	19,8	14,9	13,5	14,6	163
Aonikenk	2014 - 2019	75,5	42,9	107,4	147,8	113,5	88,9	133,0	162,8	117,9	63,0	68,7	120,7	1242

CM - VO es una combinación de datos entre las estaciones Candelario Mancilla (DGA) y Villa O'higgins (DGA).

Tabla B.2: Precipitaciones medias mensuales y anuales [mm]

En relación a las temperaturas, el análisis de calidad de los datos mostró un mejor comportamiento general respecto al de precipitaciones, aún en el caso de tener mayor distancia entre estaciones. Inicialmente se trabajó con valores mensuales, y luego en función de la longitud de datos disponibles y ubicación de las estaciones se seleccionaron estaciones para utilizar en estudios posteriores, recopilando esta información a paso de tiempo diario. Las estaciones finalmente utilizadas fueron las de Candelario Mancilla - Villa O'Higgins, al norte de la cuenca, El Calafate Aero (SMN) y Lago Argentino (SIPH) ubicadas en la zona centro-este de la cuenca, la estación meteorológica Glaciar Perito Moreno (ENGPM) y las estaciones de IANIGLA de mayor longitud (Aonikenk, Torre, Toro Inferior, Pliegue Tumbado inferior).

De la estación ENGPM se dispuso de información hasta el año 2014, por lo que los mismos fueron extendidos en función de correlaciones con temperaturas observadas por el SMN en El Calafate (coeficiente de correlación $r=0,98$).

B.3. Cantidad de días con precipitaciones. Estaciones seleccionadas (Tabla B.3)

	EL CALAFATE AERO			TORRES DEL PAINE			LAGO DICKSON		
	> 0.1 mm	> 20 mm	> 40 mm	> 0.1 mm	> 20 mm	> 40 mm	> 0.1 mm	> 20 mm	> 40 mm
2004-05	53	0	0	115	7	2	157	7	2
2005-06	41	1	0	119	7	0	138	10	0
2006-07	41	0	0	162	4	0	191	6	1
2007-08	31	0	0	138	6	0	180	5	0
2008-09	47	0	0	157	8	1	205	8	0
2009-10	25	0	0	140	3	0	184	9	1
2010-11	39	0	0	160	8	0	192	11	0
2011-12	38	2	1	181	8	0	193	5	1
2012-13	51	0	0	189	3	0	187	7	0
2013-14	45	0	0	191	2	0	185	2	0
2014-15	54	1	0	209	9	0	200	8	1
2015-16	29	1	0	173	2	0	136	4	0
2016-17	42	2	0	198	2	0	166	5	2
2017-18	45	1	1	194	5	1	123	19	11
2018-19	33	2	0						
PROMEDIO	41	0,7	0,1	166	5,3	0,3	174	7,6	1,4
Pmedia	156			792			903		

- Mayor cantidad de días con precipitaciones hacia el oeste
- Gran cantidad de días con bajos montos de precipitación

Tabla B.3: Cantidad de días con precipitaciones. Estaciones seleccionadas

B.4. Análisis de frecuencia precipitaciones y temperaturas

B.4.1. Precipitaciones máximas cuatrimestre enero - abril

(a) Procedimiento

- Se realiza análisis de frecuencia de precipitaciones en estaciones individuales, obteniendo precipitaciones máximas para diferentes recurrencias;
- Se obtiene un factor en cada estación entre precipitaciones de distintas recurrencias y la precipitación media en la misma,

$$K_{iT} = \frac{P_{ijT}}{PM_{ij}} \quad (\text{B.1})$$

Siendo i : estación de medición de precipitaciones, j : mes o período utilizado, T : recurrencia; PM_{ij} es la precipitación media en la estación i en el período j ,

- Se determina un factor medio regional (para cada región de trabajo y recurrencia): K_{medT}
- Se obtiene la precipitación máxima en cada estación en función del factor medio regional

para cada recurrencia y la precipitación media de cada estación:

$$P_{max_{ijT}} = K med_{jT} PM_{ij} \quad (B.2)$$

(b) Estadísticos principales (Tabla B.4 a Tabla B.7. Figura B.18)

	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
N	19	27	28	39	29	30	16	9	26
X [mm]	58,8	59,2	110,6	44,5	284,6	114,3	368,3	227,4	252,6
S [mm]	32,0	35,0	78,3	26,1	76,3	42,1	161,9	75,3	93,9
℄	0,52	0,83	0,98	0,79	0,32	0,12	1,21	-0,27	-0,03
℅	0,53	0,59	0,71	0,59	0,27	0,37	0,44	0,33	0,37

N: cantidad de años con información disponible

X: media

S: desvío estándar

℄ : coeficiente de asimetría

℅ : coeficiente de variación

Tabla B.4: Precipitaciones enero - abril. Estadísticos principales

1 - F	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	284,6	304,6	653,8	226,7	825,6	417,7	1436,4	784,8	925,1
0,0002	266,5	284,9	610,2	212	782,2	393,4	1350,7	740	871,1
0,001	224,4	239,1	508,9	178,1	681,3	336,8	1151,5	636,1	745,7
0,002	206,3	219,4	465,2	163,4	637,8	312,4	1065,7	591,3	691,7
0,01	164,1	173,5	363,7	129,4	536,7	255,7	866,1	487,1	566
0,02	145,8	153,7	319,8	114,6	492,9	231,1	779,7	442	511,6
0,04	127,4	133,7	275,5	99,8	448,8	206,4	692,7	396,6	456,8
0,05	121,4	127,2	261,2	95	434,5	198,4	664,4	381,9	439
0,1	102,6	106,7	215,9	79,8	389,4	173,1	575,4	335,4	382,9
0,2	83	85,4	168,7	63,9	342,4	146,7	482,5	287	324,5
0,5	53,3	53,2	97,4	40	271,4	106,9	342,3	213,8	236,2

Tabla B.5: Precipitaciones máximas enero – abril según análisis individual estación. Distribución GUMBEL (MPP) [mm]

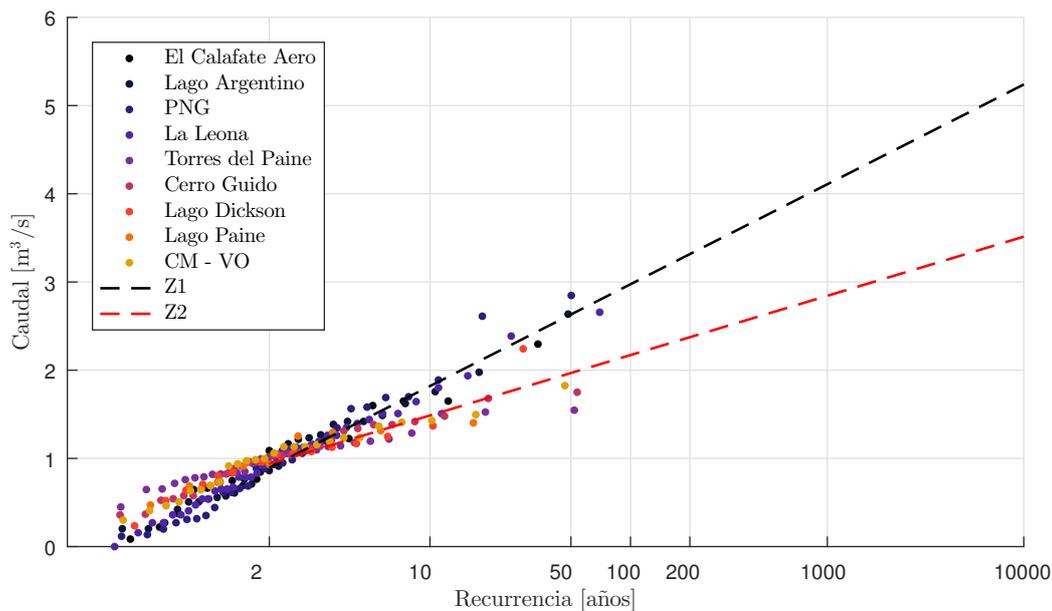


Figura B.18: Precipitaciones mensuales adimensionales y vector regional

$1 - F$	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO	Medio Z1	Medio Z2
0,0001	4,84	5,15	5,92	5,05	2,90	3,66	3,90	3,45	3,66	5,2	3,51
0,0002	4,53	4,82	5,53	4,72	2,75	3,44	3,67	3,25	3,45	4,9	3,31
0,001	3,81	4,04	4,61	3,97	2,39	2,95	3,13	2,80	2,95	4,1	2,84
0,002	3,51	3,71	4,21	3,64	2,24	2,73	2,89	2,60	2,74	3,8	2,64
0,01	2,79	2,93	3,29	2,88	1,89	2,24	2,35	2,14	2,24	3,0	2,17
0,02	2,48	2,60	2,90	2,55	1,73	2,02	2,12	1,94	2,03	2,6	1,97
0,04	2,17	2,26	2,50	2,22	1,58	1,81	1,88	1,74	1,81	2,3	1,76
0,05	2,06	2,15	2,37	2,12	1,53	1,74	1,80	1,68	1,74	2,2	1,70
0,1	1,74	1,80	1,96	1,78	1,37	1,51	1,56	1,48	1,52	1,8	1,49
0,2	1,41	1,44	1,53	1,42	1,20	1,28	1,31	1,26	1,28	1,5	1,27
0,5	0,91	0,90	0,88	0,89	0,95	0,94	0,93	0,94	0,94	0,9	0,94

$P_{max T}$: precipitación enero a abril para recurrencia T en cada estación

P_{med} : precipitación media meses de enero a abril = \overline{P}_{ij}

Z : factor medio regional (para cada región de trabajo y para cada recurrencia) = \overline{Z}_{ij}

Tabla B.6: Relación $P_{max T}/P_{med}$

1 - F	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	308	310	578	235	1000	402	1294	799	888
0,0002	288	290	541	220	943	378	1220	753	837
0,001	242	243	454	184	809	325	1047	647	718
0,002	222	223	416	169	752	302	973	601	667
0,01	175	176	328	134	618	248	800	494	549
0,02	155	156	291	118	560	225	725	447	497
0,04	134	135	252	103	502	201	649	401	445
0,05	128	129	240	98	483	194	625	386	429
0,1	107	108	201	82	423	170	548	338	376
0,2	85	86	160	65	361	145	467	288	321
0,5	53	53	99	40	267	107	346	213	237

Tabla B.7: Precipitaciones máximas enero - abril según análisis regional

B.4.2. Precipitaciones máximas mensuales (meses de enero, febrero, marzo y abril)

(a) Estadísticos principales (Tabla B.8 a Tabla B.11)

	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
<i>N</i>	40	19	27	27	39	29	30	16	9	26
<i>X</i> [mm]	10,4	6,7	9,1	15,6	9,9	55,5	17,0	74,8	40,0	55,2
<i>S</i> [mm]	11,82	6,9	11,2	18,3	11,4	30,7	13,5	43,3	22,7	32,2
<i>δ</i>	2,15	0,87	2,08	1,58	1,52	0,79	1,24	0,61	0,92	0,59
<i>ℓ</i>	1,13	1,03	1,22	1,18	1,15	0,55	0,79	0,58	0,57	0,58

Tabla B.8: Precipitaciones enero. Estadísticos principales

	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
<i>N</i>	40	19	27	27	40	29	30	16	9	26
<i>X</i> [mm]	10,6	14,6	12,9	21,8	8,3	54,2	23,5	79,2	58,0	50,6
<i>S</i> [mm]	10,8	12,8	13,2	21,6	9,8	32,1	20,2	115,0	31,4	33,4
<i>δ</i>	2,44	1,08	1,79	1,44	1,63	1,14	1,68	3,48	0,51	0,93
<i>ℓ</i>	1,01	0,88	1,02	0,99	1,19	0,59	0,86	1,4510	0,54	0,63

Tabla B.9: Precipitaciones febrero. Estadísticos principales

	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
<i>N</i>	40	19	27	28	39	29	30	16	9	26
<i>X</i> [mm]	16,2	17,2	19,3	37,6	11,3	83,7	36,6	107,0	61,4	59,8
<i>S</i> [mm]	15,8	25,6	23,1	39,2	15,2	42,8	26,3	53,6	29,1	44,4
<i>δ</i>	1,88	2,71	2,84	1,83	2,15	0,45	1,04	0,42	0,34	0,95
<i>ℓ</i>	0,97	1,49	1,20	1,04	1,35	0,51	0,72	0,50	0,47	0,74

Tabla B.10: Precipitaciones marzo. Estadísticos principales

	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
<i>N</i>	40	19	28	27	40	29	30	16	9	26
<i>X</i> [mm]	24,1	20,5	18,6	35,4	14,5	91,0	37,2	107,2	68,0	87,1
<i>S</i> [mm]	17,9	16,7	14,6	41,9	13,7	45,6	25,5	58,6	43,1	49,8
<i>δ</i>	1,13	0,65	0,76	2,30	0,88	0,89	0,81	-0,43	0,23	-0,12
<i>ℓ</i>	0,74	0,82	0,79	1,18	0,95	0,50	0,69	0,55	0,63	0,57

Tabla B.11: Precipitaciones abril. Estadísticos principales

(b) Análisis de frecuencia precipitaciones mensuales por estación individual (Tabla B.12 a Tabla B.19)

ENERO - RESULTADOS ESTACIONES INDIVIDUALES GUMBEL [mm]

<i>1 - F</i>	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	82	55	76	131	83	270	108	376	202	285
0,0002	77	51	70	121	77	253	101	352	189	266
0,001	63	42	58	100	63	213	84	296	159	224
0,002	57	38	53	91	58	195	76	272	146	205
0,01	44	29	40	69	44	155	59	215	116	162
0,02	38	25	35	60	38	138	52	191	103	144
0,04	32	21	29	50	32	121	45	167	89	125
0,05	30	20	28	47	30	115	42	159	85	119
0,1	24	16	22	38	24	97	35	133	71	100
0,2	18	12	16	28	18	78	27	107	57	80
0,5	9	6	8	13	8	50	15	68	36	50

Tabla B.12: Precipitaciones máximas enero según análisis individual estación [mm]

FEBRERO - RESULTADOS ESTACIONES INDIVIDUALES GUMBEL [mm]

$1 - F$	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	77	103	95	163	71	270	154	635	289	281
0,0002	71	96	89	152	66	253	144	590	271	263
0,001	59	79	73	126	54	213	119	487	228	220
0,002	54	72	67	114	49	195	109	442	209	201
0,01	41	56	51	88	38	155	84	338	166	158
0,02	36	49	45	76	32	137	74	293	147	139
0,04	31	41	38	65	27	120	63	248	128	121
0,05	29	39	36	61	26	114	60	233	122	115
0,1	23	32	29	49	20	96	49	187	103	95
0,2	18	24	22	37	15	77	38	139	83	75
0,5	9	12	11	18	7	49	20	66	52	45

Tabla B.13: Precipitaciones máximas febrero según análisis individual estación [mm]

MARZO - RESULTADOS ESTACIONES INDIVIDUALES GUMBEL [mm]

$1 - F$	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	118	161	152	282	100	390	218	495	272	366
0,0002	110	150	141	263	92	365	203	464	255	342
0,001	91	123	116	217	76	308	169	391	216	285
0,002	83	111	106	197	69	284	155	360	199	260
0,01	64	84	81	152	52	227	121	288	159	203
0,02	55	73	70	132	45	202	106	256	142	178
0,04	47	61	59	112	38	177	92	225	125	153
0,05	44	57	56	105	36	169	87	214	120	145
0,1	36	45	45	85	28	143	72	182	102	119
0,2	27	33	33	64	21	117	56	148	84	93
0,5	14	14	16	32	9	76	32	98	56	52

Tabla B.14: Precipitaciones máximas marzo según análisis individual estación [mm]

ABRIL - RESULTADOS ESTACIONES INDIVIDUALES GUMBEL [mm]

$1 - F$	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	146	139	121	285	109	408	216	533	389	450
0,0002	136	129	112	265	102	382	202	499	363	421
0,001	114	107	93	219	84	323	168	419	303	353
0,002	104	98	85	199	76	298	154	385	277	324
0,01	81	76	66	152	59	239	121	306	217	256
0,02	71	66	58	132	51	213	106	271	192	227
0,04	61	56	50	111	43	187	92	237	165	197
0,05	58	53	47	105	41	179	87	225	157	188
0,1	48	43	38	84	33	152	72	190	130	157
0,2	37	33	30	62	25	125	56	153	102	126
0,5	21	18	16	29	12	83	33	97	60	78

Tabla B.15: Precipitaciones máximas abril según análisis individual estación [mm]

$1 - F$	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO	Medio Z1	Medio Z2
0,0001	7,91	8,17	8,31	8,39	8,42	4,86	6,37	5,03	5,06	5,16	8,2	5,3
0,0002	7,36	7,59	7,73	7,80	7,82	4,55	5,94	4,71	4,73	4,83	7,7	5,0
0,001	6,07	6,25	6,37	6,42	6,44	3,83	4,93	3,96	3,97	4,05	6,3	4,1
0,002	5,52	5,67	5,77	5,82	5,85	3,52	4,50	3,63	3,65	3,72	5,7	3,8
0,01	4,22	4,34	4,41	4,44	4,46	2,80	3,50	2,88	2,89	2,94	4,4	3,0
0,02	3,66	3,76	3,82	3,84	3,86	2,49	3,06	2,55	2,56	2,60	3,8	2,7
0,04	3,11	3,17	3,23	3,24	3,25	2,18	2,63	2,23	2,23	2,26	3,2	2,3
0,05	2,92	2,98	3,03	3,05	3,06	2,07	2,49	2,12	2,13	2,15	3,0	2,2
0,1	2,35	2,38	2,43	2,43	2,44	1,75	2,04	1,78	1,79	1,81	2,4	1,8
0,2	1,75	1,77	1,79	1,79	1,80	1,41	1,57	1,43	1,43	1,45	1,8	1,5
0,5	0,84	0,82	0,82	0,82	0,82	0,91	0,87	0,90	0,90	0,90	0,8	0,9

Tabla B.16: Relación P_{max_T}/P_{med} enero

$1 - F$	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO	Medio Z1	Medio Z2
0,0001	7,13	7,05	7,44	7,49	8,70	4,98	6,55	8,02	4,99	5,55	7,6	6,0
0,0002	6,64	6,57	6,93	6,97	8,09	4,66	6,11	7,45	4,67	5,18	7,0	5,6
0,001	5,49	5,44	5,73	5,76	6,65	3,92	5,07	6,14	3,93	4,33	5,8	4,7
0,002	5,00	4,95	5,21	5,23	6,04	3,60	4,63	5,58	3,61	3,97	5,3	4,3
0,01	3,85	3,82	4,00	4,02	4,60	2,86	3,59	4,27	2,86	3,12	4,1	3,3
0,02	3,36	3,33	3,49	3,50	3,98	2,53	3,14	3,70	2,54	2,75	3,5	2,9
0,04	2,85	2,84	2,96	2,97	3,35	2,21	2,69	3,13	2,21	2,38	3,0	2,5
0,05	2,69	2,68	2,79	2,80	3,14	2,10	2,54	2,94	2,11	2,26	2,8	2,4
0,1	2,18	2,17	2,26	2,26	2,50	1,77	2,08	2,36	1,77	1,88	2,3	2,0
0,2	1,65	1,65	1,69	1,69	1,84	1,43	1,59	1,75	1,43	1,49	1,7	1,5
0,5	0,84	0,85	0,84	0,84	0,82	0,90	0,86	0,83	0,90	0,89	0,8	0,9

Tabla B.17: Relación P_{max_T}/P_{med} febrero

$1 - F$	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO	Medio Z1	Medio Z2
0,0001	7,25	9,35	7,88	7,49	8,82	4,66	5,94	4,62	4,42	6,13	8,2	5,2
0,0002	6,76	8,69	7,33	6,97	8,19	4,36	5,54	4,33	4,15	5,72	7,6	4,8
0,001	5,59	7,12	6,04	5,76	6,73	3,68	4,62	3,66	3,51	4,76	6,2	4,0
0,002	5,08	6,46	5,49	5,24	6,10	3,39	4,22	3,37	3,23	4,35	5,7	3,7
0,01	3,91	4,89	4,21	4,03	4,64	2,71	3,30	2,69	2,59	3,39	4,3	2,9
0,02	3,41	4,22	3,65	3,50	4,01	2,41	2,90	2,40	2,32	2,97	3,8	2,6
0,04	2,90	3,53	3,08	2,97	3,37	2,11	2,50	2,10	2,04	2,56	3,2	2,3
0,05	2,74	3,31	2,90	2,80	3,16	2,01	2,37	2,00	1,95	2,42	3,0	2,2
0,1	2,21	2,61	2,33	2,26	2,51	1,71	1,95	1,70	1,66	1,99	2,4	1,8
0,2	1,67	1,89	1,73	1,69	1,83	1,39	1,53	1,39	1,37	1,55	1,8	1,4
0,5	0,85	0,79	0,83	0,84	0,80	0,91	0,88	0,91	0,92	0,87	0,8	0,9

Tabla B.18: Relación P_{max_T}/P_{med} marzo

1 - F	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO	Medio Z1	Medio Z2
0,0001	6,05	6,78	6,43	8,08	7,55	4,48	5,79	4,97	5,72	5,17	7,0	5,2
0,0002	5,64	6,32	5,99	7,52	7,03	4,20	5,41	4,65	5,34	4,83	6,5	4,9
0,001	4,70	5,24	4,98	6,20	5,80	3,55	4,51	3,91	4,46	4,05	5,4	4,1
0,002	4,29	4,78	4,54	5,63	5,28	3,27	4,13	3,59	4,08	3,72	4,9	3,8
0,01	3,35	3,70	3,53	4,30	4,06	2,62	3,23	2,85	3,20	2,94	3,8	3,0
0,02	2,94	3,23	3,08	3,73	3,52	2,34	2,84	2,53	2,82	2,60	3,3	2,6
0,04	2,53	2,75	2,64	3,15	2,99	2,06	2,46	2,21	2,43	2,27	2,8	2,3
0,05	2,40	2,60	2,50	2,96	2,82	1,97	2,33	2,10	2,31	2,16	2,7	2,2
0,1	1,98	2,12	2,05	2,37	2,27	1,68	1,93	1,77	1,91	1,81	2,2	1,8
0,2	1,54	1,62	1,57	1,76	1,70	1,37	1,51	1,42	1,50	1,45	1,6	1,5
0,5	0,87	0,86	0,86	0,83	0,84	0,92	0,88	0,90	0,88	0,90	0,9	0,9

Tabla B.19: Relación P_{maxT}/P_{med} abril

(c) Precipitaciones máximas para diferentes recurrencias según vector Regional (Tabla B.20 a Tabla B.23)

ENERO - PRECIPITACIONES MENSUALES PARA DIFERENTES RECURRENCIAS [mm]

1 - F	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	86	55	75	128	81	294	90	396	212	292
0,0002	80	51	70	119	75	274	84	370	198	273
0,001	66	42	57	98	62	230	70	310	166	229
0,002	60	38	52	89	56	211	65	285	152	210
0,01	45	29	40	68	43	166	51	225	120	166
0,02	39	25	35	59	37	147	45	199	106	147
0,04	33	21	29	50	31	128	39	172	92	127
0,05	31	20	27	47	30	122	37	164	88	121
0,1	25	16	22	37	24	102	31	137	73	101
0,2	18	12	16	28	18	81	25	109	58	81
0,5	9	6	8	13	8	50	15	67	36	49

Tabla B.20: Precipitaciones máximas enero según análisis regional

FEBRERO - PRECIPITACIONES MENSUALES PARA DIFERENTES RECURRENCIAS [mm]

1 – F	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	81	110	97	165	62	326	142	477	349	305
0,0002	75	103	90	154	57	305	132	445	326	285
0,001	62	85	74	127	47	254	110	371	271	237
0,002	57	77	68	115	43	232	101	339	248	217
0,01	44	59	52	89	33	181	79	264	194	169
0,02	38	51	45	77	29	159	69	232	170	149
0,04	32	44	38	65	24	137	59	200	146	128
0,05	30	41	36	61	23	130	56	189	139	121
0,1	24	33	29	50	19	107	46	156	114	100
0,2	18	25	22	37	14	83	36	122	89	78
0,5	9	12	11	18	7	48	21	69	51	44

Tabla B.21: Precipitaciones máximas febrero según análisis regional

MARZO - PRECIPITACIONES MENSUALES PARA DIFERENTES RECURRENCIAS [mm]

1 – F	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	132	140	157	307	92	432	189	551	317	308
0,0002	123	131	146	286	86	404	177	516	296	288
0,001	101	108	120	235	71	339	148	433	249	242
0,002	92	98	109	214	64	311	136	397	228	222
0,01	70	75	83	163	49	246	108	314	180	175
0,02	61	65	72	141	42	218	95	278	160	155
0,04	51	55	61	119	36	189	83	242	139	135
0,05	48	51	57	112	34	180	79	230	132	129
0,1	39	41	46	90	27	151	66	193	111	108
0,2	29	30	34	66	20	121	53	154	89	86
0,5	13	14	16	31	9	75	33	96	55	54

Tabla B.22: Precipitaciones máximas marzo según análisis regional

ABRIL - PRECIPITACIONES MENSUALES PARA DIFERENTES RECURRENCIAS [mm]

1 – F	Lago Argentino Aero	El Calafate Aero	Lago Argentino	PNG	La Leona	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	169	143	131	246	101	475	195	560	355	455
0,0002	157	133	122	229	94	444	182	524	332	425
0,001	130	110	101	190	78	373	153	440	279	357
0,002	118	100	92	173	71	342	140	403	256	327
0,01	91	78	71	134	55	270	111	318	202	258
0,02	80	68	62	117	48	239	98	282	179	229
0,04	68	58	53	99	41	208	85	245	155	199
0,05	64	54	50	94	38	197	81	233	148	189
0,1	52	44	40	76	31	165	68	195	124	158
0,2	40	34	31	58	24	132	54	156	99	126
0,5	21	17	16	30	12	82	33	96	61	78

Tabla B.23: Precipitaciones máximas abril según análisis regional

B.4.3. Precipitaciones máximas diarias anuales (Tabla B.24 a Tabla B.28. Figura B.19)

Año	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
1982/83	24				
1983/84	24				
1984/85	33				
1985/86	39				
1986/87	55				
1987/88	28				
1988/89	27				
1989/90	42	18			
1990/91	51	10			
1991/92	15	14			
1992/93	38	20			
1993/94	28	12			52
1994/95	39	25			44
1995/96	34	30			42
1996/97	28	23			32
1997/98	54	30			36
1998/99	33	7			45
1999/00	25	10			27
2000/01	45	36			37
2001/02	45	26			25
2002/03	53	24			27
2003/04	42	30	42		18
2004/05	47	20	51		46
2005/06	35	34	40		68
2006/07	38	30	53		35
2007/08	36	21	30		45
2008/09	44	38	33		39
2009/10	22	22	46		27
2010/11	36	21	34	33	42
2011/12	34	48	41	35	51
2012/13	28	21	33	48	50
2013/14	22	18	24	38	35
2014/15	37	29	66	63	54
2015/16	22	19	30	25	25
2016/17	21	24	84	30	45
2017/18	66	66	98	29	58
2018/19		36	50	43	50

Tabla B.24: Precipitaciones máximas diarias anuales 1 día [mm] región Z2

	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
N	36	30	16	9	26
X [mm]	35,8	25,4	47,2	38,2	40,6
S [mm]	11,4	11,9	20,3	11,7	11,8
δ	0,52	1,41	1,43	1,24	0,14
ζ	0,32	0,47	0,43	0,31	0,29

Tabla B.25: Precipitaciones máximas diarias anuales región Z2. Estadísticos principales (1 día)

$1 - F$	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	117	104	183	121	125
0,001	95	83	147	99	103
0,01	74	62	110	77	80
0,02	67	56	99	70	73
0,05	58	47	85	61	64
0,1	52	41	73	54	57
0,2	45	34	62	47	50
0,5	34	24	44	36	39

Tabla B.26: Precipitaciones máximas diarias anuales según análisis individual estación, región Z2. Distribución GUMBEL (MPP) [mm]

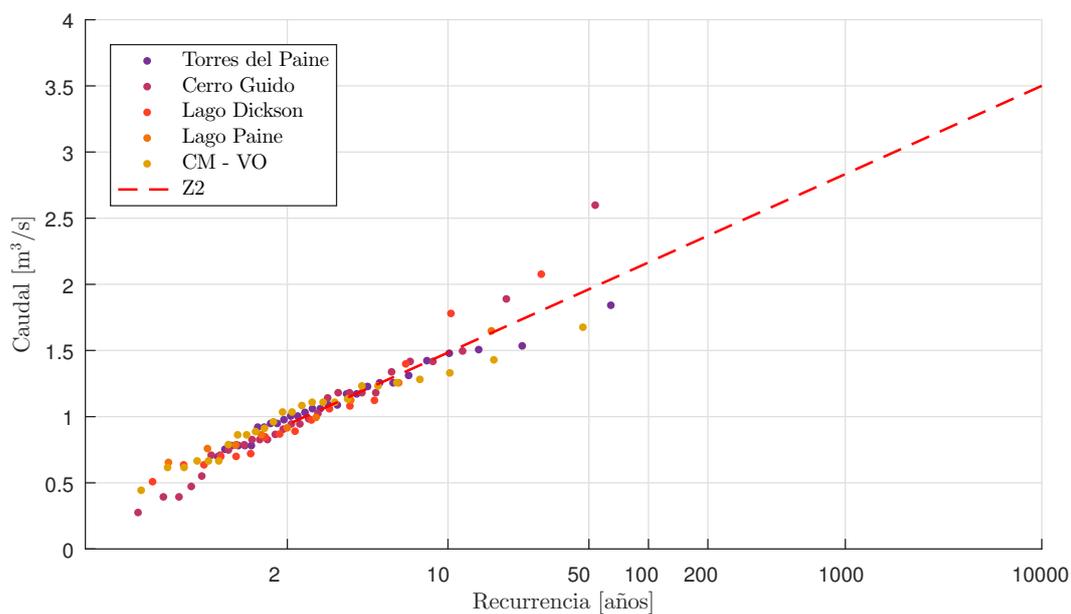


Figura B.19: Precipitaciones máximas diarias anuales adimensionales y vector regional

$1 - F$	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO	PROMEDIO Z2
0,0001	3,26	4,11	3,87	3,17	3,09	3,50
0,001	2,66	3,28	3,11	2,59	2,53	2,83
0,01	2,05	2,45	2,34	2,01	1,97	2,17
0,02	1,87	2,20	2,11	1,84	1,80	1,96
0,05	1,63	1,86	1,80	1,60	1,58	1,69
0,1	1,44	1,60	1,56	1,42	1,40	1,48
0,2	1,24	1,33	1,31	1,23	1,22	1,27
0,5	0,95	0,93	0,93	0,95	0,95	0,94

Tabla B.27: Relación P_{max_T}/P_{med} (1 día)

$1 - F$	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	125	89	165	134	142
0,001	102	72	134	108	115
0,01	78	55	102	83	88
0,02	70	50	93	75	80
0,05	61	43	80	65	69
0,1	53	38	70	57	60

Tabla B.28: Precipitaciones máximas diarias anuales según análisis regional (1 día) [mm]

(a) Precipitaciones 5 días (Tabla B.29 a Tabla B.33. Figura B.20)

Año	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
1982/83	49				
1983/84	65				
1984/85	62				
1985/86	72				
1986/87	74				
1987/88	59				
1988/89	66				
1989/90	90	37			
1990/91	107	23			
1991/92	32	18			
1992/93	70	29			
1993/94	60	18			75
1994/95	62	40			77
1995/96	58	32			70
1996/97	54	31			66
1997/98	115	60			64
1998/99	54	13			77
1999/00	51	17			68
2000/01	94	47			63
2001/02	97	78			36
2002/03	67	32			56
2003/04	75	39	54		45
2004/05	126	56	114		108
2005/06	72	59	72		93
2006/07	63	32	72		96
2007/08	66	35	99		70
2008/09	77	72	78		101
2009/10	52	31	104		69
2010/11	65	30	74	62	102
2011/12	76	71	79	59	137
2012/13	64	65	74	88	127
2013/14	62	29	71	52	57
2014/15	72	55	100	98	80
2015/16	47	27	58	47	50
2016/17	35	32	89	52	78
2017/18	82	77	227	43	97
2018/19		70	50	87	85

Tabla B.29: Precipitaciones máximas diarias anuales 5 días [mm] región Z2

	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
<i>N</i>	36	30	16	9	26
<i>X</i> [mm]	69,3	41,8	88,5	65,5	78,7
<i>S</i> [mm]	20,0	19,4	41,0	20,4	23,9
<i>σ</i>	0,92	0,52	2,77	0,65	0,63
<i>τ</i>	0,29	0,46	0,46	0,31	0,30

Tabla B.30: Precipitaciones máximas anuales región Z2. Estadísticos principales (5 días)

$1 - F$	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	204	179	321	212	247
0,001	168	143	259	173	202
0,01	132	106	197	134	157
0,02	121	95	178	122	144
0,05	107	80	153	106	125
0,1	95	69	134	94	111
0,2	84	57	113	81	97
0,5	66	39	83	62	75

Tabla B.31: Precipitaciones máximas anuales según análisis individual estación, región z2. Distribución GUMBEL (MPP) [mm] (5 días)

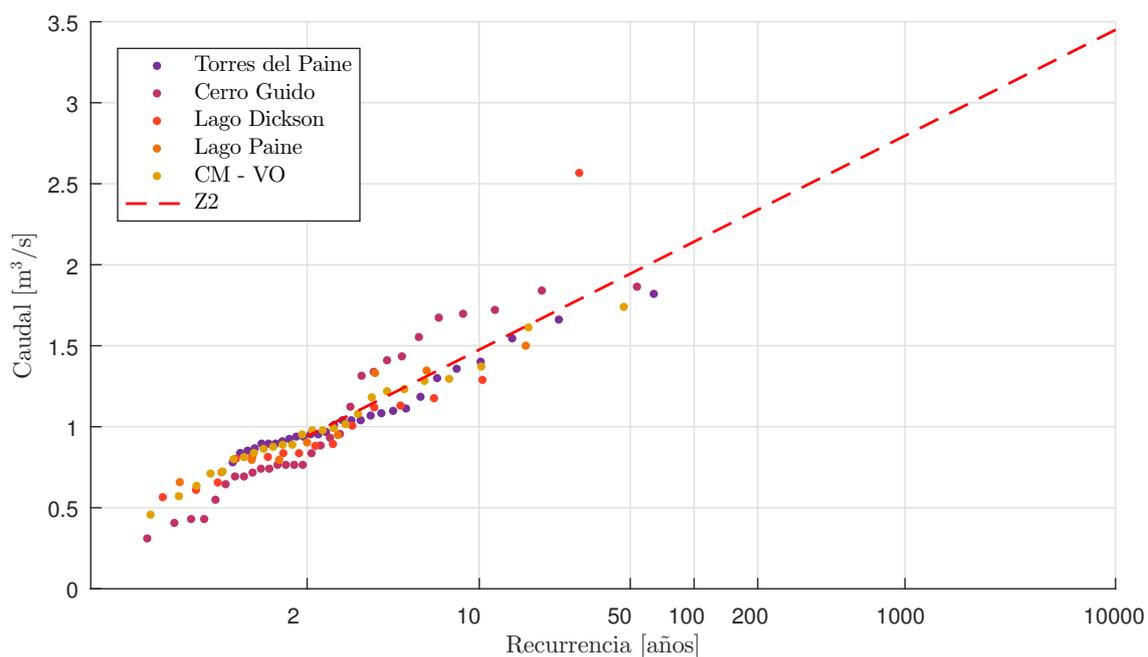


Figura B.20: Precipitaciones máximas diarias anuales adimensionales y vector regional

$1 - F$	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO	PROMEDIO Z2
0,0001	2,94	4,29	3,63	3,25	3,14	3,4
0,001	2,42	3,41	2,93	2,65	2,57	2,8
0,01	1,91	2,53	2,23	2,05	2,00	2,1
0,02	1,75	2,27	2,01	1,87	1,82	1,9
0,05	1,54	1,91	1,73	1,63	1,59	1,7
0,1	1,38	1,64	1,51	1,44	1,41	1,5
0,2	1,21	1,35	1,28	1,24	1,23	1,3
0,5	0,95	0,92	0,94	0,95	0,95	0,9

Tabla B.32: Relación P_{max_T}/P_{med} (5 días)

$1 - F$	Torres del Paine	Cerro Guido	Lago Dickson	Lago Paine	CM - VO
0,0001	239	144	305	225	272
0,001	194	117	247	183	220
0,01	148	90	189	140	169
0,02	135	81	172	127	153
0,05	116	70	149	110	132
0,1	102	62	130	96	116

Tabla B.33: Precipitaciones máximas diarias anuales según análisis regional (5 días) [mm]

B.5. Test no paramétricos para análisis de homogeneidad

Entre los test no paramétricos utilizables en extremos (ELETROBRAS, 1987; KITE, 1988; NERC, 1975) se han seleccionado:

- Mann-Kendall
- Smirnov

B.5.1. Test de Mann-Kendall

A partir de los datos cronológicos de la muestra $X_i, i=1,2..N$, donde i representa el año de registro, se calcula:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} s_{(i)} \quad (\text{B.3})$$

donde $s_{(i)}$ es el número de valores de $X_j > X_i$, siendo $i < j \leq N$, o sea para cada valor de X_i ordenado cronológicamente se calcula cuantos valores posteriores lo superan. Obviamente para el último valor no se define $s_{(i)}$ porque no existe valor posterior, por eso la suma de los $s_{(i)}$ va hasta $N - 1$.

$$T = \sum_{i=1}^{N-1} t_{(i)} \quad (\text{B.4})$$

donde $t_{(i)}$ es el número de valores $X_j < X_i$, siendo $i < j \leq N$, o sea para cada valor de X_i ordenado cronológicamente se calcula cuantos valores posteriores son menores.

Con los valores S y T calculados se define el índice $I = S - T$, que debe ser próximo a cero si la hipótesis nula es verdadera. Por lo tanto, debe verificarse que $I < I_{critico}$, o sea que el I calculado sea menor que un valor de $I_{critico}$ tabulado en función del tamaño de la muestra y según diferentes niveles de significación.

Para tamaños de muestra mayores a 10, se puede utilizar una forma simplificada, donde se transforma el índice I a V por la expresión:

$$V = \frac{I - 1}{\sqrt{(N(N-1)(2N+5))/18}} \quad (\text{B.5})$$

Los valores de V crítico (V_c), obtenidos de una distribución normal, se presenta en la Tabla B.34.

α	0,01	0,05	0,1
V_c	2,33	1,64	1,28

Tabla B.34: Valores críticos del test de Mann Kendall para niveles de significación de 1 %, 5 % y 10 %.

B.5.2. Test de Smirnov

El test de Smirnov es de interés cuando se sospecha a priori a partir de qué año se presentan interferencias o cuando se pretende comparar datos medidos hasta una cierta fecha a partir de la cual los registros se obtienen indirectamente.

De los X_i valores disponibles se identifican previamente dos muestras $X_1 \dots X_n$ y $X_{n+1} \dots X_{n+m}$ con lo que el tamaño de cada submuestra es n y m respectivamente y el total de datos es $n + m$.

Para la aplicación del test los datos son ordenados de menor a mayor sin distinción de submuestra. Para cada valor de X_i ordenado se calculan:

$R(i)$: que es el número de valores de X menores o iguales a dicho X_i que pertenecían a la submuestra n .

$S(i)$: que es el número de valores de X menores o iguales a dicho X_i que pertenecían a la segunda submuestra (m).

Con estos dos valores se calcula el índice:

$$d(i) = \frac{R(i)}{n} - \frac{S(i)}{m} \quad (\text{B.6})$$

Esta diferencia tiende a cero cuando la hipótesis nula es verdadera. Por lo tanto, $d(i)$ debe ser testeado utilizándose para ello la tabla de Smirnov indicada debajo. Se calculan el máximo valor absoluto de $d(i)$ (D) y $Z = D \sqrt{(nm)/(n+m)}$

Los valores de Z crítico (Z_c) se presenta en la Tabla B.35.

α	0,01	0,05	0,1
Z_c	1,628	1,358	1,224

Tabla B.35: Valores críticos del test de Smirnov para niveles de significación de 1 %, 5 % y 10 %.

B.6. Referencias bibliográficas

ELETROBRAS. (1987). Guia para cálculo de cheia de proyecto de vertedores. Ministerio das Minas e Energia. Rio de Janeiro.

Kite, G. (1988). Frequency and risk analyses in hydrology. Colorado, U.S.A.: Water Resources Publications.

Minowa, M., Sugiyama, S., Sakakibara, D., Skvarca, P. (2017). Seasonal Variations in Ice-Front Position Controlled by Frontal Ablation at Glaciar Perito Moreno, the Southern Patagonia Icefield. *Frontiers in Earth Science*, 5, 1.

NERC. (1975). Flood Studies Report. Hydrological studies (Vol. I). Reino Unido.: Natural Environment Research Council.

Stuefer. (1999). Investigations on Mass Balance and Dynamics of Moreno Glacier based on Field Measurements and Satellite Imagery. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.

Anexo C

REGISTRO DE ROTURAS DEL GLACIAR PERITO MORENO

En la Tabla C.1 se presenta el registro histórico de eventos de rotura del glaciar Perito Moreno desde el año 1917 (en el cual se produce el primer evento del cual se tiene conocimiento) a la fecha, detallando:

- Las fechas de producción del cierre, el inicio de las filtraciones a través del dique de hielo y el inicio del desembalse rápido, según la bibliografía y el análisis de los registros de niveles del lago Rico y el lago Argentino. La información que no posee referencia es aquella en la que la bibliografía coincide.
- El desnivel del lago Rico y del lago Argentino entre el inicio y el fin del evento de desembalse (ΔH_{LR} y ΔH_{LA} , respectivamente), y el desnivel entre los lagos previo al inicio del desembalse (ΔH_{LR-LA}). Esta información fue obtenida a partir de los registros de alturas hidrométricas en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares (SIPH), El Calafate (SIPH), Brazo Rico (SMN) y Puerto Irma (SMN), y de la revisión de antecedentes bibliográficos.
- El caudal máximo en el río Santa Cruz (Q_p) y el aumento del caudal respecto al que transitaba por el río en el momento que se inicia el evento de desembalse (ΔQ), obtenidos de los registros de caudales medios diarios en la estación Charles Fuhr (SIPH).
- El nivel alcanzado por el lago Rico según la bibliografía, sin información concreta acerca del nivel de referencia tomado para realizar las mediciones.
- Fuente de información de los datos.

