



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**APLICABILIDAD DEL PRONOSTICO METEOROLÓGICO DINÁMICO DEL MODELO
WRF-SMN EN CRECIDAS HIDROLÓGICAS EN LA REGIÓN DEL MAULE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIEGO ALONSO FLORES FARÍAS

PROFESOR GUÍA:
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA
LINA CASTRO HEREDIA

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: DIEGO ALONSO FLORES FARÍAS
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

APLICABILIDAD DEL PRONOSTICO METEOROLÓGICO DINÁMICO DEL MODELO WRF-SMN EN CRECIDAS HIDROLÓGICAS EN LA REGIÓN DEL MAULE

Durante el año 2023, la zona centro-sur de Chile se vió fuertemente afectada ante las crecidas hidrológicas causadas por un aumento en los eventos de precipitación en comparación a los últimos años. En la región del Maule, las precipitaciones superaron los 100 [mm] diarios y los caudales los 2000 [m^3/s], obligando a evacuar a la población cercana. Esta situación origina la importancia de pronosticar eventos de crecida para prevenir riesgos hidrometeorológicos, un campo poco desarrollado en Chile.

El presente trabajo evalúa los productos horarios de precipitación y temperatura del modelo climático de acceso libre desarrollado por el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, "WRF-SMN", durante el periodo invernal de 2022 y 2023 en la región del Maule en Chile, con tal de analizar su aplicabilidad en el pronóstico de crecidas hidrológicas, mediante el modelo hidrológico concentrado GR4H+CemaNeige. Específicamente, la evaluación se enfocó en tres subcuencas hidrográficas de la región: Achibueno en la Recova, Longaví en la Quiriquina y Perquilauquén en San Manuel. Se realizaron análisis hidrológicos y se compararon los productos con los datos históricos, calculando coeficientes de desempeño como Bias, RMSE, correlación de Pearson para las forzantes meteorológicas y NSE, pBias, KGE y RMSE para los pronósticos de caudales.

Los resultados indicaron un sesgo cercano a 2 [mm/hr] para la precipitación y de aproximadamente -1 [°C] para la temperatura, con una mayor diferencia a altitudes mayores a los 400 [m s.n.m.], alcanzando valores de RMSE de hasta 6 [mm] y 6 [°C]. A escala diaria se observan resultados similares, donde a partir de los 400 [m s.n.m.] se detectan errores de mayor magnitud, alcanzando valores máximos de 150 [mm]. En la evaluación de caudales, los productos de referencia tienden a subestimar las observaciones, sin embargo al introducir los pronósticos meteorológicos de WRF-SMN, los caudales pronosticados se aproximan a los valores observados, logrando un RMSE promedio de 0,5 [mm/hr] para las tres cuencas. A pesar de esto, el coeficiente NSE indica resultados mixtos, ya que aproximadamente solo un 18 % de las modelaciones presentaron un valor positivo, no obstante este porcentaje corresponde a las grandes crecidas registradas en 2023, siendo los eventos más relevantes del trabajo.

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a mi profesor guía Miguel Lagos, por su asesoría, confianza y apoyo a lo largo del desarrollo de mi trabajo de título. Su dedicación y entusiasmo en el campo de la hidrología ha sido una inspiración que reafirmó mi elección de mi carrera. Agradezco además, a los profesores Pablo Mendoza y Lina Castro por su retroalimentación y por ser parte de la comisión evaluadora.

Quiero agradecer a mis amigos y compañeros, con quienes compartí momentos de alegría, tristeza y estrés durante mi etapa universitaria, por las risas y el apoyo brindado en los diversos trabajos. En especial, agradecer a mis panitas civiles por los momentos compartidos.

Por último, deseo expresar mi gratitud a mi familia. A mi madre Eliana y mi padre Francisco por su crianza, apoyo y enseñanzas a lo largo de mi vida. A mi hermana Natalia por su cariño y mi abuela Alicia (q.e.p.d.) por ser parte importante de mi formación como persona.

Tabla de Contenido

1. Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Alcance del estudio	2
2. Capítulo 2: Antecedentes	3
2.1. Medidas de prevención de crecidas	3
2.2. Modelos numéricos del tiempo	4
2.2.1. Pronóstico del tiempo WRF-SMN	5
2.3. Modelación hidrológica	7
2.3.1. Modelo GR4H	8
2.3.2. CemaNeige	11
3. Capítulo 3: Zona de estudio	14
3.1. Caracterización de la zona de estudio	14
3.2. Disponibilidad de datos meteorológicos y tormentas a estudiar	16
3.3. Análisis hidrológico	18
4. Capítulo 4: Metodología	23
4.1. Recopilación y pre-proceso de datos	24
4.1.1. Datos observados	24
4.1.2. Datos de pronósticos	24
4.2. Evaluación del pronóstico meteorológico WRF-SMN	25
4.3. Producto observacional de referencia ERA-5	26
4.4. Modelación hidrológica	27
4.4.1. Calibración y evaluación	28
4.4.2. Generación de pronósticos de caudales con datos WRF-SMN	29
5. Capítulo 5: Resultados	31
5.1. Evaluación de forzantes meteorológicas	31
5.2. Producto observacional de referencia ERA-5	37
5.3. Modelación de caudales	39
5.3.1. Calibración y evaluación	39
5.3.2. Modelación de pronósticos con WRF-SMN	42
6. Capítulo 6: Discusión	46
6.1. Evaluación de pronósticos WRF-SMN	46
6.2. Producto observacional de referencia ERA-5	47

6.3. Pronósticos hidrológicos	47
7. Capítulo 7: Conclusiones	49
Bibliografía	50
Anexos	54
1. Anexo A: Análisis de frecuencia	54
2. Anexo B: Evaluación cuantitativa datos WRF-SMN	56
3. Anexo C: Corrección de datos ERA-5	60
4. Anexo D: Calibración y Evaluación del modelo GR4H+CemaNeige	66
5. Anexo E: Modelación de caudales con datos WRF-SMN	71

Índice de Tablas

2.1.	Características del modelo WRF-SMN. Extraído de García Skabar et al. (2018) y documentación de SMN (2024).	6
2.2.	VARIABLES PRESENTES EN LOS ARCHIVOS DE SMN, extracto de la documentación de SMN (2024). 01H, 10M y 24H, corresponden a los pronósticos con frecuencia de 1 hora, 10 minutos y 24 horas, respectivamente. En el estudio se utilizan PP y T2 01H.	6
2.3.	Parámetros del modelo GR4H+CemaNeige	13
3.1.	Características cuencas de estudio. Información obtenida de plataforma CAMELS-CL (Alvarez-Garreton et al., 2018).	15
3.2.	Estaciones meteorológicas obtenidas de la base de datos de Agrometeorología para la evaluación métrica de la temperatura a escala diaria.	16
3.3.	Estaciones meteorológicas de la DGA utilizadas para la evaluación métrica para precipitación y temperatura a escala horaria y diaria	17
3.4.	Cantidad de días por mes	17
3.5.	Días de precipitación a utilizar para la evaluación métrica	18
3.6.	Periodos de retorno para los máximos eventos del año 2023, en base a los análisis de frecuencia de los máximos diarios anuales entre los años 1979 y 2019.	20
4.1.	Porcentaje de área de cada cuenca por píxeles de ERA-5	27
4.2.	Periodos de calibración y evaluación por alternativa	28
5.1.	Parámetros del modelo GR4H para la alternativa P4 por cuenca	42
5.2.	Estadísticos calculados para subconjunto de NSE>0, para cada cuenca entre observaciones y WRF-SMN	44
1.1.	Periodos de retorno de precipitación para los días anteriores de los máximos eventos del 2023	55
2.1.	Evaluación métrica coef. Bias para Precipitación en escala horaria en 2022 y 2023	56
2.2.	Evaluación métrica coef. RMSE para Precipitación en escala horaria en 2022 y 2023	56
2.3.	Evaluación métrica correlación de Pearson para Precipitación en escala horaria en 2022 y 2023	56
2.4.	Evaluación métrica coef. Bias para Temperatura en escala horaria en 2022 y 2023	57
2.5.	Evaluación métrica coef. RMSE para Temperatura en escala horaria en 2022 y 2023	57
2.6.	Evaluación métrica correlación de Pearson para Temperatura en escala horaria en 2022 y 2023	57
2.7.	Evaluación métrica error promedio para Precipitación en escala diaria en 2022 y 2023	58
2.8.	Evaluación métrica error promedio para Temperatura en escala diaria en 2022 y 2023	58
2.9.	Evaluación métrica error absoluto promedio para Precipitación en escala diaria en 2022 y 2023	59
2.10.	Evaluación métrica error absoluto promedio para Temperatura en escala diaria en 2022 y 2023	59