El primer cierre provocado por el avance del glaciar Perito Moreno del cual se tiene registro sucedió durante el verano del año 1917. Posteriormente, en el verano de 1934-1935, el glaciar alcanza nuevamente la península de Magallanes. Por tercera vez el canal quedó cerrado en julio de 1939, produciéndose el 30 de noviembre de 1939 una diferencia de nivel entre el Brazo Rico y el canal

REGISTRO	Cierre			Filtraciones			Rotura		
	Día	Mes	Año	Día	Mes	Año	Día	Mes	Año
1			1917						1917
2			1934/1935						1934/1935
3		Julio ^{2,3,6,9} /Invierno ⁴ /Verano 39-40 ⁵	1939				17	Febrero	1940
4		Invierno ⁴	1941				19 ⁷ /20 ^{5,6} /21 ⁴	Marzo	1942
5		Invierno ⁴	1947				Primeros días de ⁸	Diciembre ¹⁰ /Primavera ⁴	1947
6		Abril-Diciembre ¹⁰ /Verano 48-49 ^{6,7,8}	1948				3 o 4 ⁷	Marzo	1949
7	25 ⁵	Julio ^{4,5}	1951				2	Marzo	1952
8	12 ⁵	Septiembre ^{4,5}	1952				30	Marzo	1953
9		Julio ⁴ /Agosto ⁹ /Septiembre ⁵	1954				14	Septiembre	1956
10		"	"				10	Octubre	"
11		Agosto ⁴	1959				15	Febrero	1960
12		"	"				31 ⁴ /4 ¹¹	Marzo	"
13		Septiembre ⁴	1962				25	Febrero	1963
14		Agosto ⁴	1964				10	Febrero	1966
15		"	"				25 ⁴	"	"
16		"	"					Marzo	1969
17		"	"					Marzo ¹¹	1970
18		"	"				Primeros días de	Marzo	1972
19		"	"				12	Abril	1974
20		"	"					Febrero ¹¹	1975
21		"	"						1977
22		"	"				17	Febrero	1980
23		"	"				13	Enero	1984
24		"	"				16	Febrero	1988
25	1	Octubre	2003				11	Marzo	2004
26	1	Agosto	2005				9 ⁷ /10 ¹⁵	Marzo	2006
27	3	Agosto	2007				4	Julio	2008
28	5	Noviembre	2011				29	Febrero	2012
29	1	Octubre	2012				21	Noviembre	2012
30	10	Septiembre	2013				18	Diciembre	2013
31	26	Octubre	2015				10 ¹⁵ /8	Marzo	2016
32	30	Junio	2017				10	Marzo	2018

- ¹ Volpi, 1940
- ¹⁰ Mercer, 1968
- ² Feruglio, 1944
- ¹¹ Registros de la SIPH
- ³ Heim, 1951
- ¹² Diario La Nación (1988)
- ⁴ Liss, 1970
- ¹³ Skvarca, 2002
- ⁵ Raffo et al., 1953
- ¹⁴ Stuefer, 1999
- ⁶ Nichols y Miller, 1952
- ¹⁵ Lenzano et al., 2018
- ⁷ Guerrido, 2014
- ¹⁶ Aniya y Skvarca, 1992
- ⁸ Bertone, 1972
- ¹⁷ Depetris y Pasquini, 2000
- ⁹ Heinsheimer, 1954
- " Roturas que se han producido en dos etapas.
- * No es el nivel alcanzado por el lago Rico, sino el ascenso del nivel del mismo desde que se ha producido el cierre.
- ⁶ No es el nivel alcanzado por el lago Rico, sino el desnivel en el mismo entre el inicio y fin del desembalse.
- Datos en color azul: los niveles del lago Argentino se registraron en la estación la Puerto Irma, no en la estación El Calafate (SIPH). La cota del cerro de la escala de la estación Puerto Irma es de 176.5 m.
- El caudal en el río Santa Cruz para el año 2018 se obtiene de Charles Fuhr (ecuación de Lara, 2016)

Tabla C.1: Registro histórico de eventos de rotura del glaciar Perito Moreno (continua en la página siguiente).

REGISTRO	ΔH Lago Rico - Lago Argentino										Lago Rico												
	Pliego de Licitación de los AHRSC					Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica					Pliego de Licitación de los AHRSC					Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica							
	Fecha	Cota LA [mIGN]	Cota LR [mIGN]	ΔH _{LR-LA} [m]	Fecha	Cota LA [mIGN]	Cota LR [mIGN]	ΔH _{LR-LA} [m]	Fecha	ΔH _{LR} [m]	Antes	Después	Fecha	Cota [mIGN]	Fecha	Cota [mIGN]	ΔH _{LR} [m]	Antes	Después	Fecha	Cota [mIGN]	ΔH _{LR} [m]	
1																							
2				4.61 ¹																			
3																							
4				2.61 ^{4,5}																			
5																							
6																							
7	2/3/1952	179,70	189,22	9,52																			8,12
8	30/3/1953	179,97	190,92	10,95																			9,65
9																							
10	9/10/1956	177,67	202,13	24,46																			
11																							
12																							
13																							
14																							
15			204,05																				21,53
16																							10,00
17																							
18																							
19																							
20																							
21																							
22																							
23																							27,0 ⁷
24				22,0 ¹²																			
25	11/3/2004	179,49	186,92	7,43																			6,80
26																							
27																							
28																							
29																							
30																							
31																							
32																							

Tabla C.1: Registro histórico de eventos de rotura del glaciar Perito Moreno (continua en la página siguiente).

REGISTRO	Lago Argentino										Caudal Charles Fuhr						Duración del desembalse [días]
	Nivel alcanzado por el Lago Rico					Pliego de Licitación de los AHRSC					Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica			Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica			
	Antes		Después		ΔH_{LA} [m]	Antes		Después		ΔH_{LA} [m]	Después		Antes		ΔQ [m ³ /s]		
Fecha	Cota [mIGN]	Fecha	Cota [mIGN]	Fecha		Cota [mIGN]	Fecha	Cota [mIGN]	Fecha		Q _p [m ³ /s]	Fecha	Q _i [m ³ /s]				
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	
11																	
12																	
13																	
14																	
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	

Tabla C.1: Registro histórico de eventos de rotura del glaciar Perito Moreno

de los Témpanos de 4,61 m (Volpi y Grandi, 1940; Feruglio, 1944), que ocasionó una inundación en la zona adyacente al Brazo Rico. Con el propósito de detener la inundación, el Ministerio de Marina dispuso que un avión arrojara bombas explosivas sobre el dique de hielo, pero el procedimiento no dio resultado. Además, el Ministerio de Obras Públicas envió una comisión integrada por los geólogos Volpi y Grandi, para que midiera la parte más avanzada del frente del glaciar, realizara un levantamiento taquimétrico del terreno adyacente y confeccionara un croquis de la lengua del glaciar (Figura C.1). Según éste último, la lengua de hielo avanzó sobre la península hasta 10 m sobre el nivel del lago, cubriendo una zona de 300 m de largo y hasta 80 m de altura.

Según Heim (1951), los datos de la Intendencia del Parque Nacional en El Calafate reportaron un nivel de 9 m para el día 25 de octubre de 1939. Según Liss (1970), el nivel del Brazo Rico alcanzó una altura de 10,5 m. En ninguno de los dos casos se indica expresamente la cota del cero de las escalas en las que se realizan las lecturas. De acuerdo a Raffo et al. (1953), el máximo nivel alcanzado por el agua en 1939 – 1940 fue incierto, pero basado en una comparación con las roturas de 1952 y 1953, se estimó que el nivel del Brazo Rico pudo alcanzar 11,5 m de altura con respecto al canal de los Témpanos. La rotura del techo del túnel formado en el dique de hielo se produjo el 17 de febrero de 1940.

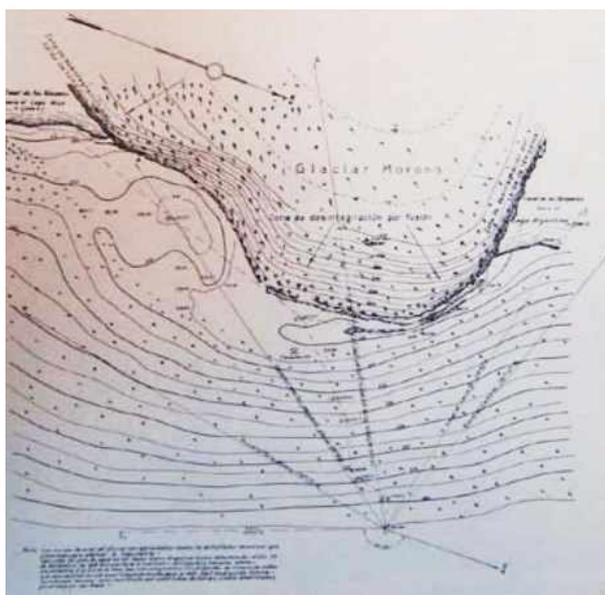


Figura C.1: Planimetría de la zona en que el glaciar Perito Moreno toca la península de Magallanes a fines de 1939, según los levantamientos taquimétricos de Volpi y Grandi (1940).

El cuarto cierre ocurrió en invierno de 1941, fue muy prolongado y estuvo acompañado por una de las mayores elevaciones del nivel del lago Rico y correspondientes inundaciones. Según la escala hidrométrica instalada por Volpi, el nivel de agua subió 8,41 m en el Brazo Rico de la siguiente forma (Raffo et al., 1953):

- Entre el 16/11/41 y el 31/12/41 2,39 m
- Entre el 1/1/42 y el 31/1/42 3,11 m
- Entre el 1/2/42 y el 28/2/42 2,91 m

Heim (1951) señala que el nivel del Brazo Rico llegó a 13,44 m previo al desembalse rápido, y

Nichols y Miller (1952) reportan una altura de 17 m, sin indicarse expresamente la cota del cero de las escalas en las que se realizan estas lecturas.

Posteriormente, en 1952, una comisión del Servicio Meteorológico Nacional relacionó los rastros dejados por la inundación, indicados por los pobladores, con la escala hidrométrica de este organismo en la estación Brazo Rico, resultando un nivel máximo del mismo de 14,9 m (Raffo et. al, 1953). La rotura del glaciar puede haberse producido el 20 de marzo de 1942 (Nichols y Miller, 1952; Raffo et. al, 1953), el 21 de marzo (de acuerdo a datos de Parques Nacionales; Liss, 1970) o el 19 de marzo (según los pobladores de la zona).

En la Figura C.2 se muestra la posición del glaciar Perito Moreno desde 1899 hasta marzo de 1946, de acuerdo a lo publicado por Heim (1951).

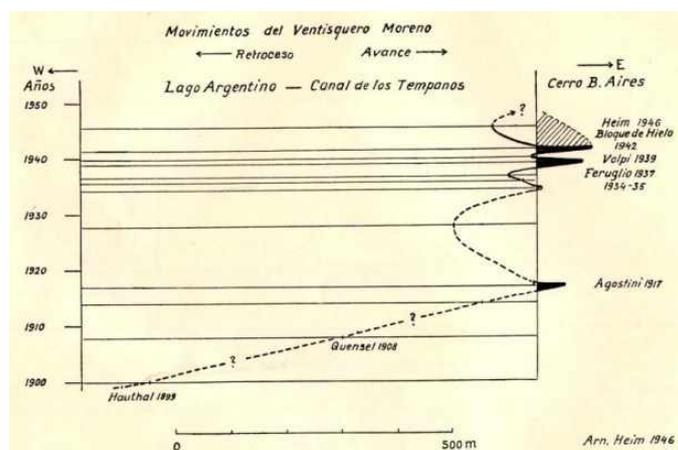


Figura C.2: Posición del frente del glaciar Perito Moreno desde 1899 hasta marzo de 1946 (Heim, 1951)

El glaciar Perito Moreno volvió a obstruir el canal de los Témpanos en invierno de 1947. Según Raffo et al (1953), el cierre no duró mucho tiempo, produciéndose la rotura en los meses de primavera del mismo año. Además, menciona que el 21 de noviembre de 1947 una comisión del Servicio Meteorológico Nacional constató la existencia del túnel (Figura C.3). Según Bertone (1972) en los primeros días de diciembre de 1947 el hielo comenzó a ceder socavando un túnel subglaciar con desagüe bifurcado (Figura C.3).

La diferencia del nivel entre los lagos previa a la rotura fue de 2,61 m (Liss, 1970; Raffo et al, 1953). Según Bertone (1972), las aguas del Brazo Rico se habían elevado en 8 m con respecto al canal de los Témpanos.

En el verano de 1948-1949 volvió a cerrarse el canal, produciéndose la rotura del dique de hielo entre el 3 y el 4 de marzo del año 1949. Nichols y Miller (1952) señalan que, al producirse la rotura del dique de hielo, la distancia entre el frente activo del glaciar y la porción del frente que quedó adherida a la península de Magallanes era de aproximadamente 40 m, dando lugar a un canal de estas dimensiones que conectaba el Brazo Rico con el canal de los Témpanos (Figura C.4)

Según una entrevista registrada por Guerrido (2014), la altura del Brazo Rico se midió antes de



Figura C.3: Imágenes del túnel formado en el dique de hielo en la rotura de noviembre de 1947 (Raffo et al., 1953; Bertone, 1972).

producirse la rotura, resultando un nivel de agua de 30 m, sin indicarse la cota del cero de la escala en la que se realiza la lectura.

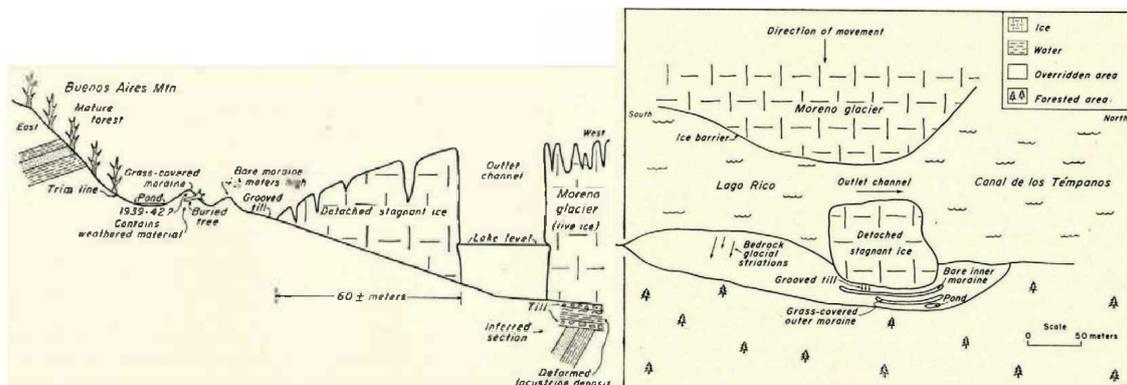


Figura C.4: Esquema de un corte longitudinal (izquierda) y la planta (derecha) del frente del glaciar Perito Moreno luego de la rotura de marzo de 1949 (Nichols y Miller, 1952).

Según Raffo et al. (1953), y como se observa en la Figura C.5, el nivel del Brazo Rico comenzó a subir el 25 de julio de 1951, cuando se supone efectuado un nuevo cierre del canal. La altura de la escala hidrométrica ese día era de 1,40 m y el 2 de marzo, de 12,70 m, resultando un ascenso del nivel del lago de 11,30 m, que coincide con el dato proporcionado por Heinsheimer (1959).

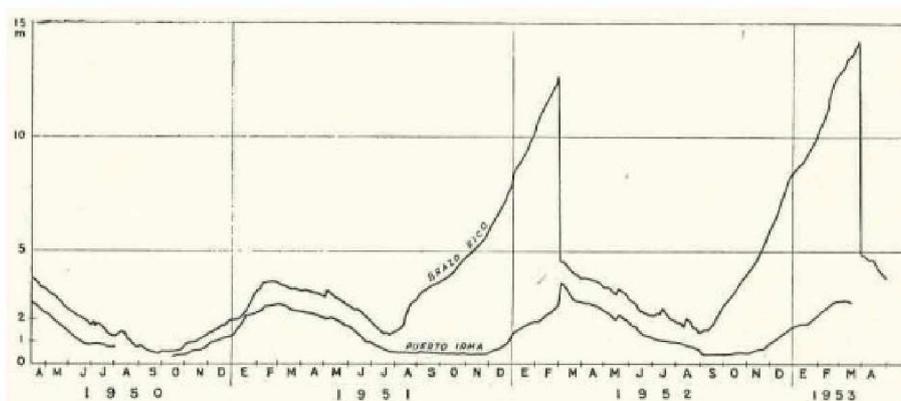


Figura C.5: Alturas hidrométricas del lago Argentino, medidas en Puerto Irma, y del Brazo Rico, medidas en la estación homónima, desde abril de 1950 hasta agosto de 1953 (Raffo et al., 1953)

Según Raffo et al. (1953) las primeras filtraciones hacia el canal de los Témpanos tuvieron lugar

el 2 de marzo de 1952 a las 14:10 hs, dato que se verifica con el inicio del descenso lento de los niveles del Brazo Rico. A partir del 3 de marzo, la variación de los niveles del brazo embalsado aumenta. Ese día una comisión del Servicio Meteorológico Nacional percibió en el campamento situado a 1,5 km del frente del glaciar un fuerte movimiento vibratorio ocurrido 11 horas después de la apertura del túnel y 5 horas antes del colapso del techo del mismo. Al abrirse el túnel, el agua comienza a trasvasarse hacia el lago Argentino, produciéndose el desembalse del lago Rico en tres días. En ese lapso, según las lecturas diarias de nivel en los lagos (Figura C.6), el lago Rico bajó 8,12 m y el lago Argentino aumentó su nivel 0,93 m.

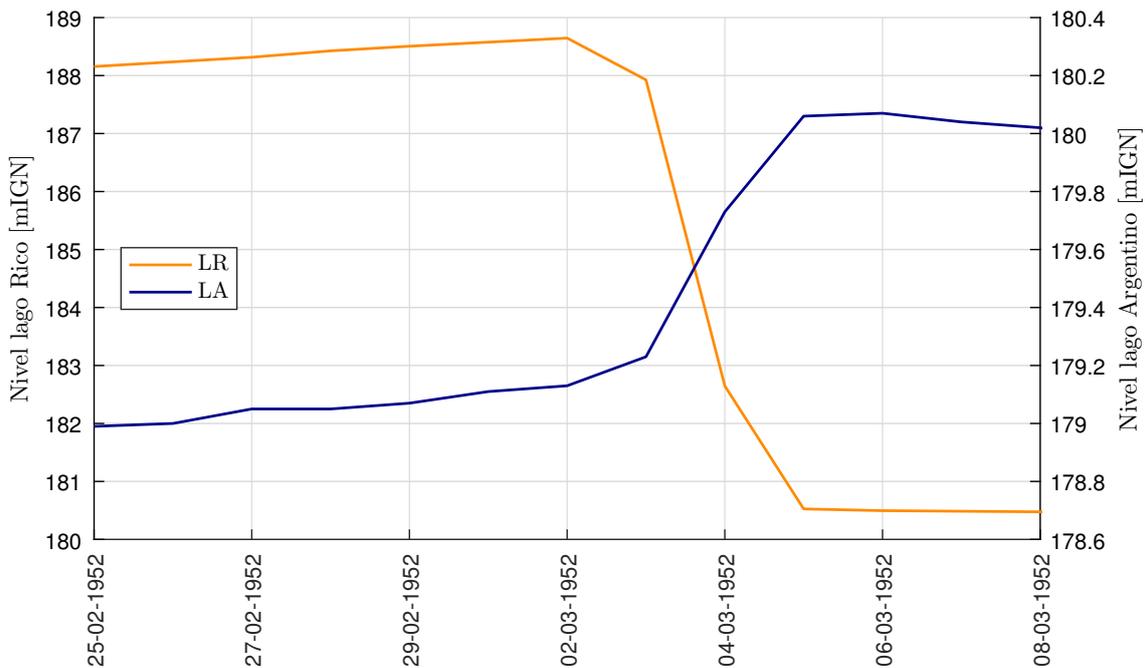


Figura C.6: Niveles del lago Rico y el lago Argentino, desde el 25 de febrero de 1952 hasta el 16 de marzo del mismo año, según los registros en las estaciones Brazo Rico y Puerto Irma del Servicio Meteorológico Nacional (MINPLAN, 2012)

El 12 de septiembre de 1952 el glaciar Perito Moreno alcanzó nuevamente la península de Magallanes, embalsando el agua en el lago Rico hasta el 30 de marzo de 1953, cuando se inicia el proceso de desembalse. El aumento medio diario del nivel del lago Rico durante los días que duró el cierre fue de 6,4 cm, registrándose el 17 de febrero el máximo aumento diario de 28 cm.

Según Raffo et al. (1953), el 12 de septiembre de 1952 el nivel del Brazo Rico era de 1,55 m y el 30 de marzo de 1953 era de 14,4 m, resultando un ascenso de 12,85 m. Mientras que para Heinsheimer (1954) la altura del agua llegó a 11 m, en una escala de la cual no se especifica la cota del cero.

Se disponen de datos diarios de los niveles en el lago Rico y el lago Argentino desde fines de marzo y hasta mediados de abril del 1953 (Figura C.7), lo que permite determinar que el desembalse tuvo una duración aproximada de dos días, habiéndose producido durante este lapso un descenso del nivel del lago Rico de 9,65 m. El ascenso abrupto del nivel del lago Argentino se extiende por dos días más y alcanza un total de 0,89 m.

En 1954, en el mes de julio según Liss (1970), agosto según Heinsheimer (1956) y septiembre

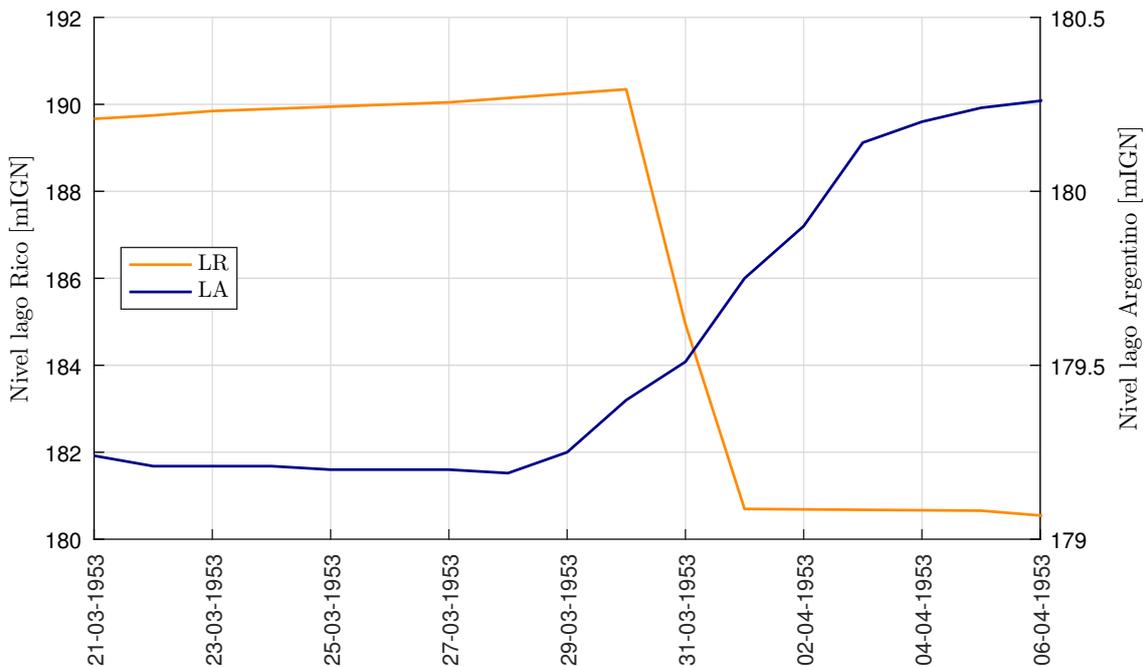


Figura C.7: Niveles del lago Rico y el lago Argentino, desde el 19 de marzo de 1953 hasta el 10 de abril del mismo año, según los registros en las estaciones Brazo Rico y Puerto Irma del Servicio Meteorológico Nacional (MINPLAN, 2012).

según Raffo et al. (1953), el glaciar Perito Moreno obstruyó nuevamente el canal de los Témpanos, produciéndose una primera rotura parcial del dique de hielo el 14 de septiembre de 1956, que hizo descender aproximadamente 1 m el nivel del lago Rico, y una segunda definitiva y de mayor magnitud el 10 de octubre del mismo año. Vale la pena destacar que el cierre del canal en esta oportunidad tuvo una duración de aproximadamente dos años, lo que parece explicar el nivel al que llega el brazo embalsado. El nivel alcanzado por el agua en el Brazo Rico previo a la primera rotura fue de 26,7 m según Liss (1970) y de 26 m según Heisheimer (1954), sin explicitar la cota del cero de la escala utilizada. Liss (1970) también señala que el nivel previo a la segunda rotura fue de 25,6 m.

De acuerdo a los registros de niveles dados por el Pliego del Llamado a Licitación Pública de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz, el desnivel entre el lago Rico y el lago Argentino el 9 de octubre de 1956 fue de 24,5 m (Figura C.8), siendo de los mayores que se han registrado. Durante el evento de desembalse, que duró aproximadamente dos días, el nivel del lago Argentino experimentó un ascenso de 2,63 m. No se cuenta con registros de niveles del lago Rico durante el evento de rotura.

A partir de diciembre del año 1955, se cuenta con información acerca del caudal en el río Santa Cruz en la estación Charles Fuhr de la SIPH, y con aforos desde enero de 1958.

A partir de estos datos, se puede deducir que el desembalse del lago Rico de octubre de 1956 dio lugar a un aumento en la descarga del río Santa Cruz de 1.024 m³/s. Sin embargo, el pico de caudal no fue de los más importantes, ya que la rotura se produjo en septiembre, mes en el cual el río Santa Cruz presenta descargas mínimas.

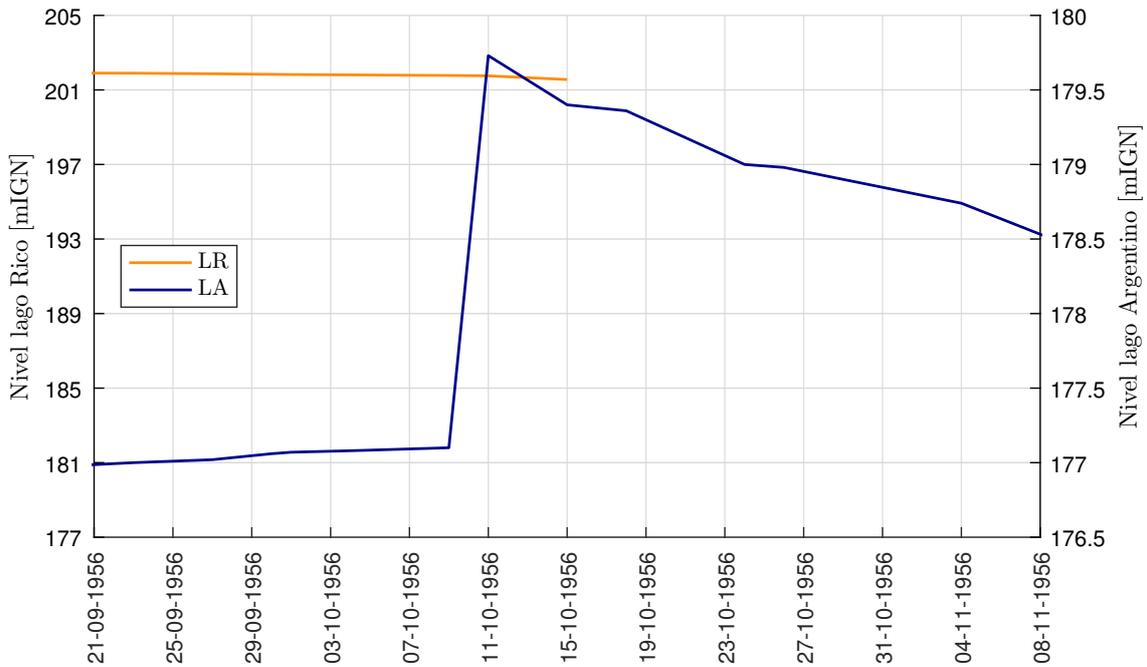


Figura C.8: Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}), desde el 21 de agosto de 1956 hasta el 28 de noviembre del mismo año, según los registros en las estaciones Brazo Rico y Puerto Irma del Servicio Meteorológico Nacional (MINPLAN, 2012).

El próximo cierre ocurrió en agosto del año 1959 y la rotura nuevamente se produjo en dos etapas: la primera el 15 de febrero de 1960, habiendo alcanzado el lago Rico un nivel de 13,1 m y provocando un aumento de la descarga del río Santa Cruz de 506 m³/s; y la segunda ocurrió, según Liss (1970), el 31 de marzo del mismo año con una altura previa de 11,6 m (Liss, 1970). Sin embargo los registros de caudales en la estación Charles Fuhr parecen indicar que la segunda etapa de la rotura comenzó entre el 4 y el 5 de marzo (Figura C.9).

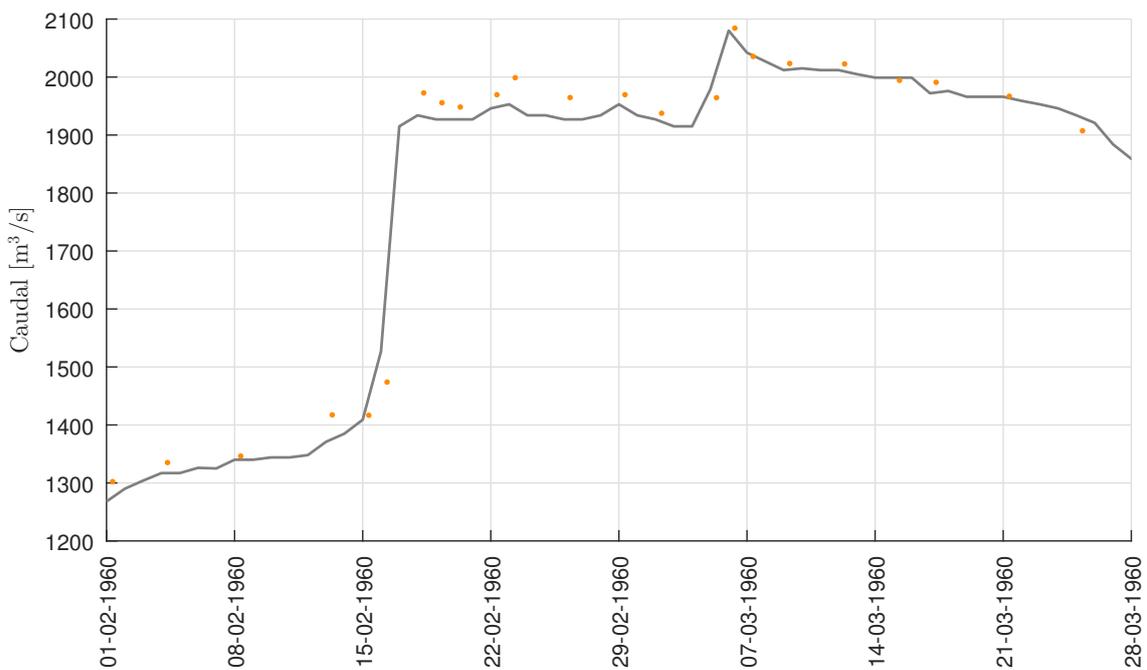


Figura C.9: Caudales registrados en la estación Charles Fuhr de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, en el período de las roturas de 1960. Los puntos naranjas corresponden a los aforos realizados en el período.

En septiembre del 1962 el glaciar Perito Moreno alcanzó nuevamente la península de Magallanes, produciéndose la rotura del dique de hielo el 25 de febrero del año siguiente, con una altura en el brazo embalsado de 15,7 m (Liss, 1970), desconociéndose la cota del cero de la escala en la que se realizó esa lectura. Según los registros de caudales en Charles Fuhr, esta rotura generó un aumento de caudal en el río Santa Cruz del orden de 1.000 m³/s y un pico también importante de 2.250 m³/s.

El glaciar vuelve a entrar en contacto con la península de Magallanes en agosto de 1964, pero la rotura no ocurrió en el período febrero – marzo del año siguiente como era de esperarse, sino casi dos años luego de producido el cierre, dando lugar a una de las mayores sobrelevaciones del brazo embalsado que se han registrado. El desembalse se produjo en dos etapas, la primera el 10 de febrero de 1966 y la segunda, de mayor magnitud, el 25 de febrero del mismo año. En la Figura C.11 se presenta la posición del frente del glaciar Perito Moreno en febrero y marzo de 1966. Liss (1970) señala 28,4 m de altura en el Brazo Rico previos a la primera etapa y aproximadamente 27 m previos a la segunda. Se disponen de datos diarios de los niveles en el lago Rico, que indican un descenso del nivel de 21,53 m del lago en aproximadamente dos días, a partir del 26 de febrero de 1966 (Figura C.10). El desembalse de ese volumen de agua dio lugar a una diferencia de caudal en el río Santa Cruz de 1.312 m³/s. Además, al producirse la rotura en un mes en el cual el lago Argentino presenta niveles máximos, el pico de caudal registrado en la estación Charles Fuhr también fue de gran importancia, alcanzando un valor de 2.257 m³/s.

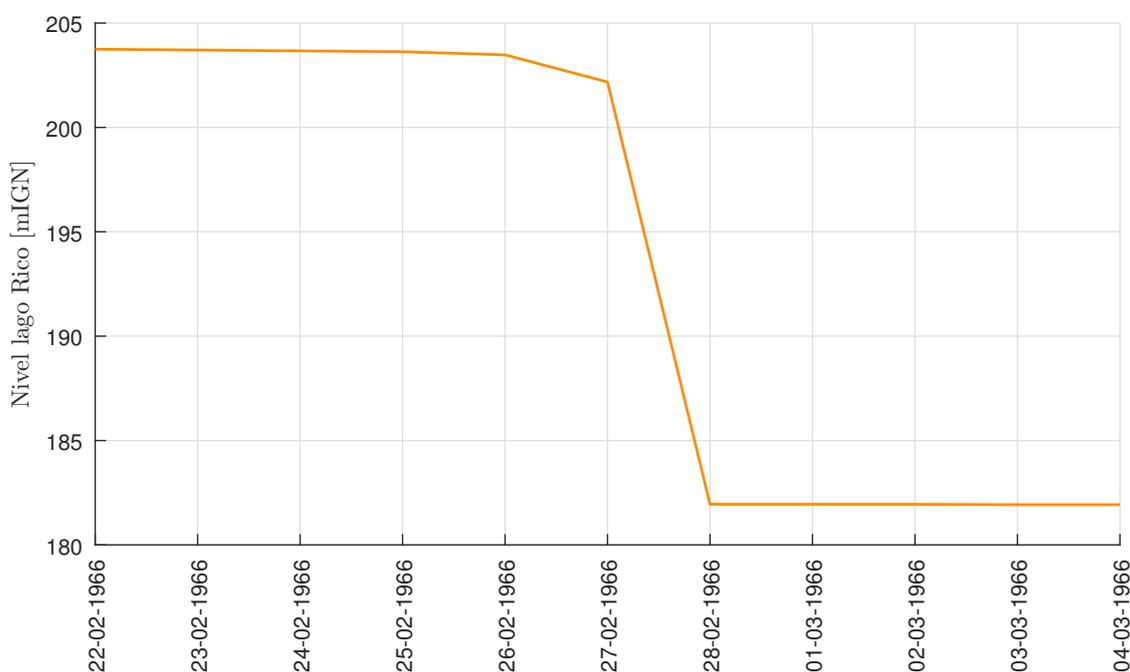


Figura C.10: Niveles del Brazo Rico registrados en la estación homónima del Servicio Meteorológico Nacional en el período de la rotura de febrero de 1966.

La próxima rotura se produjo a fines de febrero de 1970. Posteriormente, se registraron eventos de rotura durante los primeros días de marzo de 1972, el 12 de abril de 1974 y en febrero de 1975. Puede observarse en el gráfico de la Figura C.12 la influencia de los desembalses del lago Rico de la década de 1970 en los caudales del río Santa Cruz.

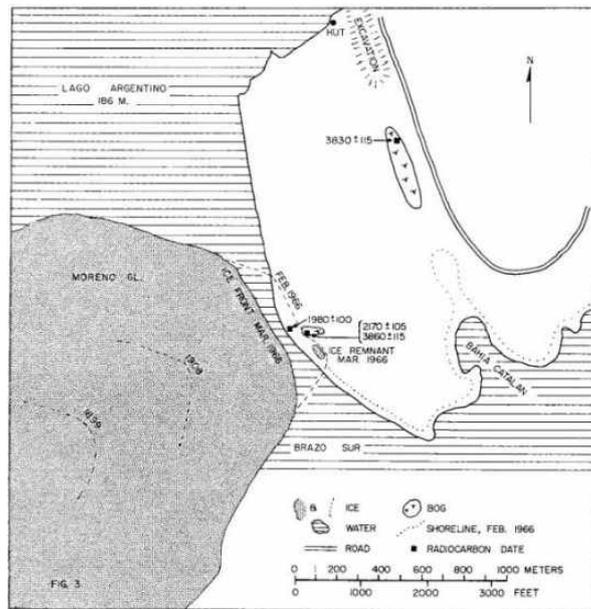


Figura C.11: Croquis de la posición del frente del glaciar Perito Moreno en febrero de 1966, sobre la península de Magallanes, y en marzo del mismo año, después de la rotura (Mercer, 1968).

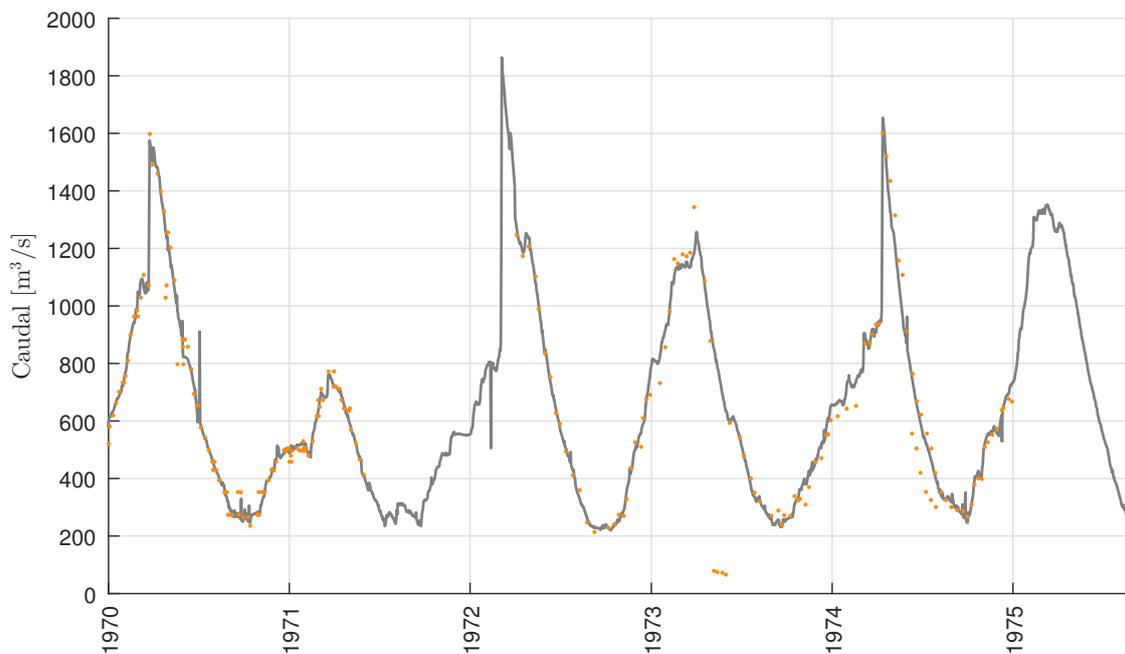


Figura C.12: Caudales registrados en la estación Charles Fuhr de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, desde enero de 1970 hasta septiembre de 1975. Los puntos naranjas corresponden a los aforos realizados en el período.

La rotura de 1970 produjo un aumento de caudal en el río Santa Cruz de casi 500 m³/s; la del año 1972 fue una rotura importante, habiendo alcanzado el lago Rico un nivel de 28 m según Guerrido (2014), sin detallar la cota del cero de la escala en la que realiza esta lectura, lo que provocó un aumento de 1.000 m³/s en el caudal del río; en el 1974, el aumento de caudal es del orden de 700 m³/s; y la rotura del año 1975 es casi imperceptible, se registra un aumento de la descarga del río Santa Cruz del orden de apenas 100 m³/s. La última rotura registrada en la década de 1970 ocurre en el año 1977, pero no se cuenta con más información acerca de la fecha de la misma ni con registros de caudales del río Santa Cruz para gran parte de ese año

que permitan inferirla.

En 1980 el Perito Moreno experimentó un evento de rotura, cuyo tramo final de desembalse y rotura del dique propiamente dicha, ocurrió en poco menos de 30 horas de duración, desde las 10:30 hs del 17 de febrero hasta las 15:10 hs del 18 de febrero (Depetris y Pasquini, 2000; Guerrido, 2014). Este evento ocasionó un aumento de caudal en el río Santa Cruz de casi $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$, sobre un caudal inicial también de gran magnitud, dando lugar a uno de los mayores caudales pico registrados en la estación Charles Fuhr de $2.318 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura C.13).

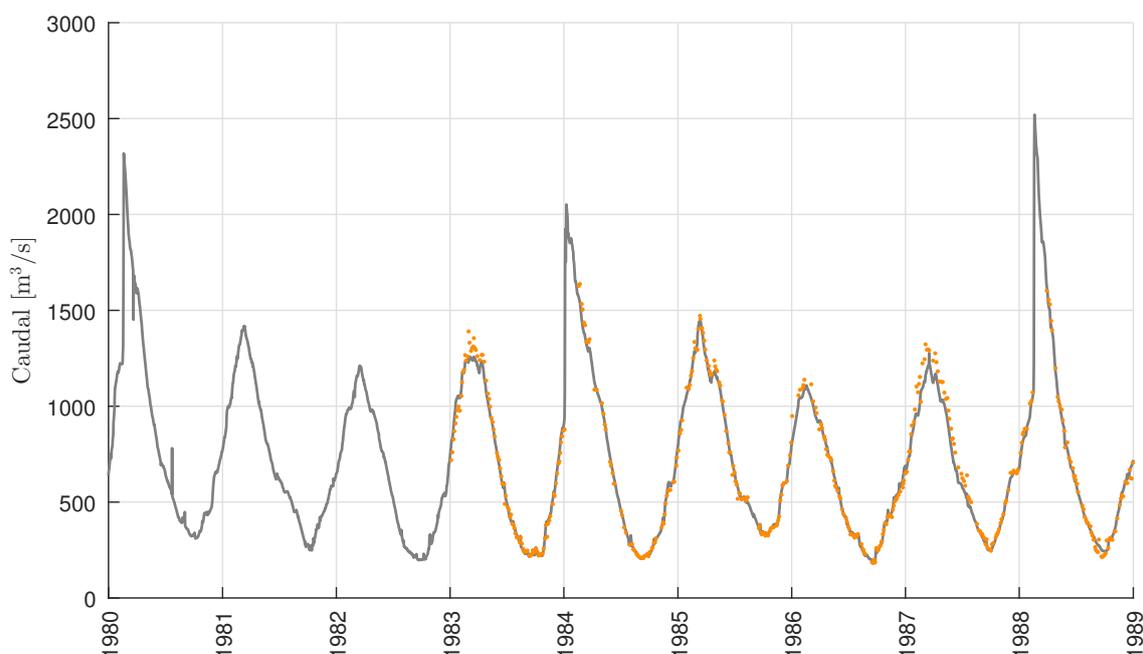


Figura C.13: Caudales registrados en la estación Charles Fuhr de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, desde enero de 1980 hasta diciembre de 1988. Los puntos naranjas corresponden a los aforos realizados en el período.

Posteriormente, el 13 de enero de 1984 volvió a romper el frente del glaciar, dando lugar a un aumento de caudal en el río Santa Cruz de $1.115 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura C.13). Guerrido (2014) informa que, luego de la rotura de este año, se midió la cota mínima del agua en la margen Sur del Brazo Rico y la cota máxima alcanzada por el nivel de agua, resultando un desnivel entre ambas de 27 m frente al glaciar.