3.1.	Estaciones utilizadas para corregir los píxeles de ERA-5 en la cuenca de Achibueno en la Recova	61
3.2.	Estaciones utilizadas para corregir los píxeles de ERA-5 en la cuenca de Longaví en la Quiriquina	61
3.3.	Estaciones utilizadas para corregir los píxeles de ERA-5 en la cuenca de Perquilauquen en San Manuel	62
3.4.	Precipitación anual ERA-5, Achibueno en la Recova	63
3.5.	Temperatura anual ERA-5, Achibueno en la Recova	63
3.6.	Precipitación anual ERA-5, Longaví en la Quiriquina	64
3.7.	Temperatura anual ERA-5, Longaví en la Quiriquina	64
3.8.	Precipitación anual ERA-5, Perquilauquen en San Manuel	65
3.9.	Temperatura anual ERA-5, Perquilauquen en San Manuel	65
4.1.	Coeficientes de la curva de duracion Achibueno en la Recova	67
4.2.	Coeficientes de la curva de duracion Longavi en la Quiriquina	68
4.3.	Coeficientes de la curva de duracion Perquilauquen en San Manuel	68
4.4.	Coeficientes del ciclo anual de Achibueno en la Recova	69
4.5.	Coeficientes del ciclo anual de Longavi en la Quiriquina	70
4.6.	Coeficientes del ciclo anual de Perquilauquen en San Manuel	70
5.1.	Caudales bases promedio por mes y cuenca	71
5.2.	Evaluación métrica NSE entre observaciones y WRF-SMN	72
5.3.	Evaluación métrica pBias entre observaciones y WRF-SMN	73
5.4.	Evaluación métrica RMSE entre observaciones y WRF-SMN	73
5.5.	Evaluación métrica R^2 entre observaciones y WRF-SMN	73
5.6.	Evaluación métrica NSE entre ERA-5 y WRF-SMN	73
5.7.	Evaluación métrica pBias entre ERA-5 y WRF-SMN	74
5.8.	Evaluación métrica RMSE entre ERA-5 y WRF-SMN	74
5.9.	Evaluación métrica R^2 entre ERA-5 y WRF-SMN	74

Índice de Figuras

2.1.	Rastreo de la crecida acontecida en junio de 2023 y mitigación empleada por embalse Colbun. Extracto de Colbun (2023)	3
2.2.	Dominio WRF-Arg en proyección Conforme de Lambert (con centro -35° lat y -65° lon) delimitado por contorno rojo. Extracto de la documentación de SMN (2024).	7
2.3.	Diagrama del modelo precipitación-escorrentía GR4J, extracto de Perrin et al. (2003)	9
2.4.	Diagrama del modelo Cemaneige, extracto de Valéry et al. (2014)	12
3.1.	Cartografía de la zona de estudio. Elaboración propia mediante software QGIS.org (2024)	14
3.2.	Mapa de elevación de las cuencas. Elaboración propia con modelos de elevación Alos Palsar de Infraestructura de Datos Geospaciales Chile (2016), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de JPL (2013) y software QGIS.	15
3.3.	Curvas hipsométricas de las cuencas de estudio. Elaboración con QGIS y Excel.	16
3.4.	Curvas de variación estacional de las cuencas hidrológicas escogidas	19
3.5.	Línea de nieves con referencia Latitud $35,06^{\circ}$ S y 6 estaciones meteorológicas. Boxplots en azul representan los resultados de las observaciones horarias y líneas continuas representan las altitudes asociadas a probabilidades de excedencia.	21
3.5.	(Cont.) Línea de nieves con referencia Latitud $35,06^{\circ}$ S y 6 estaciones meteorológicas. Boxplots en azul representan las altitudes de las observaciones horarias y líneas continuas representan las altitudes asociadas a probabilidades de excedencia.	22
4.1.	Esquema de la metodología del trabajo	23
4.2.	Disposición de las grillas sobre las cuencas	28
4.3.	Esquema de los resultados de la modelación en base a un pronóstico WRF-SMN.	30
5.1.	Distribución de coeficientes de desempeño para la precipitación por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico WRF-SMN. Cada boxplot representa los N pronósticos horarios en cada estación.	31
5.1.	(Cont.) Distribución de coeficientes de desempeño para la precipitación por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Cada boxplot representa los N pronósticos horarios en cada estación.	32
5.2.	Distribución de coeficientes de desempeño para la temperatura a dos metros por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Cada boxplot representa los N pronósticos horarios en cada estación.	33
5.2.	(Cont.) Distribución de coeficientes de desempeño para la temperatura a dos metros por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Cada boxplot representa los N pronósticos horarios en cada estación.	34
5.3.	Distribución de Errores diarios Pp. por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Boxplot representan N pronósticos horarios en cada estación.	34
5.3.	(Cont.) Distribución de Errores diarios Pp. por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Boxplots representan N pronósticos horarios en cada estación.	35

5.4.	Distribución de Errores diarios temperatura por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Boxplots representan N pronósticos horarios en cada estación.	35
5.4.	(Cont.) Distribución de Errores diarios temperatura por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Boxplots representan N pronósticos horarios en cada estación.	36
5.5.	Error por Hora de Adelanto de los pronóstico para tres estaciones meteorológicas. El área interior representa los cuantiles 25 y 75, y el área exterior representa los máximos y mínimos de los errores.	36
5.5.	(Cont.) Error por Hora de Adelanto de los pronóstico para tres estaciones meteorológicas. El área interior representa los cuantiles 25 y 75, y el área exterior representa los máximos y mínimos de los errores.	37
5.6.	Evaluación de datos ERA-5 brutos	37
5.7.	Corrección de Precipitación para el periodo de 2012-2023	38
5.8.	Corrección de Temperatura para el periodo de 2012-2023	39
5.9.	Índices de eficiencia por cuenca y por Periodo/Alternativa para calibración y evaluación resultantes del modelo GR4H+CemaNeige.	40
5.10.	Puntaje óptimo para cada coeficiente y cuenca, con 0 el óptimo	40
5.11.	Serie modelada de Calibración y Evaluación de alternativa P4 para Achibueno en la Recova. Se presenta desde el año hidrológico 2022-2023 y 2015 respectivamente	41
5.12.	Caudales pronosticados en rojo con WRF-SMN por mes, línea azul punteada representa el caudal observado.	42
5.12.	(Cont.) Caudales pronosticados en rojo con WRF-SMN por mes, línea azul punteada representa el caudal observado.	43
5.13.	Coefficientes de desempeño por año para los caudales de las tres cuencas. AR representa la cuenca de Achibueno en la Recova, LQ es Longaví en la Quiriquina y PSM es Perquilauquen en San Manuel.	44
5.14.	Modelación de pronósticos para las mayores tormentas de cada año en Achibueno en la Revoca. Línea azul representa las observaciones y la negra el caudal utilizando solo el producto de ERA-5.	45
5.15.	Error por Hora de Adelanto para las tres estaciones fluviométricas. Área sombreada representa cuantiles 25 y 75, línea punteada azul es el error promedio entre las observaciones y la modelación ERA-5 entre 2013 y 2023, la línea roja es el error promedio entre 2020 y 2023.	45
1.1.	Análisis de frecuencia Pp. diaria máx. anual para estaciones meteorológicas arbitrarias. Confección realizada por medio de Excel elaborado por Gabriel Castro (nd)	54
1.2.	Análisis de frecuencia Caudal medio diario máx. anual para estaciones fluviométricas. Confección realizada por medio de Excel elaborado por Gabriel Castro (nd)	55
3.1.	Mapas de ponderaciones de estaciones sobre píxeles del producto grillado ERA-5. Los puntos 'Pixel' representan el centroide de este y no su tamaño.	60
3.1.	(Cont.) Mapas de ponderaciones de estaciones sobre píxeles del producto grillado ERA-5. Los puntos 'Pixel' representan el centroide de este y no su tamaño.	61
3.2.	Factores de corrección aplicados para corregir los datos de ERA-5	62
4.1.	Serie completa modelada para Calibración y Evaluación por cuenca.	66

4.2.	Curvas de duración de periodos de calibración y evaluación para Achibueno en la Recova .	67
4.3.	Curvas de duración de periodos de calibración y evaluación para Longaví en la Quiriquina	67
4.4.	Curvas de duración de periodos de calibración y evaluación para Perquilauquen en San Manuel	68
4.5.	Ciclo anual de periodos de calibración y evaluación para Achibueno en la Recova	69
4.6.	Ciclo anual de periodos de calibración y evaluación para Longaví en la Quiriquina	69
4.7.	Ciclo anual de periodos de calibración y evaluación para Perquilauquen en San Manuel . .	70
5.1.	Caudales modelados con WRF-SMN por mes, linea azul punteada representa el caudal observado.	72
5.2.	Modelación para las mayores tormentas de cada año en Longaví en la Quiriquina y Perquilauquen en San Manuel.	75
5.3.	Error por Hora de Adelanto para las tres estaciones fluviométricas, valores máx. y mín. . .	75

Capítulo 1: Introducción

1.1. Introducción

En la última década, la zona central de Chile ha enfrentado una grave escasez hídrica provocada principalmente por sequía (Espinoza Calderón, 2022). Esta situación ha tenido un impacto en los cuerpos de agua, sus alrededores y por ende, en la población, teniendo que adaptarse a un clima más árido u haciendo uso de zonas anteriormente susceptibles a inundaciones. No obstante, los eventos de crecida de escorrentía siguen ocurriendo, por lo que actualmente los riesgos asociados pueden ser mayores; como fue evidenciado durante el invierno del año 2023, donde la zona centro-sur fue gravemente impactada por inundaciones generados por caudales que superaron los 2.000 [m^3/s], que obligaron a evacuar a más de diez mil personas (Riquelme et al., 2023).

Para mitigar los riesgos asociados a los eventos de crecidas, se pueden implementar diversas medidas, clasificadas como estructurales y no estructurales. Las estructurales incluyen obras de infraestructuras como presas o canales, mientras en las no estructurales se destacan los sistemas de alerta temprana (SAT) (García, 2007). Los SAT permiten estimar la evolución de los caudales mediante modelos que pronostican variables como precipitación, temperatura y caudal. Gracias estas estrategias, es posible reducir los riesgos asociados por medio de la evacuación de la población o la regulación de crecidas mediante el uso de embalses. Un ejemplo reciente de sistema de alerta, es el desarrollado por Najafi et al. (2024) para inundaciones, que mediante observaciones y un modelo numérico del tiempo, evaluó su efectividad en el valle de Ahr en Alemania; este sistema demostró excelentes resultados, logrando predecir el 100% de las grandes crecidas de caudales asociadas a inundaciones con 7 horas de antelación.