En 1988 ocurrió la última rotura registrada en la década de 1980, cuya fecha de cierre se desconoce, pero podría suponerse, debido al nivel alcanzado por el brazo embalsado, que se habría producido en el período de avance del glaciar (junio – diciembre) del año 1986, y no del año anterior a la rotura. Según indican entrevistas realizadas a habitantes de la zona y el Libro de Guardia de la Seccional Moreno del Parque Nacional Los Glaciares, la rotura se produjo en menos de un día, entre las 19:15 hs del 16 de febrero y las 16:30 hs del 17 febrero (Guerrido, 2014). Una publicación del Diario La Nación del 19 de febrero de 1988 informa que el desembalse tuvo una duración de 36 horas. Este artículo también señala que la diferencia de nivel entre el Brazo Rico y el canal de los Témpanos era de 21,75 m el 13 de febrero, y que el 17 del mismo mes habría alcanzado los 22 m. Según la entrevista N° 8 de Guerrido (2014), el nivel del Brazo Rico previo a

la rotura fue de 27 m, de 21,6 m según las entrevistas N° 11 y 12 también de Guerrido (2014), y 19 m según Skvarca (2002), sin indicarse la cota del cero de las escalas en ninguno de los casos.

Si bien no se cuenta con lecturas de niveles de los lagos para el desembalse de 1988, los datos de caudal del río Santa Cruz durante ese periodo muestran el mayor aumento de la descarga del río que se ha registrado: el 16 de febrero, previo al inicio de la rotura, el caudal del río era de 1.075 m³/s, y sólo tres días después, se había elevado a 2.520 m³/s, es decir más del doble del caudal erogado justo antes del evento (Figura C.13). Este valor de caudal además constituye el de mayor magnitud que se ha registrado en la estación Charles Fuhr, ya que la rotura se produjo en el mes de febrero, cuando los niveles en el lago Argentino y los caudales en Charles Fuhr presentan sus máximos.

Posteriormente, durante 16 años el glaciar Perito Moreno permaneció en equilibrio, sin registrar grandes avances. Al final de cada invierno, el frente del glaciar tocaba la península de Magallanes pero sin ejercer la presión suficiente como para bloquear totalmente el paso del agua del lago Rico hacia el canal de Los Témpanos. El 1 de octubre de 2003 el glaciar Perito Moreno alcanzó nuevamente la península de Magallanes y en marzo de 2004 se produjo el siguiente desembalse rápido del lago Rico. Desde ese momento, en promedio cada 2 años ocurre un cierre. Sin embargo, exceptuando el último evento observado en el año 2018, los eventos presentaron magnitudes significativamente menores en comparación con las históricas registradas.

A partir del año 1992, se cuenta con lecturas de los niveles del lago Rico y el lago Argentino en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate de la SIPH, inicialmente con paso diario y a partir de marzo del año 2018 con varias mediciones por día.

Se obtiene de Skvarka y Naruse (2006) que el nivel del lago Rico también fue medido en el muelle del puerto Bajo las Sombras (ubicado en la margen Norte del Brazo Rico, a pocos kilómetros de la zona de encuentro del glaciar Perito Moreno con la península de Magallanes) desde que se produjo el cierre y con paso diario (Figura C.14); y en la margen Sur del Brazo Rico con un indicador de presión de agua durante el período de desembalse (Figura C.16).

La altura del agua antes de la rotura de 2004 fue de 9,35 m según la escala en el puerto Bajo las Sombras (Guerrido, 2014; Skvarka y Naruse, 2006) y de 10,5 m de acuerdo a la escala de la estación Parque Nacional Los Glaciares (Figura C.14).

En cuanto al desnivel entre el lago Rico y el canal de los Témpanos previo a la rotura, Skvarka y Naruse (2006) informa que fue medido el día el 14 de diciembre de 2003 por triangulación topográfica convencional con un distanciómetro electrónico, resultando que el nivel del Brazo Rico era 4,2 m más alto que el del canal de los Témpanos. Según los datos de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, el desnivel entre los lagos antes de que comenzar las primeras filtraciones fue de 7,43 m (Figura C.15).

El desembalse tuvo inicio a las 19:00 hs según Guerrido (2014) y a las 17:00 hs según Skvarka y Naruse (2006) del 11 de marzo, a las 19:10 hs del 14 marzo de 2004 (Intendencia Parque

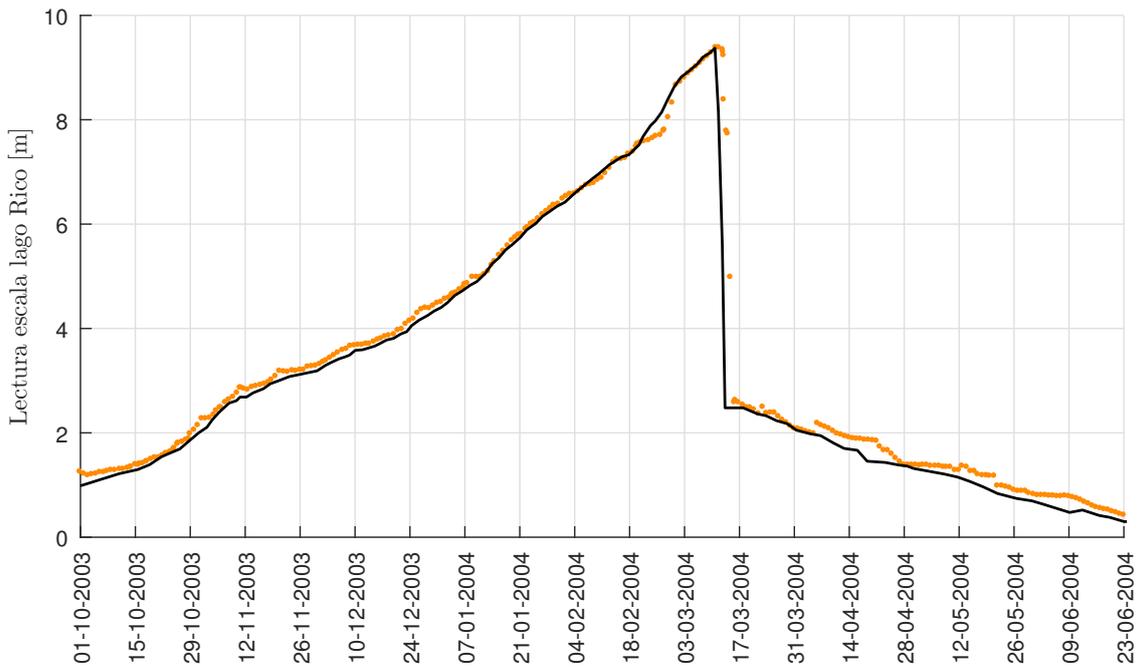


Figura C.14: Variación de niveles del lago Rico desde el 1/10/2003 hasta el 26/6/2004. Fuentes: Skvarca y Naruse (2006), color negro; registros de alturas hidrométricas en la estación Parque Nacional Los Glaciares de la SIPH, color naranja. Las escalas no están referidas al mismo cero (difieren aproximadamente en 1 m), pero la variación del nivel coincide en ambos registros.

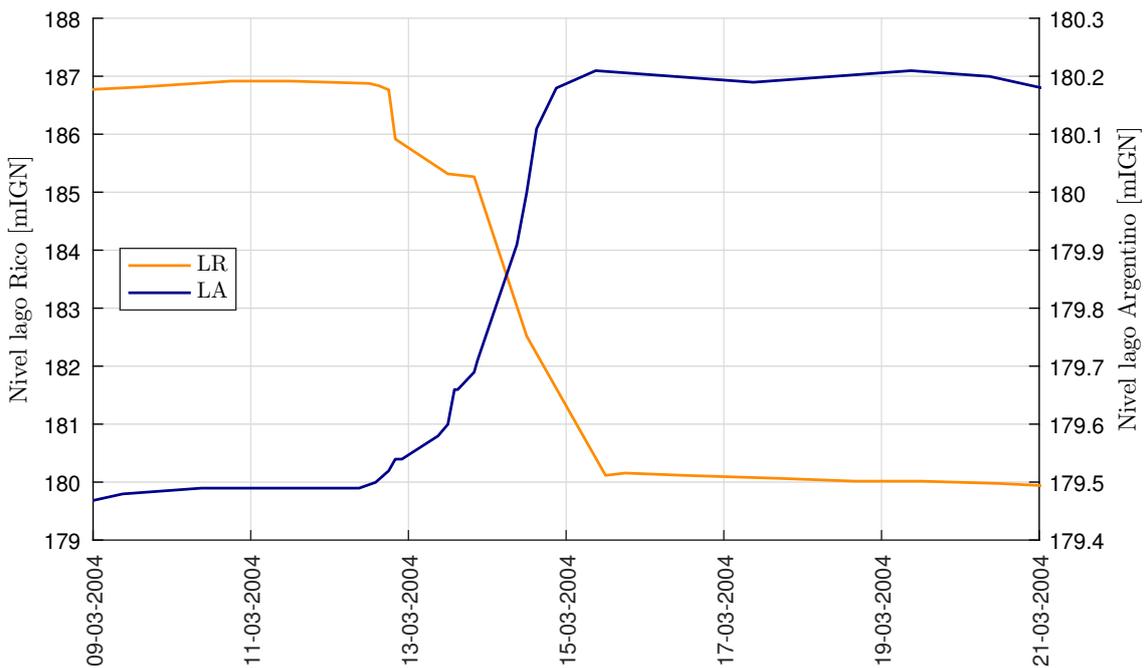


Figura C.15: Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2004, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.

Nacional Los Glaciares; Skvarca y Naruse, 2006) colapsó el dique de hielo formado por el glaciar y a partir del 15 de marzo se igualan los niveles del Brazo Rico y el canal de los Témpano (Figura C.16).

Durante los 4 días que duró el desembalse del lago Rico, el nivel de éste último descendió 6,80 m, y el nivel del lago Argentino se elevó 0,72 m (Figura C.15), lo que dio lugar a un aumento en el caudal del río Santa Cruz de 330 m³/s.

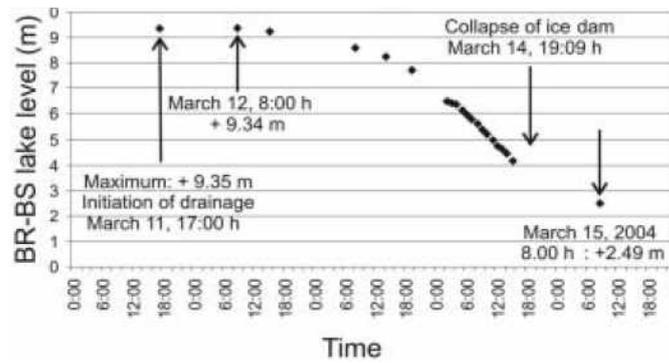


Figura C.16: Variación del nivel del lago Rico durante el evento de desembalse rápido del año 2004, medidos en la margen Sur del Brazo Rico con un indicador de presión de agua (Skvarka y Naruse, 2006).

Del 10 al 13 de marzo de 2006 se produjo el siguiente desembalse rápido del lago Rico, luego de haberse cerrado el canal el 1 de agosto del 2005. El techo del túnel colapsó a las 22:55 hs del 13 de marzo (Intendencia Parque Nacional Los Glaciares). Según los registros de niveles en las estaciones de la SIPH, el 10 de marzo de 2006, previo a iniciarse el evento de desembalse y rotura, el desnivel entre el lago Rico y el canal de los Témpanos fue de 5,13 m. El descenso experimentado por el nivel del lago Rico en los tres días que duró el evento fue de 4,60 m, mientras que el nivel del lago Argentino sufrió un ascenso de 0,56 m (Figura C.17), dando lugar a un aumento de la descarga en el río Santa Cruz de 243 m³/s.

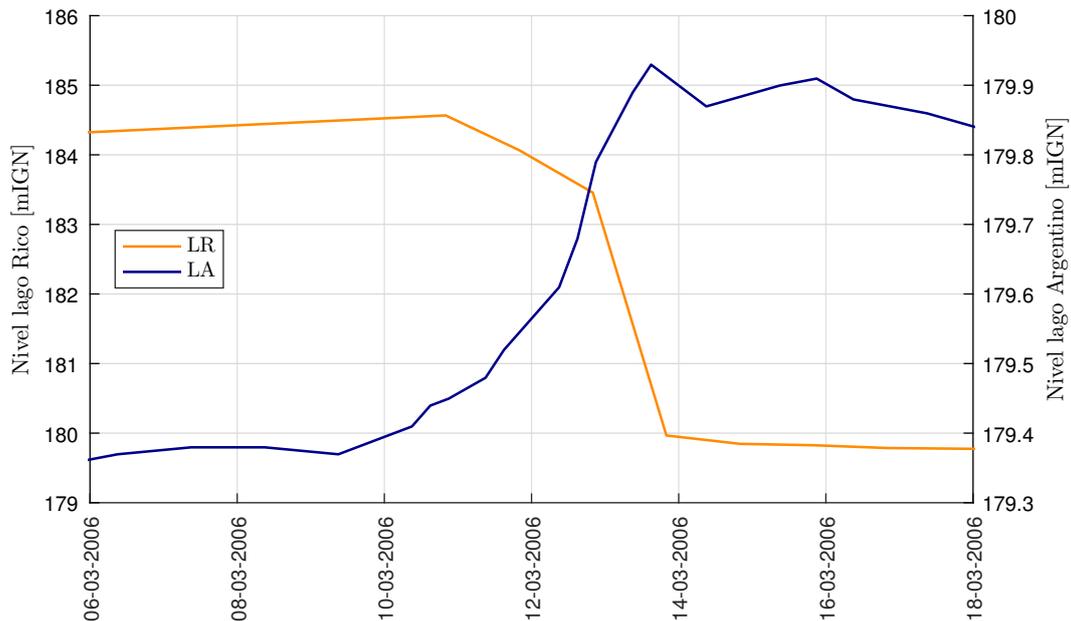


Figura C.17: Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2006, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.

El glaciar Perito Moreno volvió a cerrar el canal el 3 de agosto de 2007, y el año siguiente, en forma excepcional a lo largo de más de un siglo, el glaciar rompió en invierno; las filtraciones comenzaron el día 4 de julio del 2008 y, según Guerrero (2014), el 9 de julio a las 11:20 hs se produjo el colapso del techo del túnel. Según la información dada por la Intendencia Parque Nacional Los Glaciares, la altura de agua en el Brazo Rico previa a la rotura del año 2008 fue de 7,9 m, sin aclarar expresamente el cero de la escala utilizada. Según los registros en las

estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate (Figura C.18), la rotura se produjo el día 4 de julio de 2008 y tuvo una duración de aproximadamente 3 días, habiendo descendido el nivel del lago embalsado 7,13 m para el 7 de julio del mismo año, produciendo un incremento en los caudales del río Santa Cruz de 187,6 m³/s.

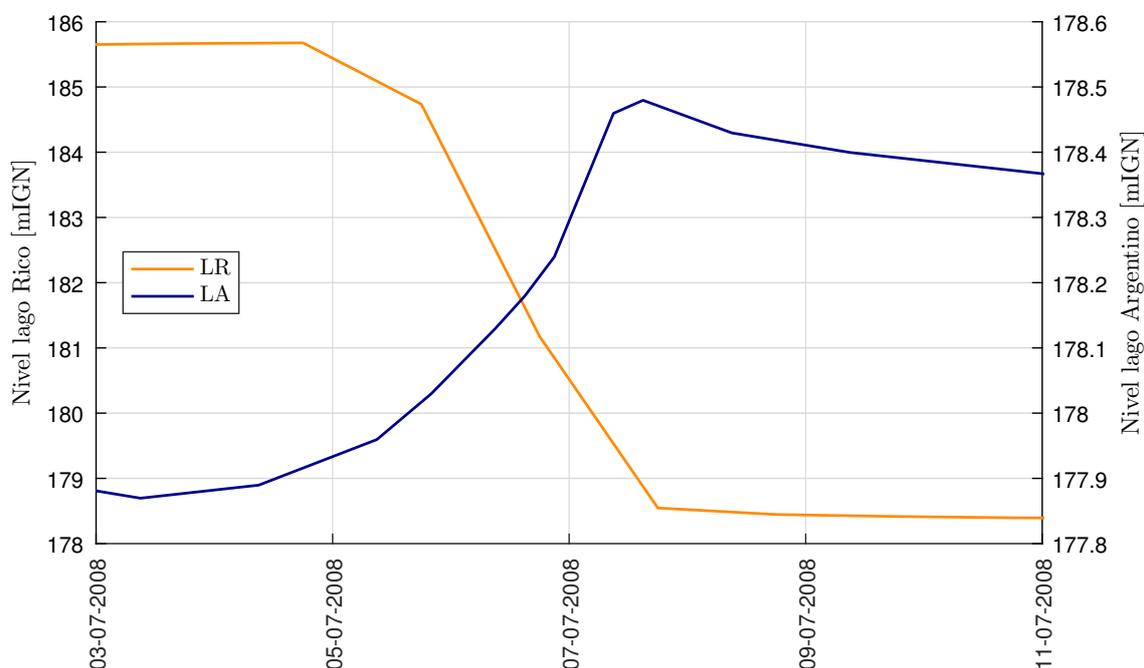


Figura C.18: Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2008, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.

El glaciar Perito Moreno volvió a obstruir el canal de los Témpanos el 5 de noviembre de 2011, hasta el 29 de febrero del año siguiente, que el lago Rico alcanza su nivel máximo. Según Guerriero (2014), el nivel alcanzado por el Brazo Rico previo a la rotura fue de 5,93 m, nuevamente sin especificar a qué cero está referido la escala en la que se realizó esta lectura. Ese día comenzó la descarga de agua hacia el canal de los Témpanos y el 3 de marzo de 2012 colapsó el techo del túnel del Perito Moreno a las 3:45 hs de la madrugada (Intendencia Parque Nacional Los Glaciares), día en el cual se produce el nivel máximo alcanzado por el lago Argentino debido a un ascenso marcado de su nivel de 0,56 m en dos días. Sin embargo, en los registros de los niveles del lago Rico de la SIPH (Figura C.19) se observa que el desembalse continúa luego de la rotura hasta el 11 de marzo del 2012, cuando los niveles del lago Rico se estabilizan, habiendo descendido en total 5,10 m y provocando un ligero aumento de la descarga del río Santa Cruz de 116 m³/s.

La próximas dos roturas, ambas del año 2013, no son súbitas como las demás que se han presentado, sino que son progresivas. La variación de los niveles del brazo embalsado no es abrupta sino que las descargas presentan duraciones mayores, los desniveles entre los lagos previos a la rotura son menores y la influencia de los eventos en los caudales del río Santa Cruz son casi imperceptibles.

La primera, según Lenzano et al. (2018) se produjo el 19 de enero del 2013, habiendo comenzado las filtraciones el 21 de noviembre del 2012 y habiéndose producido el cierre el 1 de octubre del

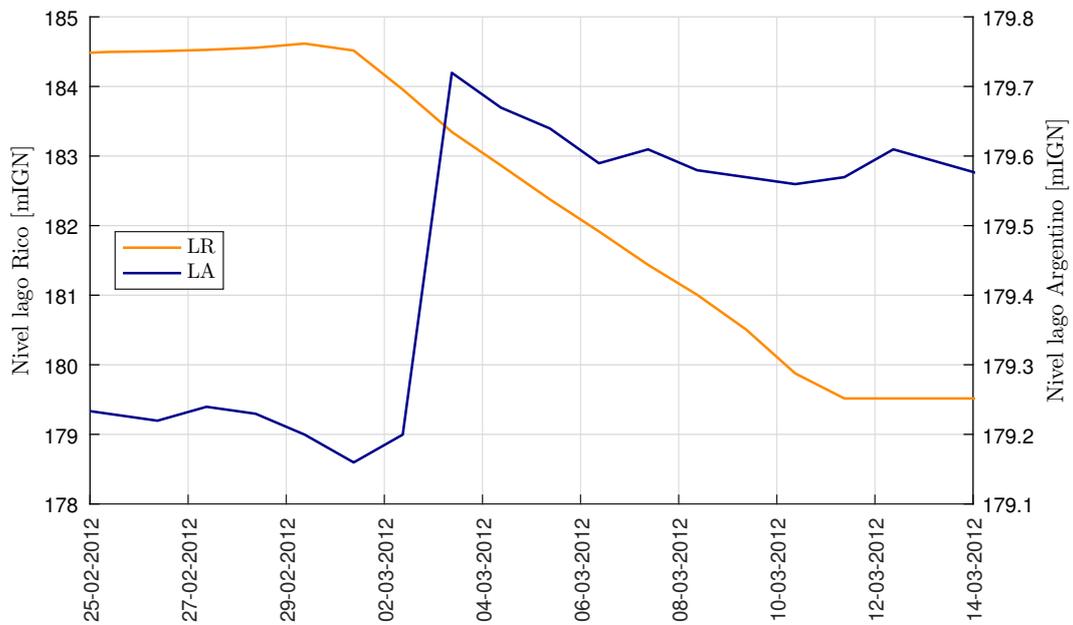


Figura C.19: Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2012, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.

mismo año. Según los registros de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, la diferencia de nivel entre los lagos alcanza un valor de 1,9 m el día que comienzan las filtraciones y se anula recién en los primeros días de marzo, resultando un desembalse de 98 días de duración.

Se produce un nuevo cierre el 10 de septiembre de 2013, las filtraciones inician el 18 de diciembre, cuando el desnivel entre los lagos era de 3,4 m, y el 30 del mismo mes se produce la rotura del techo del túnel. Los niveles entre los lagos se igualan los últimos días de febrero del año siguiente, 70 días después de comenzar el desembalse.

El 26 de octubre del año 2015 el glaciar Perito Moreno vuelve a entrar en contacto con la península de Magallanes, el 8 de marzo de 2016 comienza la descarga hacia el canal de los Témpanos y el 10 del mismo mes se produce la rotura del techo del túnel formado en el hielo. El desnivel entre los lagos previo a la rotura fue de 7,6 m. El desembalse se produce aproximadamente en 3 días, descendiendo el nivel del lago Rico 5,86 m en este lapso, provocando un aumento del nivel del lago Argentino de 0,68 cm (Figura C.20) y de la descarga del río Santa Cruz de 267 m³/s.

La última rotura sucede el 11 de marzo de 2018 por la noche, habiéndose iniciado las filtraciones el día anterior a primera hora a través del dique de hielo formado hacía un año aproximadamente (el cierre se produjo el 30 de junio del año 2017). El desnivel entre los lagos antes de comenzar las primeras filtraciones fue de 10,8 m. El desembalse del lago Rico ocurre en aproximadamente 3 días, produciéndose un descenso de su nivel del en ese lapso de 9,8 m y un ascenso del nivel del lago Argentino de 1,0 m (Figura C.21). Esta rotura da lugar a un aumento de la descarga del río Santa Cruz de 593 m³/s, que se monta sobre un caudal inicial del río de 1.677 m³/s, resultando un caudal pico registrado en la estación Charles Fuhr de 2.270 m³/s (Figura C.22). Vale la pena resaltar que el caudal de diseño de las obras de desvío para la construcción de las presas sobre el río Santa Cruz es de 2.100 m³/s y se corresponde a una recurrencia de 25 años. Esta rotura

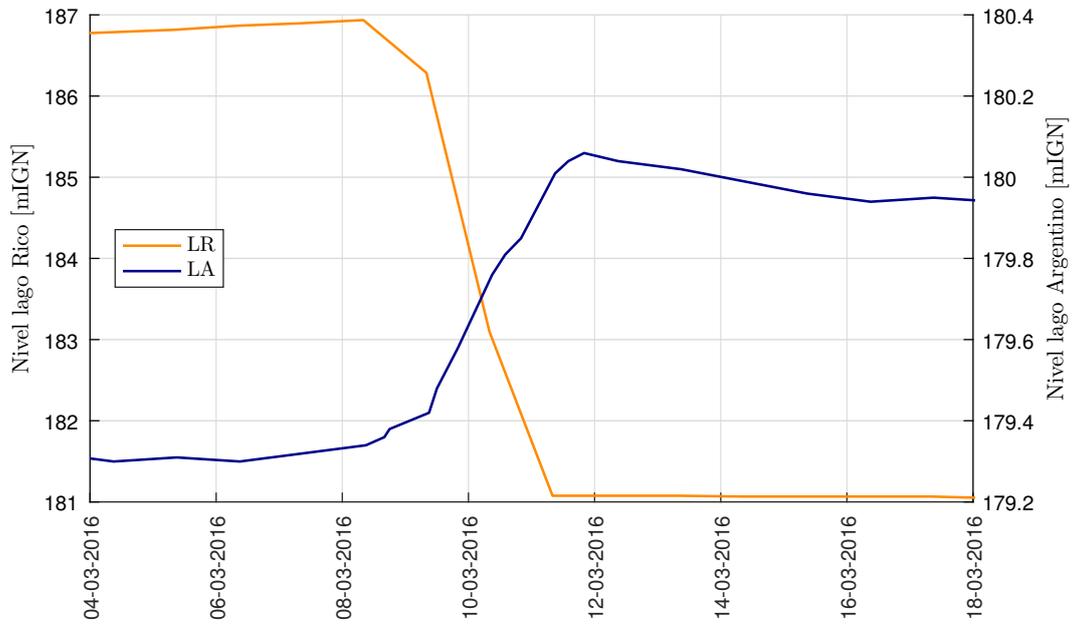


Figura C.20: Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2016, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.

dio lugar a un caudal pico levemente superior al caudal de diseño anteriormente mencionado, el cual no se registraba desde la rotura del año 1988, es decir, hacía 30 años.

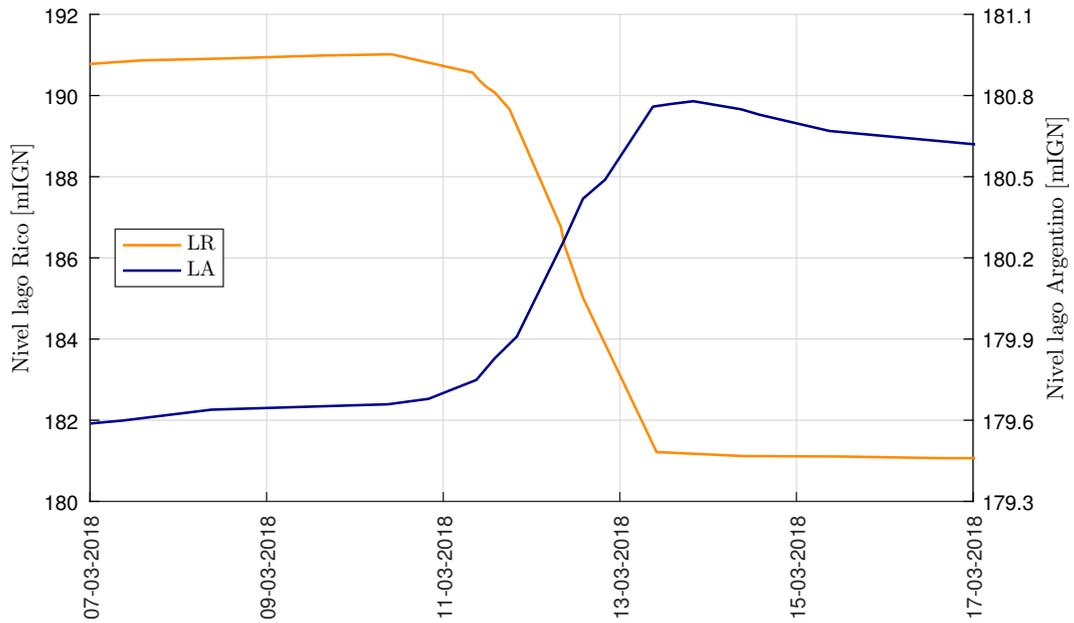


Figura C.21: Niveles del lago Rico (N_{LR}) y el lago Argentino (N_{LA}) en el período de la rotura del año 2018, registrados en las estaciones Parque Nacional Los Glaciares y El Calafate, respectivamente, de la SIPH.

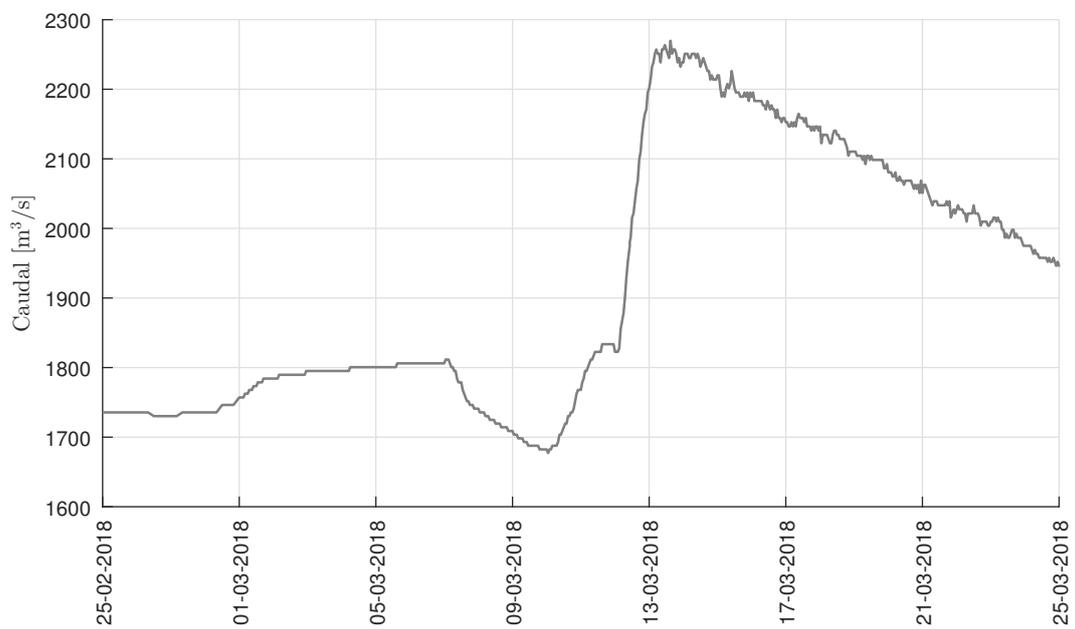


Figura C.22: Caudales en el río Santa Cruz en el período de la rotura de marzo de 2018. Para esta rotura no se cuenta con registros de caudales en Charles Fuhr, pero sí con alturas hidrométricas, que permiten obtener los caudales que se produjeron a partir de una ley que los relaciona.

C.1. Referencias bibliográficas

Bertone, M. (1972). Aspectos Glaciológicos de la Zona del Hielo Continental Patagónico. Contribución del Instituto Nacional del Hielo Continental Patagónico. Ministerio de Cultura y Educación. Buenos Aires.

Depetris, P. J., Pasquini, A. I. (2000). The hydrological signal of the Perito Moreno Glacier damming of Lake Argentino (southern Andean Patagonia): the connection to climate anomalies. *Global and Planetary Change*, 26(4), 367-374.

Feruglio, L. (1944). Estudios Geológicos y glaciológicos en la Región del lago Argentino. *Bol. Ac. Nac. de Ciencias*. Córdoba.

Guerrido, C. M. (2015). Respuestas del bosque patagónico a inundaciones recurrentes. Universidad Nacional del Comahue.

Heim, A. (1951). Informe sobre un estudio glaciológico en el Parque Nacional Los Glaciares. República Argentina: Administración general de Parques Nacionales.

Heisheimer, G. (1954). Der Durchbruch des Morenogleschers, Lago Argentino, Patagonien. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, III/1, 33–45.

Lenzano, M. G., Lannuttia, E., Tothb, C., Lenzano, L., Lo Vecchio, A., Falaschia, D., Vich, A. . (2018). Analyzing the oscillations of the Perito Moreno Glacier, using time-lapse image sequences. *Cold Regions Science and Technology*, 146, 155-166.

Liss, C. (1970). Der Morenogletscher in der Patagonischen Kordillere: sein ungewöhnliches Verhalten seit 1899 und der Eisdamm durchbruch des Jahres 1966. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, VI(1-2), 161-180.

Mercer, J. (1968). Variations of some Patagonian glaciers since the Late-Glacial. *American Journal of Science*, 266, 91–109.

MINPLAN. (2012). APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ (Pte. KIRCHNER y Gdor. CEPERNIC) TÍTULO V – Documentación Técnica. CAPÍTULO I – Hidrología. Pliego Licitación Pública. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. Secretaría de Obras Públicas. Subsecretaría de Recursos Hídricos.

Nichols, R.L., Miller, M.M. (1952). The Moreno Glacier, Lago Argentino, Patagonia. Advancing glaciers and nearby simultaneously retreating glacier. *Journal of Glaciology* 2, 41–46.

Raffo, J. M., Colqui, B. S., Madejski, M. E. (1953). Glaciar Moreno. *Revista Meteoros*. Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional.

Skvarca, P. (2002). Importancia de los Glaciares del Hielo Patagónico Sur para el desarrollo regional. XV Congreso Geológico Argentino. El Calafate.

Skvarca, P., Naruse, R. (2006). Overview of the ice-dam formation and collapse of Glaciar Perito Moreno, southern Patagonia in 2003/04. *Journal of Glaciology*, 52(177), 318-320.

Stuefer, M. (1999). Investigations on Mass Balance and Dynamics of Moreno Glacier based on Field Measurements and Satellite Imagery. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.

Volpi, A.C., Grandi, A.L. (1940). El Ventisquero Moreno. *La Ingeniería*, Tomo XLIV, págs. 54-63. Buenos Aires.

Anexo D

DETERMINACIÓN DE CURVAS COTA - VOLUMEN EN LAGO RICO Y LAGO ARGENTINO

D.1. Objetivo

La caracterización del comportamiento hidrológico del sistema de lagos de la cuenca del lago Argentino requiere, entre otras cosas, la determinación de la relación entre las cotas de superficie de los lagos y los volúmenes asociados de los cuerpos de agua. A partir de ello, es posible modelar la propagación de ondas de crecidas en los lagos como también estimar las zonas afectadas correspondientes con dichos eventos hidrológicos.

En principio, la metodología más certera de obtener la relación cota - volumen de los lagos, es realizar un relevamiento topobatimétrico del área que comprende el espejo de agua como también de sus costas. Con ello se pueden trazar curvas de nivel, luego calcular las áreas circunscriptas para cada cota en la zona del lago y luego estimar los volúmenes asociados.

No obstante, la imposibilidad de realizar dichos trabajos topográficos, o bien la no disponibilidad del tiempo y recursos que requiere desarrollarlos, promueven el abordaje de metodologías alternativas para tal fin. En este sentido, la utilización de sensores remotos permite agilizar los tiempos y disminuir los recursos requeridos para estimar las relaciones cota - volumen aunque, por otro lado, la precisión de los resultados es menor respecto a la obtenida con relevamientos topográficos tradicionales.

En el presente anexo se propone una metodología para emplear imágenes LANDSAT 8 juntamente con los registros de altura de las estaciones hidrométricas existentes a fin de estimar las relaciones cota - área y cota - volumen de los lagos Argentino y lago Rico en sus niveles de

variación normal y superiores hasta cota 210 mIGN, completando y ajustando las relaciones obtenidas con el modelo MDE-Ar 2.0 del Instituto Geográfico Nacional (IGN). En función de esta metodología y la información disponible, se presentan los resultados obtenidos, relaciones cota - área y cota - volumen.

D.2. Metodología

El proceso planteado para arribar a los objetivos de este trabajo se divide en dos bloques:

1. El primer bloque aborda la determinación de las relaciones cota - área de los lagos para un rango de variaciones de nivel que son normales a partir de su frecuencia de ocurrencia. Este proceso se realiza mediante el procesamiento de las imágenes LANDSAT 8 y los registros de altura de las estaciones hidrométricas existentes. Conceptualmente, el bloque se aborda en tres pasos:
 - a) obtener la información altimétrica del nivel de agua y la extensión de la superficie libre de los lagos estudiados;
 - b) establecer una vinculación entre los distintos tipos de información que dará lugar a relación cota - área;
 - c) integrar dicha relación para establecer la ley cota - volumen como resultado final.
2. El segundo bloque presenta la estimación de la relación cota - volumen para todo el rango de niveles esperables en los lagos. Para esto, se debe comenzar con establecer la compatibilidad entre la curva cota - área obtenida mediante el procesamiento de las LANDSAT y aquella obtenida mediante el modelo MDE-Ar 2.0, para luego obtener los volúmenes almacenados como una integración de estas.

D.3. Primer bloque: curva cota – área para niveles normales

D.3.1. Información disponible

La información altimétrica del nivel de agua en los lagos disponible proviene de dos estaciones limnimétricas dispuestas una de ella sobre el lago Argentino y la otra sobre el Brazo Rico. Estas estaciones relevan un valor diario del nivel del pelo de agua que es almacenado y posteriormente publicado por el Sistema Nacional de Información Hídrica de forma periódica (SIPH, 2021).

La estación hidrométrica del lago Argentino, con coordenadas Latitud 50° 19' 12,00" S y Longitud 72° 15' 39,60" O, se encuentra ubicada sobre el lago Argentino (Figura D.1). La serie de registros cuenta con datos desde el año 1992 hasta 2020. La cota del cero de la escala 174,8696 mIGN (SRVN71) de acuerdo al relevamiento realizado por la Contratista (UTE, 2015).

La estación hidrométrica del Brazo Rico, con coordenadas Latitud 50°25'34" S y Longitud 72° 44' 52,20" O, se localiza sobre la zona este del brazo. La estación cuenta con registros desde el año 1992 hasta 2021 (Figura D.2). La cota del cero de la escala 176,516 mIGN (SRVN71). La cota del cero de la escala 176,516 mIGN (SRVN71).

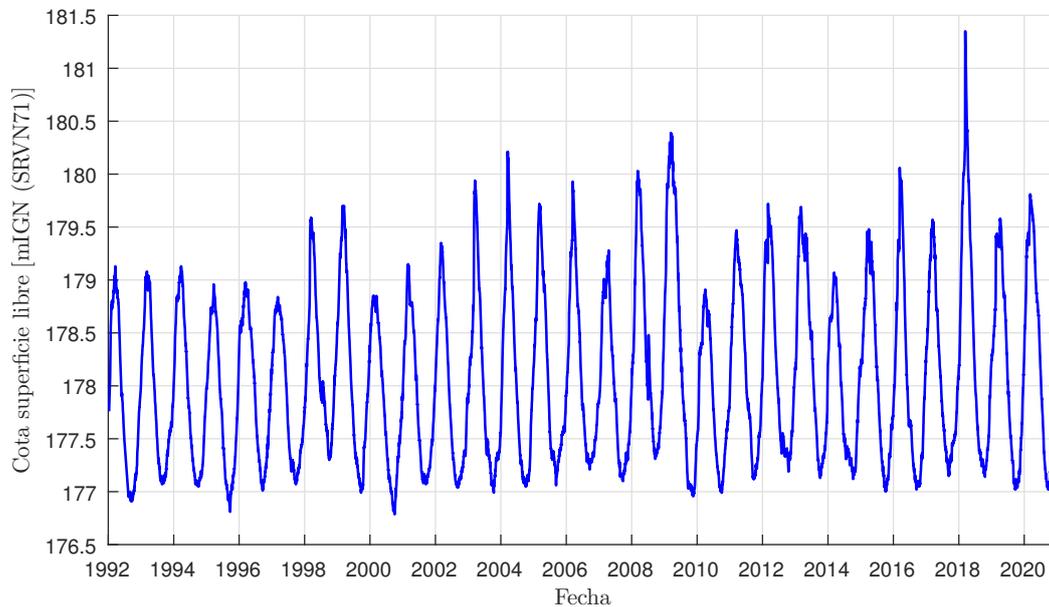


Figura D.1: Serie de registros desde el año 1992 hasta 2020, Estación El Calafate, ubicada sobre el lago Argentino. Cota del Cero de la Escala 174,8696 mIGN (SRVN71).

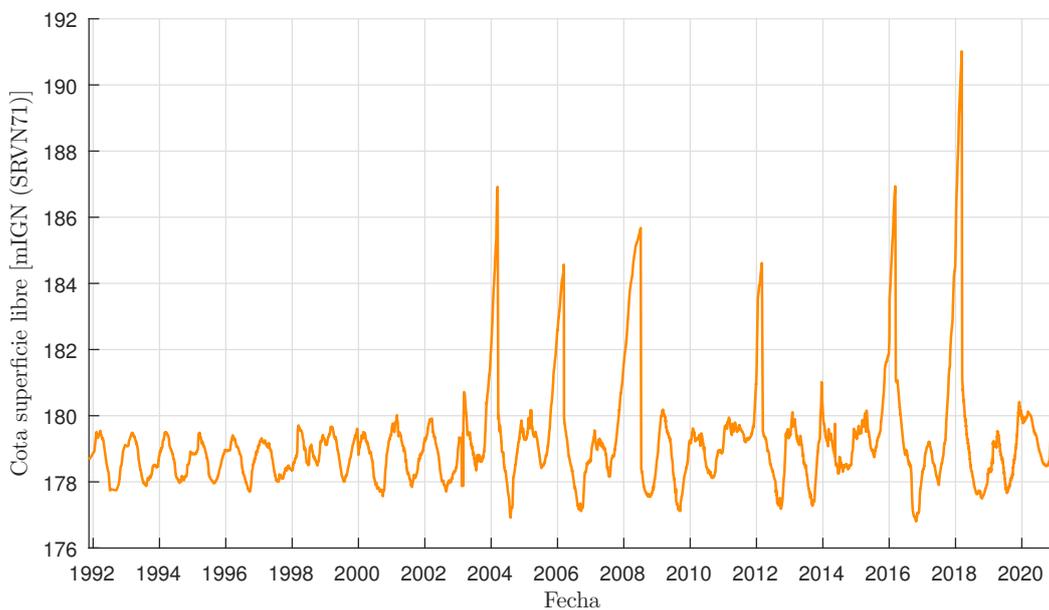


Figura D.2: Serie de registros desde el año 1991 hasta 2020 de la Estación Lago Rico. Cota del Cero de la Escala 176,516 mIGN (SRVN71).

La información referente al área de la superficie libre de los espejos de agua se obtiene a partir del procesamiento de imágenes satelitales que deberán ser procesadas para delimitar los márgenes del espejo de agua respecto de las otras coberturas del suelo.

Las imágenes empleadas en este proceso son las provistas por el satélite LANDSAT 8, en particular las bandas espectrales del sensor OLI (Operational Land Imager) que cubren el espectro

desde los 0,433 μm a los 1,390 μm (Tabla D.1). Este proyecto releva imágenes desde abril de 2013 con una frecuencia de 16 días para el mismo punto de la tierra. Estas y más características de las imágenes utilizadas pueden encontrarse en el manual de usuario (USGS, 2019).

Banda	Nombre	Longitud de onda [μm]	Resolución [m]
1	Costera - Aerosoles	0.435 - 0.451	30
2	Azul	0.452 - 0.512	30
3	Verde	0.533 - 0.590	30
4	Rojo	0.636 - 0.673	30
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 - 0.879	30
6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.566 - 1.651	30
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.107 - 2.294	30
8	Pancromática	0.503 - 0.676	15
9	Cirrus	1.363 - 1.384	30

Tabla D.1: Características de las bandas espectrales generadas por el sensor OLI del satélite LANDSAT 8 (USGS, 2019).

Las imágenes empleadas en este trabajo corresponden a un producto procesado y ofrecido por la U.S. Geological Survey (USGS), imágenes LANDSAT 8 Collection 1 Level 2 e imágenes LANDSAT 8 Collection 2 Level 2. Estos productos ofrecen la información relevada en términos de reflectancia de superficies y con diferentes correcciones vinculadas al posicionamiento geográfico, la presencia de nubosidad, entre otras mejoras que se realizan a partir de los avances tecnológicos.