En nuestro país, la predicción de crecidas aún no está tan desarrollada. A pesar de esto se han logrado algunos avances en los sistema de alerta en el corto plazo, como es la alerta hídrica (CORFO, 2024), sin embargo esta se encuentra limitada a ciertas regiones y estaciones fluviométricas. A nivel nacional, los pronósticos meteorológicos son realizada por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), que utiliza el modelo WRF-DMC, cuyos datos históricos no se encuentran directamente disponibles para uso público (DMC, 2024). Weather Reaserch and Forecasting (WRF) es un modelo dinámico (Skamarock et al., 2008), que resuelve las distintas ecuaciones de conservación de momentum, masa y energía para simular diversas variables de estado de la atmósfera y la superficie.

Dado los reciente cambios en la climatología nacional, la escasez de información proveniente de observaciones y el bajo desarrollo en la predicción de crecidas de escorrentía, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la aplicabilidad de un modelo meteorológico en la modelación de caudales en el corto plazo. En particular, se evalua y verifica el modelo utilizado por el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN), WRF-SMN de acceso libre (SMN, 2024), que proporciona variables como la precipitación y la temperatura. Se realizan comparaciones estadísticas con observaciones en superficie de eventos

conocidos en la región del Maule, y posteriormente se aplica un modelo hidrológico simple, en este caso el GR4H + CemaNeige, verificando la aplicabilidad del modelo en base a estos últimos resultados.

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta memoria es analizar la viabilidad de la aplicación de los productos del modelo meteorológicos WRF-SMN del servicio meteorológico argentino, en el pronóstico de crecidas hidrológicas en cuencas de la región del Maule en régimen cercano al natural.

Para dar cumplimiento al objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar sesgos y el desempeño del modelo WRF-SMN en eventos históricos de precipitación en la región del Maule en Chile.
- Forzar y analizar la respuesta hidrológica de las cuencas utilizando un modelo hidrológico, mediante un enfoque de pronóstico dinámico.
- Evaluar el desempeño de la modelación de crecidas hidrológicas en un modelo simple, integrando los pronósticos meteorológicos de WRF-SMN dentro del modelo hidrológico.

1.3. Alcance del estudio

El alcance de este trabajo se centra en el postproceso de los productos del modelo WRF del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, aplicado al pronóstico de crecidas hidrológicas en las cuencas de Perquilauquen, Longaví y Achibueno en la región del Maule entre los años 2022 y 2023. Se utilizan los datos horarios de forzantes meteorológicas de precipitación y temperatura a un horizonte límite de 48 horas en cada pronóstico. Adicionalmente, se utiliza el producto grillado de reanálisis ERA-5 a escala horaria, como datos de entrada para la modelación de caudales en fechas precedentes a cada pronóstico. Se utiliza el modelo GR4H+CemaNeige a escala espacial de cuenca, por lo tanto no se representa de forma desagregada las variables provenientes de los productos de WRF-SMN y ERA-5.

Capítulo 2: Antecedentes

En este capítulo se presentan los antecedentes relevantes del trabajo realizado, definiendo los principales conceptos de la prevención de riesgos y pronósticos de crecidas. Además, se definen los modelos numéricos del tiempo e hidrológicos, enfocándose en aquellos utilizados en el estudio.

2.1. Medidas de prevención de crecidas

Las crecidas hidrológicas están asociadas a los denominados "Riesgos Hidrometeorológicos", estos corresponden a fenómenos naturales que generan transporte de materiales con el agua como principal componente, siendo capaces de modificar el paisaje y poner en peligro áreas habitadas (Wu et al., 2016). Chile es vulnerable ante estos riesgos, su relativa angostura de oeste a este, junto con las cordilleras de los Andes y la Costa, lo expone a grandes precipitaciones de origen orográfico, al igual que convectivas, en especial en la zona centro-sur del país (Garreaud, 2009).

Existen diversas maneras de mitigar los desastres causados por crecidas hidrológicas, tales como la intervención de cauces, la evasión de actividades en zonas de inundación y el manejo de cuencas. Estas medidas se pueden clasificar en estructurales y no estructurales, las estructurales consisten en la construcción de obras de formación y propagación de caudales, como los embalses, obra fundamental para reducir los caudales máximos al almacenar y mitigar estos (García, 2007). Un ejemplo es el embalse Colbun en la región del Maule, que durante las crecidas de junio de 2023 logró contener el aumento de caudal, que aumentó de 250 $[m^3/s]$ hasta 6.000 $[m^3/s]$, llenándose hasta un 98% de su capacidad (Colbun, 2023) (en la Figura 2.1 se muestra el rastreo de la crecida y su mitigación). Sin embargo, la construcción de embalses implica un alto costo monetario, limitándolos a sectores estratégicos. Por esta razón, se pueden utilizar otras obras, como canales que desvíen y controlen el caudal, mitigando el riesgo.

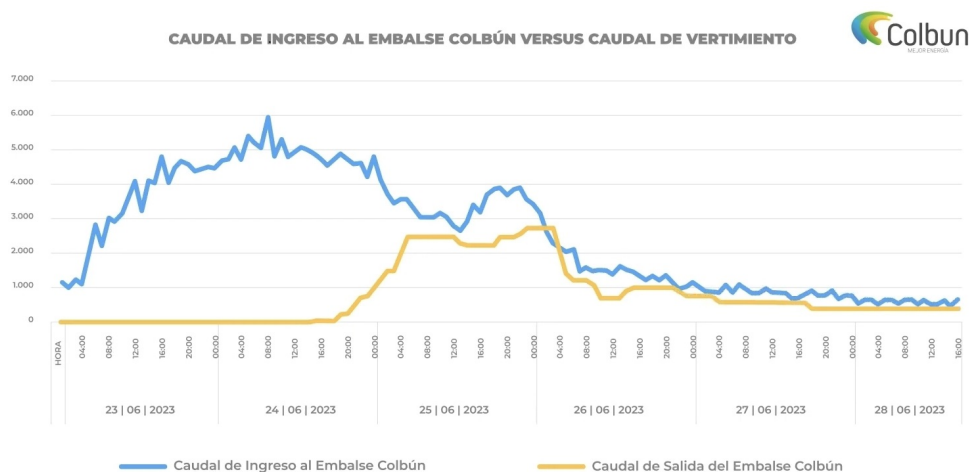


Figura 2.1: Rastreo de la crecida acontecida en junio de 2023 y mitigación empleada por embalse Colbun. Extracto de Colbun (2023)

Las medidas no estructurales no interactúan directamente con el cuerpo de agua, más bien modifican la susceptibilidad de las zonas de inundación mediante la gestión y análisis de los eventos. Buscan modificar la exposición al daño, relocalizando o protegiendo propiedades y controlando el desarrollo de la zona inundable, para mejorar la respuesta de ante crecidas. Una de las medidas cruciales, son los sistemas de alerta temprana (SAT), estos desempeñan un rol importante en situaciones de emergencia, utilizan información sobre variables hidrometeorológicas, como la precipitación, en puntos de control para estimar la evolución de las magnitudes de caudales (García, 2007).

Los pronósticos meteorológicos requieren el uso de modelos matemáticos que ofrezcan la mayor precisión y tiempo de adelanto posible, de forma que los organismos gubernamentales o privados responsables puedan actuar con la debida anticipación. El alcance de estos pronósticos puede variar dependiendo del modelo, inclusive utilizando datos registrados durante una misma tormenta para predecir los hidrogramas de crecida (García, 2007). Un ejemplo de pronósticos de crecidas hidrológicas, es el sistema para inundaciones elaborado por Najafi et al. (2024) evaluado en Alemania, el cual por medio de observaciones y un modelo numérico del tiempo, permite predecir caudales de crecidas, con un 75 % de sus ensambles pronosticando crecidas de 100 años con 17 horas de antelación y un 100 % para 7 horas de antelación.

2.2. Modelos numéricos del tiempo

Actualmente los modelos matemáticos se han convertido en uno de los métodos más importantes en la predicción de crecidas dada su precisión e importancia en la prevención de riesgos hidrometeorológicos. Los modelos de predicción numérica del tiempo (NWP en inglés), son utilizados en todo el mundo para la operación de pronósticos meteorológicos. Estos modelos resuelven ecuaciones diferenciales de conservación momentum, masa, energía y vapor de agua, implementándose en la atmósfera y la superficie. Las variables se definen en espacio de grillas y dependiendo de su resolución horizontal, se disponen en distintos puntos (Pu and Kalnay, 2019).

Los modelos numéricos del tiempo se pueden clasificar como globales y regionales. Los globales, conocidos como Modelos de Circulación General (GCMs) son empleados en simulaciones de largo plazo, para varios días o para estudios de cambio climático. Estos representan el tiempo atmosférico mediante grillas tridimensionales que abarcan todo el planeta, actualmente pueden alcanzar una resolución de hasta 16 [km]. Sin embargo, aunque representan los procesos físicos de la atmósfera, océano y superficie, lo hacen con un nivel de detalle limitado debido principalmente a su baja resolución horizontal. (Pu and Kalnay, 2019)

Los Modelos Climáticos Regionales (RCMs), son complementarios a los modelos globales, dada su resolución (menores a 50 [km]) pueden representar con mayor certeza procesos físicos no incluidos en los globales (Rummukainen, 2010). Estos incluyen condiciones de borde laterales adicionales, que reducen los errores y mejoran la resolución de la modelación. Debido a que requieren estas condiciones adicionales, es necesario utilizar modelos complementarios que simulen estas (Pu and Kalnay, 2019).

Los modelos regionales dependen de sus condiciones iniciales, no todas las esquemas y parametrizaciones físicas son aplicables globalmente. Por ello, es crucial evaluar su aplicación en la respectiva zona con tal de determinar la configuración óptima. Se han llevado a cabo investigaciones de esta similitud en el territorio chileno, Yáñez-Morrón et al. (2018) evaluaron diversas microfísicas en sectores de la cordillera de los Andes, donde se destaca que para eventos de grandes precipitaciones, la microfísica WSM6 (utilizada por WRF-SMN) presentó los mejores resultados. Otro estudio por Schumacher et al. (2020), compara distintos escalamientos de WRF y demuestra que una resolución de 3 [km] ofrece un mejor desempeño en precipitaciones menores, mientras que a 9 [km] es más eficaz en lluvias intensas.

En Chile, la DMC utiliza el modelo regional WRF, en su variación "WRF-DMC", este realiza simulaciones con cinco días de adelanto, dividiendo el país en Zona Norte, Zona Centro, Zona Sur y Zona Austral (DMC, 2024), aunque sus datos históricos no se encuentran en acceso libre. En este contexto, el presente trabajo evalúa la aplicabilidad del modelo WRF-SMN, modelo regional del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, este es un modelo con resolución de 4 [km], que genera cuatro pronósticos meteorológicos diarios para gran parte de América del Sur y sus productos históricos son de acceso libre.

2.2.1. Pronóstico del tiempo WRF-SMN

El servicio meteorológico argentino utiliza el modelo regional Weather Research and Forecasting, WRF (Skamarock et al., 2008), un modelo diseñado para la investigación de la atmósfera y aplicación operacional de pronósticos. Su resolución horizontal varía entre las decenas y los miles de kilómetros y es utilizado por más de 160 países en el mundo (NSF National Center for Atmospheric Research, 2024). WRF-SMN, ha estado operativo desde el año 2017, ofreciendo acceso a sus productos generados a partir del año 2022. Durante este año, el modelo realizaba pronósticos dos veces al día, con horas de inicio a las 00 y 12 UTC, a partir del 2023, se incrementó a cuatro pronósticos diarios: 00, 06, 12 y 18 UTC. Las características del modelo empleadas, así como las variables meteorológicas disponibles, se presentan en las Tablas 2.1 y 2.2 y en la Figura 2.2 se muestra la delimitación de los productos.

Tabla 2.1: Características del modelo WRF-SMN. Extraído de García Skabar et al. (2018) y documentación de SMN (2024).

Configuración WRF-SMN	
Resolución horizontal	4 km
Resolución vertical	38 niveles, tope 50 hPa
Convección	Explícita
Microfísica	WSM6 (Hong and Lim, 2006)
Radiación onda larga	RRTM
Radiación onda corta	Dudhia
Capa límite	Mellor, Yamada, Janjic
Modelo de suelo	NOAH, 4 capas 0-10cm, 10-40cm, 40-100cm, 1-2cm
Hora de adelanto	72 horas
Condiciones iniciales y de borde	Análisis y pronósticos GFS del NCEP, con resolución horizontal de 0,25 grados, horarios

Tabla 2.2: Variables presentes en los archivos de SMN, extracto de la documentación de SMN (2024). 01H, 10M y 24H, corresponden a los pronósticos con frecuencia de 1 hora, 10 minutos y 24 horas, respectivamente. En el estudio se utilizan PP y T2 01H.

Variable	Descripción	Unidad	Frecuencia
PP	Precipitación acumulada en 10 minutos	mm	10M
PP	Precipitación acumulada en una hora	mm	01H
HR2	Humedad relativa a 2 metros	%	01H
T2	Temperatura a 2 metros	°C	01H
dirViento10	Dirección del viento a 10 metros	°	01H
magViento10	Magnitud del viento a 10 metros	m/s	01H
PSFC	Presión en superficie	hPa	01H
ACLWDNB	Radiación de onda larga entrante	J/m^2	01H
ACLWUPB	Radiación de onda larga saliente	J/m^2	01H
ACSWDNB	Radiación de onda corta entrante	J/m^2	01H
TSLB	Temperatura de suelo en la capa 0-10cm	°C	01H
SMOIS	Humedad de suelo en la capa 0-10cm	m^3/m^3	01H
Freezing_level	Altura sobre el nivel del mar de la isoterma de 0°C	m	01H
Tmax	Temperatura máxima diaria	°C	24H
Tmin	Temperatura mínima diaria	°C	24H

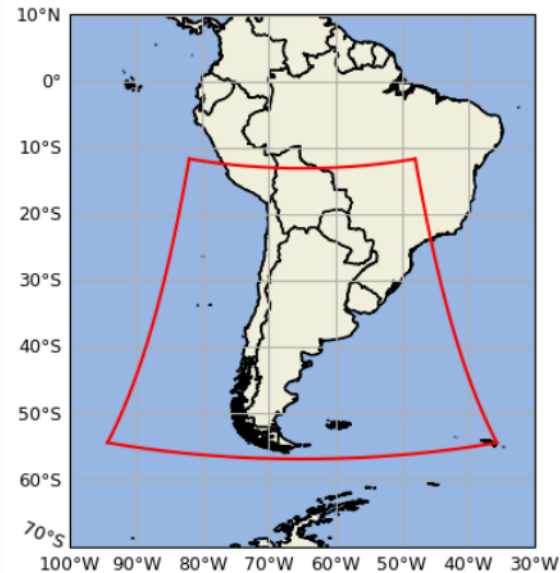


Figura 2.2: Dominio WRF-Arg en proyección Conforme de Lambert (con centro -35° lat y -65° lon) delimitado por contorno rojo. Extracto de la documentación de SMN (2024).

2.3. Modelación hidrológica

Los modelos hidrológicos son herramientas para estudiar los procesos hidrológicos y la variabilidad natural, permiten resolver problemas relacionados con los recursos hídricos, pronosticar inundaciones y evaluar la calidad del agua. Existen distintos tipos de modelos computacionales, estos simulan caudales o cambios en el almacenamiento del agua en el tiempo, utilizando principalmente variables meteorológicas. La cantidad de variables o "heterogeneidad", genera una incertidumbre dada la complejidad de sus interrelaciones, dado esto se tiende a simplificar o aproximar ciertos aspectos. Es importante determinar la sensibilidad de cada variable, ya que algunas pueden tener una influencia mínima en los resultados (Ogden (2021) y Cherif et al. (2023)).

Existen diversos tipos de modelos computacionales, variando en su metodología como su escala de trabajo, distinguiendo su capacidad de acomodar las distintas variables de entrada y la escala temporal a evaluar. Es importante notar, que un modelo puede entrar en más de una clasificación. Por ejemplo, gran cantidad de modelos son de tipo conceptuales, ya que simplifican procesos para representar algunos componentes del sistema hidrológico. Entre algunas de las clasificaciones, definidas en Ogden (2021), se encuentran:

- Modelos basados en procesos:
Se basan en las leyes físicas para simular y simplificar los comportamientos hidrológicos, representan la complejidad de los procesos al incluir una variedad de ecuaciones diferenciales que describen la escorrentía, infiltración, evaporación, entre otros. Son útiles para estudiar el impacto del cambio climático, sin embargo tienen sus limitaciones, requieren una gran cantidad de datos detallados de las propiedades del suelo y de las variables climáticas.

- Modelos basados en datos:

Utilizan datos para derivar y preservar funciones en respuesta a una probabilidad de ocurrencia o de magnitud de un evento. Estos pueden ser por métodos estadísticos tradicionales, como el análisis de frecuencia de inundaciones y sequías u otros enfoques, como el escalamiento o redes neuronales de aprendizaje.

- Modelos conceptuales:

Es un tipo de modelos bajo la clasificación de basados en procesos. Simplifican los procesos hidrológicos en una cuenca mediante conceptos generales y parámetros empíricos. Utilizan principios básicos como la conservación de masa y balance de energía, representan procesos como precipitación, escorrentía, evapotranspiración y almacenamiento de agua. Se centran en los principales comportamientos de la cuenca, calibran los parámetros con datos observacionales y se utilizan en casos de disponer datos limitados. Pueden ser concentrados o distribuidos, los concentrados tratan la cuenca como una sola unidad homogénea y los distribuidos subdividen la región.

- Modelos estocásticos:

Es un tipo de modelos bajo la clasificación de basados en datos. Abordan la variabilidad natural e incertidumbre de estos, generan datos de salida que siguen una distribución de probabilidad predefinida. Son útiles para la predicción de riesgos hidrológicos como inundaciones y sequías, pero requieren datos de alta calidad y representativos, además de que requieren un alto conocimiento respecto a las distribuciones de las variables y una alta capacidad computacional para su proceso.

Los modelos hidrológicos, sean de cualquier tipo, dependen de sus datos de entrada y del lugar de su aplicación, por ello, necesitan realizar un proceso de calibración. La calibración permite evaluar, visual o estadísticamente, la capacidad del modelo de reproducir los valores observados (Cherif et al., 2023). Para esto, se pueden utilizar funciones objetivo que comparen los valores observados con los modelados, como por ejemplo el NSE (Nash and Sutcliffe, 1970), que evalúa la calidad de la modelación, donde un valor igual a 1 indica el ajuste óptimo y valores menores a 0 reflejan un bajo desempeño.