D.3.2. Procesamiento imágenes LANDSAT

Como se comentó anteriormente, el propósito de utilizar las imágenes LANDSAT es el de determinar el área de los espejos de agua de los lagos estudiados. A tal fin, se debe llevar a cabo un proceso de clasificación de las imágenes distinguiendo entre aquellos píxeles en los que se observa presencia de agua y aquellos en los que no.

Dicho proceso consiste, en primera medida, en la selección de imágenes que abarquen el área de los lagos y cuya calidad sea aceptable, es decir, no tenga grandes fallas ni mayor presencia de nubosidad.

En una segunda instancia, con las imágenes a trabajar seleccionadas, se comienza con la clasificación de los píxeles. Lo que se observa en este punto es que si bien se tiene una buena representación del agua por parte de la composición RGB (Red, Green, Blue), se presentan diferentes problemas para la clasificación como:

- Los valores de RGB asociados a la presencia de agua cambian de valores según diferentes factores como el horario de la captura de la imagen, el estado de la atmósfera, la radiación solar, la temperatura, presencia de sedimentos, calidad del agua, etc.
- La presencia de sombras dadas por la nubosidad o de origen orográfico evitan la distinción de cuerpos de agua.

- Confusión de colores, la composición RGB de las bandas espectrales puede arrojar colores similares para distintas coberturas del suelo llevando a confusiones en la clasificación de píxeles agua y no-agua (ej. confundir agua con vegetación, construcciones, sombras, etc., o viceversa). Este tipo de confusión se incrementa en casos de agua con gran presencia de sedimentos, materia orgánica, baja profundidad, entre otros.

Ante los problemas observados en el uso de los RGB y haciendo uso del amplio rango de bandas espectrales relevadas por el sensor OLI, se implementa el uso de índices espectrales construidos como una combinatoria algebraica de distintas bandas a los fines de resaltar o acotar los píxeles con presencia de agua.

Los índices empleados en este trabajo son el NDWI, MNDWI y AWEI, de los cuales se empleará el que mejor performance presente.

- Normalized Difference Water Index - *NDWI* (McFeeters, 1996)

$$NDWI = \frac{green - nir}{green + nir} \quad (D.1)$$

- Modification of Normalized Difference Water Index - *MNDWI* (Xu, 2006)

$$MNDWI = \frac{green - swir1}{green + swir1} \quad (D.2)$$

- Automated Water Extraction Index without shadow - *AWEI* (Feyisa et al., 2014)

$$AWEI = blue + 2,5 green - 1,5 (nir + swir1) - 0,25 swir2 \quad (D.3)$$

Una vez calculados estos índices se establecen, mediante una calibración, los umbrales que delimitan dentro del histograma de valores aquellos asociados a la presencia de agua. La aplicación de los umbrales permite la binarización de las imágenes en términos de agua y no agua.

El siguiente paso en este proceso consiste en la vectorización de la imagen, definiendo polígonos de agua y no-agua, desde donde se adoptan los polígonos correspondientes al lago Argentino y el lago Rico.

Por último, con las herramientas del procesamiento de sistemas de información geográficos (SIG) se procede a calcular el área de los lagos para cada imagen procesada.

(a) Calibración de los umbrales de los índices

Para la validación y evaluación del potencial que tienen los distintos índices para clasificar al agua desde los valores de reflectancia en superficie se plantea una metodología cuyo concepto general es evaluar la capacidad que tiene cada índice en distinguir, a partir de la reflectancia de superficie, la presencia o no de agua en cada píxel. En este sentido se reconocen dos tipos de

errores principales: error por omisión, donde a un píxel de agua no se lo clasifica como tal, y error en el nombramiento de píxeles, aquellos píxeles no-agua que se los define como si fueran agua.

La precisión de los índices es evaluada a partir de su contraste con una referencia generada desde registros de alta resolución, en este trabajo emplearon las imágenes provistas por Google Earth.

El procedimiento de calibración consiste en la siguiente serie de pasos:

- I. Se seleccionan diferentes regiones donde se observa el cuerpo de agua en distintas condiciones y en adyacencia a diferentes coberturas del suelo (hielo, bosques, arenas, edificaciones, vegetación, etc.).
- II. Se busca para cada región imágenes de alta resolución (Google Earth) que coincidan temporalmente con las imágenes LANDSAT (que exista la menor diferencia de días entre las fechas de captura de ambas fuentes de imagen) y considerando que no existan eventos hídricos significantes entre las capturas de las imágenes.
- III. Clasificar manualmente en las regiones aquellas áreas de agua y no-agua, dibujando polígonos sobre las imágenes de alta resolución.
- IV. Clasificar aquellas áreas de agua y no-agua en las regiones mediante distintos umbrales para los índices productos de las imágenes LANDSAT.
- V. Contrastar en cada región los resultados de clasificación realizados en los incisos c y d. En este punto se evalúa visualmente la representatividad de los índices y de forma numérica el valor umbral que mejor aproxime las áreas de agua con aquellas definidas por alta resolución.
- VI. Finalmente se ha de evaluar cuál es el índice que mejor performance presenta en la totalidad de las regiones analizadas y con qué valor umbral se obtiene la binarización con el mínimo error.

Se obtiene de este proceso la selección de un índice y un valor umbral que se emplea para binarizar el total de imágenes a procesar.

(b) Correcciones manuales a los polígonos obtenidos del procesamiento

La generalización del proceso de binarización muestra la persistencia de errores en la clasificación de las imágenes. Ante esta situación, se debe realizar una verificación visual y corrección de la representación de los polígonos de los lagos a partir de la composición RGB de las imágenes.

Luego de finalizado este proceso manual y exhaustivo, se realiza una corrección por una única persona para unificar el criterio de trazado y disminuir el error humano inherente.

D.3.3. Vinculación entre la extensión areal de los lagos y las cotas de superficie libre.

A partir de los registros hidrométricos disponibles y las áreas generadas mediante el procesamiento de las imágenes LANDSAT, se establece una vinculación entre los niveles registrados y el área de los lagos mediante su fecha de relevamiento.

A raíz de los puntos obtenidos de esta vinculación se puede obtener una generalización de la relación para el rango de niveles representados aproximando dicha relación a una función potencial o polinómica.

D.3.4. Estimación de la capacidad de almacenamiento de los lagos.

Uno de los productos más relevantes que se puede obtener de este trabajo es la relación cota - volumen almacenado de los lagos que se obtiene a partir de la relación cota - área.

El cálculo del volumen entre áreas se ha de realizar mediante el Método del Área Promedio o el Método de Aproximación Cónica.

Método del área promedio

$$V = \frac{A1 + A2}{2} h \quad (D.4)$$

Donde V es el volumen, $A1$ y $A2$ son las áreas del nivel superior e inferior, y h la distancia entre las dos áreas (diferencia entre niveles).

Método de aproximación cónica

$$V = \frac{h}{3} (A1 + A2 + \sqrt{A1 A2}) \quad (D.5)$$

Donde V es el volumen, $A1$ y $A2$ son las áreas del nivel superior e inferior, y h la distancia entre las dos áreas (diferencia entre niveles).

A raíz de los puntos obtenidos de esta vinculación entre el nivel y el volumen, se puede obtener una generalización para el rango de niveles representados aproximando dicha relación a una función lineal o polinómica.

Cabe destacar que, ante la imposibilidad de conocer el volumen de agua de los lagos en la condición del nivel mínimo registrado, no se puede establecer volumen absoluto de los lagos. El producto que se obtiene es el volumen comprendido en el rango de variación de los niveles, la capacidad de almacenamiento.

D.3.5. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras aplicar la metodología descrita anteriormente.

(a) Calibración

Para llevar a cabo la calibración se seleccionaron 5 regiones representativas de las condiciones que se observan en la extensión de los lagos. La Figura D.3 muestra la ubicación de dichas regiones y en la Figura D.4 se puede ver una imagen ilustrativa de las particularidades de cada región.

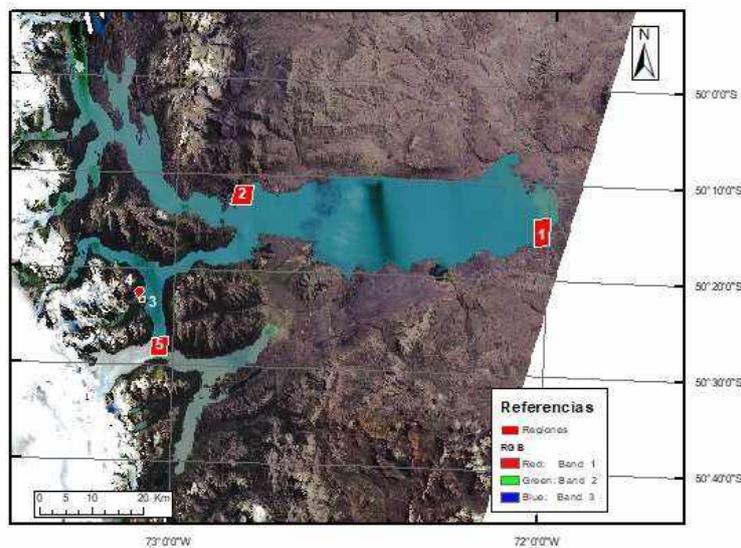


Figura D.3: Regiones empleadas para la calibración de los índices y umbrales sobre los lagos estudiados.

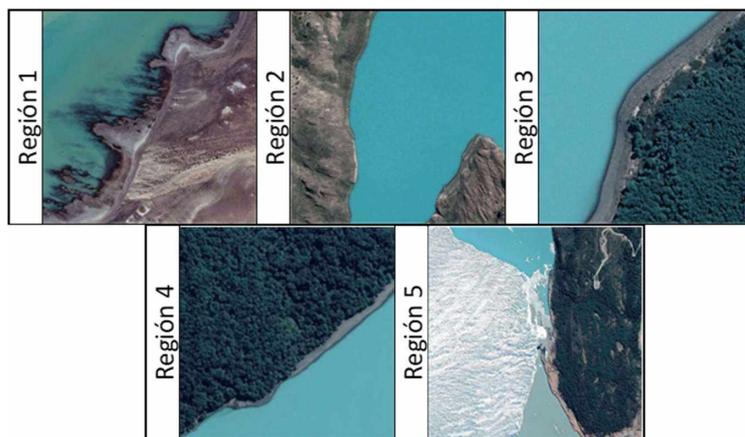


Figura D.4: Referencia de las coberturas de suelo de las regiones seleccionadas (imagen compuesta Google Earth).

En la Tabla D.2 se indica la extensión del área de cada región como también una estimación del error esperable por la resolución de las imágenes LANDSAT sobre el análisis de dicha región.

Durante el proceso de calibración se contrastaron las imágenes satelitales de distintas fuentes

Región	Área [ha]	Representatividad del píxel
1	1567	0,01%
2	1350	0,01%
3	90	0,10%
4	221	0,04%
5	1179	0,01%

Tabla D.2: Áreas de las regiones de calibración.

y resolución a partir de su proximidad temporal (Tabla D.3). Como resultado de esto, en primera medida se obtuvo la binarización de las imágenes de alta resolución, distinguiendo superficies de agua y no-agua (Figura D.5), y en segundo lugar se obtuvieron los índices calculados mediante las imágenes LANDSAT, acotadas a las regiones de análisis (Figura D.6).

Fecha	Mosaico	Imagen	Fuente
20181028	Región 1(A)*	-	Google Earth
20180227	Región 1(B)*	-	Google Earth
20181109	Región 2(A)*	-	Google Earth
20160301	Región 2(B)*	-	Google Earth
20181106	Región 3(A)*	-	Google Earth
20160305	Región 3(B)*	-	Google Earth
20181106	Región 4(A)*	-	Google Earth
20160305	Región 4(B)*	-	Google Earth
20130918	Región 5(A)*	-	Google Earth
20181030	230-095	LC08_L1TP_230095_20181030_20181115_01_T1	U.S. Geological Survey
20180216	230-095	LC08_L1TP_230095_20180216_20180307_01_T1	U.S. Geological Survey
20181106	231-095	LC08_L1TP_231095_20181106_20181115_01_T1	U.S. Geological Survey
20160305	230-095	LC08_L1TP_231095_20160305_20170328_01_T1	U.S. Geological Survey
20130829	230-095	LC08_L1TP_230095_20130829_20170502_01_T1	U.S. Geological Survey

* Regiones definidas en el desarrollo de este trabajo.

Tabla D.3: Imágenes empleadas para el proceso de calibración.

En una instancia posterior, se procedió a proponer diferentes valores umbrales para binarizar los índices obtenidos y así clasificar los píxeles de las imágenes LANDSAT en agua y no-agua. Este procedimiento se realizó de forma independiente en cada región de análisis, y para cada imagen considerada, buscando obtener la menor discrepancia entre las áreas definidas con imágenes de alta resolución y las que la binarización del índice arroja. Asimismo, se extendió el análisis para un rango de umbrales que nos permitiese obtener una sensibilidad del error cometido. Los resultados de esta tarea para los índices NDWI, MNDWI y AWEI se presentan en la Tabla D.4, Tabla D.5 y Tabla D.6 respectivamente (los detalles del procesamiento se encuentran en el Anexo D.I).

En los resultados obtenidos se pudo observar que para las regiones 1, 2, y 3 se alcanza una buena aproximación, con diferencias menores al 1 %. Para la región 5 y en una de las fechas analizadas en la región 4 se observa una mayor dificultad en la determinación del área de agua. No obstante, se ha logrado realizar una aproximación con diferencias menores al 2 % para los índices NDWI, MNDWI y AWEI. Por último, en la otra fecha analizada para la región 4 (región 4-A) la determinación del área se vuelve mucho más sensible al índice y umbral seleccionado, se

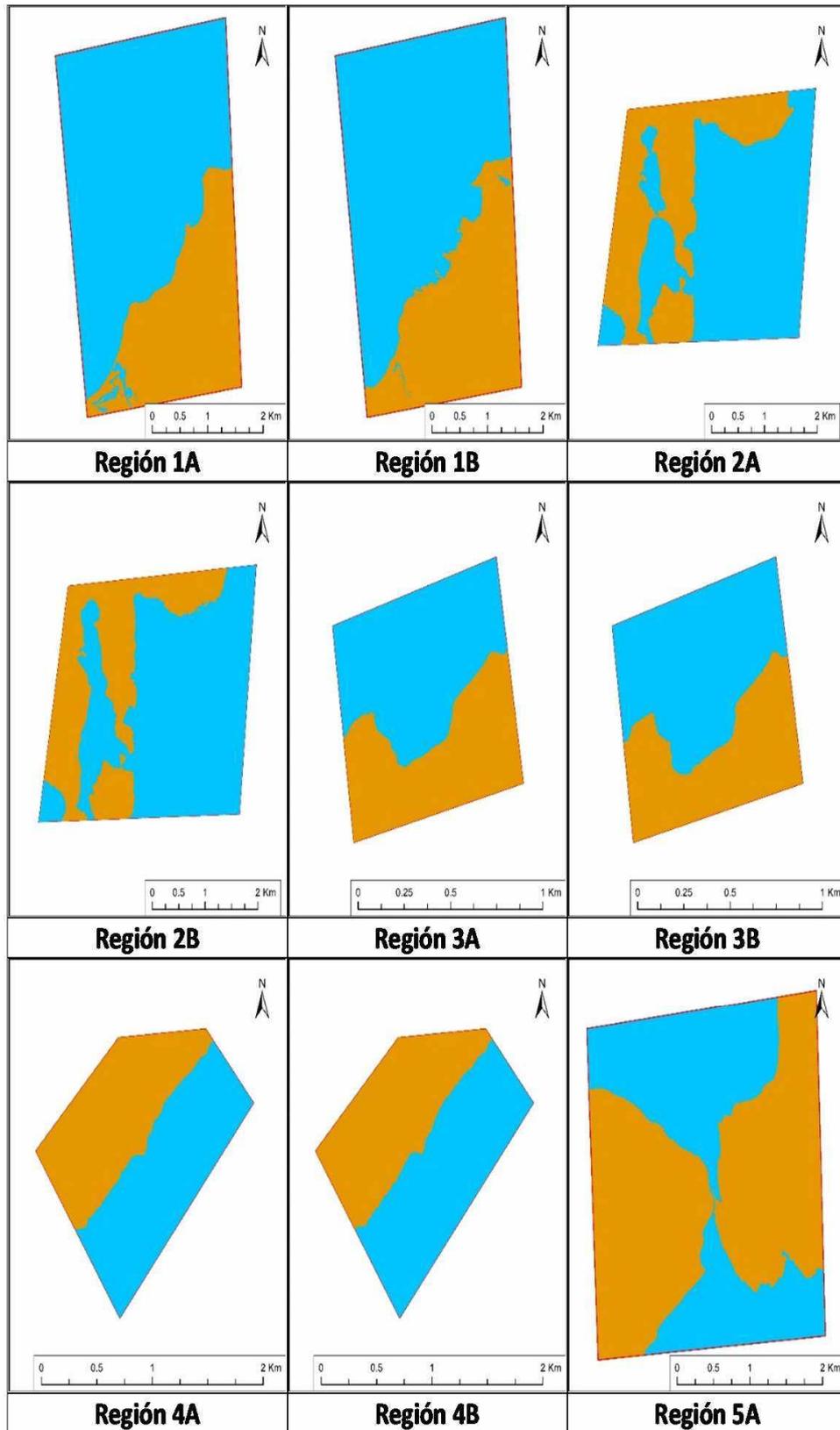


Figura D.5: Binarización de las imágenes de alta resolución para las distintas regiones y fechas empleadas en la calibración.

obtiene para el NDWI un error mínimo menor al 1 %, y para los índices MNDWI y AWEI un error mínimo del orden del 5 %.

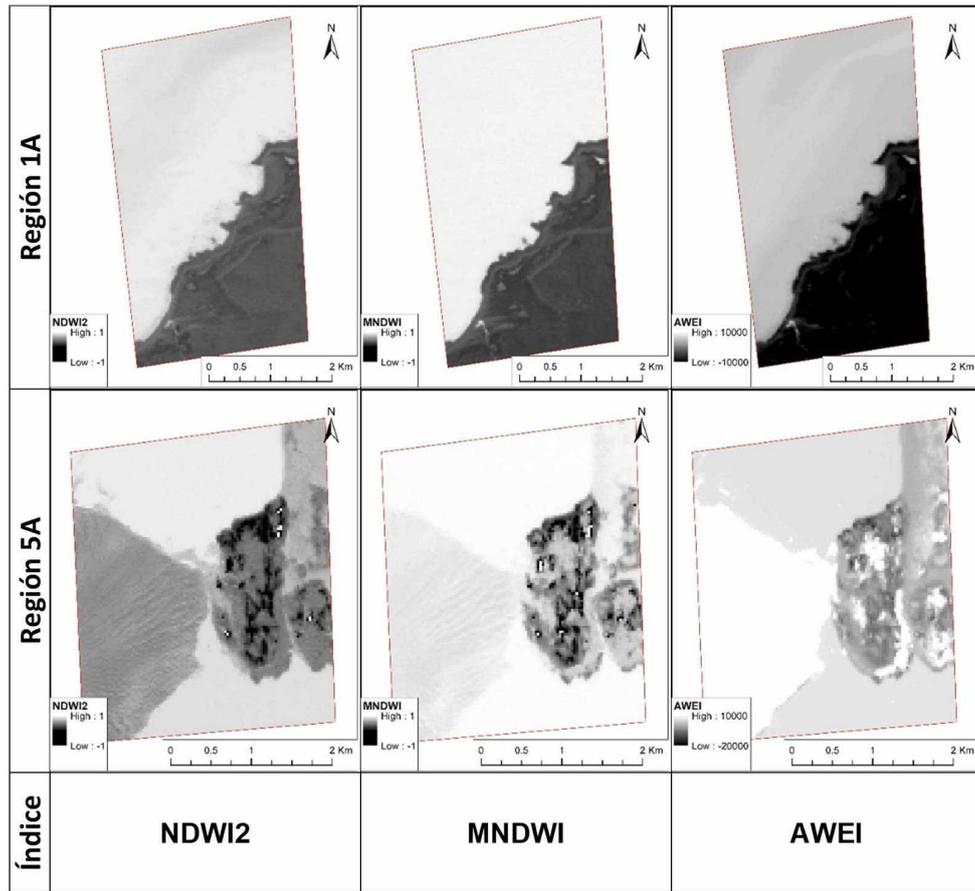


Figura D.6: Índices espectrales para las regiones 1A y 5A, ilustración del trabajo que se realizó para todas las regiones.

Región	Fecha	Umbral	Diferencia [%]
1	20181028	0,00	-0,07
1	20180227	-0,10	-0,65
2	20181109	0,30	-0,11
2	20160301	0,10	0,27
3	20181030	0,40	0,44
3	20160301	0,20	0,17
4	20181030	-0,10	-0,84
4	20160301	-0,20	-1,78
5	20130918	0,60	-1,65

Tabla D.4: Análisis de umbrales para el índice NDWI.

Región	Fecha	Umbral	Diferencia [%]
1	20181028	-0,10	0,13
1	20180227	-0,20	0,32
2	20181109	0,15	0,23
2	20160301	-0,45	-0,53
3	20181030	0,50	0,08
3	20160301	0,30	0,17
4	20181030	0,30	-4,73
4	20160301	0,10	-1,33
5	20130918	0,95	-1,76

Tabla D.5: Análisis de umbrales para el índice MNDWI.

Región	Fecha	Umbral	Diferencia [%]
1	20181028	-3500	0,07
1	20180227	-6000	0,16
2	20181109	-1000	-0,20
2	20160301	-1500	-0,45
3	20181030	2500	0,26
3	20160301	500	-0,17
4	20181030	500	-7,70
4	20160301	-2000	-0,58
5	20130918	6500-10000	-1,57

Tabla D.6: Análisis de umbrales para el índice AWEI.

De estos primeros resultados se aprecia una gran capacidad de los índices empleados para diferenciar el área de agua de las distintas coberturas del suelo que se presentan en las distintas regiones. Se observa también que, en general, los índices presentan baja sensibilidad a la variación del umbral. En particular, se aprecia una mayor dificultad en delimitar las fronteras entre áreas de agua y zonas de hielo, glaciares o suelos nevados, así como una mayor sensibilidad del umbral para aquellos índices que logran hacerlo. Por último, se menciona que en la región 4-A se ha encontrado una mayor dificultad para definir las áreas de agua y una mayor sensibilidad al umbral seleccionado, lo cual no hemos podido explicar en esta instancia de trabajo.

Como resultado de la calibración se decidió optar por el índice NDWI dado su buen desempeño ante las distintas coberturas del suelo, en especial ante presencia de hielo, y su baja sensibilidad ante la selección del umbral en la generalidad de las coberturas, que se traduce en bajos errores en la delimitación del área de agua para un gran espectro de valores de umbrales. En base a estas bondades, se adoptó en particular por un umbral de 0,60 que nos permite disminuir los errores en sectores con presencia de hielo y al mismo tiempo conservar errores bajos en las distintas regiones que presenta el lago (Tabla D.7).

Región	Fecha	Umbral	Diferencia [%]
1	20181028	0,60	-2,47
1	20180227	0,60	-2,52
2	20181109	0,60	3,99
2	20160301	0,60	2,72
3	20181030	0,60	-1,53
3	20160301	0,60	-2,24
4	20160301	0,60	-4,24
5	20130918	0,60	1,65

Tabla D.7: Error en la delimitación del área de agua con el índice NDWI, umbral 0,60, en las regiones y fechas de la calibración.

(b) Procesamiento imágenes LANDSAT

Con las definiciones realizadas en el proceso de calibración se procedió a procesar un total de 17 imágenes (Tabla D.8) seleccionadas de la campaña LANDSAT 8 disponibles a septiembre del

2020. Las imágenes seleccionadas corresponden al Sector Path 231- Row 095, que contienen la totalidad del área de los lagos estudiados, y fueron seleccionadas en base al grado de nubosidad observado y la calidad de las mismas.

Para cada una de las imágenes procesadas se calculó el índice NDWI y se obtuvieron los polígonos de la región del lago Argentino y lago Rico que delimitan el sector definido como agua a partir del umbral de 0,60 (Figura D.8).

Fecha	Mosaico	Imagen	Fuente
20140228	231-095	LC08_L2SP_231095_20140228_20200911_02_T1	U.S. Geological Survey
20150404	231-095	LC08_L2SP_231095_20150404_20200909_02_T1	U.S. Geological Survey
20160321	231-095	LC08_L2SP_231095_20160321_20200907_02_T1	U.S. Geological Survey
20160812	231-095	LC08_L2SP_231095_20160812_20200906_02_T1	U.S. Geological Survey
20160929	231-095	LC08_L2SP_231095_20160929_20200906_02_T1	U.S. Geological Survey
20170204	231-095	LC08_L2SP_231095_20170204_20200905_02_T1	U.S. Geological Survey
20180327	231-095	LC08_L2SP_231095_20180327_20200901_02_T1	U.S. Geological Survey
20180428	231-095	LC08_L2SP_231095_20180428_20201015_02_T1	U.S. Geological Survey
20181005	231-095	LC08_L2SP_231095_20181005_20200830_02_T1	U.S. Geological Survey
20190109	231-095	LC08_L2SP_231095_20190109_20200830_02_T1	U.S. Geological Survey
20190805	231-095	LC08_L2SP_231095_20190805_20200827_02_T1	U.S. Geological Survey
20190906	231-095	LC08_L2SP_231095_20190906_20200826_02_T1	U.S. Geological Survey
20191008	231-095	LC08_L2SP_231095_20191008_20200825_02_T1	U.S. Geological Survey
20191109	231-095	LC08_L2SP_231095_20191109_20200825_02_T1	U.S. Geological Survey
20200316	231-095	LC08_L2SP_231095_20200316_20200822_02_T1	U.S. Geological Survey
20200417	231-095	LC08_L2SP_231095_20200417_20200822_02_T1	U.S. Geological Survey
20200807	231-095	LC08_L2SP_231095_20200807_20200916_02_T1	U.S. Geological Survey

Tabla D.8: Imágenes LANDSAT 8 procesadas para la delimitación de los cuerpos de agua.

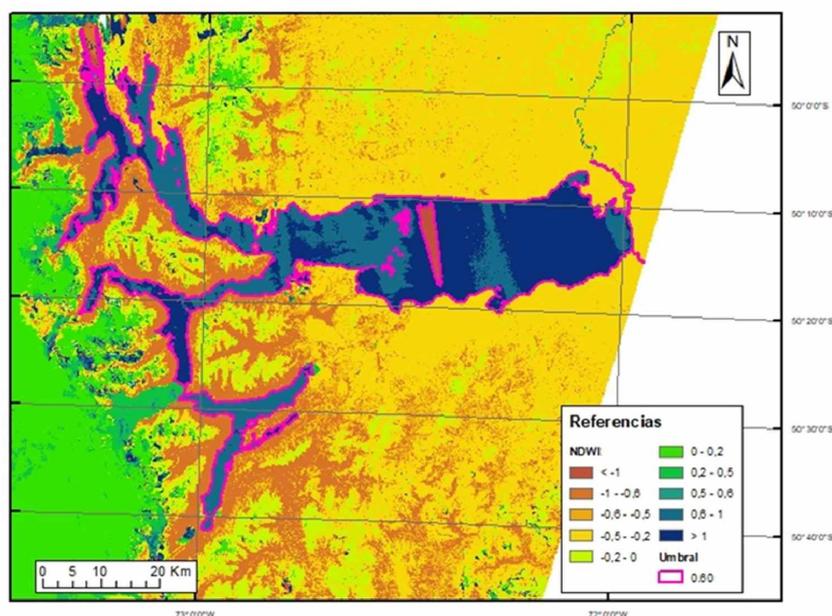


Figura D.7: Polígonos de agua de los lagos, generados automáticamente con el umbral 0,60 en el índice NDWI.

Los resultados obtenidos de forma automática (Figura D.7) para toda la extensión del área de estudio muestran ciertas inconsistencias en la delimitación de la superficie de agua. Se observa que estas inconsistencias se corresponden a distintos fenómenos, algunos de ellos mayormente

te sectorizados como la presencia de hielo glaciar, sedimentos o sombras orográficas y otros fenómenos de naturaleza más aleatoria como la presencia de pequeñas nubes o distintos reflejos. Ante estas inconsistencias se procedió a realizar una corrección manual de cada uno de los polígonos en base al RGB correspondiente a cada imagen (Figura D.8).

Finalmente, se obtuvo para cada imagen analizada un par de polígonos, uno de ellos correspondiente al cuerpo principal del lago Argentino y el otro correspondiente al área del lago Rico, que representan el área de superficie libre. Esta división responde al fenómeno natural de división por el cual estos cuerpos de agua se separan ante la dinámica del glaciar Perito Moreno.

De las 17 imágenes procesadas, se debieron descartar cuatro de ellas porque las áreas obtenidas no resultaron consistentes.

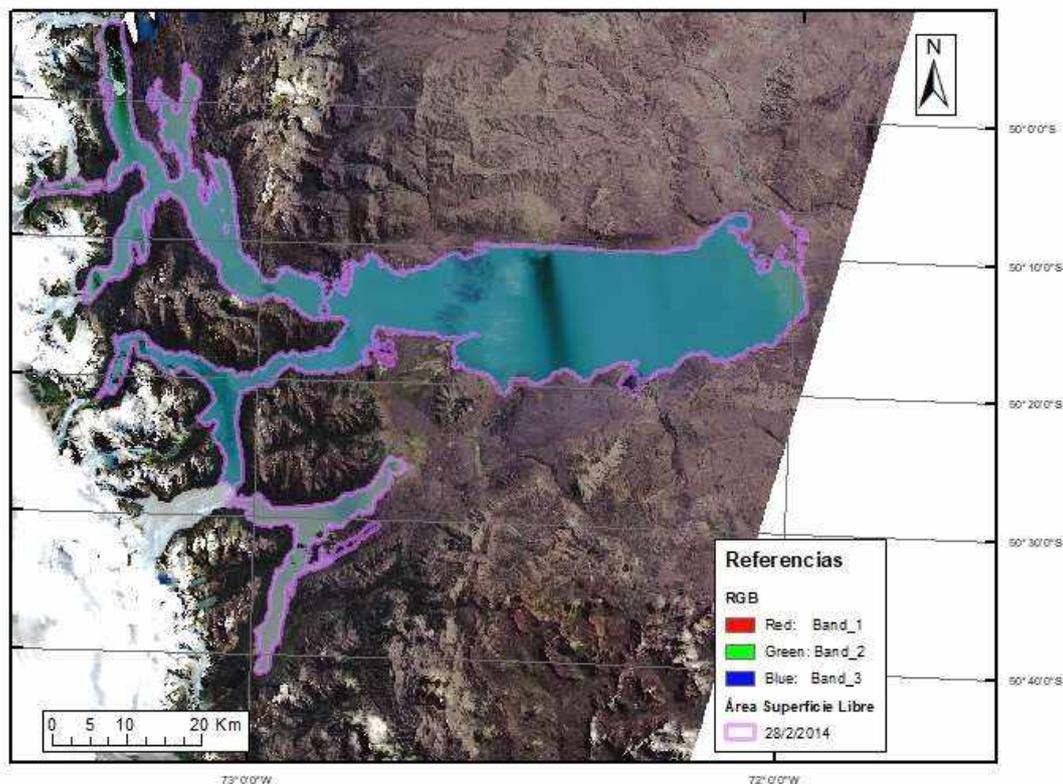


Figura D.8: Polígono de la superficie libre del lago Argentino y el lago Rico obtenido del procesamiento para la imagen del 28/02/2014. Imagen representativa del resultado obtenido para cada imagen procesada.

(c) Construcción de curvas cota - área

La presencia de dos escalas limnimétricas, dispuestas en el lago Argentino y en el lago Rico, y el registro diario de los niveles del pelo de agua que publica la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, permite vincular la superficie de agua de los lagos con su correspondiente valor altimétrico (Tabla D.9 y Tabla D.10). Además, si se observa la distribución de los valores en la Figura D.9 y Figura D.10, se puede ver que la relación cota - área puede estimarse a partir de una relación cuadrática para el rango de alturas analizadas en cada uno de los lagos.

Fecha de Imagen [dd/mm/aaaa]	Cota [mIGN]	Área del Lago [km ²]
29/09/2016	177,1	1.317,0
06/09/2019	177,1	1.323,2
05/10/2018	177,2	1.312,4
07/08/2020	177,4	1.341,7
05/08/2019	177,5	1.342,4
09/01/2019	178,3	1.352,5
28/02/2014	178,9	1.361,0
04/02/2017	179,1	1.361,7
04/04/2015	179,3	1.365,4
17/04/2020	179,5	1.372,4
28/04/2018	179,8	1.375,3
21/03/2016	179,9	1.371,2
27/03/2018	180,7	1.382,0

Tabla D.9: Relación cota - área del lago Argentino. Cota del cero de escala limnimétrica 174,8696 mIGN SRVN71.

Fecha de Imagen [dd/mm/aaaa]	Cota [mIGN]	Área del Lago [km ²]
29/09/2016	177,0	111,3
05/10/2018	177,6	111,6
05/08/2019	177,8	115,2
06/09/2019	178,1	120,5
09/01/2019	178,4	120,7
07/08/2020	178,7	121,7
04/02/2017	178,9	122,9
28/02/2014	179,1	123,5
28/04/2018	179,7	125,5
04/04/2015	179,8	124,6
17/04/2020	179,9	123,8
27/03/2018	180,6	126,2
21/03/2016	181,0	124,5

Tabla D.10: Relación cota - área del lago Rico. Cota del cero de escala limnimétrica 176,516 mIGN SRVN71

D.3.6. Análisis de sensibilidad

(a) Sensibilidad al proceso de vectorización

La determinación de la superficie libre de los lagos bajo esta metodología acarrea un error intrínseco proveniente de vectorizar imágenes con píxeles de 900 m² (Figura D.11).

Una estimación del error que introduce este proceso puede obtenerse de considerar que en todo el perímetro de la superficie del lago determinada podría sumarse o restarse un píxel de agua. Esta consideración permite apreciar la sensibilidad de la metodología respecto a este proceso particular. Se observa para el lago Argentino una variación del orden del 1,22 % (Figura D.12) y del orden del 2,63 % para el lago Rico (Figura D.13).

Trasladando este análisis a la estimación del volumen almacenado, el error generado sería del orden del 1,5 % para el lago Argentino (Tabla D.11) y del orden del 2,6 % para el lago Rico (Tabla

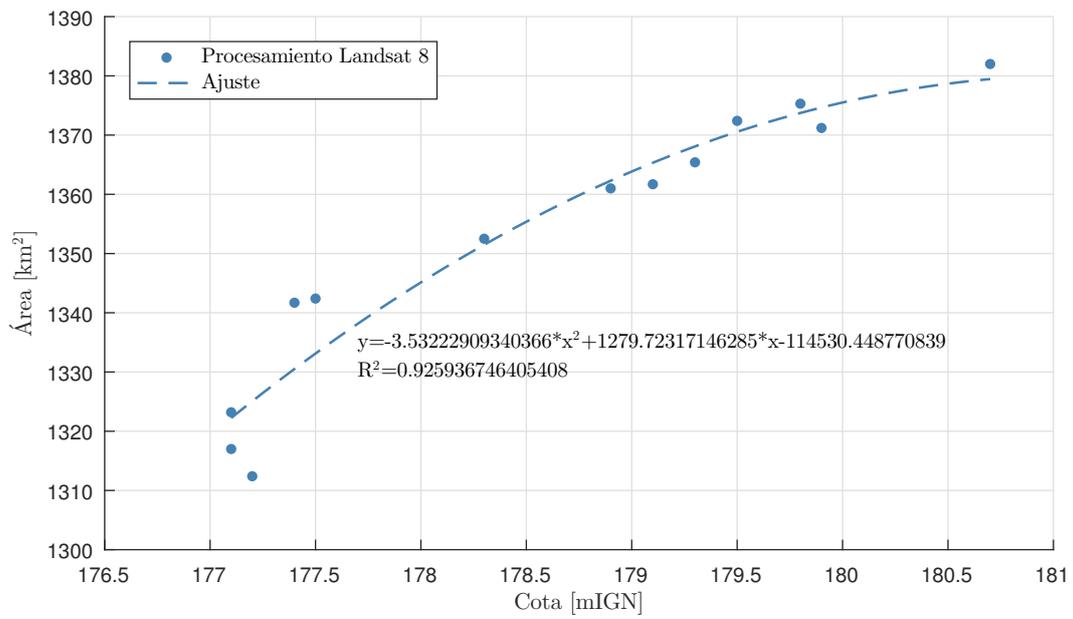


Figura D.9: Curva cota - área del lago Argentino.

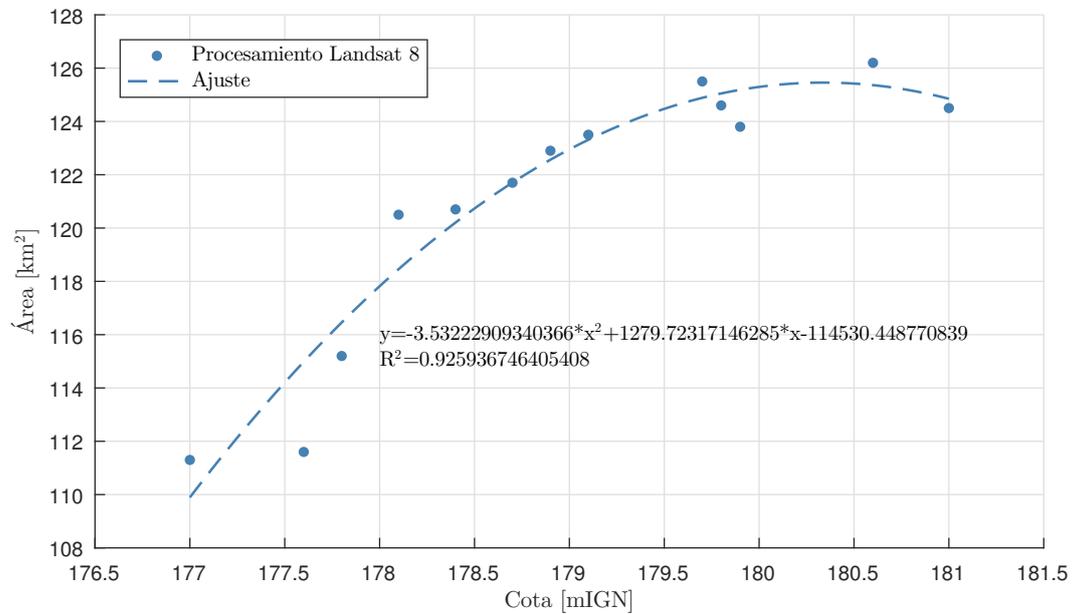


Figura D.10: Curva cota - área del lago Rico.

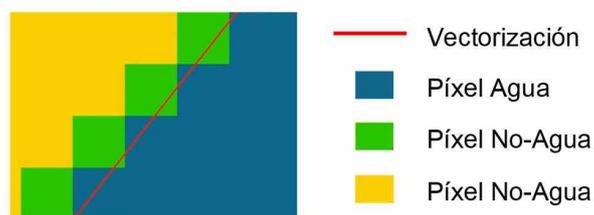


Figura D.11: Esquema de vectorización de los píxeles de agua.

D.12).

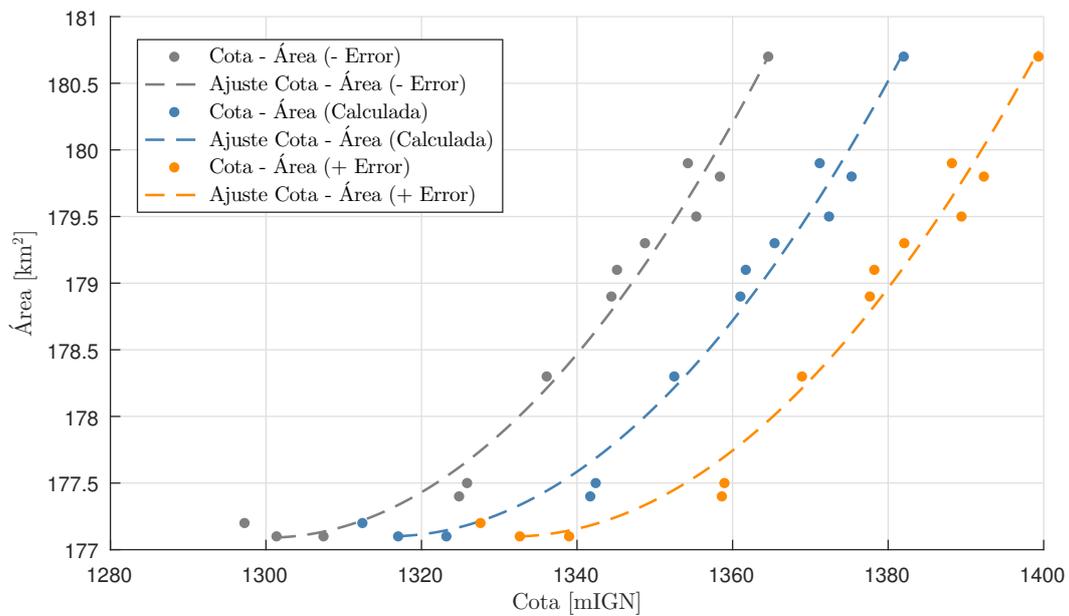


Figura D.12: Sensibilidad al proceso de vectorización, lago Argentino.

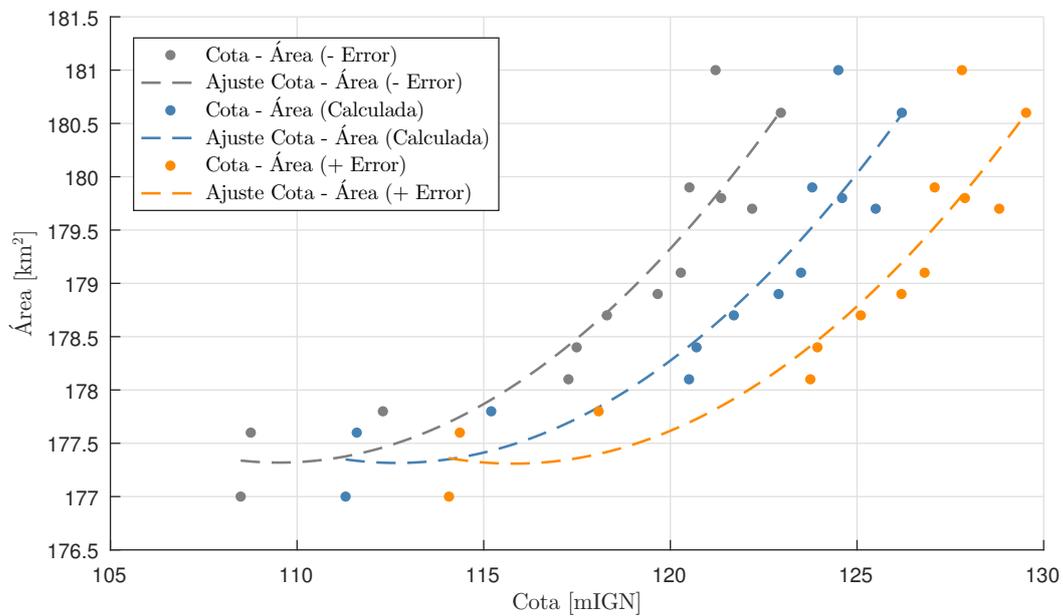


Figura D.13: Sensibilidad al proceso de vectorización, lago Rico.