2.3.1. Modelo GR4H

El modelo GR4H es un modelo basado en procesos a escala horaria (Mathevet, 2005), este es una modificación del modelo de escorrentía a escala diaria 'GR4J' (Perrin et al., 2003) de cuatro parámetros. Si bien, el modelo GR4J es un modelo simplificado, en su elaboración demostró resultados con notable precisión, comparándose con modelos de mayor complejidad. Como ejemplo de un estudio realizado en Chile, el trabajo de Acuña and Pizarro (2023) empleó el modelo GR4J para evaluar crecidas en 101 cuencas del país, sus resultados mostraron que el modelo tuvo un buen desempeño en la estimación de grandes caudales, aunque el rendimiento varía según las calibraciones aplicadas. En la Figura 2.3 se presenta un esquema de su funcionamiento

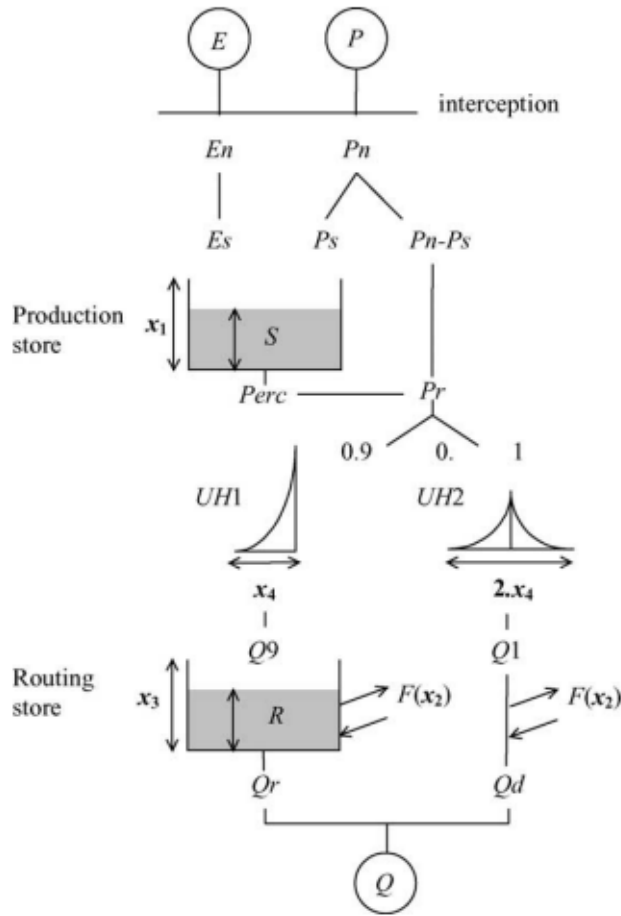


Figura 2.3: Diagrama del modelo precipitación-escorrentía GR4J, extracto de Perrin et al. (2003)

Como se observa en la Figura 2.3, el proceso comienza con la precipitación (P) y evapotranspiración potencial (E), ambos en milímetros. A partir de estas forzantes se calcula la lluvia neta (P_n) y la capacidad de evapotranspiración neta (E_n) con la ecuación 2.1. Si P_n es distinto de cero, se extrae una porción de este, denominada P_s , para el almacenamiento de la cuenca (S) y si E_n es distinto de cero, se determina el agua a evaporar del almacenamiento (E_s), utilizando las ecuaciones 2.2 y 2.3 y definiendo el primer parámetro, 'x1', como la capacidad máxima del almacenamiento en milímetros. Además, se calcula la pérdida por percolación de S con la ecuación 2.4, la cual permite realizar el calculo de la variación en el tiempo de S, como muestra la ecuación 2.5.

$$\begin{aligned} P \geq E, \quad P_n &= P - E \wedge E_n = 0 \\ P \leq E, \quad P_n &= 0 \wedge E_n = E - P \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)} \quad (2.2)$$

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)} \quad (2.3)$$

$$P_{erc} = S \left(1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9x_1}\right)^4\right]^{-1/4}\right) \quad (2.4)$$

$$S = S - E_n + P_s - Perc \quad (2.5)$$

Posteriormente, se calcula la cantidad de agua que es enrutada en la cuenca (Pr) con la ecuación . De esta cantidad, el 90% se dirige a un hidrograma unitario UH1 y el 10% a un segundo, UH2, no lineal, que simula el desfase entre la precipitación y la escorrentía. Ambos hidrogramas dependen del parámetro de constante de tiempo x_4 [días], aunque UH2 tiene una base de $2 \cdot x_4$. Para determinar los hidrogramas se realiza el calculo de las curvas de acumulación, SH1 y SH2, con las ecuaciones 2.7, 2.8 y 2.9

$$P_r = P_{erc} + P_n - P_s \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} t \leq 0, & \quad SH1(t) = 0 \\ 0 < t < x_4, & \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \\ t \geq x_4, & \quad SH1(t) = 1 \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} t \leq 0, & \quad SH2(t) = 0 \\ 0 < t < x_4, & \quad SH1(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \\ x_4 < t < 2 \cdot x_4, & \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \\ t \geq 2 \cdot x_4, & \quad SH2(t) = 1 \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} UH1(j) &= SH1(j) - SH1(j-1) \\ UH2(j) &= SH2(j) - SH2(j-1) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Seguidamente, se calcula el intercambio de agua (F) con la ecuación 2.10, determinando el almacenamiento de enrutamiento (R), el parámetro de capacida de de referencia 'x3' [mm] y el coeficiente de intercambio de agua 'x2' [mm/dias] como muestra la ecuación 2.11. El valor de R se va actualizando iterativamente sumando la salida Q9 de UH1 y F: :

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3}\right)^{7/2} \quad (2.10)$$

$$R = \max(0; R + Q9 + F) \quad (2.11)$$

Determinados estos valores se calcula el caudal resultante de UH1 (Qr) y de UH2 (Qd) con las ecuaciones 2.12 y 2.14. Dado que Qr depende de R, a la medida que pasa el tiempo se vuelve a calcular R con la

ecuación 2.13. Finalmente, el caudal total resulta de la suma de Q_r y Q_d , como muestra la ecuación 2.15:

$$Q_r = R \left(1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right]^{-1/4} \right) \quad (2.12)$$

$$R_{i+1} = R_i - Q_r \quad (2.13)$$

$$Q_d = \max(0; Q_1 + F) \quad (2.14)$$

$$Q = Q_r + Q_d \quad (2.15)$$

Para la elaboración de GR4H, se realizaron algunas modificaciones, evaluando distintas alternativas (Mathevet, 2005), de las cuales se establecieron tres modificaciones importantes. A continuación, se presentan los cambios óptimos que se realizaron al modelo GR4J en la elaboración de GR4H:

- Valor del coeficiente de la función de percolación: se ajustó para que dependiera del paso del tiempo de los datos hidrológicos.
- Potencia del hidrograma unitario: Se modificó la potencia para adaptarse a las características específicas de los datos horarios.
- Uso de un solo hidrograma unitario de dos ramas: En lugar de utilizar múltiples UH, se optó por un único de dos ramas, mejorando la eficiencia y precisión

2.3.2. CemaNeige

CemaNeige es un modelo cuyo propósito es contabilizar la nieve y simular la evolución temporal del manto de nieve. Este modelo puede ser asociado con cualquier modelo de precipitación-escorrentía para simular el caudal a escala de la cuenca (Valéry et al., 2014). Es importante mencionar que fue desarrollado en un paso de tiempo diario, pero aun así existe una versión ajustada a escala horaria.

Está semidistribuido por dos parámetros, el coeficiente de ponderación para el estado térmico del manto de nieve θ_{G1} [-] y el coeficiente de derretimiento por grado-hora θ_{G2} [mm/°C/h]. Tiene cinco características principales: rango de transición de temperatura para la determinación de la fracción sólida de la precipitación, cinco bandas altitudinales de igual área para la acumulación de nieve, el contenido de frío del manto de nieve (con un parámetro que controla la inercia del manto de nieve), un factor de grados-día que controla el deshielo de la nieve y una distribución desigual de la nieve en cada banda. La Figura 2.4 presenta el esquema del modelo.

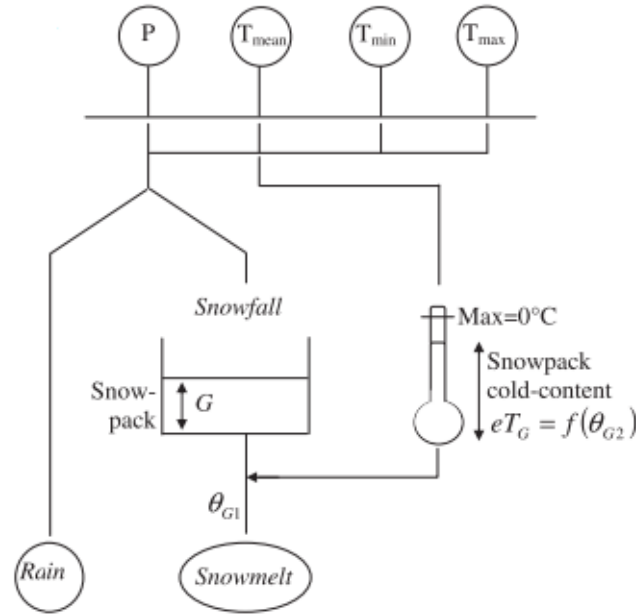


Figura 2.4: Diagrama del modelo Cemaneige, extracto de Valéry et al. (2014)

Como presenta el esquema, Cemaneige requiere valores de entrada de la precipitación de agua líquida y la temperatura del aire (valor promedio, mín o máx). Con esta información el modelo calcula la determinación de fracción sólida de precipitación y la acumulación de nieve, presentados en las ecuaciones 2.16 y 2.17, con G la cantidad de nieve y eT_G el contenido de frío.

$$\begin{aligned}
 &\text{Si } Z_{\text{mediana}_{\text{cuenca}}} < 1500\text{m,} && \text{Fracción sólida} = f(T_{\text{min}}, T_{\text{max}}) \\
 &\text{Si } Z_{\text{mediana}_{\text{cuenca}}} \geq 1500\text{m,} && \text{Fracción sólida} = f([-1; , +3^{\circ}\text{C}]) \\
 &Nevada = P \cdot \text{Fracción sólida} && \text{Lluvia} = P - Nevada
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

$$\begin{aligned}
 G &= G + Nevada \\
 eT_G &= \theta_{G2} \cdot eT_G + (1 - \theta_{G2}) \cdot T_{\text{promedio}}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Con estos valores luego se calcula el deshielo potencial y el área cubierta por nieve con las ecuaciones 2.18 y 2.19. Las cuales a su vez permiten estimar el deshielo real y la variación temporal de la acumulación de nieve, como muestran las ecuaciones 2.20 y 2.21. Por último, con el deshielo y la lluvia se determina la escorrentía total del modelo con la ecuación 2.22.