D.3.7. Comparación de resultados obtenidos con relevamiento topográfico costero en regiones puntuales del lago.

Con el objetivo de validar la metodología, se propone realizar una comparación de las curvas de nivel obtenidas mediante el procesamiento de las imágenes LANDSAT con un relevamiento puntual sobre la costa del lago Argentino.

El relevamiento topográfico se ha realizado los días 10, 16 y 20 del mes de octubre de 2020 relevándose puntos suficientes para caracterizar la topografía de las orillas en tres sectores diferentes (Figura D.14). Dicho relevamiento se procesó utilizando el modelo geoidal EGM08AR que es el asociado a las cotas SRVN71 y se obtuvo una precisión de 10 cm. En el desarrollo de

Fecha de Imagen	Cota	Perímetro	Área		Volumen			
			Diferencia	Error	Diferencia + Pixel	Diferencia - Pixel	Error + Pixel	Error - Pixel
[dd/mm/aaaa]	[mIGN]	[km]	[+/- km ²]	[+/- %]	[hm ³]	[hm ³]	[%]	[%]
29/09/2016	177,10	0,737	15,64	1,19	9,4	-14,9	1,20	-1,89
06/09/2019	177,11	0,744	15,79	1,19	9,6	-15,1	1,20	-1,89
05/10/2018	177,21	0,715	15,17	1,16	11,2	-16,9	1,20	-1,81
07/08/2020	177,37	0,796	16,89	1,26	13,7	-20,0	1,20	-1,74
05/08/2019	177,51	0,780	16,54	1,23	16,0	-22,8	1,20	-1,71
09/01/2019	178,28	0,774	16,41	1,21	28,5	-43,4	1,20	-1,83
28/02/2014	178,91	0,783	16,62	1,22	38,9	-62,8	1,21	-1,95
04/02/2017	179,08	0,780	16,54	1,21	41,8	-66,8	1,21	-1,93
04/04/2015	179,33	0,786	16,67	1,22	46,0	-71,7	1,21	-1,89
17/04/2020	179,48	0,804	17,05	1,24	48,5	-74,6	1,21	-1,87
28/04/2018	179,76	0,800	16,97	1,23	53,2	-80,0	1,21	-1,83
21/03/2016	179,93	0,800	16,97	1,24	56,1	-83,3	1,22	-1,80
27/03/2018	180,69	0,819	17,38	1,26	69,2	-98,5	1,22	-1,74

Tabla D.11: Variación del área del lago Argentino debida al proceso de vectorización.

Fecha de Imagen	Cota	Perímetro	Área		Volumen			
			Diferencia	Error	Diferencia + Pixel	Diferencia - Pixel	Error + Pixel	Error - Pixel
[dd/mm/aaaa]	[mIGN]	[km]	[+/- km ²]	[+/- %]	[hm ³]	[hm ³]	[%]	[%]
29/09/2016	176,97	0,132	2,79	2,51	1,2	-1,2	2,44	-2,44
05/10/2018	177,59	0,132	2,80	2,51	3,0	-3,0	2,49	-2,49
05/08/2019	177,81	0,136	2,89	2,51	3,6	-3,7	2,51	-2,51
06/09/2019	178,09	0,153	3,24	2,69	4,5	-4,5	2,53	-2,54
09/01/2019	178,37	0,152	3,23	2,67	5,4	-5,4	2,54	-2,57
07/08/2020	178,67	0,160	3,40	2,79	6,3	-6,4	2,56	-2,59
04/02/2017	178,89	0,154	3,27	2,66	7,1	-7,1	2,57	-2,60
28/02/2014	179,08	0,154	3,27	2,64	7,7	-7,8	2,58	-2,61
28/04/2018	179,65	0,156	3,31	2,64	9,6	-9,7	2,59	-2,62
04/04/2015	179,82	0,154	3,26	2,62	10,1	-10,2	2,60	-2,62
17/04/2020	179,94	0,155	3,29	2,66	10,5	-10,6	2,60	-2,62
27/03/2018	180,56	0,155	3,29	2,60	12,6	-12,5	2,61	-2,59
21/03/2016	181,03	0,155	3,30	2,65	14,1	-13,9	2,61	-2,56

Tabla D.12: Variación del área del lago Rico debida al proceso de vectorización.

estas campañas se asentó el nivel del pelo de agua y la curva que describe la orilla por medio de múltiples puntos relevados en esa condición.

Para evaluar la representatividad de las imágenes LANDSAT 8 y validar la representatividad de la metodología de este trabajo se realizaron distintos análisis comparativos.

En primera medida se empleó la imagen LC08 L2SP 230095 20201019 20201105 02 T1, imagen relevada por el satélite LANDSAT 8 el día 19/10/2020 con nubosidad relativamente baja en el área analizada, para comparar cómo representa la orilla de agua con relación al relevamiento topográfico. Observando la Figura D.15 se puede apreciar, en términos cualitativos, una buena coincidencia de ubicación del pelo de agua relevado y el que nos permite apreciar la composición RGB de la imagen LANDSAT. En particular, vemos sobre el sector C que la presencia de nubes y sus sombras no permiten una observación tan clara de las orillas.

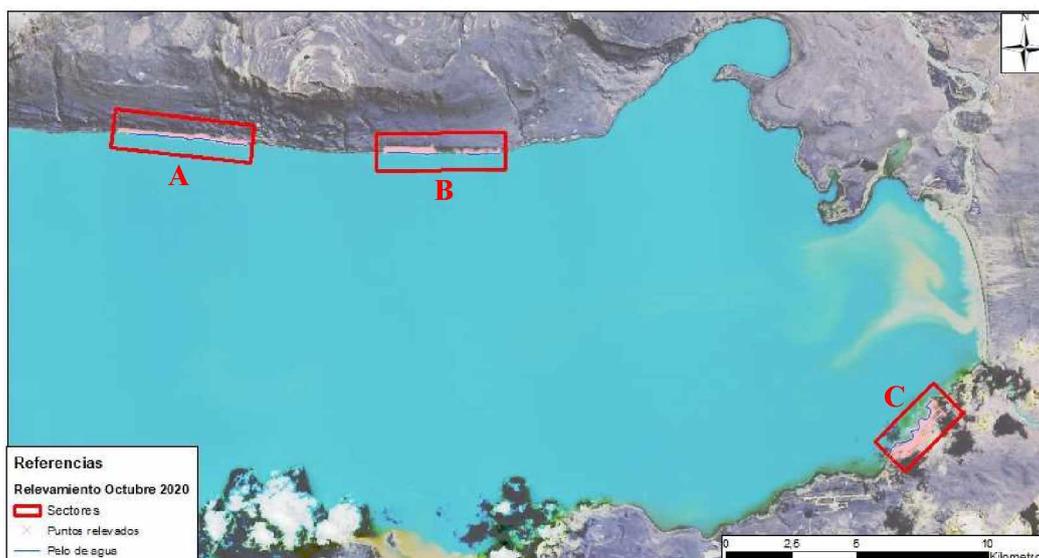


Figura D.14: Sectores costeros del lago Argentino donde se efectuaron los relevamientos topográficos.

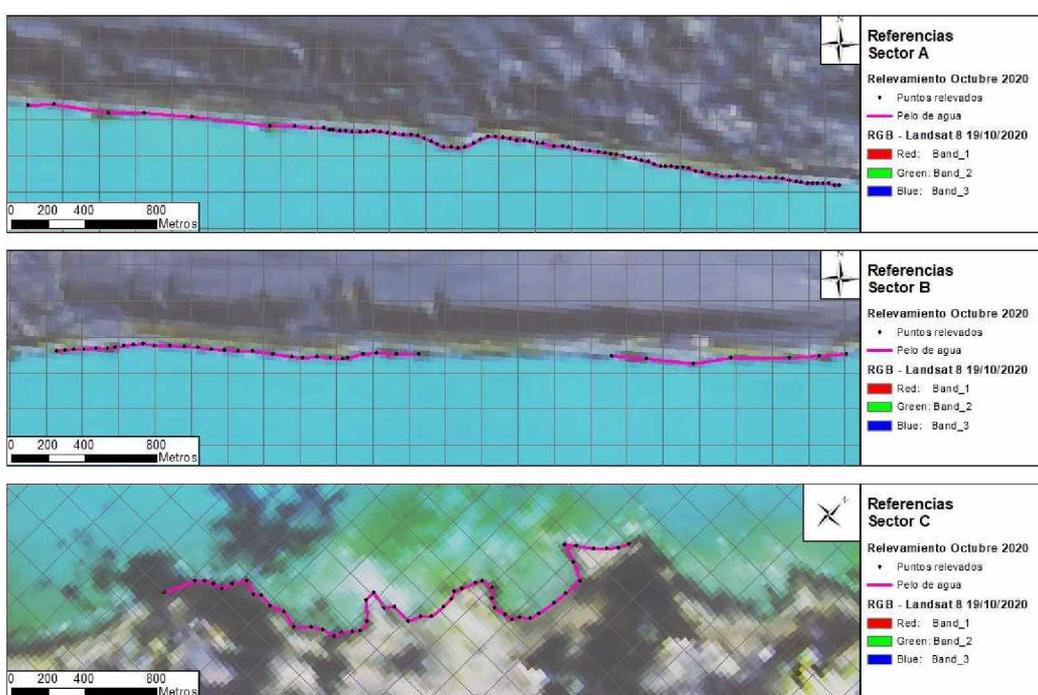


Figura D.15: Superposición de la línea de orilla estimada por el relevamiento topográfico y la composición RGB de las imágenes LANDSAT.

En segundo lugar y en concordancia con la metodología implementada en el trabajo, se calculó el índice NDWI para la imagen y se clasificó con los umbrales que se han empleado en el trabajo Figura D.16. Nuevamente, se observa una buena concordancia entre las representaciones de la orilla. En particular, se aprecia que si bien el índice se ve afectado por la nubosidad, cuando la misma es aislada y delgada puede ser interpretada por el espectro del índice y da lugar a las correcciones puntuales que se emplearon en este trabajo.

En tercer lugar, se procesó la información del relevamiento topográfico a los fines de generar un modelo del terreno mediante la triangulación de los puntos, se generó un modelo en función a las curvas de nivel resultante del procesamiento de imágenes de este trabajo y, por último,

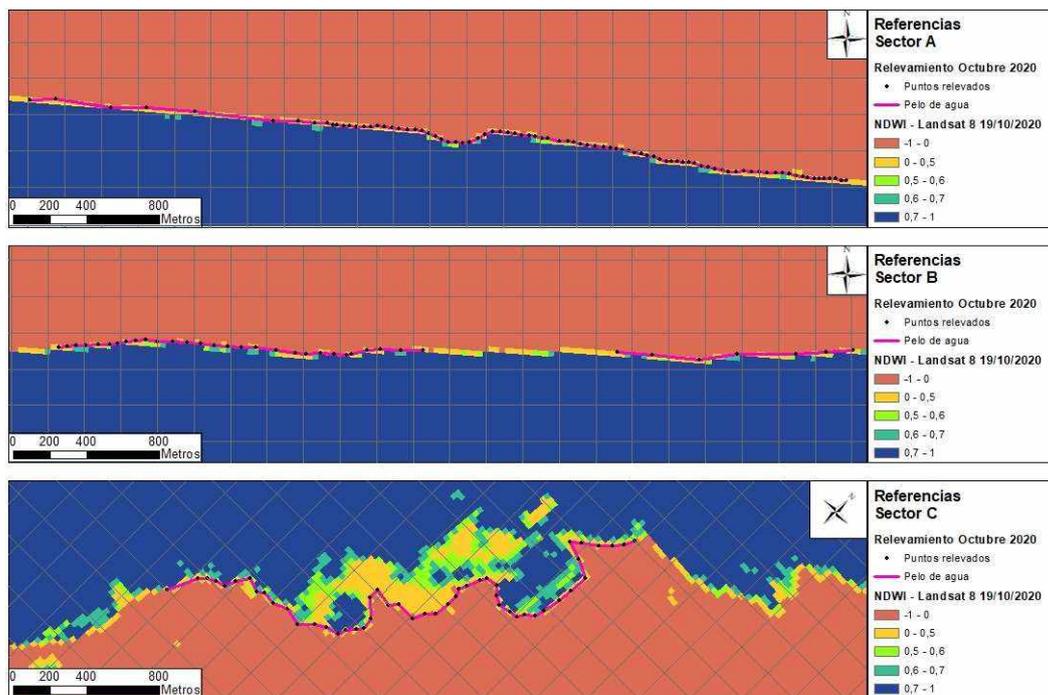


Figura D.16: Superposición de la línea de orilla estimada por el relevamiento topográfico y a partir del índice NDWI de las imágenes LANDSAT con el umbral utilizado en el trabajo.

se realizó la comparación entre ambos modelos. La Figura D.17 muestra los resultados de este procesamiento donde se tiene, para el área de intersección entre modelos, una valoración de las diferencias computadas en una grilla de 30 x 30 m (coincidente con la resolución de las imágenes LANDSAT 8). En tanto, la Figura D.18 muestra un histograma con el computo del porcentaje de área para distintos rangos de diferencia entre los modelos por sectores analizados. En la Figura D.19 se presenta el histograma del área total analizada.

De este análisis cuantitativo, se observa un ajuste excelente para el sector C con diferencias menores al 0,20 m para más del 50% del área y menores a 0,50 m para el 85% del área. Para los sectores A y B la calidad del ajuste disminuye y aparecen mayores diferencias. No obstante, evaluando toda la información existen razones que explican esta diferencia y que nos permiten inferir que las mismas no tendrían mayor incidencia.

La principal razón de dichas diferencias responde a las características físicas del terreno en las zonas A y B donde las orillas están demarcadas por contornos rocosos de pendientes pronunciadas, lo que conlleva a que el rango de niveles de oscilación del lago se vea restringido en una franja de aproximadamente 60 m, es decir, 2 píxeles de las imágenes LANDSAT. El segundo factor viene dado por las características de la vectorización de las imágenes que, ante cambios del relieve tan pronunciados, se entrecruzan los polígonos producto de su proximidad. El tercer factor, es el error atribuible a los problemas de interpolación en los contornos que adoptan mayor relevancia ante áreas tan pequeñas. Por último, se destaca que la diferencia media entre los modelos altimétricos arroja una diferencia media de 17 cm, siendo la precisión de las mediciones topográficas de 10 cm.

Por otro lado, si se observa la Figura D.20 se puede ver en términos cualitativos la bondad del

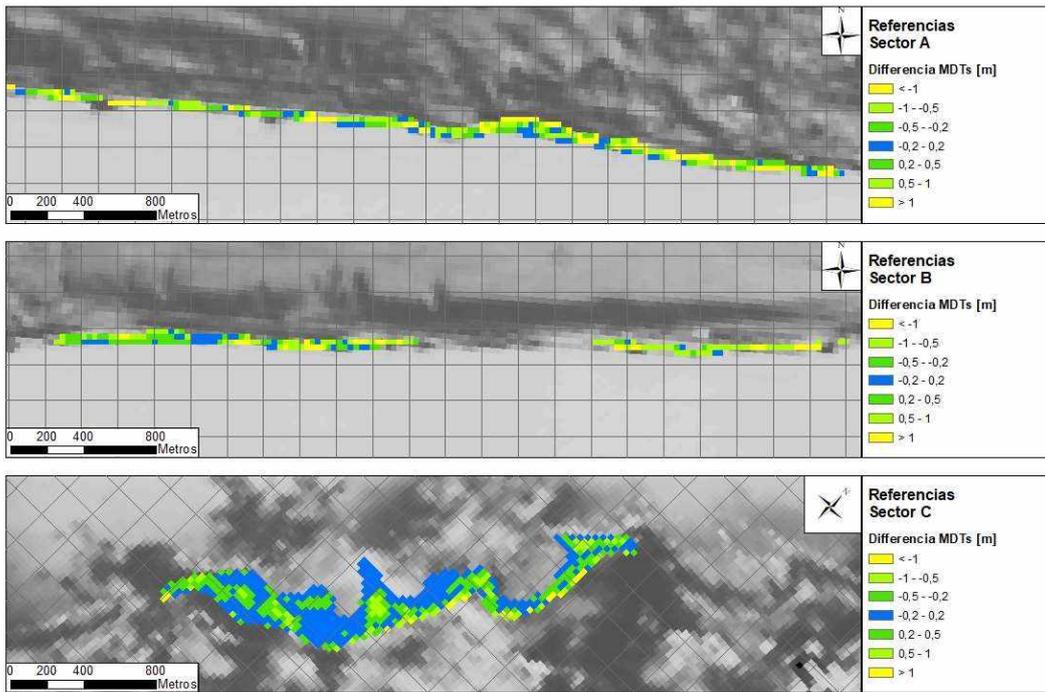


Figura D.17: Diferencias altimétricas entre el modelo digital del terreno producto del relevamiento topográfico y del correspondiente a las curvas de nivel obtenidas del procesamiento de las imágenes LANDSAT.

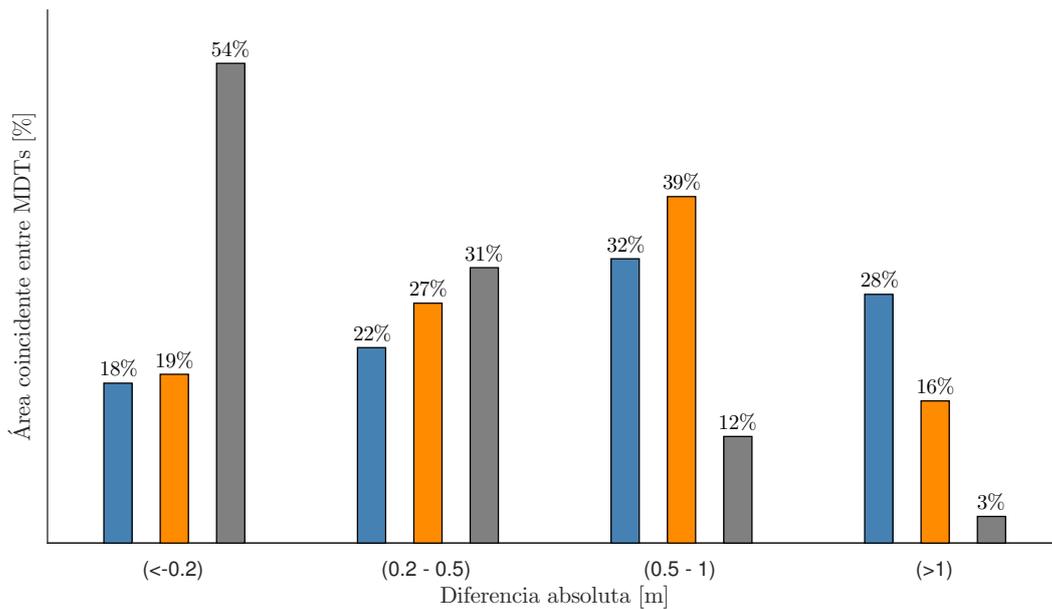


Figura D.18: Histogramas de frecuencias de las diferencias altimétricas de los modelos digitales del relevamiento topográfico y el procesamiento de las imágenes LANDSAT por sectores.

ajuste. En general, se encuentra que las curvas del procesamiento de las imágenes satelitales quedan confinadas por las curvas de nivel del relevamiento topográfico para el rango de niveles coincidentes. El rango descrito se limita inferiormente a la curva de 177,3 mIGN, cota más baja que llega a describir el relevamiento topográfico, y superiormente en la cota 180,70 mIGN, cota máxima descrita por el procesamiento de imágenes.

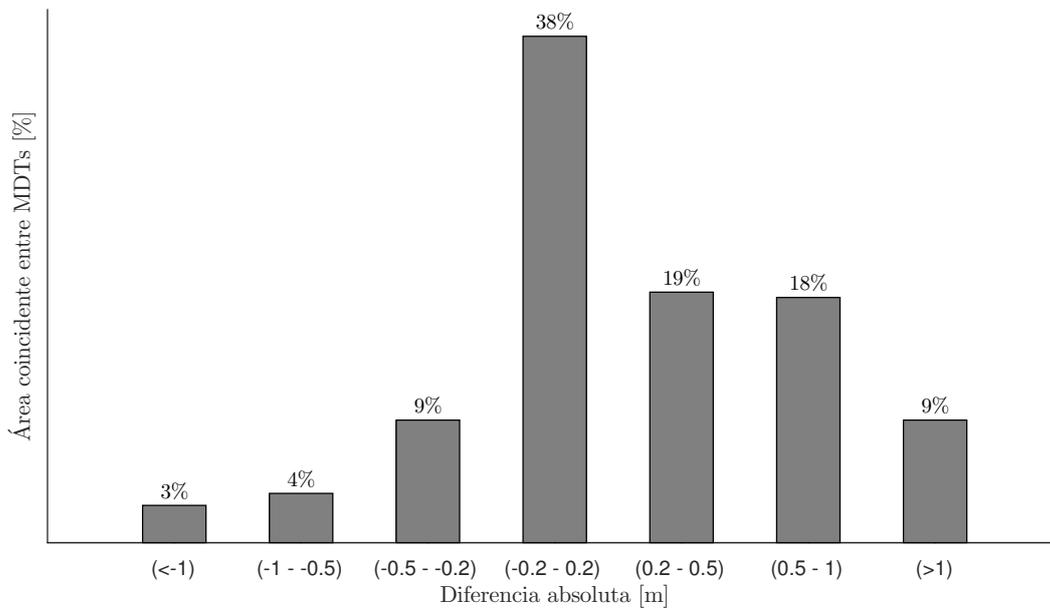


Figura D.19: Histogramas de frecuencias de las diferencias altimétricas de los modelos digitales del relevamiento topográfico y el procesamiento de las imágenes LANDSAT (área total analizada)

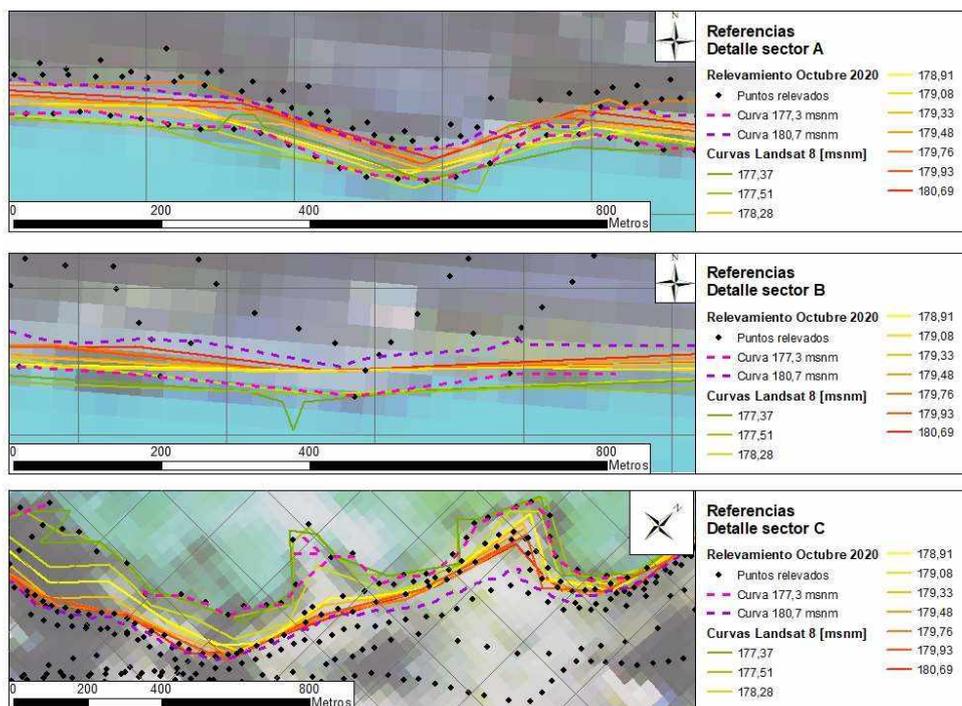


Figura D.20: Comparación de curvas de niveles del relevamiento topográfico y las correspondientes al procesamiento de las imágenes LANDSAT.

D.4. Segundo bloque: relación cota - volumen de los lagos

Como se planteó en el apartado de la metodología, para alcanzar la curva cota - volumen de los lagos, fue necesario previamente compatibilizar la curva cota - área generada en el Primer Bloque de este trabajo con la curva cota - área que describa los niveles máximos alcanzables por el agua.

En este sentido, se encontró una aproximación para la estimación de la relación cota - área de los

lagos que se ha realizado, en trabajos anteriores, empleando el modelo de elevaciones MDE-Ar 2.0 realizado por el IGN en base a la información satelital SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) y que describe un rango de niveles mayores a los abordados con las imágenes LANDSAT 8. La obtención de estas relaciones se realiza a partir la definición de áreas mediante las curvas de igual nivel coincidentes con la ubicación de los lagos. Las relaciones resultantes se presentan en la Tabla D.13 y Tabla D.14, donde las cotas han sido convertidas al sistema de referencia altimétrico SRVN71. Esta corrección consiste en la adición de un valor constante en la extensión de +0,57 m. En la Figura D.21 y Figura D.22 se encuentran graficadas las curvas cota - área del lago Argentino y lago Rico respectivamente.

Cota [mIGN]	Área del Lago [km ²]
182,57	1.323,7
183,07	1.335,4
183,57	1.344,8
184,07	1.354,0
184,57	1.361,0
185,07	1.368,4
185,57	1.375,1
186,57	1.392,7
187,57	1.398,2
188,57	1.416,4

Tabla D.13: Relación cota - área del lago Argentino. MDE-Ar 2.0.

Cota [mIGN]	Área del Lago [km ²]
181,57	121,09
182,07	122,16
182,57	123,21
183,07	124,57
183,57	125,96
184,57	131,86
185,57	137,47
186,57	143,49
187,57	149,58
188,57	154,97
190,57	164,61
192,57	172,51
194,57	180,05
196,57	185,8
198,57	190,43
200,57	194,77
202,57	199,01
205,57	206,07
208,57	213,88
210,57	219,33
211,77	222,95
212,07	229,66

Tabla D.14: Relación cota - área del lago Rico. MDE-Ar 2.0.

El empleo del MDE-Ar 2.0 para la estimación de las características topográficas del terreno ha sido ampliamente empleado, con un buen desempeño en relación con los resultados obtenidos y la accesibilidad a la información. No obstante, se reconocen una serie de limitaciones en la representatividad de esta información que podría repercutir en errores ante su aplicación. Las principales limitaciones encontradas son la imposibilidad de representar superficies de agua, la

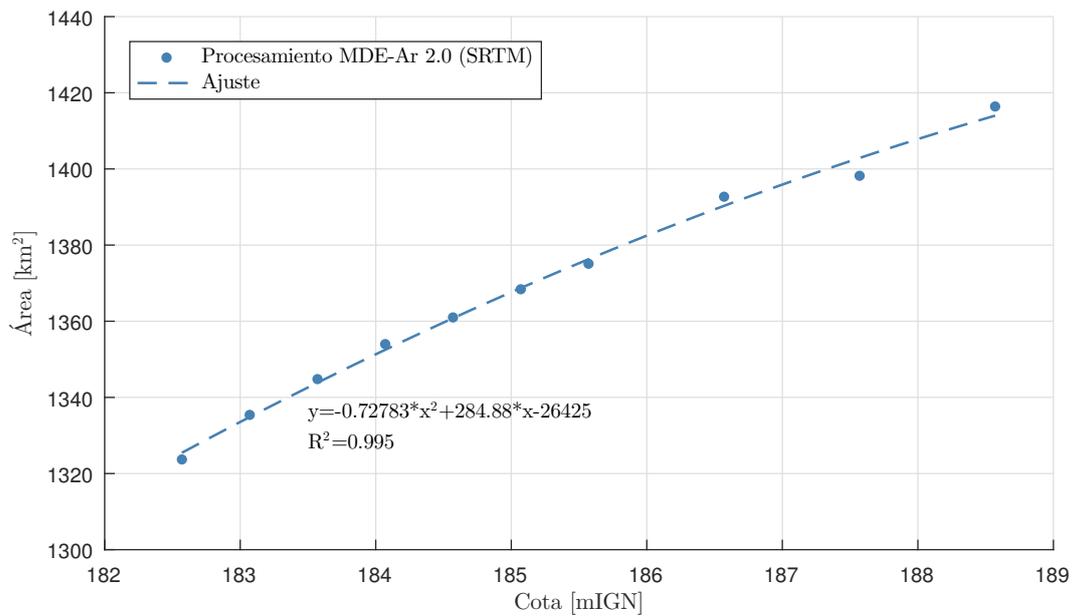


Figura D.21: Curva cota - área lago Argentino. MDE-Ar 2.0.

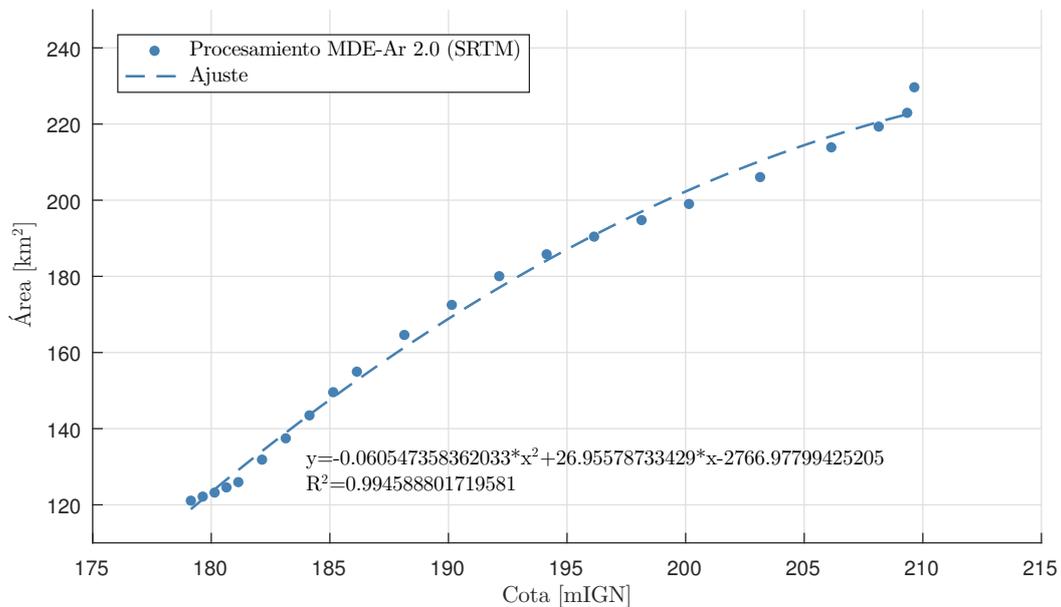


Figura D.22: Curva cota - área lago Rico. MDE-Ar 2.0.

representación de elevaciones y no del terreno (el modelo se deforma ante presencia de elementos como árboles y edificios) y desfasajes en la definición altimétrica del terreno.

En este sentido, observando las Figura D.23 y D.24 se pueden identificar las discrepancias altimétricas entre la información del MDE-Ar 2.0 (que ha sido trabajada en términos del SRVN71) y la obtenida de las escalas limnimétricas para las imágenes LANDSAT 8 procesadas.

Por otro lado, si se corrigen las diferencias mediante un valor constante resultante (también en las Figura D.23 y Figura D.24) y se superponen la imagen de un nivel lago dado y la curva de nivel de altimetría correspondiente (Figura D.25), se observan algunas deficiencias que tiene el MDE-Ar 2.0 ante la presencia de agua en la superficie del terreno.

Este análisis permite evidenciar los errores que acarrea el empleo del MDE-Ar 2.0 en esta región del territorio, particularmente las diferencias altimétricas y la definición de contornos de igual elevación. Junto a esto, se observa que la conjunción de ambos errores imposibilita su corrección de forma sencilla. Por un lado, se advierte que la diferencia altimétrica en los dos lagos es distinta, es decir, no es constante en el espacio, por otro lado, se observa que para un nivel dado el MDE-Ar 2.0 subestima el área inundable.

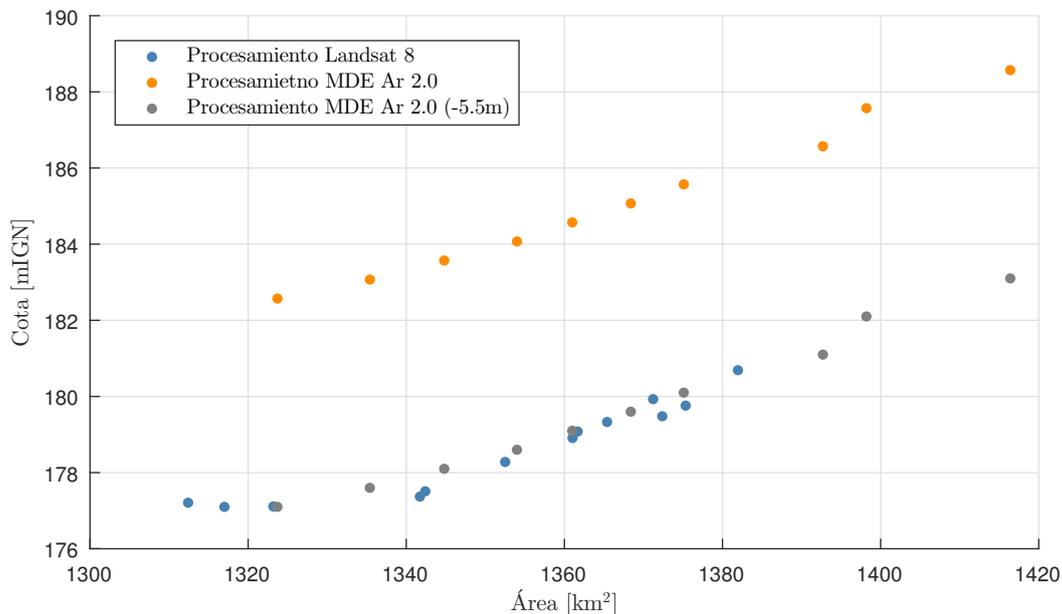


Figura D.23: Verificación de curva cota - área del lago Argentino con la información MDE-Ar 2.0 (SRTM).

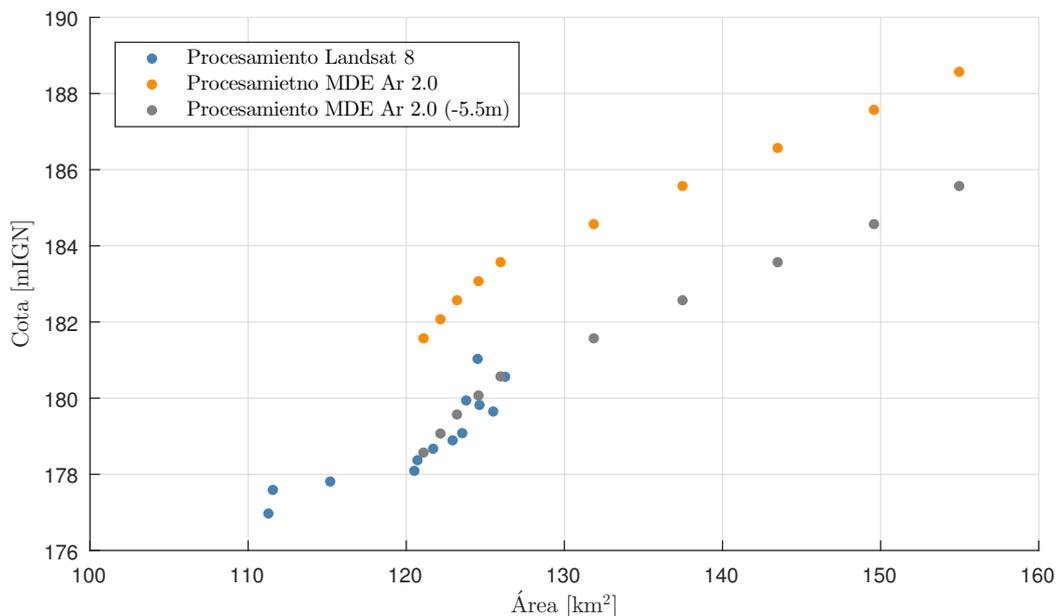


Figura D.24: Verificación de curva cota - área del lago Rico con la información MDE-Ar 2.0 (SRTM).

D.4.1. Ajuste de las fuentes de información

Ante las discrepancias observadas entre ambas fuentes de información, se planteó un análisis de las incertidumbres de estas para evaluar si la diferencia entre los valores quedaba comprendida



Figura D.25: Composición RGB de imagen LANDSAT del 05/08/2019, nivel del lago Argentino 177,5 msnm. En verde, curva de nivel 182 msnm MDE-Ar 2.0, que corregida resulta en 177,5 msnm.

en su error y establecer así una relación única con una incertidumbre asociada.

(a) Primer planteo

Lo primero que se estableció, según se plantea en el primer bloque del trabajo, es que la determinación de las áreas mediante el procesamiento de las imágenes LANDSAT tiene un error relativo asociado de 1,22 % en el lago Argentino y de 2,63 % en el lago Rico. En tanto las imprecisiones en la determinación de los niveles puede considerarse, en principio, despreciables.

Respecto a las imprecisiones de las curvas obtenidas del modelo MDE-Ar 2.0, en la documentación técnica que publica el IGN, es posible encontrar el contraste entre una serie de puntos de alta precisión y el modelo para la Provincia de Santa Cruz. Esta comparación muestra una diferencia media de -0,98 m, con una desviación estándar de 1,67 m (Figura D.26)

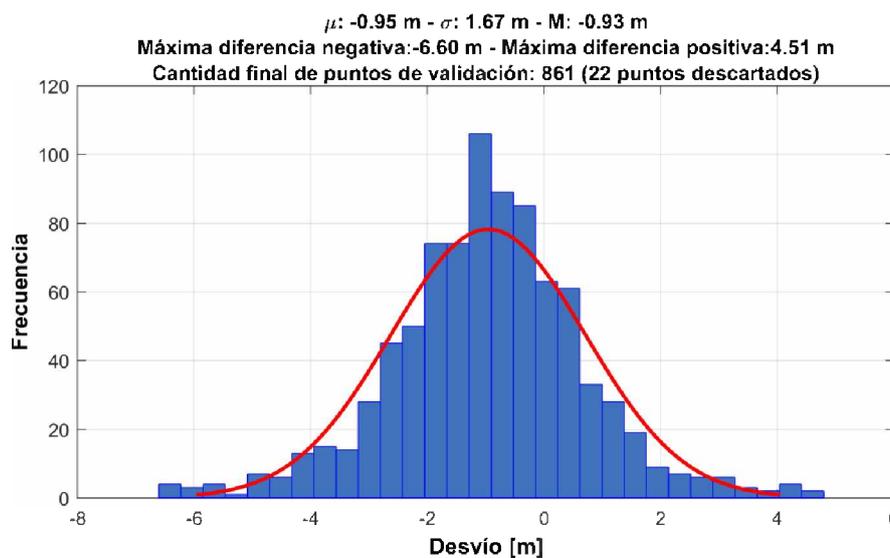


Figura D.26: Histograma de las diferencias entre las alturas de los puntos altimétricos y las alturas derivadas del MDE-Ar 2.0 en la Provincia de Santa Cruz (Instituto de Geodesia Nacional, 2019)

Considerando las incertidumbres entre ambas fuentes de observaciones se procedió a graficar y

evaluar nuevamente el ajuste de las curvas cota - área, intentando hallar un modelo de regresión que permita caracterizar la relación cota - área de forma continua.

En primer lugar, se procesaron los datos del lago Argentino, Figura D.27, donde el mejor ajuste se obtuvo para una relación polinómica de segundo grado, pero con un ajuste bastante pobre donde el R-cuadrado (R^2) resulta de 0,39 y el error medio de 21,67 Km². Si se evalúa este error respecto al área media del lago se tiene que el error relativo es 1,60%. No obstante, si se considera que la variación de área máxima descrita por los registros es de 99,4 Km² el error representa un 21,8% de esta.

Luego, se analizan los datos, con su incertidumbre, para el lago Rico (Figura D.28). Aquí se consiguió un ajuste muy bueno al modelo de regresión con un R^2 de 0,98 para una polinómica de segundo grado. El error medio resultó de 5,65 Km², lo que representa un error relativo de 3,74%. Considerando una variación máxima del área de 118,4 Km², el error representa un 4,77%.

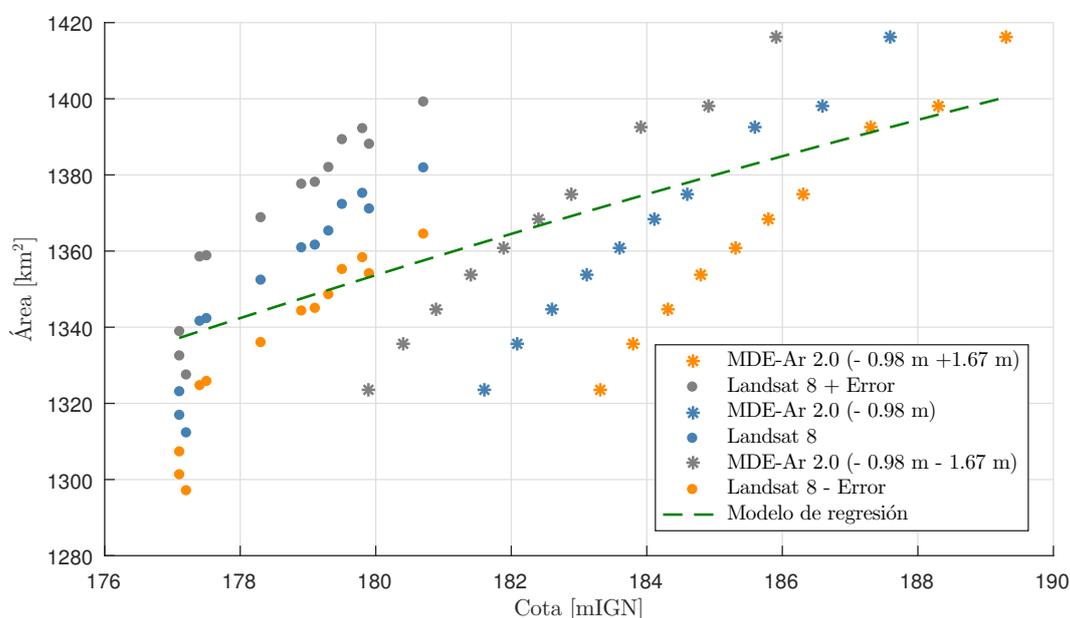


Figura D.27: Modelo estimado para la relación cota - volumen en base a las correcciones estimadas por el IGN para la provincia de Santa Cruz y el error de los datos obtenidos mediante el procesamiento LANDSAT. Lago Argentino.

Este tipo de abordaje, si bien es coherente y responde estrictamente a la información disponible, tiene su mayor limitante en la generalidad con que se realiza la estimación del error de los datos del modelo MDE-Ar 2.0. Esto refiere a que la corrección propuesta por el IGN responde a un análisis realizado para toda la provincia de Santa Cruz, con su amplia extensión territorial y, principalmente, abordando indistintamente toda la variación del relieve existente.

(b) Segundo planteo

En una segunda instancia, y siguiendo la lógica de análisis planteada por el IGN, se procedió establecer una comparación entre puntos relevados topográficamente en campo con el valor asignado por el modelo MDE-Ar 2.0 para los mismos.