$$\begin{aligned}
 &\text{Si } eT_G = 0 \text{ y } T_{\text{promedio}} > 0, \text{ Deshielo potencial} = \theta_{G1} \cdot T_{\text{promedio}} \\
 &\text{Si Deshielo potencial} > G, \text{ Deshielo potencial} = G
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Si } G < G_{\text{limite}}, \text{ Área cubierta} = \frac{G}{G_{\text{limite}}} \\
 &\text{Si } G \geq G_{\text{limite}} \text{ Área cubierta} = 1
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\text{Deshielo} = f(\text{Área cubierta}) \cdot \text{Deshielo potencial} \tag{2.20}$$

$$G = G - \text{Deshielo} \quad (2.21)$$

$$\text{Escorrentía total} = \text{Lluvia} + \text{Deshielo} \quad (2.22)$$

Con la información del modelo GR4J/GR4H y CemaNeige se confecciona la Tabla 2.3, la cual presenta los parámetros necesarios para realizar la modelación hidrológica y se determinan a partir del proceso de calibración con los datos históricos de las cuencas de estudio de los últimos diez años.

Tabla 2.3: Parámetros del modelo GR4H+CemaNeige

Parámetro	Definición
X1	Capacidad de almacenamiento de producción [mm]
X2	Coefficiente de intercambio entre cuencas [mm/h]
X3	Capacidad de almacenamiento de enrutamiento [mm]
X4	Constante de tiempo del hidrograma unitario [h]
CX1	Coefficiente de ponderación para el estado térmico del manto de nieve [-]
CX2	Coefficiente de derretimiento por grado-hora [mm/°C/h]

Capítulo 3: Zona de estudio

El presente capítulo presenta la delimitación de la zona de estudio en la cual se realizó el trabajo, se incluyen las características de las estaciones fluviométricas y meteorológicas utilizadas, así como también un análisis hidrológico en base a la precipitación y los caudales de las cuencas.

3.1. Caracterización de la zona de estudio

El dominio de estudio corresponde a la parte sur de la región del Maule y una pequeña sección del norte de Ñuble en Chile, entre los rangos latitudinales $35,62^{\circ}\text{S}$ - $36,72^{\circ}\text{S}$ y longitudinales $72,54^{\circ}\text{O}$ - $70,71^{\circ}\text{O}$. Este dominio está influenciado por el relieve característico del territorio chileno, es decir, la presencia de cuatro franjas longitudinales: la cordillera de los Andes, la depresión intermedia, la cordillera de la Costa y las planicies costeras, cada cual tiene un efecto en variables climáticas como la precipitación y temperatura. El estudio se enfoca en el sector precordillerano de los Andes y un sector de la depresión intermedia, como muestra la Figura 3.1 que incluye las cuencas, estaciones meteorológicas y fluviométricas utilizadas en el trabajo.

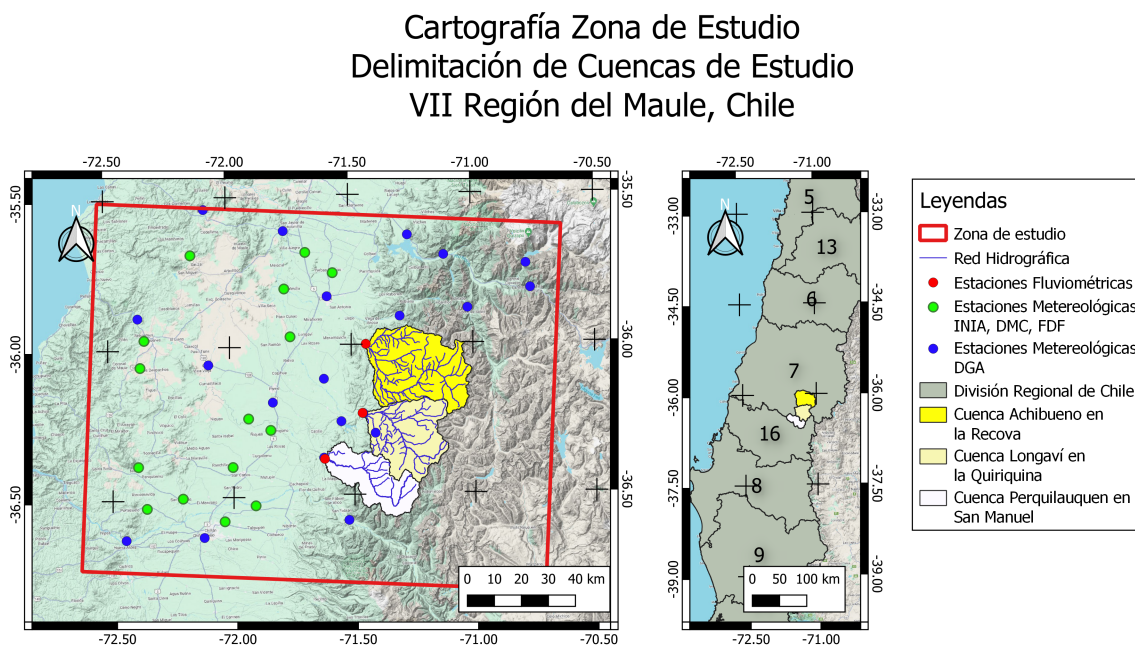


Figura 3.1: Cartografía de la zona de estudio. Elaboración propia mediante software QGIS.org (2024)

Se seleccionaron tres subcuencas con bajo grado de intervención, con la mayor cantidad de datos disponibles, correspondientes a los ríos homónimos: Achibueno en la Recova, Longaví en la Quiriquina y Perquilauquen en San Manuel. En general, las cuencas presentan características similares, presentan un

índice de aridez de 0,5, indicando que la evapotranspiración potencial es relativamente baja en comparación con la precipitación. Las tres cuencas tienen altitudes comparables, aunque la cuenca de Perquilauquen se diferencia mayormente de las otras, alcanzando menores alturas y una menor extensión de área. En la tabla 3.1 se presentan características de cada cuenca.

Tabla 3.1: Características cuencas de estudio. Información obtenida de plataforma CAMELS-CL (Alvarez-Garretón et al., 2018).

Nombre	Código Estación Fluviométrica	Rango de elevaciones [m.s.n.m]	Elevación media [m.s.n.m]	Área [km ²]	Índice de aridez [-]
Rio Achibueno En La Recova	7354002	309-3.197	1.329	894,3	0,6
Rio Longaví En La Quiriquina	7350001	449-3.195	1.401	668,9	0,5
Rio Perquilauquen En San Manuel	7330001	275-2.230	1.100	502,4	0,5

De manera más detallada y gráfica, las Figuras 3.2 y 3.3 muestran la información acerca de las altitudes a través de mapas de elevación y curvas hipsométricas. En estas figuras se aprecia una similitud en sus altitudes, variando entre los 500 y 2.000 [m s.n.m.], con un bajo porcentaje alcanzando los 3000 [m s.n.m.].

Mapa de Elevación de las Cuencas de Estudio

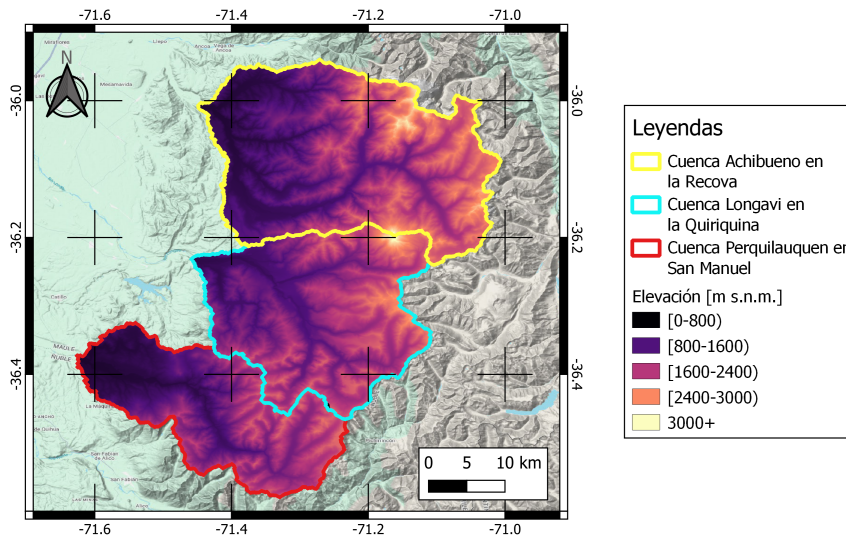


Figura 3.2: Mapa de elevación de las cuencas. Elaboración propia con modelos de elevación Alos Palsar de Infraestructura de Datos Geospaciales Chile (2016), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de JPL (2013) y software QGIS.