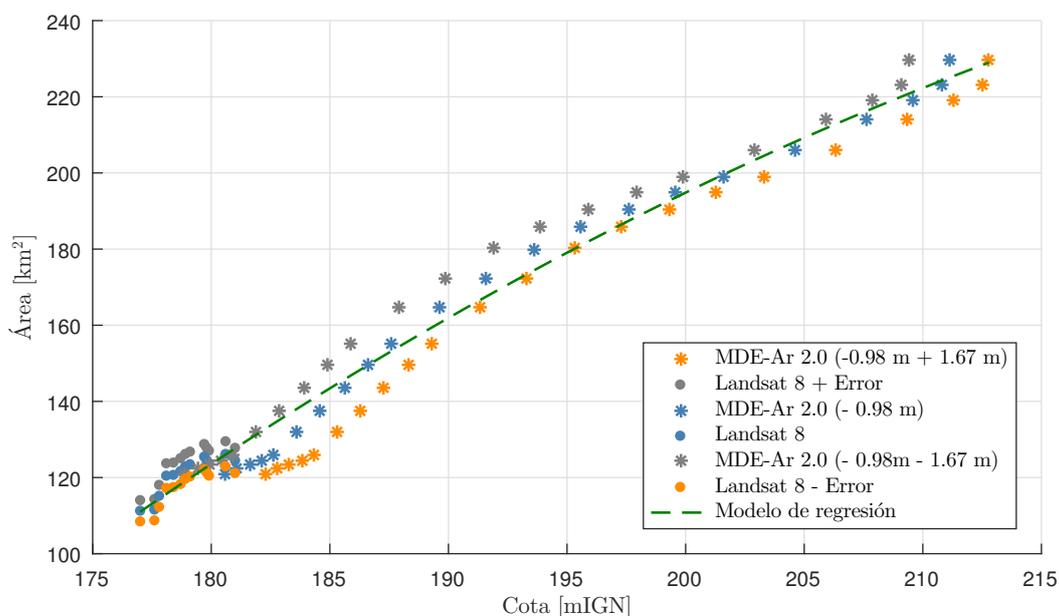


Figura D.28: Modelo estimado para la relación cota - volumen en base a las correcciones estimadas por el IGN para la provincia de Santa Cruz y el error de los datos obtenidos mediante el procesamiento LANDSAT. Lago Rico.

Para este procedimiento se dispuso de relevamientos realizados en tres campañas diferentes (Figura D.29):

- Relevamiento topográfico realizado el mes de octubre de 2020 en tres sectores diferentes del lago Argentino (Figura D.14). Dicho relevamiento se procesó utilizando el modelo geoidal EGM08AR que es el asociado a las cotas SRVN71, con una precisión de 10 cm.
- Relevamiento topográfico realizado el mes de marzo de 2021 en el sector de mayor variabilidad espacial del lago Rico y donde tuviese lugar su potencial desborde (Figura D.14, rojo A), y en el sector de vinculación con el lago Roca (Figura D.30, rojo B). El relevamiento se procesó utilizando el modelo geoidal EGM08AR, con una precisión de 10 cm.
- Relevamiento topográfico realizado el mes de marzo de 2016 en el sector de mayor variabilidad espacial del lago Rico, donde se registró el pelo de agua del lago ante uno de los mayores eventos de crecientes registrados (Figura D.14, verde A), y en el sector de vinculación con el lago Roca (Figura D.14, rojo B). El relevamiento se procesó utilizando el modelo geoidal EGM08AR, con una precisión de 10 cm.

En este contraste, donde se analizaron 5491 puntos, se obtuvo un valor medio de la diferencia entre los puntos relevados y la cota asignada por el modelo MDE-Ar 2.0 igual a -2,43 m, con una desviación estándar de 1,89 m.

A partir de esta corrección se observa una cierta mejora en los ajustes, pero no necesariamente significativa. Para el lago Argentino el error medio resulta de 20,21 Km², en lo que respecto al área media del lago significa que el error relativo pasa de 1,60% a 1,49% y si se considera la variación del área máxima el error pasa de 21,8% a 20,3%.

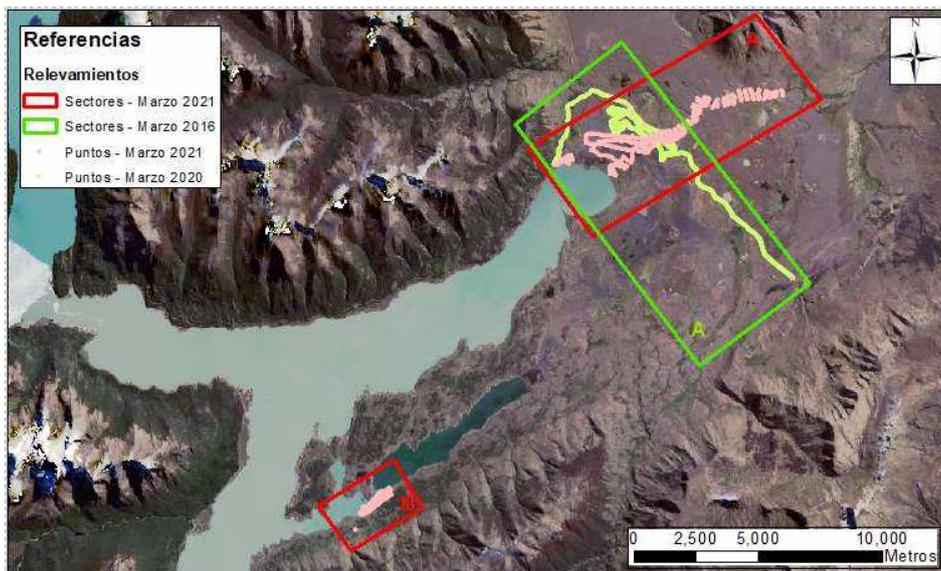


Figura D.29: Relevamientos topográficos realizados sobre el lago Rico y empleados para analizar el modelo MDE-Ar 2.0.

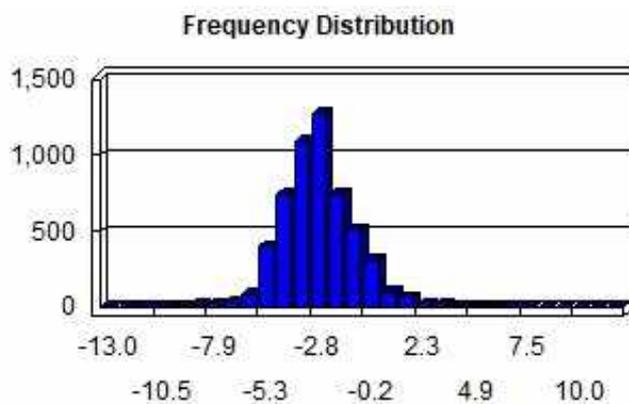


Figura D.30: Histograma de diferencia entre los relevamientos topográficos en campo y el modelo MDE-Ar 2.0. En el eje de abscisas se presentan los segmentos de discretización de las diferencias altimétricas en unidades métricas, mientras que la altura de los bastones representa el número de eventos de cada segmento.

Para el caso del lago Rico el error medio resulta de 5,62 Km², lo que significa que el error relativo al área media del lago pasa de 4,77 % a 4,75 %, y el error relativo a la máxima variación del área pasa de 3,74 % a 3,72 %.

Ante esto, se decidió considerar, también, en este segundo planteo una corrección respecto al área descrita por el modelo MDE-Ar 2.0. Al evaluar las curvas de nivel con que se definen las áreas de superficie libre de los lagos, se observa que existen una serie de sectores sobre el lago Argentino que no son correctamente representados (Figura D.31).

De los sectores señalados en la Figura D.31, se distingue un área sin computar de aproximadamente 11,6 Km² en el sector A, de 4,1 Km² en el sector B y de 5,6 Km² en el sector C. En particular, se observa un error constante en los sectores A y C, y un error en el sector B que disminuye para las curvas de mayor elevación.

Las diferencias observadas, si bien son variables según el nivel de las curvas del MDE-Ar 2.0

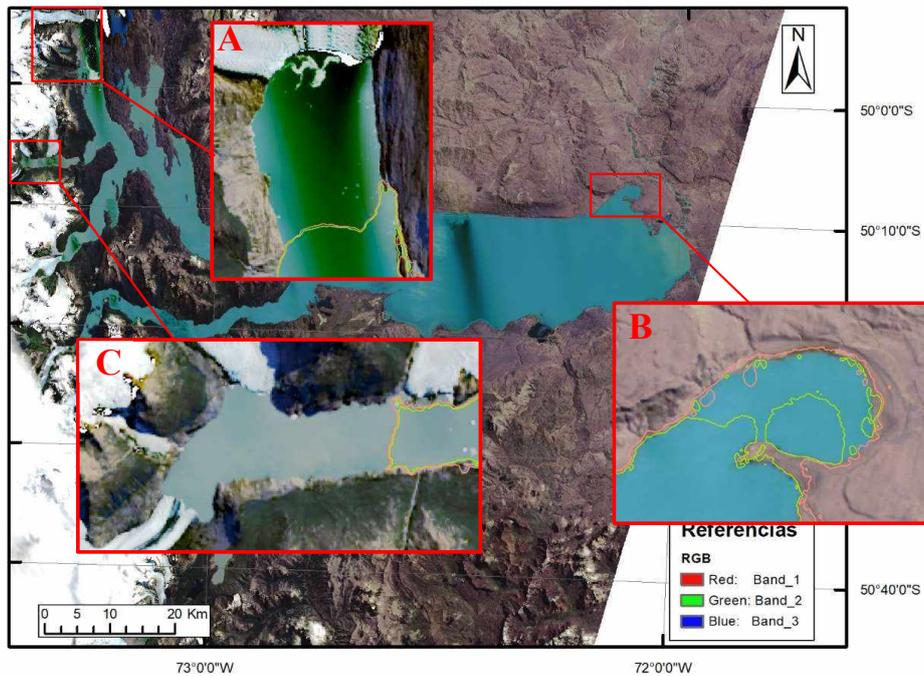


Figura D.31: Sectores del lago Argentino que no son descriptos como tal por el MDE-Ar 2.0. En verde, curva de nivel 182,57 msnm MDE-Ar 2.0, y en rosa la curva 187,57 msnm MDE-Ar 2.0.

elegidas y la imagen del lago seleccionada, muestran una diferencia media de 1,5% del área total computada que no es considerada por el modelo del IGN.

Incorporando la corrección de 1,5% del área computada para el lago Argentino por el modelo MDE-Ar 2.0, se obtiene un error medio 17,67 Km², lo que lleva a un error relativo de 1,29%. Analizando la variación del área se tiene un error de 17,8% respecto a la variación máxima del área obtenida de los registros (99,4 Km²), con la corrección del área la variación de esta resulta de 120,6 Km² y, por ende, el error sería de 14,7%.

Finalmente, se obtiene de este segundo planteo una mejora en el ajuste de los datos para el lago Argentino (Figura D.32), en tanto para el lago Rico la mejora no es significativa, pero es favorable (Figura D.33).

D.4.2. Estimación de las curvas cota - volumen almacenado

Con base en la mejor compatibilización de los registros obtenida, se procedió a estimar la relación cota - volumen almacenado para ambos lagos empleando, para ello, el método del área media entre niveles sucesivos. Se consideró en este proceso un nivel de 176,50 mIGN como el nivel mínimo del lago, es decir, el nivel en que el almacenamiento es nulo.

La relación cota - volumen almacenado para el lago Argentino en su rango de niveles esperables, en su régimen normal y extraordinario, puede aproximarse con la siguiente expresión lineal:

$$cota [mIGN] = 0,0007264 Volumen [hm^3] + 176,50 \quad (D.6)$$

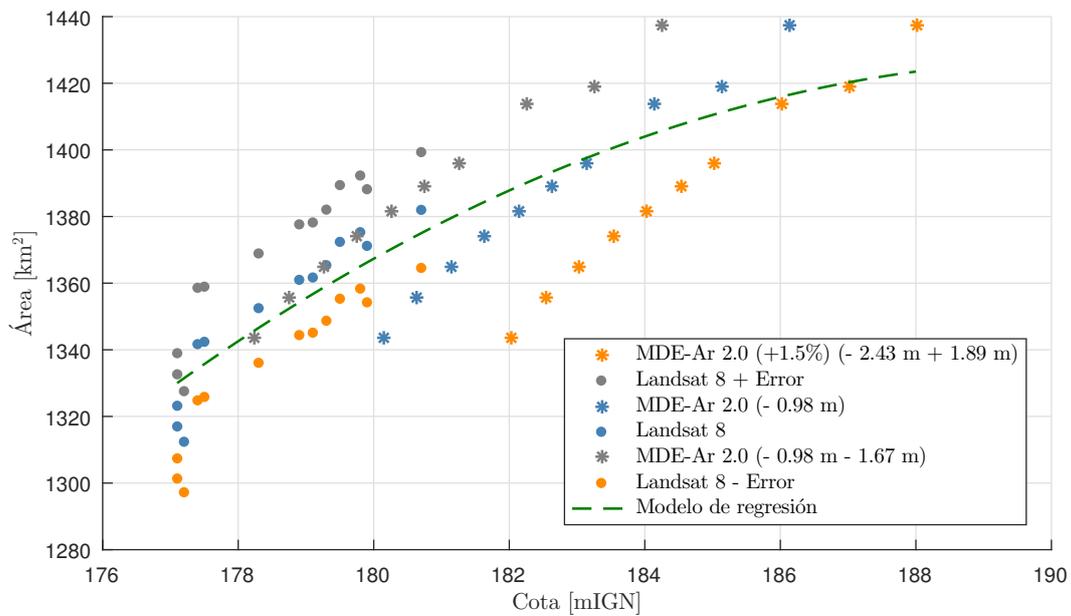


Figura D.32: Modelo estimado para la relación cota - área en base a los datos del MDE-Ar 2.0 corregidos por el relevamiento topográfico más las correcciones del cómputo del área y los datos obtenidos mediante el procesamiento LANDSAT con sus errores. Lago Argentino.

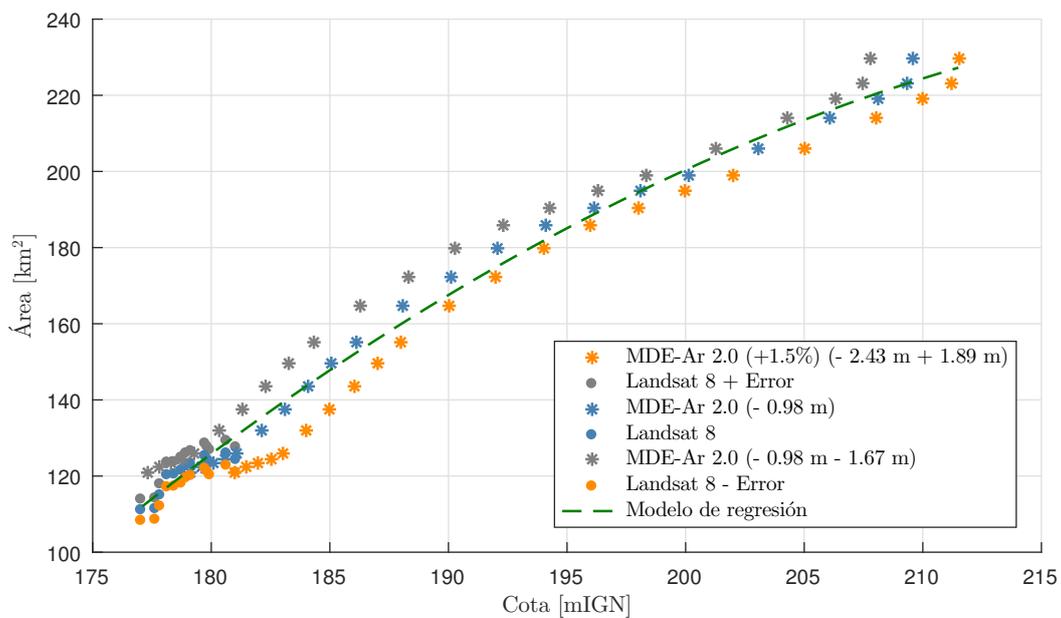


Figura D.33: Modelo estimado para la relación cota - área en base a los datos del MDE-Ar 2.0 corregidos por el relevamiento topográfico más las correcciones del cómputo del área y los datos obtenidos mediante el procesamiento LANDSAT con sus errores. Lago Rico.

El ajuste de la expresión lineal tiene un error relativo menor a 0,05%. Si a este valor se propaga la estimación de errores de la determinación de la relación cota - área, el error asignado a la expresión de la relación cota - volumen es de $\pm 1,4\%$.

Para el lago Rico, el mejor ajuste de la relación cota - volumen acumulado se obtiene con un polinomio de segundo grado. No obstante, siendo que el motivo de la determinación de esta función es su implementación en modelaciones hidrológicas y de balances de flujo, se ha optado

por aproximarla mediante una función potencial. Esto permite la reversibilidad de las expresiones.

$$Volumen [hm^3] = 78,905 (cota [mIGN] - 176,5)^{1,224} \quad (D.7)$$

Esta aproximación mediante la regresión potencial genera un error en la estimación de niveles de 0,1 % que se suman al error que se traslada de la determinación de la relación cota - área. El error asignado a la expresión de la relación cota - volumen es de $\pm 3,8\%$.

En la Figura D.34 y Figura D.35 se presentan las relaciones cota - volumen almacenado para el lago Argentino y lago Rico que finalmente se adoptaron.

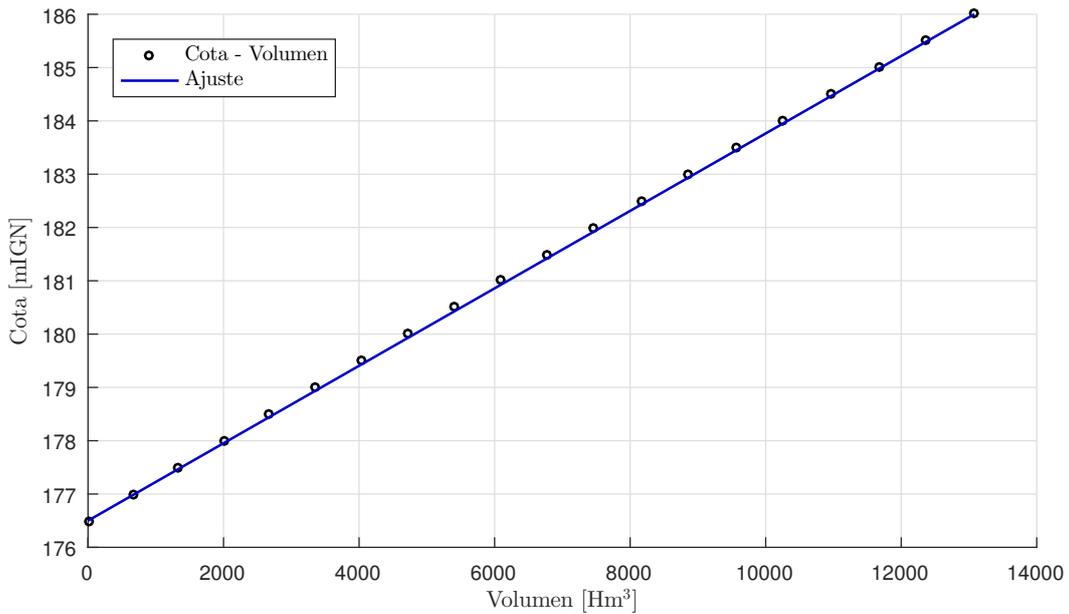


Figura D.34: Relación cota - volumen almacenado, lago Argentino.

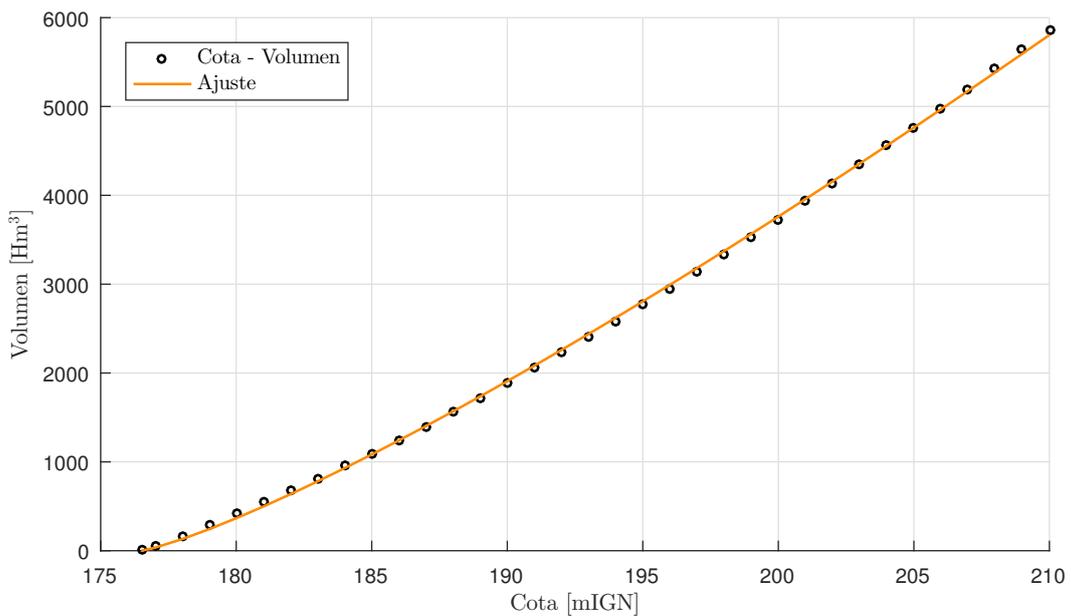


Figura D.35: Relación cota - volumen almacenado, lago Rico.

D.5. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo ha permitido establecer una relación cota - área y luego, una relación cota - volumen para el lago Argentino y el lago Rico. La metodología empleada contempló, por un lado, el análisis de imágenes satelitales de espectro visible tipo LANDSAT 8 con una correlación con los niveles de agua observados; por el otro, se analizó un modelo de elevaciones generado con imágenes radar SRTM y corregidos con relevamientos topográficos de campo. Se ha logrado describir todo el rango de niveles variables y estimar el error en la determinación del área y volumen almacenado en los lagos. Esto se realizó con metodologías alternativas que permitieron suplir la imposibilidad de realizar en tiempo y forma relevamientos topobatimétricos tradicionales, obteniendo resultados acordes a las necesidades planteadas.

D.6. Referencias bibliográficas

Elsahabi, M., Negm, A., Tahan, A. H. (2016). Performances Evaluation of Surface Water Areas Extraction Techniques Using LANDSAT ETM+ Data: Case Study Aswan High Dam Lake (AHDL). *Procedia Technology*, 22, 1205-1212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.02.001>

Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using LANDSAT imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>

Fisher, A., Flood, N., Danaher, T. (2016). Comparing LANDSAT water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167-182. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>

Instituto de Geodesia Nacional. (Mayo de 2019). Modelo de Elevaciones de la República Argentina versión 2.0. Obtenido de <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Documentacion>

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425-1432. doi:10.1080/01431169608948714

SIPH. (Febrero de 2021). Sistema Nacional de Información Hídrica. Obtenido de Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica - Ministerio de Obras Públicas: <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/hidricas/base-de-datos-hidrologica-integrada>

USGS. (2019). LANDSAT 8 (L8) Data Users Handbook Version 5.0. U.S. Geological Survey, Department of the Interior. Obtenido de <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>

UTE. (2015). Sistema Geodésico y Geofísico de Apoyo. General - Obras Civiles - Memoria técnica - Topografía. UTE CGGC ELING HCSA

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, 3025-3033. doi:10.1080/01431160600589179

Yan, D., Huang, C., Ma, N., Zhang, Y. (2020). Improved LANDSAT-Based Water and Snow Indices for Extracting Lake and Snow Cover/Glacier in the Tibetan Plateau. *Water*, 12. doi:10.3390/w12051339

Anexo D.I: Análisis de umbrales para los índices NDWI, MNDWI y AWEI

En la Tablas D.15 a D.23 se presentan los análisis de umbrales de los índices NDWI, MNDWI y AWEI para las diferentes regiones.

REGIÓN 1 - A				
Landsat	20181030	Mosaico	230-095	
Google Earth	20181028			
Índice	Referencia	Área según cobertura [Ha]		Diferencia
	Umbral	Agua	Tierra	[%]
Google Earth	-	1025,15	541,63	-
NDWI	-0,20	1083,15	484,11	5,66
	-0,10	1036,35	530,91	1,09
	0,00	1024,47	542,79	-0,07
	0,10	1019,34	547,92	-0,57
	0,20	1015,65	551,61	-0,93
	0,30	1013,13	554,13	-1,17
	0,40	1010,07	557,19	-1,47
	0,50	1005,93	561,33	-1,88
	0,60	999,81	567,45	-2,47
	0,70	955,71	611,55	-6,77
MNDWI	-0,30	1086,57	480,69	5,99
	-0,20	1038,51	528,75	1,30
	-0,10	1026,45	540,81	0,13
	0,00	1021,32	545,94	-0,37
	0,10	1018,44	548,82	-0,65
	0,20	1015,83	551,43	-0,91
	0,40	1012,14	555,12	-1,27
	0,80	997,29	569,97	-2,72
	0,90	852,84	714,42	-16,81
		0,95	1567,29	0,00
AWEI	-6000	1040,67	526,59	1,51
	-5000	1032,39	534,87	0,71
	-4000	1028,16	539,10	0,29
	-3500	1025,82	541,44	0,07
	-3000	1024,11	543,15	-0,10
	-2000	1021,05	546,21	-0,40
	-1000	1018,17	549,09	-0,68
	0	1015,02	552,24	-0,99
	3000	999	568,26	-2,55
	3500-10000	991,80	575,46	-3,25
6500-10000	32,31	1534,95	-96,85	

Tabla D.15: Análisis de umbrales en Región 1-A.

REGIÓN 1 - B

Landsat	20180216	Mosaico	230-095
Google Earth	20180227		

Índice	Referencia	Área según cobertura [Ha]		Diferencia [%]
	Umbral	Agua	Tierra	

Google Earth	-	1081,55	485,23	-
---------------------	---	---------	--------	---

NDWI	-0,20	1090,71	476,71	0,85
	-0,10	1074,51	492,75	-0,65
	0,00	1069,29	497,97	-1,13
	0,10	1065,51	501,75	-1,48
	0,20	1062,99	504,27	-1,72
	0,30	1060,83	506,43	-1,92
	0,40	1058,49	508,77	-2,13
	0,50	1056,42	510,84	-2,32
	0,60	1054,35	512,91	-2,52
	0,70	1053,00	514,26	-2,64

MNDWI	-0,30	1107,54	459,72	2,40
	-0,20	1078,11	489,15	-0,32
	-0,10	1070,46	496,80	-1,03
	0,00	1066,77	500,49	-1,37
	0,10	1064,43	502,83	-1,58
	0,20	1061,82	505,44	-1,82
	0,40	1057,32	509,94	-2,24
	0,80	1050,84	516,42	-2,84
	0,90	1045,89	521,37	-3,30
	0,95	1031,58	535,68	-4,62

AWEI	-6000	1083,33	483,93	0,16
	-5000	1077,03	490,23	-0,42
	-1000	1063,71	503,55	-1,65
	-500	1062,45	504,81	-1,77
	0	1060,65	506,61	-1,93
	500	1059,12	508,14	-2,07

Tabla D.16: Análisis de umbrales en Región 1-B.

REGIÓN 2 - A

Landsat	20181106	Mosaico	230-095
Google Earth	20181109		

Referencia Índice	Umbral	Área según cobertura [Ha]		Diferencia [%]
		Agua	Tierra	

Google Earth	-	503,29	846,73	-
---------------------	---	--------	--------	---

NDWI	-0,20	432,36	918,09	-14,09
	-0,10	460,71	889,74	-8,46
	0,00	480,69	869,76	-4,49
	0,10	489,69	860,76	-2,70
	0,20	496,53	853,92	-1,34
	0,30	502,74	847,71	-0,11
	0,40	507,60	842,85	0,86
	0,50	513,45	837,00	2,02
	0,60	523,35	827,10	3,99
	0,70	539,64	810,81	7,22

MNDWI	0,10	501,12	848,61	-0,43
	0,15	504,45	845,28	0,23
	0,20	506,70	843,03	0,68
	0,25	508,59	841,14	1,05
	0,30	511,11	838,62	1,55
	0,40	516,96	832,77	2,72
	0,50	523,08	826,65	3,93
	0,60	531,81	817,92	5,67

AWEI	1000	515,61	834,12	2,45
	0	508,14	841,59	0,96
	-500	505,71	844,02	0,48
	-1000	502,29	847,44	-0,20

Tabla D.17: Análisis de umbrales en Región 2-A.

REGIÓN 2 - B

Landsat	20160305	Mosaico	230-095
Google Earth	20160301		

Referencia Índice	Umbral	Área según cobertura [Ha]		Diferencia [%]
		Agua	Tierra	

Google Earth	-	462,44	887,56	-
---------------------	---	--------	--------	---

NDWI	-0,20	455,31	895,14	-1,54
	-0,10	458,82	891,63	-0,78
	0,00	461,16	889,29	-0,28
	0,10	463,68	886,77	0,27
	0,20	466,83	883,62	0,95
	0,30	468,54	881,91	1,32
	0,40	470,97	879,48	1,84
	0,50	472,50	877,95	2,17
	0,60	475,02	875,43	2,72
	0,70	476,64	873,81	3,07

MNDWI	-0,50	448,74	900,99	-2,96
	-0,45	459,99	889,74	-0,53
	-0,40	465,21	884,52	0,60
	-0,30	469,62	880,11	1,55
	-0,20	473,85	875,88	2,47
	-0,10	477,45	872,28	3,25
	0,00	480,78	868,95	3,97
	0,10	484,74	864,99	4,82

AWEI	0	489,96	859,77	5,95
	-1000	468,90	880,83	1,40
	-1500	460,35	889,38	-0,45
	-2000	438,30	911,43	-5,22

Tabla D.18: Análisis de umbrales en Región 2-B.

REGIÓN 3 - A

Landsat	20181106	Mosaico	230-095
Google Earth	20181030		

Referencia Índice	Umbral	Área según cobertura [Ha]		Diferencia [%]
		Agua	Tierra	

Google Earth	-	50,18	39,65	-
---------------------	---	-------	-------	---

NDWI	-0,20	52,20	37,89	4,03
	-0,10	51,93	38,16	3,49
	0,00	51,57	38,52	2,77
	0,10	51,39	38,70	2,41
	0,20	50,85	39,24	1,34
	0,30	50,58	39,51	0,80
	0,40	50,40	39,69	0,44
	0,50	49,77	40,32	-0,82
	0,60	49,41	40,68	-1,53
	0,70	41,85	48,24	-16,60

MNDWI	0,10	53,28	36,81	6,18
	0,20	52,02	38,07	3,67
	0,30	50,94	39,15	1,51
	0,40	50,67	39,42	0,98
	0,50	50,22	39,87	0,08
	0,60	50,04	40,05	-0,28
	0,70	49,59	40,50	-1,18
	0,80	45,54	44,55	-9,25
	0,90	3,69	86,40	-92,65

AWEI	-2000	54,81	35,28	9,23
	-1500	54,18	35,91	7,97
	-1000	54,09	36,00	7,79
	-500	53,55	36,54	6,72
	0	51,93	38,16	3,49
	500	50,94	39,15	1,51
	1000	50,85	39,24	1,34
	1500	50,76	39,33	1,16
	2000	50,49	39,60	0,62
	2500	50,31	39,78	0,26
	3000	50,04	40,05	-0,28
	3500	49,86	40,23	-0,64
	4000	49,59	40,50	-1,18

Tabla D.19: Análisis de umbrales en Región 3-A.

REGIÓN 3 - B

Landsat	20160305	Mosaico	230-095
Google Earth	20160301		

Referencia Índice	Umbral	Área según cobertura [Ha]		Diferencia [%]
		Agua	Tierra	

Google Earth	-	52,29	37,54	-
---------------------	---	-------	-------	---

NDWI	-0,20	53,37	36,72	2,07
	-0,10	53,10	36,99	1,55
	0,00	52,74	37,35	0,86
	0,10	52,56	37,53	0,52
	0,20	52,38	37,71	0,17
	0,30	52,02	38,07	-0,51
	0,40	51,66	38,43	-1,20
	0,50	51,30	38,79	-1,89
	0,60	51,12	38,97	-2,24
	0,70	50,85	39,24	-2,75

MNDWI	0,10	53,10	36,99	1,55
	0,20	52,65	37,44	0,69
	0,30	52,38	37,71	0,17
	0,40	52,11	37,98	-0,34
	0,50	51,66	38,43	-1,20
	0,60	51,12	38,97	-2,24
	0,70	50,67	39,42	-3,10
	0,80	50,31	39,78	-3,78
	0,90	49,05	41,04	-6,19

AWEI	-1000	66,33	23,76	26,85
	-500	53,37	36,72	2,07
	0	52,65	37,44	0,69
	500	52,20	37,89	-0,17
	1000	51,48	38,61	-1,55
	1500	49,59	40,50	-5,16
	2000	31,14	58,95	-40,45

Tabla D.20: Análisis de umbrales en Región 3-B.

REGIÓN 4 - A

Landsat	20181106	Mosaico	230-095
Google Earth	20181030		

Referencia Índice	Umbral	Área según cobertura [Ha]		Diferencia [%]
		Agua	Tierra	

Google Earth	-	<i>118,18</i>	<i>102,86</i>	-
---------------------	---	---------------	---------------	---

NDWI	-0,20	120,60	99,72	2,05
	-0,10	117,18	103,14	-0,84
	0,00	114,84	105,48	-2,82
	0,10	109,26	111,06	-7,55
	0,20	104,04	109,26	-11,96
	0,30	98,37	121,95	-16,76
	0,40	93,69	126,63	-20,72
	0,50	73,44	146,88	-37,86
	0,60	34,29	186,03	-70,98
	0,70	15,30	205,02	-87,05

MNDWI	0,10	166,59	53,73	40,97
	0,20	151,65	68,67	28,32
	0,30	112,59	107,73	-4,73
	0,40	105,48	114,84	-10,74
	0,50	99,99	120,33	-15,39
	0,60	95,67	124,65	-19,05
	0,70	79,29	141,03	-32,91
	0,80	26,01	194,31	-77,99

AWEI	-500	161,64	58,68	36,78
	0	138,51	81,81	17,21
	500	109,08	111,24	-7,70
	1000	106,92	113,40	-9,53
	1500	103,05	117,27	-12,80
	2000	43,02	177,30	-63,60

F

Tabla D.21: Análisis de umbrales en Región 4-A.

REGIÓN 4 - B

Landsat	20160305	Mosaico	230-095
Google Earth	20160301		

Referencia Índice	Umbral	Área según cobertura [Ha]		Diferencia [%]
		Agua	Tierra	

Google Earth	-	120,49	100,54	-
--------------	---	--------	--------	---

NDWI	-0,20	118,35	101,97	-1,78
	-0,10	117,45	102,87	-2,52
	0,00	116,91	103,41	-2,97
	0,10	116,55	103,77	-3,27
	0,20	116,55	103,77	-3,27
	0,30	116,28	104,04	-3,50
	0,40	116,01	104,31	-3,72
	0,50	115,92	104,40	-3,79
	0,60	115,38	104,94	-4,24
	0,70	114,84	105,48	-4,69

MNDWI	0,10	118,89	101,43	-1,33
	0,20	118,17	102,15	-1,93
	0,30	117,63	102,69	-2,38
	0,40	117,09	103,23	-2,82
	0,50	116,64	103,68	-3,20
	0,60	116,10	104,22	-3,64
	0,70	115,92	104,40	-3,79
	0,80	115,11	105,21	-4,47
	0,90	113,58	106,74	-5,74
	0,95	101,7	118,62	-15,60

AWEI	-3000	132,12	88,20	9,65
	-2500	120,87	99,45	0,31
	-2000	119,79	100,53	-0,58
	-1500	119,70	100,62	-0,66
	-1000	119,34	100,98	-0,96
	-500	118,89	101,43	-1,33
	0	118,26	102,06	-1,85
	500	117,63	102,69	-2,38
	1000	117,09	103,23	-2,82
	1500	116,82	103,50	-3,05

Tabla D.22: Análisis de umbrales en Región 4-B.

REGIÓN 5 - A

Landsat	20130829	Mosaico	230-095
Google Earth	20130918		

Índice	Referencia	Área según cobertura [Ha]		Diferencia
	Umbral	Agua	Tierra	[%]

Google Earth	-	482,16	697,18	-
---------------------	---	---------------	---------------	---

NDWI	0,00	1014,03	165,15	110,31
	0,10	947,34	231,84	96,48
	0,20	738,18	441,00	53,10
	0,30	620,37	558,81	28,67
	0,40	560,16	619,16	16,18
	0,50	495,54	683,64	2,78
	0,60	474,21	704,97	-1,65
	0,70	460,35	718,35	-4,52

MNDWI	0,40	1027,44	151,74	113,09
	0,80	858,51	320,67	78,06
	0,90	540,90	638,28	12,18
	0,95	473,67	705,51	-1,76

AWEI	0-10000	675,90	503,28	40,18
	3500-10000	546,03	633,15	13,25
	5000-10000	505,26	673,92	4,79
	6500-10000	474,57	704,61	-1,57
	7000-10000	230,40	948,78	-52,21
	6500-8000	451,80	727,38	-6,30

Tabla D.23: Análisis de umbrales en Región 5-A.

Anexo E

CAUDALES MENSUALES DE APORTES AL LAGO RICO

Para la cuantificación del aporte de caudales de la cuenca del lago Rico se dispone de mediciones de alturas hidrométricas en la estación Parque Nacional Los Glaciares y de las curvas cota - área y cota - volumen del mismo (ver Anexo D). Considerando los períodos en los cuales el glaciar Perito Moreno provoca el cierre de los caudales efluentes hacia lago Argentino, en los cuales dicho caudal puede considerarse nulo, es posible el planteo del siguiente balance hidrológico:

$$V_{LRf(t)} = V_{LRi(t)} + V_{Mitre(t)} + V_{Prec(t)} - V_{Evap(t)} + V_{Ap(t)} \quad (E.1)$$

Donde:

$V_{LRf(t)}$: volumen del lago Rico al final del intervalo de tiempo t

$V_{LRi(t)}$: volumen del lago Rico al inicio del intervalo de tiempo t

$V_{Mitre(t)}$: volumen aportado por la cuenca Mitre en el intervalo t

$V_{Prec(t)}$: volumen precipitado en el lago Rico (precipitación x Área lago) en el intervalo t

$V_{Evap(t)}$: volumen evaporado en lago Rico (evaporación por área de lago) en el intervalo t

$V_{Ap(t)}$: volumen aportado por la cuenca del lago Rico (sin cuenca Mitre) en el intervalo t

Considerando despreciables los términos de intercambio subterráneo.

Entonces el volumen aportado por la cuenca del lago Rico ($V_{Cuenca LR(t)}$) durante el período de cierre del GPM, resulta:

$$V_{Cuenca LR(t)} = V_{Ap(t)} + V_{Mitre(t)} = V_{f(t)} - V_{i(t)} - V_{Prec(t)} + V_{Evap(t)} \quad (E.2)$$

Se consideró la variación diaria de las variables mencionadas, determinándose los caudales

aportantes correspondientes.

Las Figura E.1 a Figura E.7 presentan la variación de niveles en el lago Rico y caudales aportantes totales determinados en los períodos de cierre del Glaciar Perito Moreno con información. La Tabla E.1 presenta los caudales obtenidos como resumen mensual de los mismos.

	Caudales medios mensuales de aportas al lago Rico										
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar(*)	Abr	May	Jun
2003/04			50	61	66	113	143	122			
2005/06	12	31	46	60	57	57	46	61			
2007/08	23	19	31	45	50	46	74	38	38	16	17
2011/12				19	80	153	45				
2013		15	51	30	149#						
2015/16				52	25	173	109	63			
2017/18	26	58	68	93	83	211	128	120			
Media				51	73	125	91	81			

(*) los caudales medios del mes de marzo son aproximados, ya que no se consideran todos los días del mes debido a la fecha en la que se produce la rotura (a excepción del año 2007/08)

hasta el 17/12/2013

Tabla E.1: Caudales medios mensuales de aporte al lago Rico

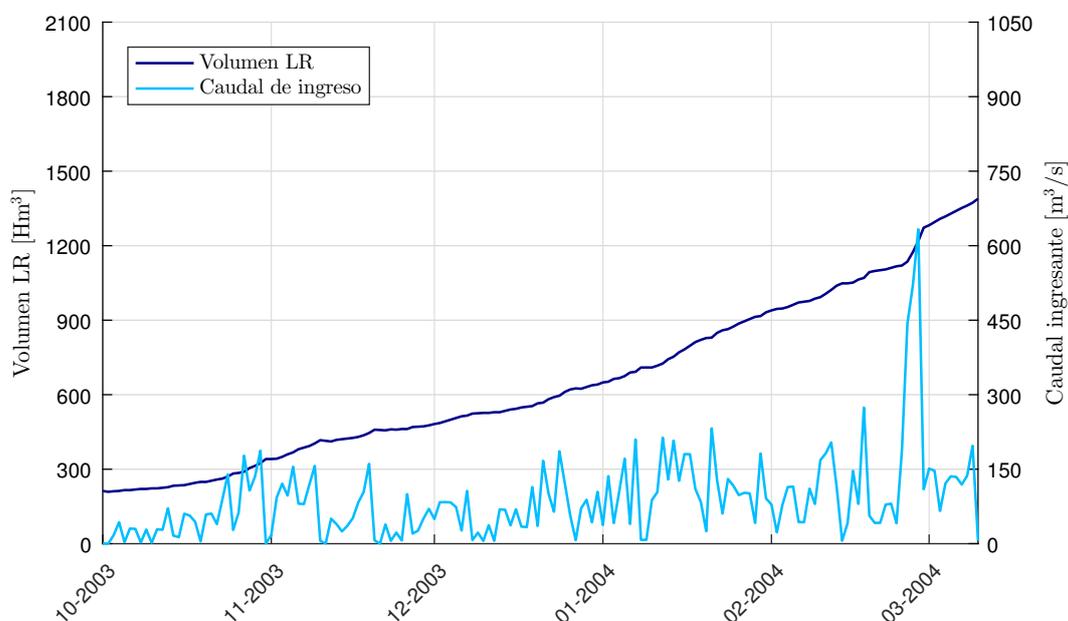


Figura E.1: Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2004.

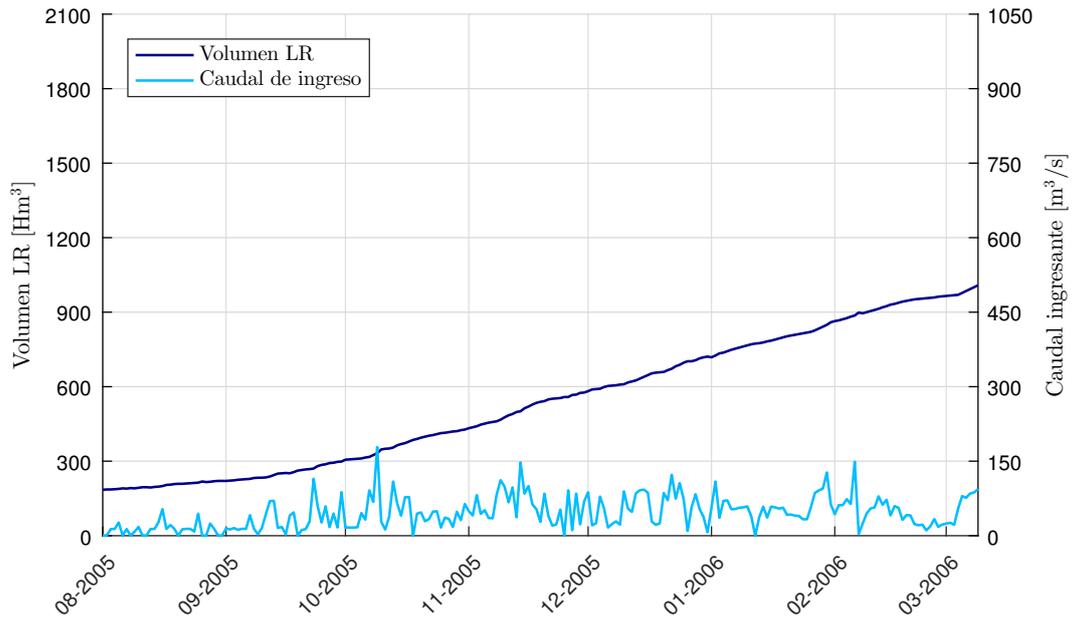


Figura E.2: Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2006.

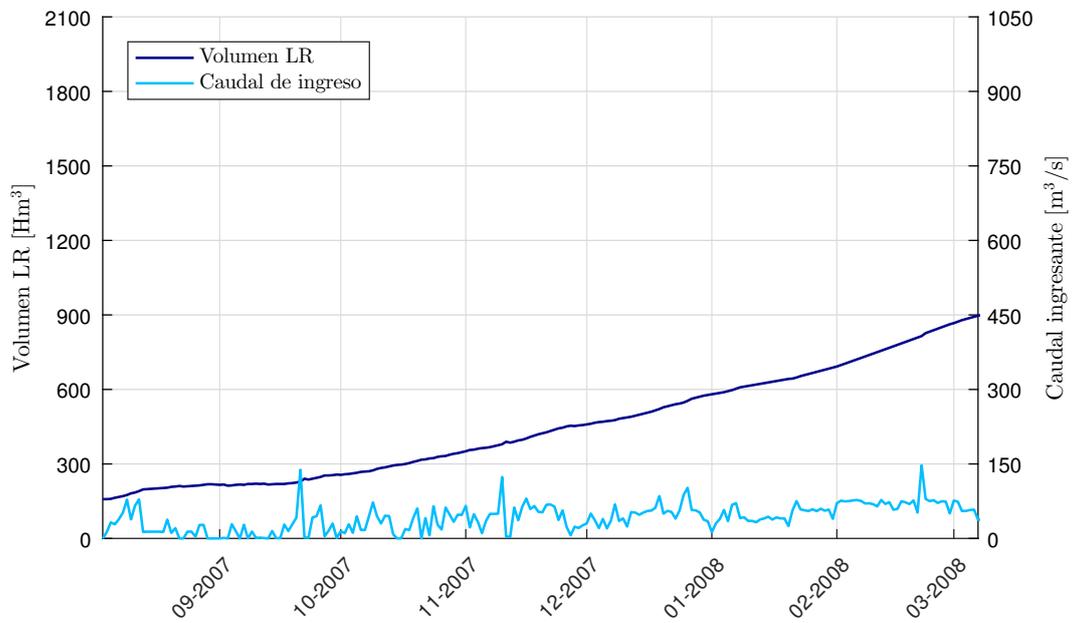


Figura E.3: Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2008.

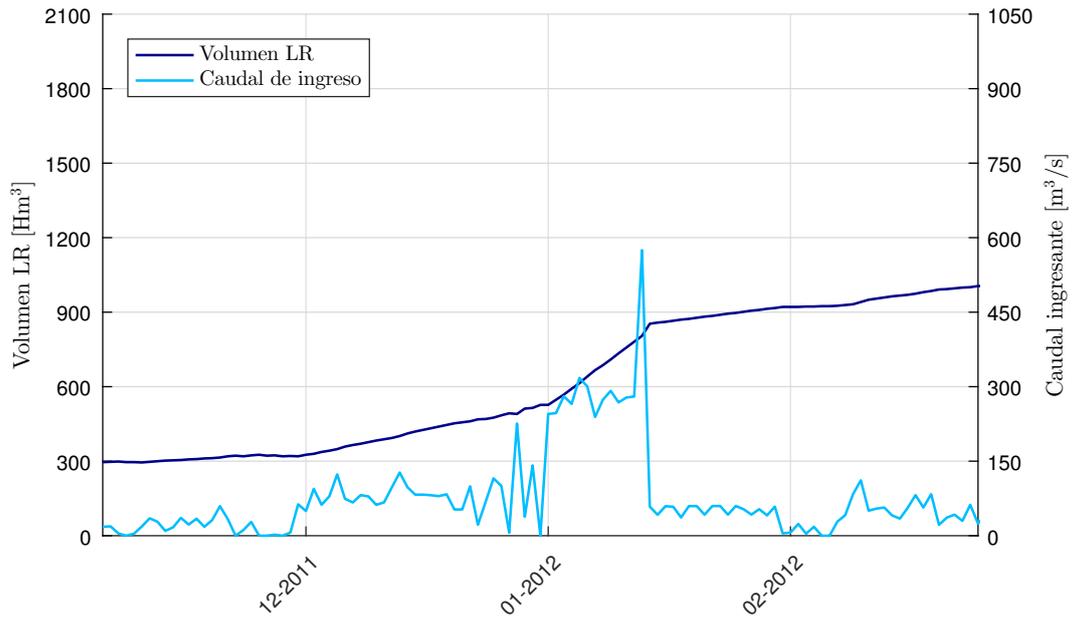


Figura E.4: Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2012.

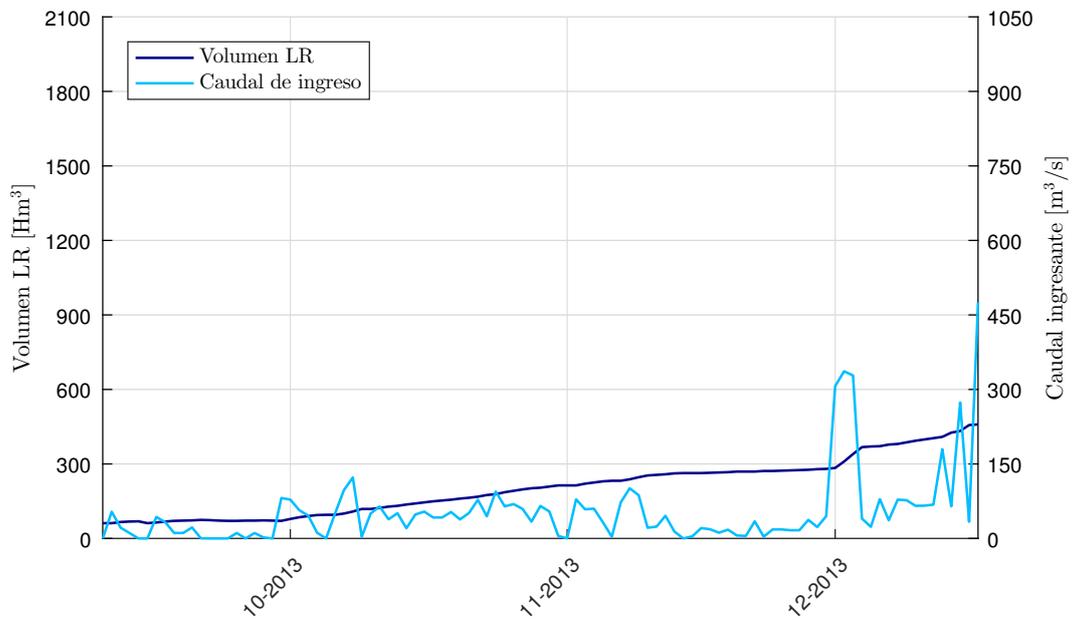


Figura E.5: Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2013

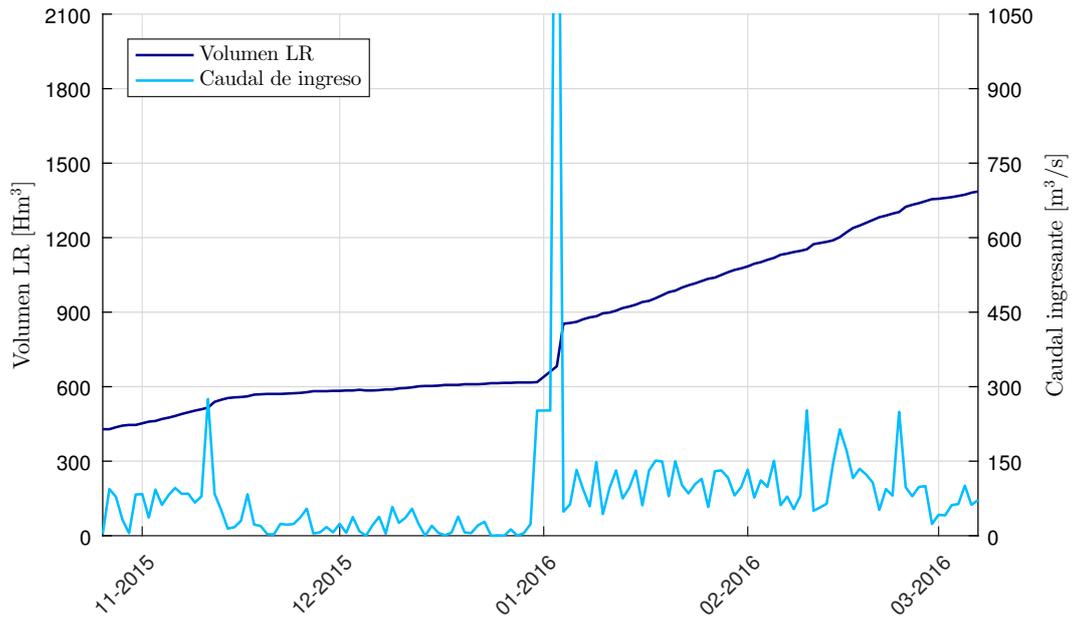


Figura E.6: Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2016.

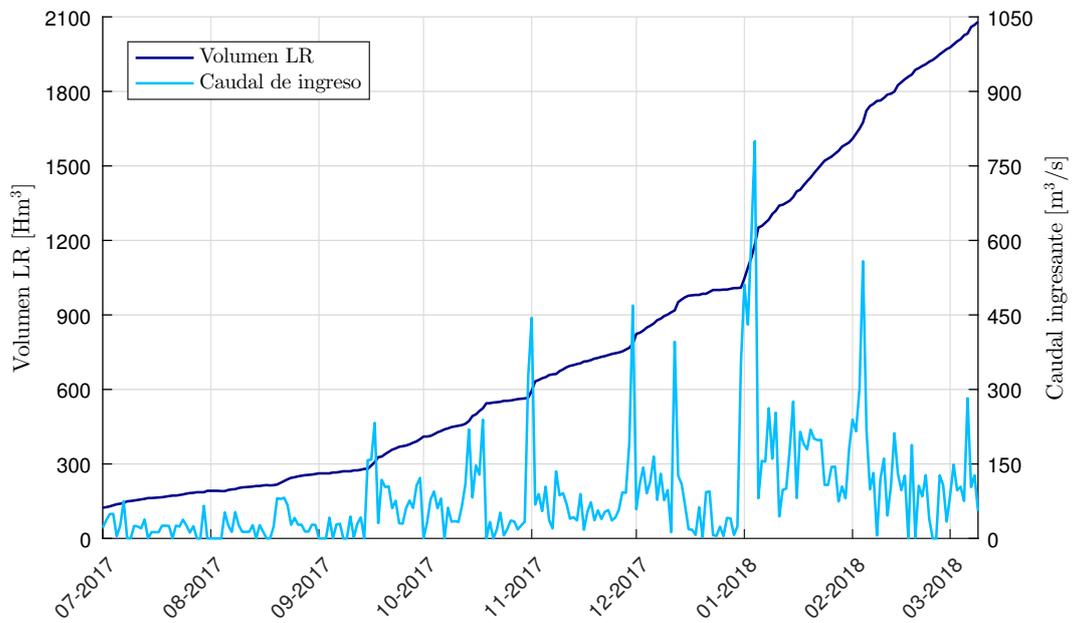


Figura E.7: Curva de variación del volumen y caudales ingresantes al lago Rico entre el cierre del glaciar Perito Moreno y el inicio del evento de desembalse del año 2018.

Anexo F

RESULTADOS SIMULACIÓN MODELO DE EMBALSE SIMPLIFICADO

En las Figuras F.1 a F.11 se presentan los resultados gráficos del tránsito por el modelo de embalse simplificado de los hidrogramas de las roturas de las cuales se disponen de:

- Registros de niveles del lago Rico, necesarios para construir los hidrogramas de rotura.
- Niveles del lago Argentino y/o caudales en el río Santa Cruz, que determinan las condiciones iniciales sobre las cuales se superponen los hidrogramas de rotura y permiten validar el modelo de embalse.

Los eventos de desembalse rápido del lago Rico que cuentan con estos registros son los de los años 1966 (Figura F.1), 2004 (Figura F.2 y Figura F.3), 2006 (Figura F.4 y Figura F.5), 2008 (Figura F.6 y Figura F.7), 2016 (Figura F.8 y Figura F.9) y 2018 (Figura F.10 y Figura F.11).

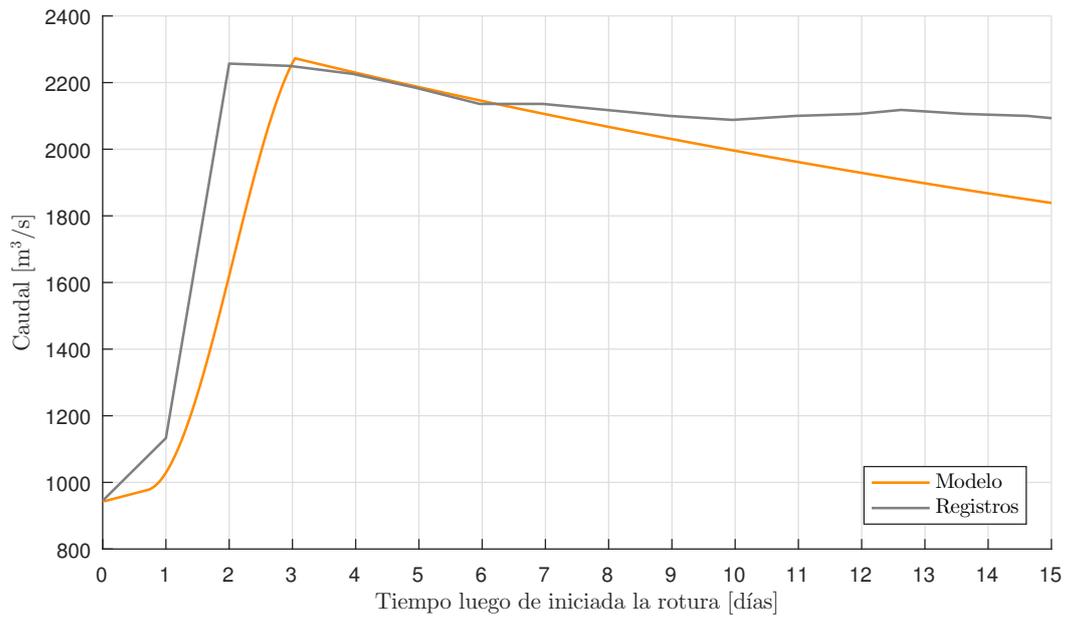


Figura F.1: Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 1966.

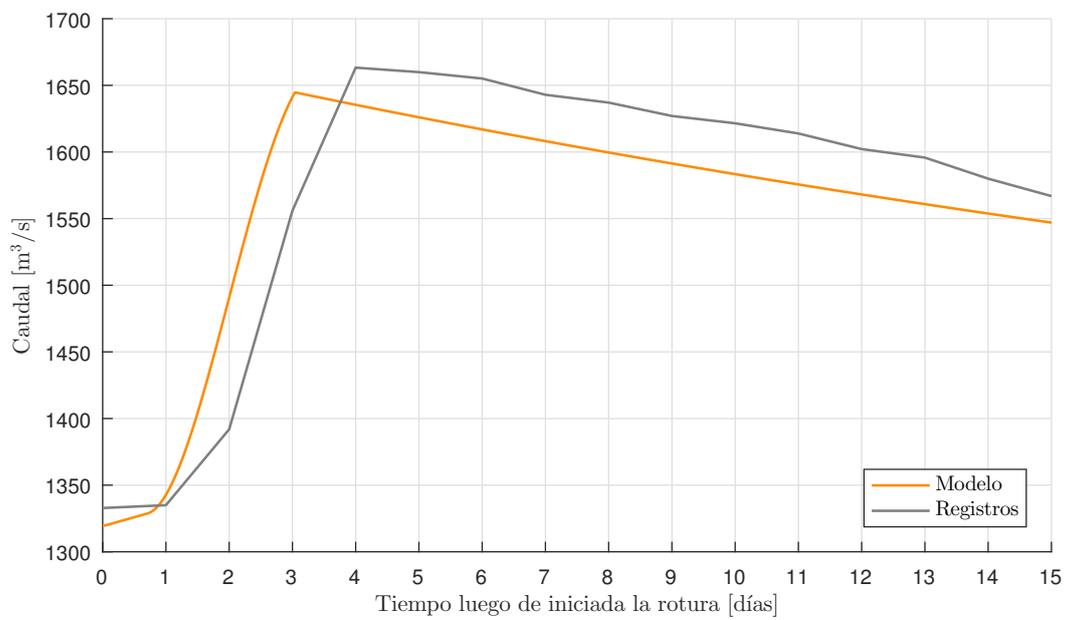


Figura F.2: Nivel del lago Argentino para el evento de rotura del año 2004.

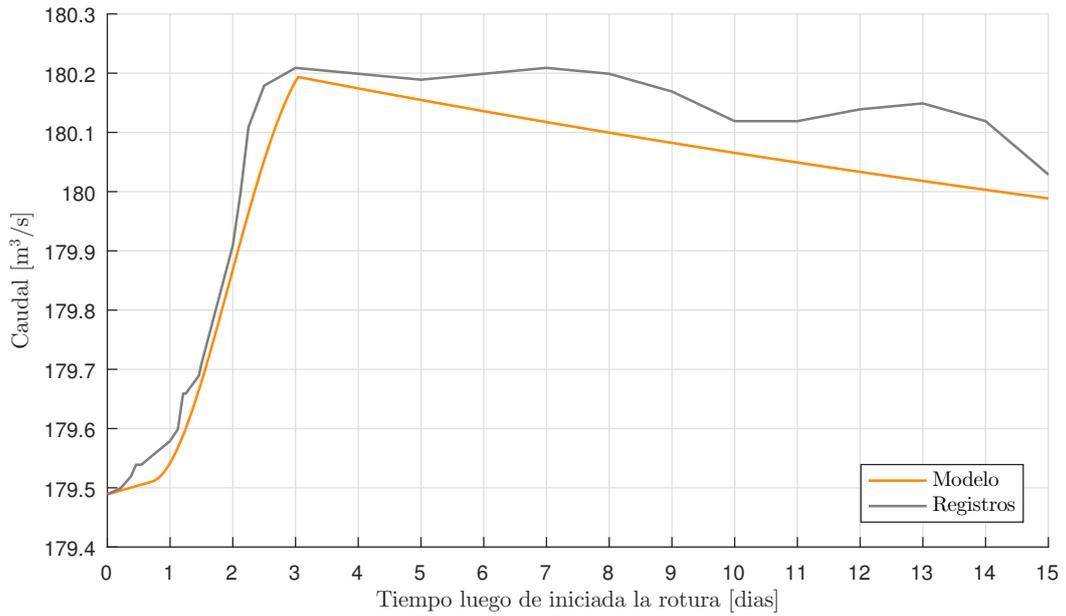


Figura F.3: Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 2004.

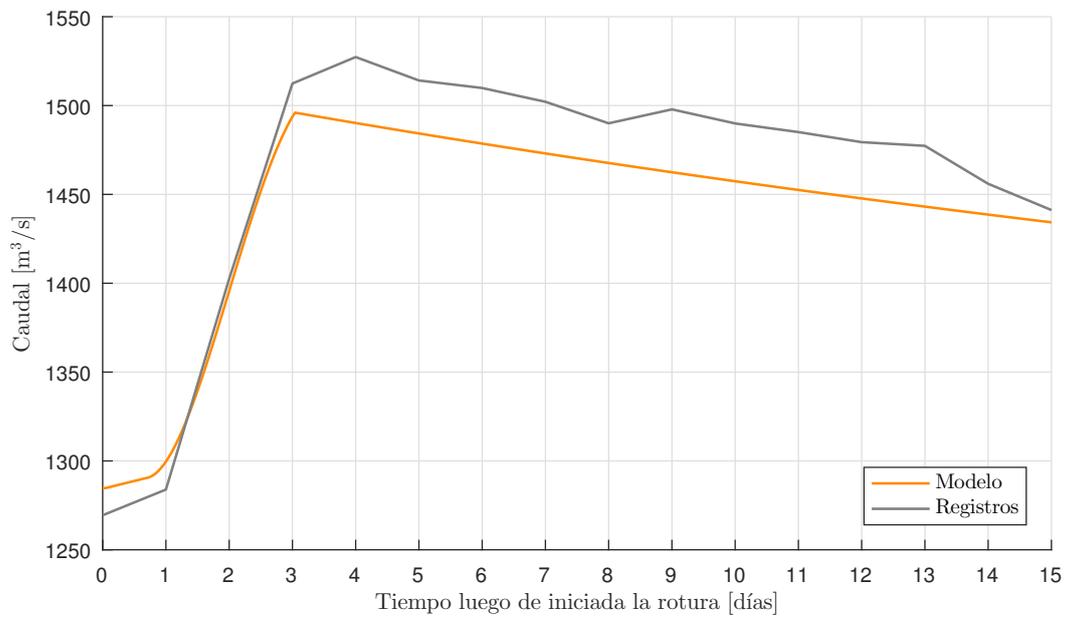


Figura F.4: Nivel del lago Argentino para el evento de rotura del año 2006.

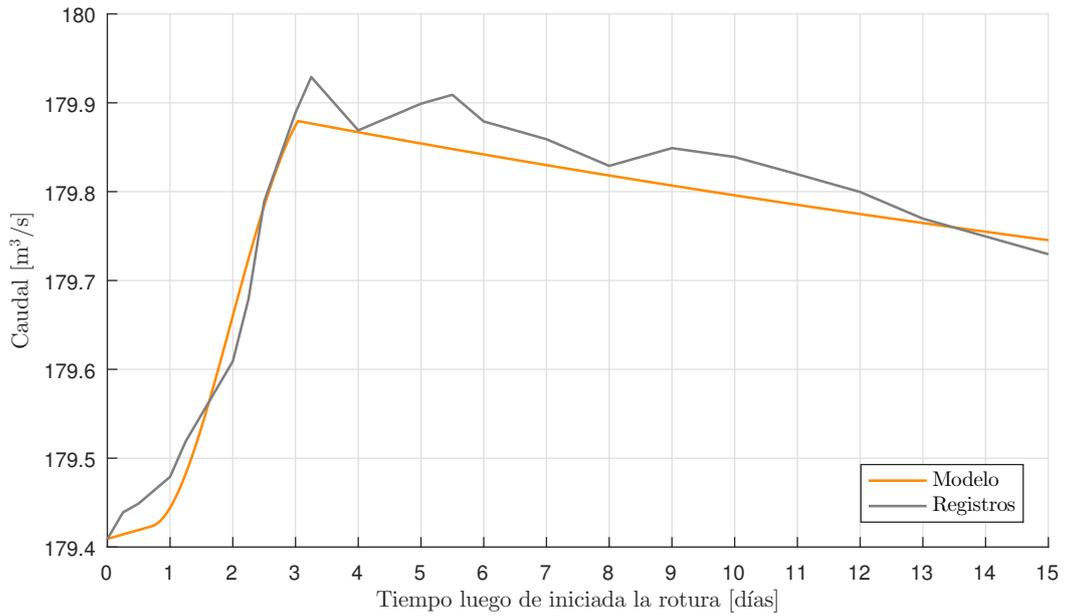


Figura F.5: Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 2006.

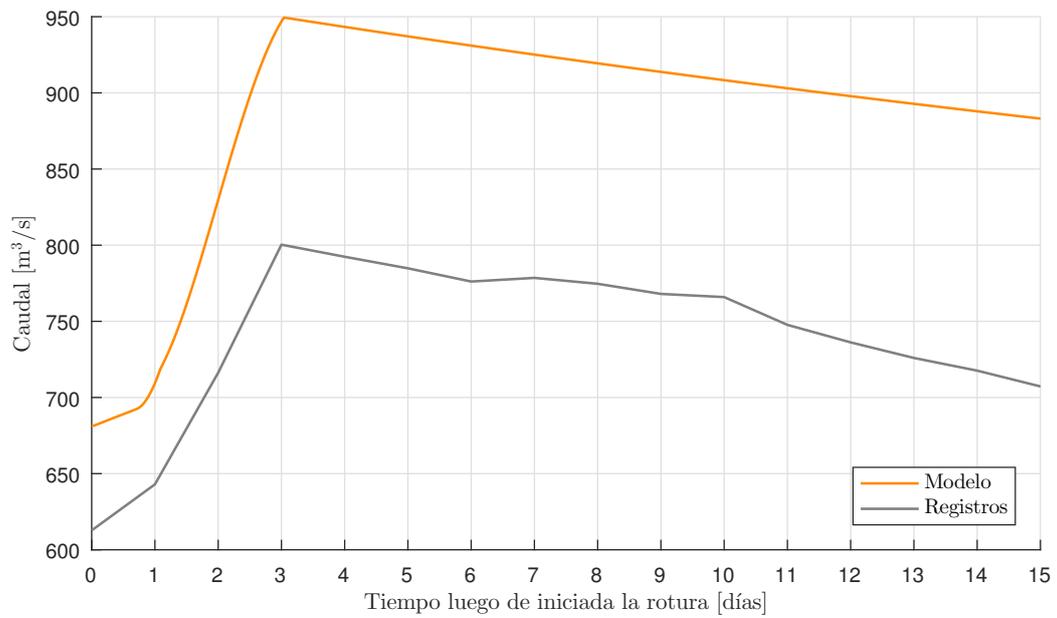


Figura F.6: Nivel del lago Argentino para el evento de rotura del año 2008.

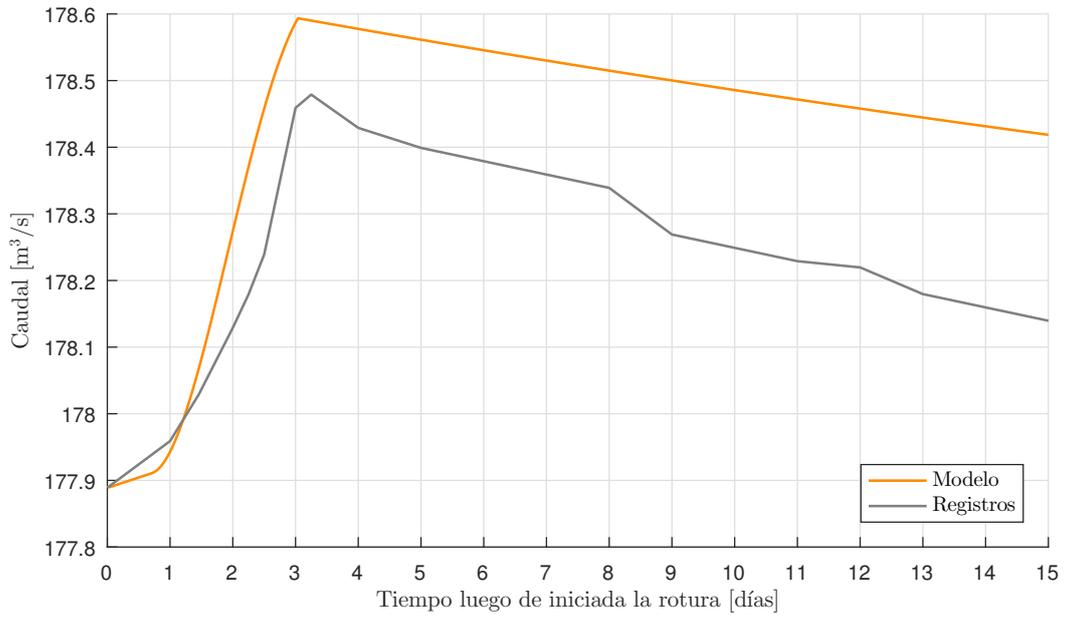


Figura F.7: Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 2008.

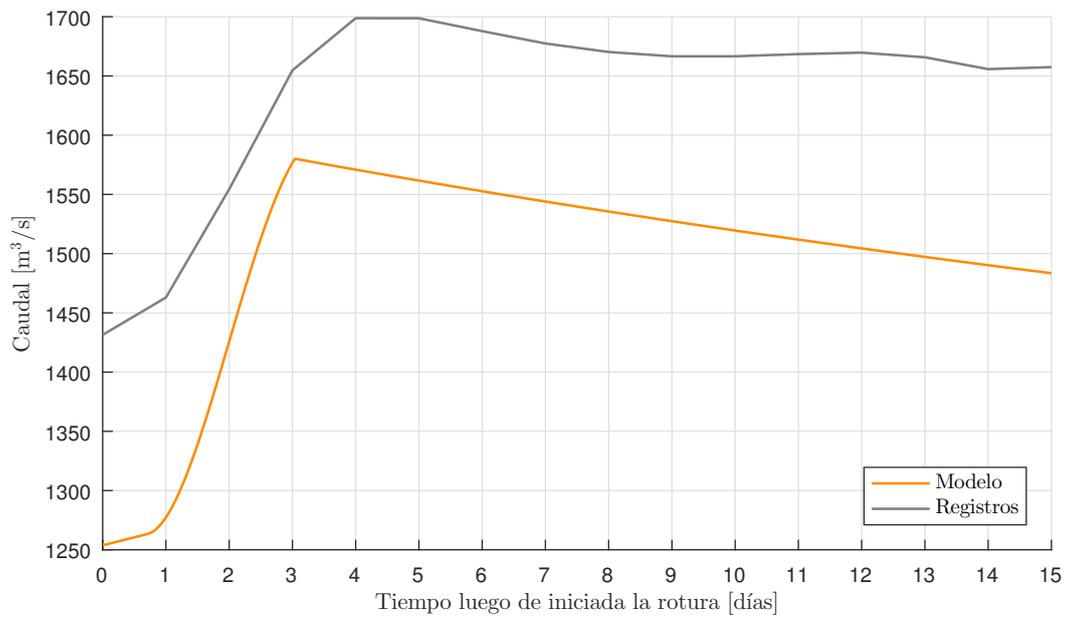


Figura F.8: Nivel del lago Argentino para el evento de rotura del año 2016.

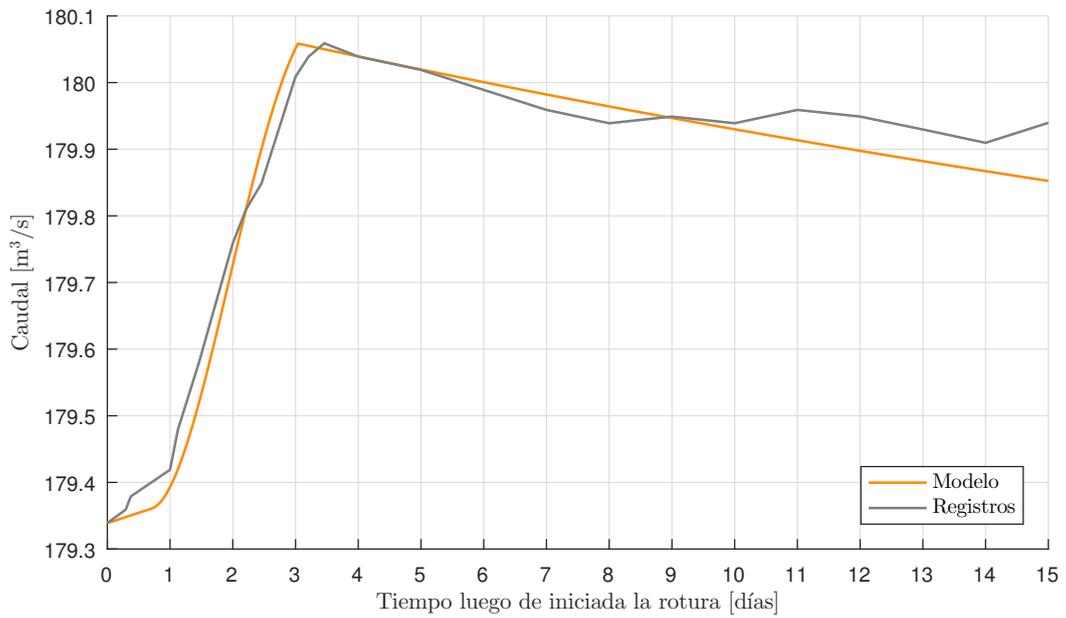


Figura F.9: Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 2016

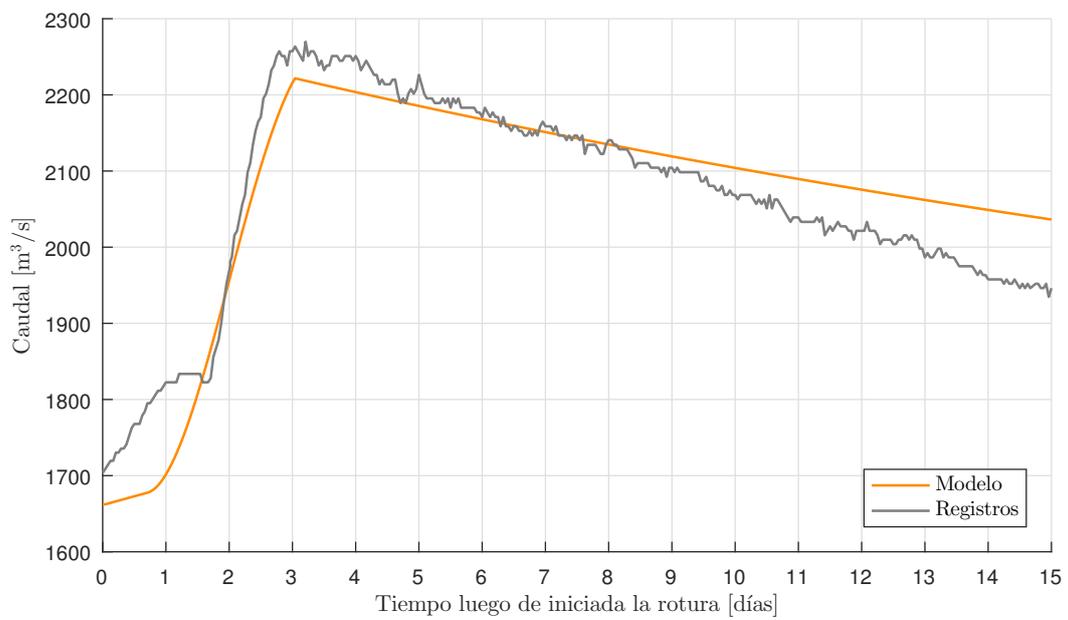


Figura F.10: Nivel del lago Argentino para el evento de rotura del año 2018.

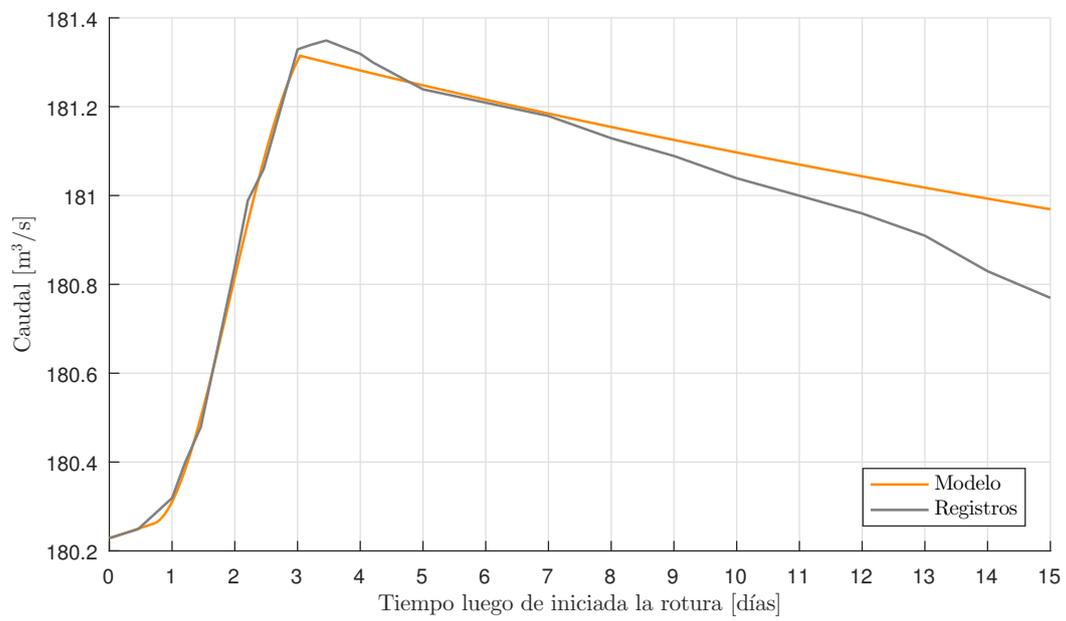


Figura F.11: Hidrograma de crecida en el río Santa Cruz para el evento de rotura del año 2018.

Anexo G

CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE SIMULACIÓN HEC-HMS y del modelo SMA

MODELO DE HUMEDAD DE SUELO (SMA) DEL HEC-HMS

En casos como el presente, donde las crecidas son relevantes tanto respecto a su caudal máximo como a su volumen, y donde los procesos de formación de crecidas pueden tomar varios meses, sobre los cuales pueden apoyarse a su vez desembalses repentinos del lago Rico, surge la necesidad de abordar un estudio que contemple la variación de estado de los diferentes almacenamientos en los que se divide el sistema, incluyendo tanto períodos lluviosos y/o de acumulación de nieve como otros de ausencia de precipitaciones y derretimiento, visualizando las variaciones de contenido de humedad en cada almacenamiento, y el agua disponible para escurrimiento que surge de cada uno de los ellos. HEC-HMS permite la utilización del modelo SMA (Soil Moisture Account) para estos análisis detallados. HEC-HMS (SMA) es desarrollado por U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.

El modelo SMA representa la cuenca mediante un conjunto de almacenamientos, como se muestra esquemáticamente en la Figura G.1 donde se pueden ver las conexiones entre los diferentes almacenamientos y las salidas del modelo.

El primer almacenamiento representa la porción de precipitación que es interceptada por la vegetación y no llega a alcanzar la superficie del terreno. El siguiente, representa el almacenamiento de agua que se podría acumular en la superficie del terreno, en pequeñas depresiones.

Superada la capacidad de estos almacenamientos el agua ingresa al terreno a través de la infiltración y/o escurre superficialmente (ello en función de una capacidad máxima de infiltración).

El primer almacenamiento en el interior del terreno, intenta representar el fenómeno complejo de almacenamiento de agua en la capa superior del suelo. El mismo se divide en dos zonas: una de las cuales está constituida por la parte de suelo que es capaz de perder agua por evapotranspiración y/o percolación (upper zone), y la otra (tension zone), que representa la parte del suelo que pierde agua exclusivamente por evapotranspiración, diferenciando de esta manera la existencia de agua libre y de agua capilar en el interior del suelo.

Luego el agua puede ingresar a los almacenamientos subterráneos, los cuales pueden representar el flujo subsuperficial y el flujo base propiamente dicho.

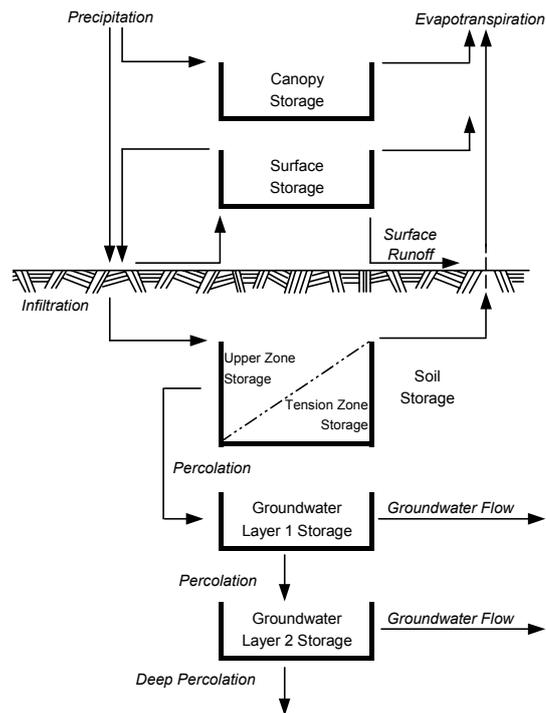


Figura G.1: Esquema conceptual del modelo SMA.

El modelo SMA calcula el flujo hacia, desde, o entre los almacenamientos indicados, siendo la secuencia de cálculo diferente, según que se consideren períodos de precipitación o de ausencia de precipitación, tal como se indica en los dos esquemas mostrados en la Figura G.2.

Ocurrida una precipitación, el primer destino del agua de lluvia es el depósito de intercepción por la vegetación, cuya máxima capacidad de almacenamiento debe ser indicada externamente. El exceso de precipitación sobre la citada capacidad de almacenamiento, unido al agua existente en el depósito de almacenamiento superficial al comienzo del intervalo de cálculo constituye el volumen de agua disponible para la infiltración en la capa superior del suelo.

El volumen potencial de infiltración de agua en el suelo durante un intervalo de tiempo Δt se determina mediante la siguiente expresión:

$$IP = MCIS - \left(1 - \frac{AS}{CAS}\right) \Delta t \quad (G.1)$$

Donde:

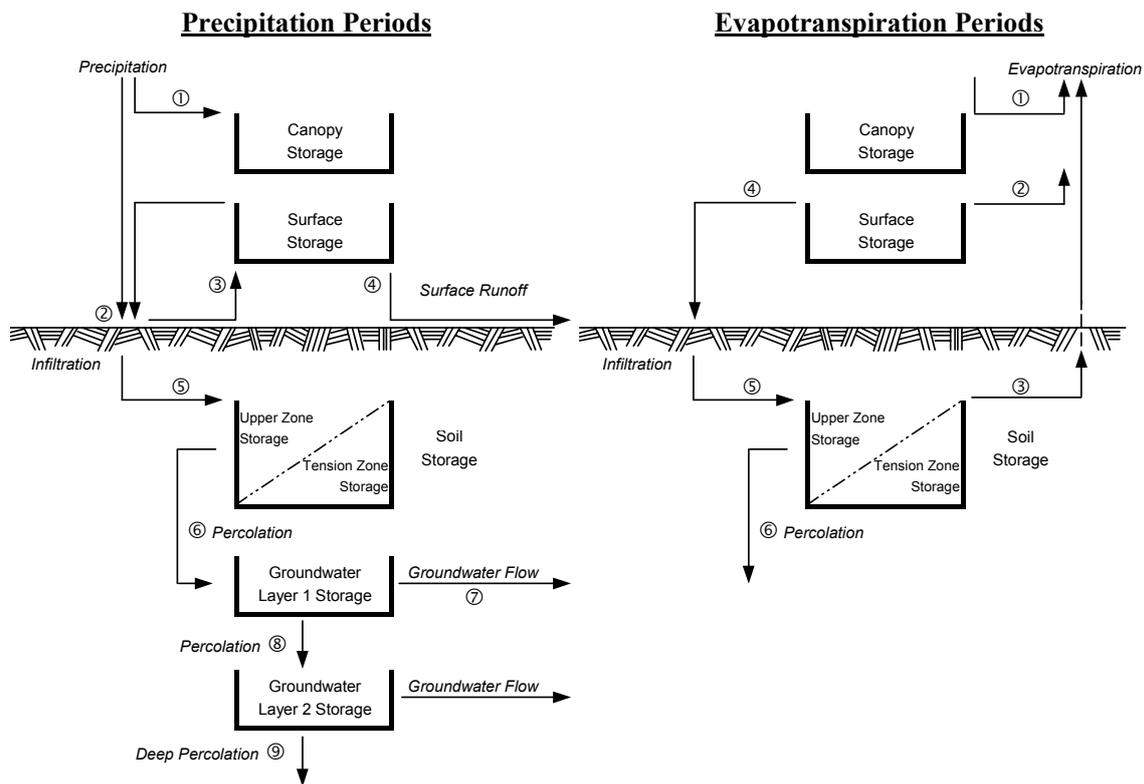


Figura G.2: Esquema de procesos de cálculo SMA (humedecimiento – desecación).