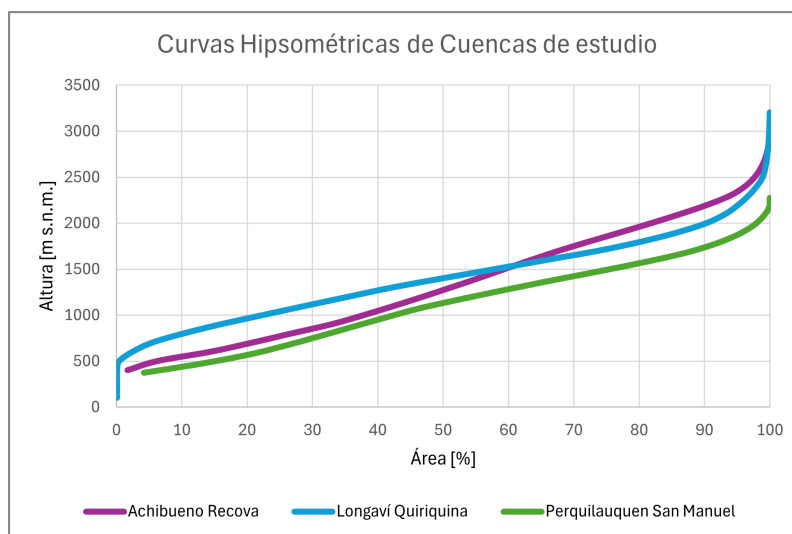


Figura 3.3: Curvas hipsométricas de las cuencas de estudio. Elaboración con QGIS y Excel.

3.2. Disponibilidad de datos meteorológicos y tormentas a estudiar

Para la evaluación métrica de los datos simulados de WRF en comparación con las observaciones, se seleccionaron estaciones meteorológicas con datos disponibles durante los periodos de estudio (años 2022 y 2023). Estas son estaciones pertenecientes a la DGA, INIA y DMC. La distribución espacial de las estaciones se muestra en la Figura 3.1. A continuación se presentan las estaciones designadas para evaluar precipitación y temperatura:

Tabla 3.2: Estaciones meteorológicas obtenidas de la base de datos de Agrometeorología para la evaluación métrica de la temperatura a escala diaria.

Nombre	Altura	Latitud	Longitud	Organización
Escuela de Artillería	160	-35,83	-71,59	DMC
Miraflores	124	-35,81	-71,77	INIA
Villa Alegre	127	-35,69	-71,68	FDF
Copihue	162	-35,97	-71,75	DMC
Santa Sofía	151	-35,97	-72,35	INIA
Los Despachos	167	-36,06	-72,37	INIA
San Gregorio	180	-36,28	-71,84	AGRICHILE
Monte Flor-Tucapel	160	-36,24	-71,93	INIA
CFArroz	162	-36,4	-72,00	INIA
Santa Rosa	194	-36,53	-71,91	INIA
Aeródromo Gral. O'Higgins	151	-36,58	-72,04	DMC
Portezuelo	109	-36,53	-72,36	INIA
Ninhue	91	-36,39	-72,39	INIA

Tabla 3.3: Estaciones meteorológicas de la DGA utilizadas para la evaluación métrica para precipitación y temperatura a escala horaria y diaria

Nombre	Código estación	Altura	Latitud	Longitud	Pp.	Tem.
Nirivilo	07341002	200	-35,54	-72,09	✓	×
Rio Loncomilla En Las Brisas	07359001	68	-35,62	-71,77	✓	×
Colorado	07378003	420	-35,64	-71,26	✓	✓
Rio Maule En Armerillo	07321002	470	-35,71	-71,11	✓	×
Rio Cipreses En Dasague	07306001	1300	-35,74	-70,78	✓	✓
Laguna La Invernada						
Linares	07358007	157	-35,84	-71,6	✓	×
Rio Melado En El Salto	07317005	730	-35,88	-71,02	✓	✓
Tutuven Embalse	07337002	179	-35,9	-72,37	✓	×
Rio Ancoa En El Morro	07355002	402	-35,91	-71,3	✓	×
Quella	07335004	130	-36,06	-72,09	✓	×
La Sexta De Longavi	07352002	229	-36,11	-71,62	✓	×
Parral	07345001	175	-36,19	-71,83	✓	✓
Rio Longavi En La Quiriquina	07350001	449	-36,23	-71,46	✓	×
Digua Embalse	07331002	390	-36,26	-71,55	✓	✓
Embalse Bullileo (Lago)	07350007	700	-36,3	-71,41	✓	×
Rio Perquilauquen En San Manuel	07330001	266	-36,38	-71,62	✓	×
Rio Ñuble En San Fabian N 2	08106002	450	-36,59	-71,53	✓	×
Chillan Viejo	08117002	115	-36,63	-72,13	✓	✓
Rio Ñuble En Confluencia	08119002	20	-36,63	-72,45	✓	×

Una vez definidas las estaciones, se llevó a cabo un catastro de los días en los cuales precipitaron dentro del periodo de estudio, correspondiente a los meses entre Abril y Septiembre de los años 2022 y 2023 (Tablas 3.4 y 3.5). De estas tablas, se destaca el mes de Julio que presentó la mayor cantidad de días con precipitación en ambos años, así como el mes de Agosto de 2023, que registró el evento más prolongado, con 9 días consecutivos de lluvia.

Tabla 3.4: Cantidad de días por mes

Mes	Días de PP 2022	Días de PP 2023
Abril	8	3
Mayo	6	6
Junio	7	11
Julio	16	14
Agosto	6	14
Septiembre	4	9
Total	47	57

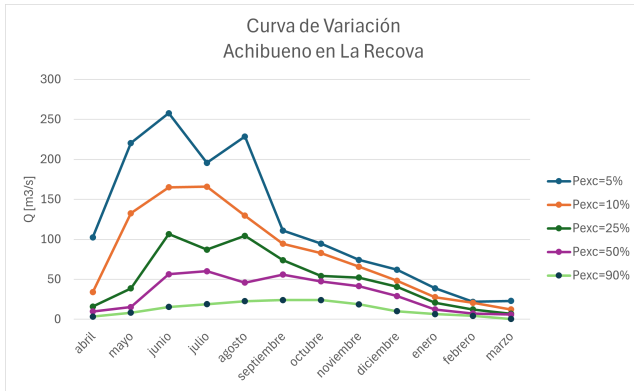
Tabla 3.5: Días de precipitación a utilizar para la evaluación métrica

Año	Días de Precipitación a evaluar					
2022	19-abr	12-may	23-jun	05-jul	16-jul	14-ago
	21-abr	19-may	27-jun	06-jul	17-jul	15-ago
	22-abr	20-may	28-jun	09-jul	18-jul	16-ago
	23-abr	22-may	29-jun	10-jul	25-jun	07-sept
	24-abr	23-may	30-jun	12-jul	26-jun	17-sept
	25-abr	24-may	01-jul	13-jul	05-ago	20-sept
	26-abr	14-jun	02-jul	14-jul	06-ago	24-sept
	27-abr	22-jun	03-jul	15-jul	13-ago	
2023	28-abr	02-jun	02-jul	21-jul	19-ago	04-sept
	29-abr	03-jun	03-jul	22-jul	20-ago	05-sept
	30-abr	08-jun	04-jul	24-jul	21-ago	08-sept
	21-may	20-jun	06-jul	25-jul	22-ago	09-sept
	22-may	21-jun	07-jul	09-ago	23-ago	10-sept
	23-may	22-jun	08-jul	10-ago	27-ago	13-sept
	24-may	23-jun	11-jul	15-ago	28-ago	25-sept
	26-may	24-jun	12-jul	16-ago	29-ago	
	30-may	25-jun	13-jul	17-ago	02-sept	
	01-jun	26-jun	20-jul	18-ago	03-sept	

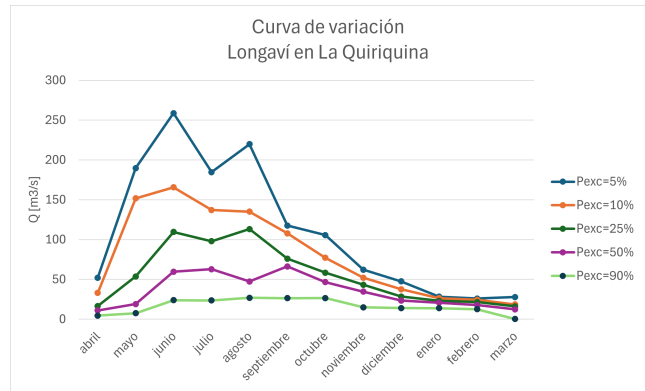
3.3. Análisis hidrológico

Dado que el estudio se ubica en la zona central de Chile, próximo a la zona sur y en el sector precordillerano, es esperable que las cuencas presenten un comportamiento pluvio-nival. Esto implica que se producirán grandes eventos de escorrentía y precipitación en el periodo invernal, seguidos de un descenso de la precipitación en verano. Para corroborar este análisis se generaron gráficos de curvas de variación estacional, utilizando los datos de caudales medios mensuales de la plataforma CAMELS de la Dirección General de Aguas (DGA) (Alvarez-Garreton et al., 2018), desde el año 1989 hasta el 2019. Se aplicó una distribución de Weibull (1951) y, cuando fuera necesario, se realizó relleno de datos entre estaciones, por medio del software de Excel y su función de estimación lineal.

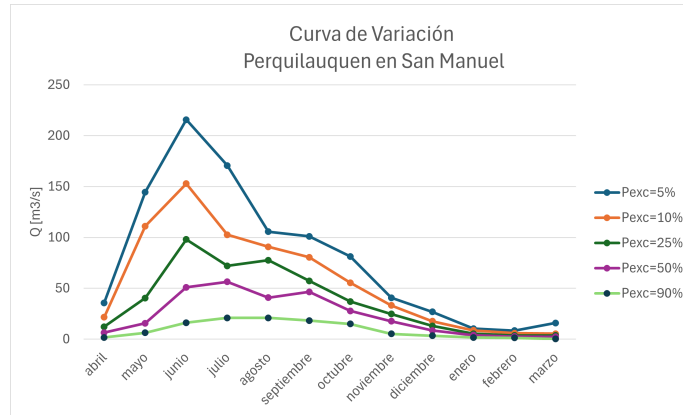
Las curvas de variación estacional presentadas en las Figuras 3.4 (a), (b) y (c), confirman un régimen pluvio-nival, mostrando un aumento de los caudales, especialmente en las bajas probabilidades de excedencia, alcanzando los $200 [m^3/s]$ entre junio y agosto para una P_{exc} igual al 5%. En contraste para probabilidades mayores al 50%, los caudales se mantienen bajo los $50 [m^3/s]$ durante todo el año.