IP: potencial de infiltración en el suelo durante el intervalo Δt .

MCIS: máxima capacidad de infiltración de agua en el suelo.

AS: volumen de agua almacenado en el suelo al comienzo del intervalo de tiempo.

CAS: máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

Es decir, si el depósito de almacenamiento de agua en el suelo se encuentra vacío, el potencial de infiltración iguala a la máxima capacidad de infiltración, mientras que si el citado depósito se encuentra lleno, el potencial de infiltración es nulo.

Para determinar el volumen de agua que realmente se infiltra en el suelo durante el intervalo de tiempo, hay que comparar el valor calculado de *IP* con el volumen total de agua disponible para la infiltración al comienzo del intervalo. El mínimo de estos dos valores coincide con el volumen de agua realmente infiltrado.

Si el volumen de agua disponible para la infiltración supera el valor de *IP*, el exceso de agua se incorpora al depósito de almacenamiento superficial. Cuando esta incorporación supera la capacidad del depósito de almacenamiento superficial (*CADSUP*), el exceso se convierte en escorrentía superficial.

Desde el depósito de almacenamiento de agua en el suelo se produce el fenómeno de percolación hacia el primero de los depósitos de agua subterránea considerado. El volumen potencial de percolación entre ambos depósitos, durante el intervalo de tiempo, se determina mediante la

siguiente expresión:

$$PP_1 = MCPS \frac{AS}{CAS} \left(1 - \frac{ADS1}{CADS1} \right) \Delta t \quad (G.2)$$

Donde:

PP_1 : potencial de percolación hacia el primer depósito de agua subterránea.

$MCPS$: máxima capacidad de percolación desde el depósito de almacenamiento de agua en el suelo, definida por el usuario.

$ADS1$: volumen de agua almacenado en el primer depósito de agua subterránea al comienzo del intervalo de tiempo.

$CADS1$: máxima capacidad de almacenamiento de agua en el primer depósito de agua subterránea.

El potencial de percolación es tanto mayor cuanto más lleno se encuentra el depósito de almacenamiento de agua en el suelo y más vacío el primer depósito de agua subterránea, al comienzo del intervalo de tiempo y viceversa.

Por otro lado, el volumen de agua disponible para la percolación es igual a la suma de la infiltración real desde la superficie y del volumen de agua existente al comienzo del intervalo en el depósito de almacenamiento de agua en el suelo. El mínimo resultante de la comparación entre este valor y el potencial de percolación antes calculado representa el volumen real de percolación que tiene lugar durante el correspondiente Δt hacia el primer depósito de agua subterránea.

De manera análoga, el potencial de percolación entre los dos depósitos de agua subterránea se determina mediante la siguiente expresión:

$$PP_2 = MCPDS1 \frac{ADS1}{CADS1} \left(1 - \frac{ADS2}{CADS2} \right) \Delta t \quad (G.3)$$

Donde:

PP_2 : potencial de percolación entre los dos depósitos de agua subterránea.

$MCPDS1$: máxima capacidad de percolación entre los dos depósitos de agua subterránea, definida por el usuario.

$ADS2$: volumen de agua almacenado en el segundo depósito de agua subterránea al comienzo del intervalo de tiempo.

$CADS2$: máxima capacidad de almacenamiento de agua en el segundo depósito de agua subterránea.

Durante cada intervalo de tiempo, se produce también otra salida de agua desde el primer depósito de agua subterránea, que contribuye a alimentar el caudal, en el punto de desagüe de la cuenca considerada. El volumen ($VDS1$) que representa dicha salida de agua se determina

mediante la siguiente expresión:

$$VDS1 = \frac{1}{2} (Q_{1,t+\Delta t} + Q_{1,t}) \Delta t \quad (G.4)$$

Donde:

$Q_{1,t}$ y $Q_{1,t+\Delta t}$ son los caudales de salida de dicho depósito, al principio y al final del intervalo de cálculo, respectivamente.

El valor de $Q_{1,t+\Delta t}$ se determina, a su vez, a partir de la siguiente expresión:

$$Q_{1,t+\Delta t} = \frac{PR_1 + ADS1 - PP_2 - \frac{1}{2} Q_{1,t} \Delta t}{TADS1 + \frac{\Delta t}{2}} \quad (G.5)$$

Donde:

PR_1 : volumen de percolación que tiene lugar, durante el intervalo de tiempo de cálculo, entre el suelo y el primer depósito de agua subterránea.

$TADS1$: coeficiente de almacenamiento del citado depósito subterráneo, que debe ser definido por el usuario.

El volumen de agua disponible para la percolación entre los dos depósitos de agua subterránea es igual al existente en el depósito superior al comienzo del intervalo de tiempo ($ADS1$), más la percolación real desde el depósito de almacenamiento de agua en el suelo (PR_1), menos el volumen ($VDS1$) evacuado desde el primer depósito de agua subterránea durante el citado incremento de tiempo.

El mínimo resultante de la comparación entre este volumen de agua disponible para la percolación y el potencial de percolación (PP_2) antes calculado, representa el volumen real de percolación (PR_2) que tiene lugar, durante el correspondiente Δt , entre ambos depósitos de agua subterránea.

El siguiente paso en el proceso de cálculo es la determinación del potencial de percolación desde el segundo depósito de agua subterránea hacia capas más profundas, que se realiza con la siguiente expresión:

$$PP_3 = MCPDS2 \left(\frac{ADS2}{CADS2} \right) \quad (G.6)$$

Donde:

PP_3 : potencial de percolación profunda.

$MCPDS2$: máxima capacidad de infiltración desde el segundo depósito de agua subterránea.

En algunos casos es posible la consideración de uno solo de los dos depósitos de almacenamiento de agua subterránea, e incluso la no consideración de ninguno de ellos. En este último caso, la percolación profunda se produce directamente desde el depósito de almacenamiento de

agua en el suelo, con un potencial de percolación PP_1^* dado por la siguiente expresión:

$$PP_1^* = MCPS \left(\frac{AS}{CAS} \right) \quad (G.7)$$

En el caso de considerar un único depósito de agua subterránea, la percolación profunda se produce directamente desde el mismo, con un potencial de percolación PP_2^* dado por la siguiente expresión:

$$PP_2^* = MCPDS1 \left(\frac{ADS1}{CADS1} \right) \quad (G.8)$$

Durante cada intervalo de tiempo se produce, además, otra salida de agua desde el segundo depósito de almacenamiento de agua subterránea, que contribuye a alimentar, en forma de flujo base, el caudal en el punto de desagüe de la cuenca considerada.

El volumen $VDS2$ que representa dicha salida de agua se determina mediante las siguientes expresiones:

$$VDS2 = \frac{1}{2} (Q_{2,t+\Delta t} + Q_{2,t}) \Delta t \quad (G.9)$$

$$Q_{2,t+\Delta t} = \frac{PR_2 + ADS2 - PP_3 - \frac{1}{2} Q_{2,t} \Delta t}{TADS2 + \frac{\Delta t}{2}} \quad (G.10)$$

Las variables consideradas tienen el mismo significado que antes, pero ahora se refieren al segundo de los depósitos de agua subterránea, en lugar del primero.

El volumen de agua disponible para la percolación profunda es igual al existente en el depósito inferior de agua subterránea al comienzo del intervalo ($ADS2$), más la percolación real (PR_2) desde el depósito superior de agua subterránea, menos el volumen desaguado ($VDS2$) desde el depósito inferior durante el intervalo de tiempo. El mínimo resultante de la comparación entre este volumen de agua disponible para la percolación profunda y el potencial de la misma (PP_3), representa el volumen real percolado (PR_3) hacia capas profundas, durante el correspondiente Δt . Este volumen de agua constituye una pérdida de agua definitiva del sistema, que no aflora a la superficie aguas arriba del punto de desagüe de la cuenca.

En los períodos en que hay ausencia de precipitaciones, el proceso de cálculo se resume en:

- se produce un vaciado parcial o total del almacenamiento de agua que representa la intercepción por parte de la vegetación, debido al fenómeno de evapotranspiración;
- el siguiente depósito que contribuye a satisfacer la demanda de evapotranspiración, una vez que se ha vaciado totalmente el anterior, es el que representa el almacenamiento superficial de agua en las depresiones del terreno. Dicho depósito experimenta también una pérdida de agua por infiltración en el suelo.

El volumen de agua disponible para la infiltración en el suelo es igual al existente en el depósito superficial al comienzo del intervalo Δt , designado como AS , menos el volumen necesario para hacer frente a la demanda de evapotranspiración que aún queda por satisfacer. Dependiendo de

las circunstancias, puede darse el caso de que el volumen de agua disponible para la infiltración sea nulo.

Cuando la demanda de evapotranspiración potencial total (*EPT*) no se puede satisfacer plenamente a partir del volumen de agua contenido en los dos primeros depósitos, entra en juego el depósito de almacenamiento de agua en suelo, para hacer frente al resto de la demanda, que se puede designar como *ETS*.

Se intenta satisfacer dicha demanda a partir del volumen de agua contenido en la upper zone del depósito de almacenamiento de agua en el suelo al comienzo del intervalo. De cumplirse, la evapotranspiración real total (*ERT*) es igual a la potencial y el volumen de agua que queda en el citado depósito continúa el mismo proceso que se ha descrito anteriormente.

Por el contrario, si ello no es posible, se empieza a utilizar el agua contenida en la tension zone, en la que el agua se encuentra fuertemente ligada a las partículas del suelo, lo cual dificulta su extracción.

El agua que queda en el depósito de almacenamiento de agua en el suelo, una vez satisfecha la demanda de evapotranspiración, está disponible para continuar su penetración en el terreno, alimentando sucesivamente los depósitos utilizados para representar el almacenamiento en capas más profundas.

La Tabla G.1 presenta la denominación de los parámetros que utiliza el modelo SMA. Dichos parámetros son definidos por el usuario y/o son obtenidos por calibración.

Código	Descripción y Unidad
INTVEG	Intercepción por la vegetación [mm]
CADSUP	Capacidad de almacenamiento superficial en depresiones [mm]
MCIS	Máxima capacidad de infiltración en el suelo [mm/h]
CAS	Capacidad de almacenamiento del suelo [mm]
CAZTS	Capacidad de almacenamiento en la zona de tensión del suelo [mm]
MCPS	Máxima capacidad de percolación del suelo [mm/h]
CADS1	Capacidad de almacenamiento del depósito subterráneo N°1 [mm]
MCPDS1	Máxima capacidad de percolación del depósito subterráneo N°1 [mm]
TADS1	Coeficiente de almacenamiento del depósito subterráneo N°1 [h]
CADS2	Capacidad de almacenamiento del depósito subterráneo N°2 [mm]
MCPDS2	Máxima capacidad de percolación del depósito subterráneo N°2 [mm/h]
TADS2	Coeficiente de almacenamiento del depósito subterráneo N°2 [h]
CIINTVEG	Contenido inicial del almacenamiento por intercepción [%]
CIADSUP	Contenido inicial del almacenamiento superficial en depresiones [%]
CIAS	Contenido inicial del almacenamiento en el suelo [%]
CIADS1	Contenido inicial del almacenamiento en el depósito subterráneo N°1 [%]
CIADS2	Contenido inicial del almacenamiento en el depósito subterráneo N°2 [%]

Tabla G.1: Parámetros del modelo SMA.

Anexo H

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD. COMPARACIONES CON OTRAS CMP EN REGÍMENES NIVALES O PLUVIO-NIVALES EN ARGENTINA

H.1. Análisis de sensibilidad

Se analizan sensibilidades en relación a hipótesis asumidas en el modelo hidrológico de simulación:

- Incertidumbres al ingreso de hidrograma de 10.000 años en La Leona.
- Variaciones en precipitaciones.
- Incremento en temperaturas.
- Variaciones al nivel inicial considerado en lago Rico.
- Sensibilidades a la forma del hidrograma de rotura y a las variaciones de las curvas cota - volumen.

H.1.1. Incertidumbres al ingreso de hidrograma de 10.000 años en La Leona

Teniendo en cuenta que el hidrograma en el río La leona es un ingreso al modelo de simulación hidrológico, utilizándose para ello el hidrograma de 10.000 años de recurrencia obtenido del análisis de frecuencia de caudales y volúmenes máximos en la estación La Leona, el cual presente

incertidumbre estadística representada por sus intervalos de confianza, se analiza las variaciones esperables en CHF al utilizar los límites inferiores y superiores de dicho intervalo. En este ejercicio se utiliza el intervalo de confianza del 90 %, representándose en la Figura H.1 el hidrograma original y los hidrogramas correspondientes al asumir los límites superiores e inferiores respectivamente.

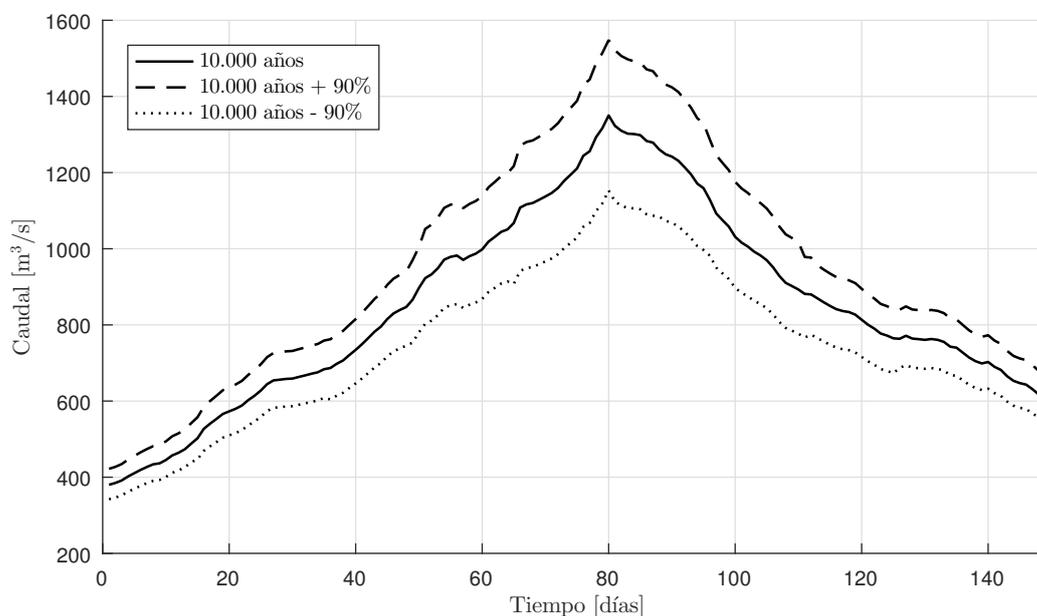


Figura H.1: Hidrograma 10.000 años en La Leona, límite superior e inferior intervalo 90 %.

En términos prácticos el hidrograma que considera el límite superior del intervalo de confianza del 90 % es un 15 % superior al estimado para 10.000 años de recurrencia.

Al incorporar estos hidrogramas a la simulación, se modifica la condición de lago Argentino (nivel de agua) al momento de considerarse la “rotura”, por lo que deben recalcularse los hidrogramas de rotura. Los resultados de la simulación considerando la incertidumbre en el caudal proveniente del río La Leona se muestran en la Tabla H.1

Simulación	Q_{mx} LLEO [m³/s]	Cota máxima LA [mIGN]	Cota máxima LR [mIGN]	Q_{mx} rotura [m³/s]	Q_{mx} CHF [m³/s]	Diferencia [%]
CMP con LLEO + 90 %	1.548	182,8	209,6	28.900	5.250	+ 3,8
CMP	1.350	182,5	209,6	29.190	5.060	-
CMP con LLEO - 90 %	1.153	182,3	209,6	29.380	4.890	- 3,4

Tabla H.1: Resultados simulaciones considerando incertidumbres en La Leona.

La diferencia en caudal máximo en CHF es menor al 4 % respecto a la simulación base. La Figura H.2 presenta los hidrogramas resultantes en CHF en comparación con el hidrograma CMP base.

H.1.2. Sensibilidad a la variación de precipitaciones

Se realizó un análisis de sensibilidad variando las precipitaciones del período enero – abril consideradas en la maximización de la crecida base. Se asumió una variación de 15 % en cada una

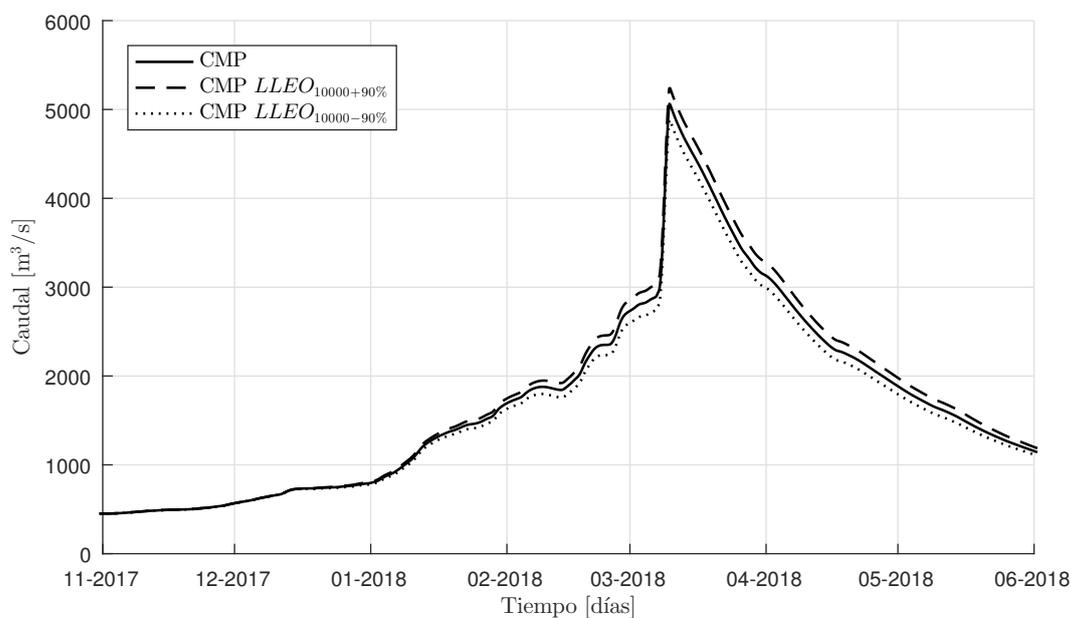


Figura H.2: Hidrogramas en CHF considerando variaciones en La Leona (límite superior e inferior intervalo 90%).

de las estaciones pluviométricas utilizadas.

Al incorporar estas variaciones de precipitación, se modifican los valores máximos alcanzadas en los lagos al momento de considerarse la “rotura”, por lo que deben recalcularse los hidrogramas respectivos (Tabla H.2).

Simulación	Cota LR (*) [mIGN]	Q_{deb} (*) [m³/s]	Cota máxima LA [mIGN]	Q_{max} rotura [m³/s]	Q_{max} CHF [m³/s]	Diferencia [%]
CMP con $P_{100} + 5\%$	210,2	376	183,1	29.350	5.475	+ 8,2
CMP	209,6	200	182,5	29.190	5.060	-
CMP con $P_{100} - 5\%$	208,5	38	182,0	28.310	4.640	- 8,3

(*) al momento de inicio rotura

Tabla H.2: Resultados simulaciones considerando incertidumbres en precipitaciones

En este caso se tienen variaciones en el caudal máximo en CHF en el orden del 8%. La Figura H.3 presenta los hidrogramas resultantes.

H.1.3. Sensibilidad al incremento de temperaturas

En el capítulo 10 del cuerpo principal se analizó el posible impacto del Cambio Climático en las crecidas del río Santa Cruz, incrementando las temperaturas utilizadas en las simulaciones hidrológicas de crecidas por un factor de 1,25. La simulación de la crecida del escenario 2 considerando este incremento de temperaturas y variables asociadas (*ETP*) arroja como resultado un Q_{max} de 5.420 m³/s en CHF, lo cual significa un incremento del 7% en el caudal máximo respecto a la crecida base y del 14% en el volumen escurrido (entre el 1° septiembre y el 31 de mayo). Si bien este análisis fue realizado con el objetivo principal de analizar el efecto del Cambio Climático en el futuro lejano (2100), sirve también para analizar el efecto que las temperaturas

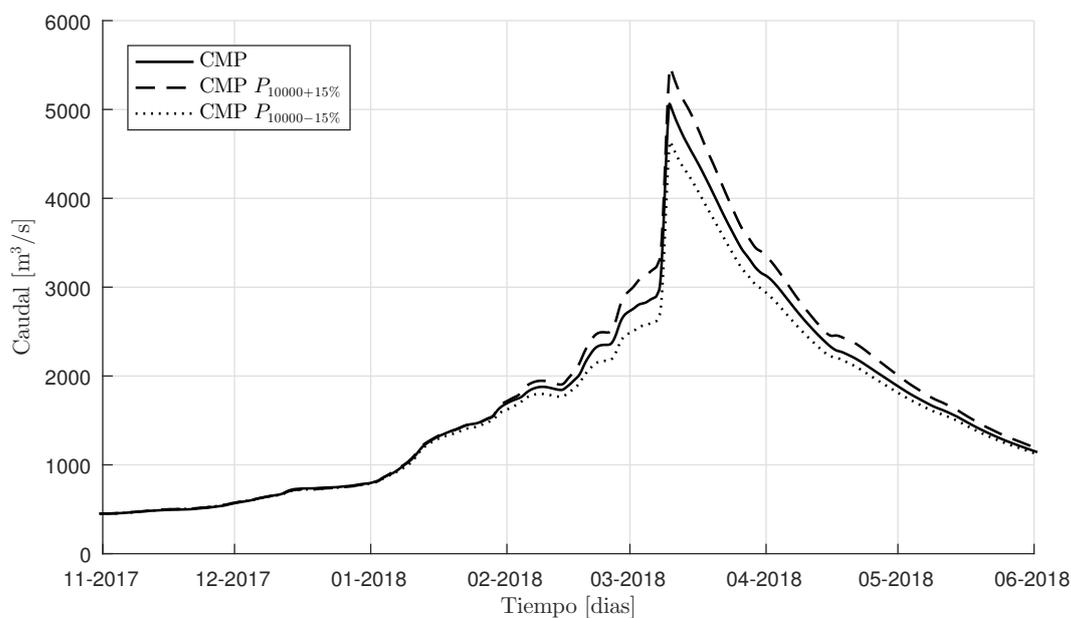


Figura H.3: Hidrogramas en CHF considerando variaciones en precipitaciones (15% en período Enero – Abril).

(sus variaciones) tienen sobre el caudal máximo del río.

H.1.4. Sensibilidad a la condición inicial en lago Rico

Como se mencionara en el cuerpo principal, el evento maximizado en la crecida de verificación escenario 2 es el evento de 2018. Este evento presentó una cota máxima de 191 m en lago Rico, el 10 de marzo de 2018, luego de 8,3 meses de cierre del GPM. Si se considera que no se hubiese producido rotura en dicho momento, al 01/05 los niveles del lago Rico hubieran alcanzado un valor del orden de 193 m IGN. Para la condición de inicio de la simulación hidrológica matemática que brinda las condiciones para la CMP, el 01/05, se adoptó una cota en lago Rico de 195 m, y se asume que se tendría una rotura del GPM en marzo del año siguiente coincidente con caudales máximos en La Leona para 10.000 años de recurrencia y condiciones de precipitaciones y temperaturas maximizadas, luego de más de 20 meses de cierre del GPM.

Se realizaron corridas del modelo adoptando diferentes niveles iniciales del lago Rico al inicio de las simulaciones (Tabla H.3). En cada simulación se modifican entonces los niveles del lago Rico al momento de la rotura, los desbordes posibles desde el lago Rico al lago Argentino por el extremo noreste del lago Rico, variando también los niveles máximos que se alcanzan en el lago Argentino y consecuencia de todo ello se modifican en cada caso los hidrogramas de rotura.

La simulación 1 ($N_{LRi} = 192, 5$) representa un caso donde prácticamente no existirían desbordes y la rotura se produce al llegar a la condición a partir de la cual éstos ocurrirían.

La simulación base adoptada, relacionando con casos observados, puede asimilarse al caso hipotético donde no se hubiera producido la rotura del GPM de marzo/18 y durante el siguiente ciclo se dieran las condiciones de temperaturas y precipitaciones maximizadas para producir la

Simulación	Cota inicial simulación LR (01/05) [mIGN]	Cota LR (*) [mIGN]	Fecha inicio desborde	Q_{dbb} máximo [m ³ /s]	Q_{dbb} (*) [m ³ /s]	Cota máxima LA [mIGN]	Q_{max} rotura [m ³ /s]	Q_{max} CHF [m ³ /s]	Dif. [%]
CMP con $N_{LR} = 192.5$	192.5	208,0	5-Mar	2	2	182,5	27.220	4.853	- 4,1
CMP	195	209,6	25-Feb	220	200	182,5	29.190	5.060	-
CMP con $N_{LR} = 197.5$	197.5	210,3	15-Feb	440	410	182,7	29.860	5.220	+ 3,2

(*) al momento de inicio rotura

Tabla H.3: Resultados simulaciones variando niveles iniciales en lago Rico.

CMP considerada (produciéndose la rotura en marzo siguiente, luego de 20 meses de cierre). En esta simulación base los niveles en lago Rico alcanzarían una cota de 209,5 m.

En la Figura H.4 se muestran los hidrogramas en CHF considerando variaciones en condiciones iniciales de lago Rico.

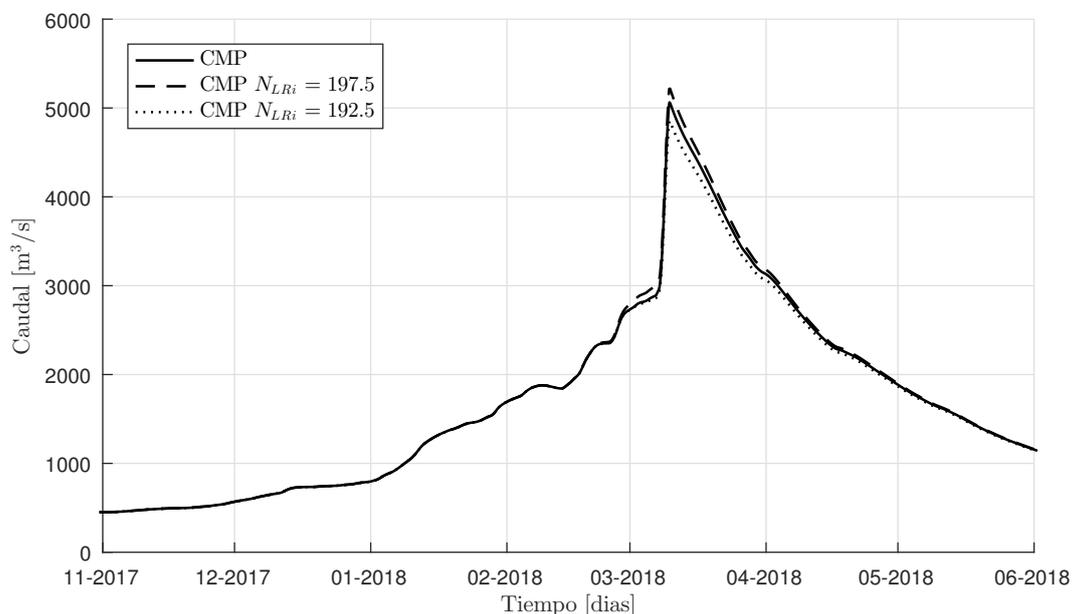


Figura H.4: Hidrogramas en CHF considerando variaciones en condiciones iniciales de lago Rico.

H.1.5. Sensibilidad a la forma del hidrograma de rotura y a las variaciones de las curvas cota - volumen

En el punto 8.4 del cuerpo principal se realizó un análisis de sensibilidad del modelo, en particular asociado a:

- La forma del hidrograma de rotura.
- La duración del desembalse (D) utilizada para escalar la curva de variación de niveles del lago Rico durante el desembalse.
- Variaciones en las curvas cota – volumen del lago Rico y del lago Argentino.
- Variaciones en cota de lago Argentino.

En base a los resultados, se concluye que tanto la forma del hidrograma de rotura como la duración del desembalse no impactan significativamente en el hidrograma de crecida del río Santa Cruz, teniendo en cuenta que las diferencias en caudal máximo resultante son menores que el 1 %.

En cuanto a la sensibilidad del modelo de embalse a la variación de las curvas cota - volumen del lago Rico y del lago Argentino, se pudo observar que en la situación más desfavorable de modificación de estas curvas, el caudal pico del hidrograma de crecida en el río Santa Cruz podría aumentar un 2,9 %.

Si se analizan los resultados de la sensibilidad del modelo de embalse al nivel del lago Argentino al momento de la rotura, se observa que al aumentar este nivel, se reduce el hidrograma de rotura, debido a la disminución del desnivel del lago Rico considerado para su determinación. Sin embargo, los hidrogramas de crecida en el río Santa Cruz aumentan con el aumento del nivel en lago Argentino. Para el caso de variar el nivel en lago Argentino de 181,6 m (correspondiente al caudal decamilenario del río Santa Cruz sin considerar los aportes de los eventos de rotura) a una cota de 182,0 m, (correspondiente al límite superior del intervalo de confianza del 90 % de la estimación probabilística del caudal decamilenario previamente mencionado), se tiene un incremento en el caudal máximo del río Santa Cruz en CHF de un 6 %.

Notar que la estimación de la crecida del escenario 2 considerada CMP adopta una cota máxima de 182,5 m en lago Argentino.

H.1.6. Resumen análisis de sensibilidad

En la siguiente Tabla H.4 se resumen los análisis de sensibilidad realizados.

Elemento considerado	Variación Caudal máximo en el río Santa Cruz en CHF
1- Variaciones hidrograma 10.000 años en La Leona - incertidumbre 15%	4 %
2- Variaciones en precipitaciones máximas período enero – abril (15 %)	8 %
3- Incremento de temperaturas (25 %)	7 %
4- Variaciones en nivel inicial lago Rico	3 – 4 %
5- Variaciones forma del hidrograma de rotura	< 1 %
6- Duración del desembalse (2, 2.5 y 3 días)	1 %
7- Variación de las curvas cota - volumen (- 1.4 % LA, + 3.8 % LR)	3 %

Tabla H.4: Resumen de los análisis de sensibilidad realizados.

H.2. Comparación de CMP con formulaciones generales

En la literatura la estimación de caudales máximos de diseño y/o verificación para grandes obras hidráulicas es materia de frecuente discusión, siendo común encontrar comparaciones entre cau-

dales máximos de diferentes cuencas en el mundo con índices obtenidos de relaciones empíricas, como las obtenidos a través de la expresión de Creager o la de Francou-Rodier.

La expresión de Creager vincula el caudal máximo que se genera en una cuenca con su respectiva área. El denominado “coeficiente Creager” corresponde al valor C de la siguiente fórmula:

$$Q_{max} = C 1,303 \left(\frac{A}{2,588} \right)^{\frac{0,936}{A^{0,048}}} \quad (H.1)$$

Siendo Q_{max} el caudal máximo en m³/s y A el área de la cuenca (km²).

En un trabajo presentado en British Dam Society, Londres, Octubre 2003, por J. Hinks, J. Lewin y A. Warren (Hinks et al., 2003), se estudia tanto este coeficiente como el de Francou-Rodier, como una forma de evaluar las descargas extremas, indicándose que para cualquier cuenca particular en el mundo, C es normalmente consistente para la CMP o para un determinado período de retorno, citándose como ejemplo valores del coeficiente C obtenidos para la CMP en Gales (con C variable entre 36 a 45), aunque se menciona que existen casos puntuales donde debido a la baja pendiente de la cuenca o menor pluviometría, pueden obtenerse valores menores (por ej. para el reservorio Blithfield en Staffordshire $C = 16$). Se indica que en Europa este valor C se encuentra usualmente en el rango de 30 – 100 para la CMP, aunque en climas áridos (República Kirguisa), los valores pueden ser tan bajos como 1 a 3. En el otro extremo, en el Caribe, donde debe tenerse en cuenta la presencia de huracanes, los valores se ubican típicamente entre 100 y 250.

Obviamente las menciones anteriores resultan de la combinación de las características físicas y climáticas de las cuencas aportantes que se presentan en cada región, debiendo las comparaciones ser cuidadosas al realizarlas respecto a la cuenca superior del río Santa Cruz, atendiendo sus particularidades.

Se presenta a continuación una figura comparativa del coeficiente C de Creager para presas argentinas que tienen componente nival (Figura H.5). Se indica a continuación la fuente de información a partir de la cual ha sido posible obtener dicho coeficiente: Agua del Toro (Mendoza) según GM&A (2009), Portezuelo del Viento (Río Grande - Mendoza) según ficha técnica, Alicurá (río Limay - Neuquén) según INA (2002), Casa de Piedra – Buta Ranquil (río Colorado) según CDPCP (1976), Río Neuquén (1) según BC Hydro (1999), Río Neuquén (2) según Quick (2008), Piedra del Águila (río Limay – Neuquén) según INA (2002), Néstor Kirchner según UNLP (2021).

Los valores más bajos de este coeficiente se tienen dentro de la cuenca del río Colorado (CP, BR, PV) y los mayores valores para las cuencas de los ríos Limay (PA) y Neuquén (NQN), justificándose ello por la mayor pluviosidad de éstas últimas. Dentro de la cuenca del río Limay, la presa de Alicurá presenta el menor valor justificándose ello por su ubicación aguas abajo de un importante sistema lacustre donde el principal lago es el Nahuel Huapi (560 km²).

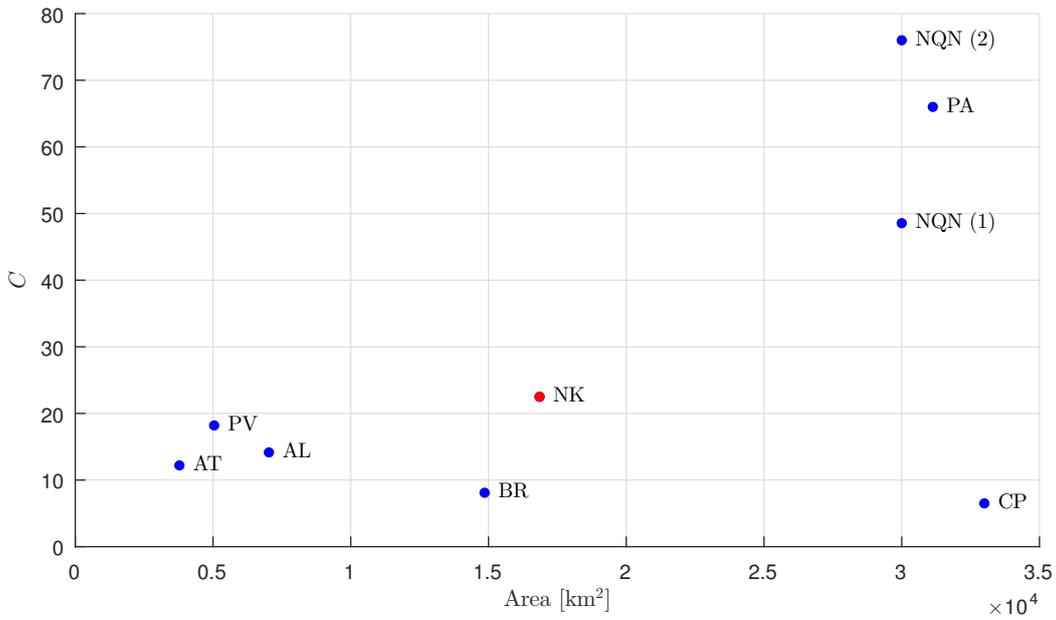


Figura H.5: Coeficiente Creager para CMP

En forma un poca más clara se visualiza el coeficiente de Francou-Rodier (valor k en la fórmula):

$$\frac{Q_{max}}{10^6} = \left(\frac{A}{10^8} \right)^{1-0,1 k} \quad (H.2)$$

$$k = \frac{\log A - \log Q_{max} - 2}{0,1 \log A - 0,8} \quad (H.3)$$

Donde Q_{max} es el caudal máximo en m³/sec y A es el área de la cuenca en km²

Resultan nuevamente los menores valores para la cuenca del río Colorado y los mayores en las cuencas Limay – Neuquén. El coeficiente obtenido en NK resulta un valor intermedio (Figura H.6).

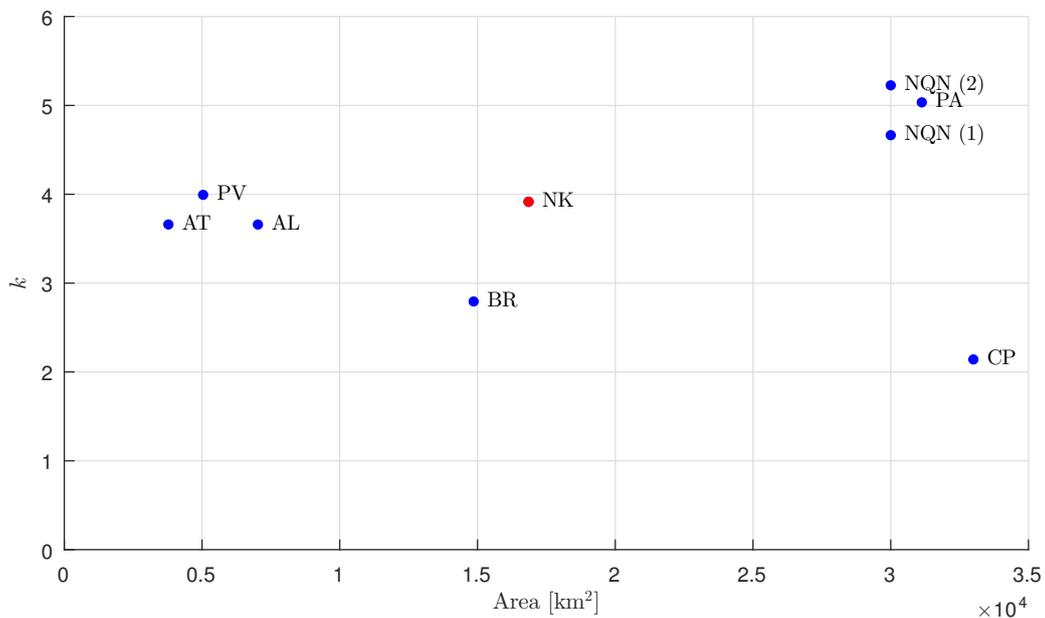


Figura H.6: Coeficiente k Francou – Rodier para CMP

En el contexto mencionado, los índices C o k obtenidos para NK resultan razonables, teniendo en cuenta que son mayores que otras cuencas de fuerte componente nival y menores a las cuencas cordilleranas con fuerte componente pluvial. Dentro del análisis debe tenerse en cuenta el efecto del fenómeno de desembalses rápidos ocasionados por el cierre del Glaciar Perito Moreno que ocasiona crecidas relativamente abruptas en el río Santa Cruz, así como la presencia de grandes lagos en la cuenca. De no existir este fenómeno de rotura del GPM, el coeficiente C sería cercano a 10 y el k próximo a 3.

Dentro de este tópico es interesante mencionar lo indicado por el Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) en sus *Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages - Guidelines for dam spillway design* (CFBR, 2013).

Dicha guía, en los criterios de diseño de crecidas indica, para situaciones extremas, estimar el caudal con un período de retorno de 100.000 años, el cual se obtiene aproximadamente incrementando un 30 % el caudal de 10.000 años.

Para nuestro caso, si al Q_{10000} de 3.803 m³/s se le aplica un coeficiente de 1,3 se tiene un valor de 4.940 m³/s, el cual es ligeramente menor a la CMP estimada y mayor al Q_{100000} que se obtendría por métodos estadísticos directos ($Q_{100000} = 4.425$ m³/s según Gumbel MPP).

Dentro del capítulo “5. Topics for research and development. 5.2 Taking into account uncertainties when choosing the reference hydrological hazard” la guía menciona que la selección habitual es admitir primero un riesgo de falla y luego obtener la “mejor estimación” del valor correspondiente para ese riesgo (probabilidad anual de ser superado) con información de las incertidumbres asociadas (análisis clásico estimación QT), lo cual siempre implica la aceptación de un riesgo residual. Para evitar esta aceptación de un riesgo residual, un primer enfoque consiste en utilizar la CMP, la cual se indica como una maximización con alto grado de subjetividad relacionada por ej. con parámetros de cuenca adoptados. Considerando que la CMP resulta de decisiones/elecciones que no están claramente expresadas, y a su vez la falta de estandarización del método PMP / CMP, indica “ello ha impedido que el método se utilice en Francia”.

Un segundo enfoque consiste en combinar el peligro de referencia y su incertidumbre asociada sobre una base fija, por ejemplo, sobre el límite superior del intervalo de confianza (al 70, 90, 95 %) de la crecida de referencia (recurrencia 10.000 años por ej.). Este enfoque es también subjetivo en la elección del intervalo de confianza.

Un tercer enfoque consiste en utilizar distribuciones predictivas, integrando las incertidumbres, en vez de usar la distribución central, encontrándose en desarrollo aplicaciones hidrológicas para mostrar las ventajas de la aplicabilidad de esta distribución predictiva, lo cual puede resultar de interés al momento de actualizar estimaciones a futuro.

H.3. Referencias bibliográficas

BC Hydro. (1999). Determinación de la Crecida Máxima Probable para la cuenca del río Neuquén. BC Hydro International Ltd.

CDPCP. (1976). Aprovechamiento Hidráulico del Río Colorado. Dique "Casa de Piedra". Estudio hidrológico. Comité Director del Proyecto Casa de Piedra.

CFBR. (2013). Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages [Recommendations for dams' spillway design]. Comité Français des Barrages et Réservoirs.

GM&A. (2009). Revisión del Estudio Hidrológico de la cuenca media del Río Diamante. Informe Final. HIDISA.

Hinks, J. L., Lewin, J., & Warren, A. L. (2003). Extreme events and reservoir safety. *Dams and Reservoirs*, 13(3), 12-19.

INA. (2002). Estudio de Crecida Máxima Probable para el Río Limay. Instituto Nacional del Agua.

Quick, M. C., Losano, F., Martin, A. (2008). Revisión de la estimación de la crecida máxima probable (CMP) del Río Neuquén, Argentina.

UNLP (2021). Crecidas de diseño del río Santa Cruz. Universidad Nacional de La Plata