(a) Achibueno en la Recova.



(b) Longaví en la Quiriquina.



(c) Perquilauquén en San Manuel.

Figura 3.4: Curvas de variación estacional de las cuencas hidrológicas escogidas

Si bien, los máximos mensuales pueden alcanzar valores de hasta $250 \text{ [m}^3/\text{s]}$, no significa que sean representativos de la serie completa. En la Figura 1.2 de análisis de frecuencia del Anexo A, los caudales oscilan entre los 500 y $750 \text{ [m}^3/\text{s]}$ para un periodo de retorno de 2 años, lo que indica una ocurrencia frecuente de eventos de crecida con caudales significativos.

Específicamente, para el análisis de frecuencia se utilizaron seis estaciones meteorológicas y las tres estaciones fluviométricas de las cuencas de estudio, respecto a las variables de Pp. diaria máxima anual y caudal medio diario máximo anual del periodo invernal con los datos de la DGA, desde 1979 hasta 2019 (Figuras 1.1 1.2 del Anexo A). En caso de datos faltantes, se realizaron rellenos de datos por estimación lineal. En la Tabla 3.6, se presentan los periodos de retorno de los máximos eventos registrados durante el periodo de estudio, junto con la distribución de probabilidad obtenida.

Tabla 3.6: Periodos de retorno para los máximos eventos del año 2023, en base a los análisis de frecuencia de los máximos diarios anuales entre los años 1979 y 2019.

Estación	Variable	Dist.	Valor 24/06/23	Periodo de retorno	Valor 21/08/23	Periodo de retorno
Colorado	PP [mm/día]	Normal	31	1,01	102,5	2
Linares		Normal	39,2	1,11	12,6	1,01
Tutuven emb.		Gumbell	22,5	1,01	13,6	1,01
Parral		Gumbell	71,5	2	32,9	1,02
Digua emb.		Gumbell	116,5	6	64	1,25
Chillán Viejo		Gumbell	32,4	1,04	6,6	1,01
Achibueno inv	Q [m3/s]	Gumbell	2713,4	313	2142,1	77
Longaví inv		Gumbell	-	-	2421,8	85
Perquilau- quen inv		Gumbell	974,81	34	718,1	9

En ambos casos, la variable de precipitación muestra una periodicidad baja, cercana a 1 año. En contraste, los periodos de retorno de los caudales aumentan considerablemente. Para entender esta diferencia, se realizaron los mismos cálculos para la precipitación del día anterior en la Tabla 1.1 del Anexo A, aunque el periodo de retorno es similar en ambos análisis. La diferencia entre precipitación y caudales se puede deber a diversos factores que afectan la escorrentía, como altas cotas de las líneas de nieves durante los eventos y la acumulación de precipitación de varios días de tormenta. Cabe destacar que, se tiende a mal estimar los caudales de de menor y mayor magnitud.

Para comprender mejor el incremento en los caudales, se realizaron cálculos de la línea de nieves en los días de precipitación mediante dos métodos: el primero se basó en la isoterma 0 y su diferencia de 300 [m] con la línea de nieves (Garreaud, 1993), realizando estimación lineal entre las elevaciones y los valores de la temperatura horaria de las estaciones de Colorado, Río Cipreses en Dasague, Río Melado en el Salto, Parral, Digua Embalse y Chillán Viejo presentes en la Tabla 3.3, tomando en cuenta una correlación de R^2 mayor o igual a 0,5. El segundo método utiliza las ecuaciones 3.1 y 3.2 en base la latitud y la probabilidad de excedencia de la nieve, propuesto por Covián and Stowhas (2015).

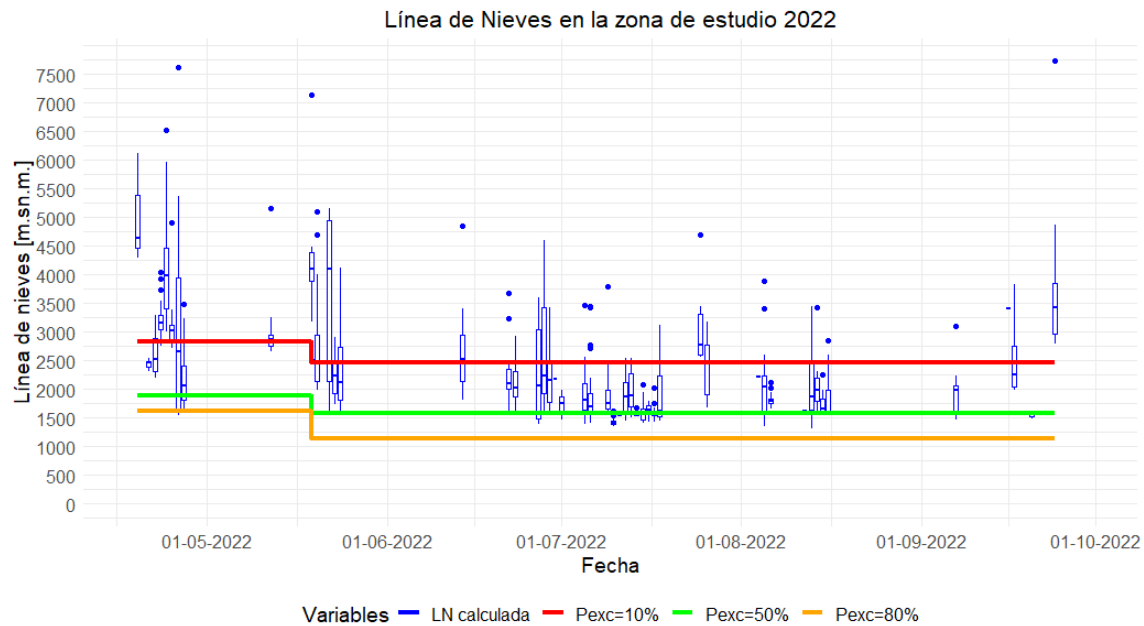
- Para época de invierno (Mayo a Septiembre)

$$\begin{aligned}
 ELN &= (646,5 \cdot p_{exc} - 4361,1) \cdot \ln(LAT) - 3792,3 \cdot p_{exc} + 17951 & \text{si} & \quad 0,8 \geq p_{exc} \geq 0,5, \\
 ELN &= EXP \left(16,596 + \ln \left(\frac{1}{p_{exc}} \right) t^{-0,123} \right) \cdot LAT^{-2,577 \cdot \ln \left(\frac{1}{p_{exc}} \right)^{-0,304}} & \text{si} & \quad 0,5 \geq p_{exc} \geq 0,001,
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

- Para época de Otoño-Primavera (Abril, Octubre y Noviembre)

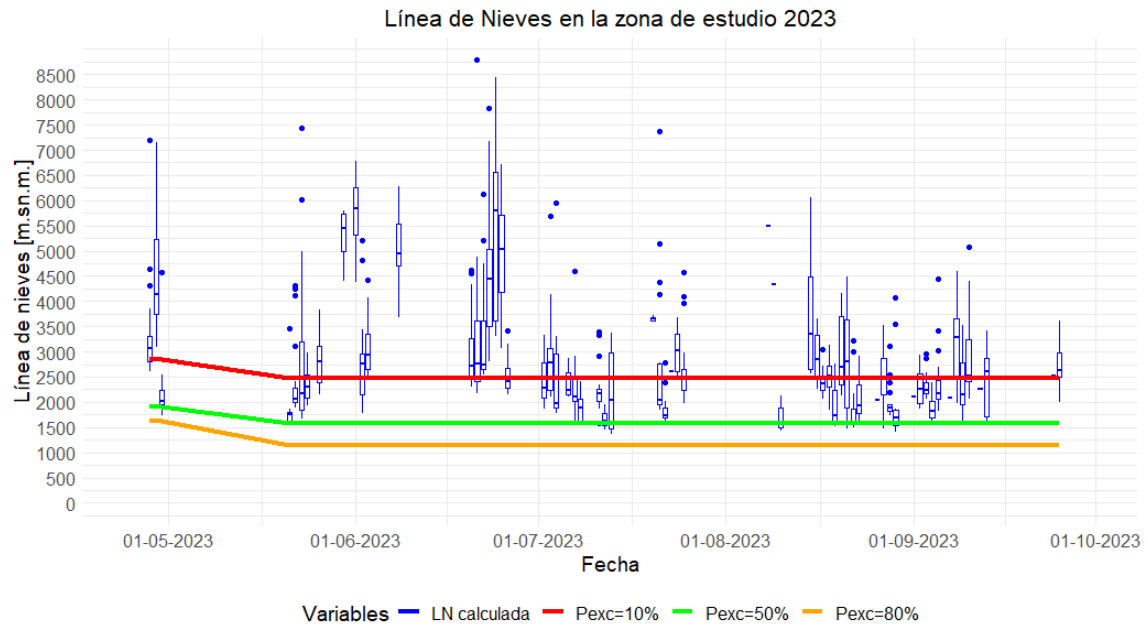
$$ELN = EXP \left(15,64 + \ln \left(\frac{1}{p_{exc}} \right)^{-0,104} \right) \cdot LAT^{0,5374 \cdot \ln \left(\ln \left(\frac{1}{p_{exc}} \right) \right) - 2,23} \quad \text{si} \quad 0,8 \geq p_{exc} \geq 0,05 \quad (3.2)$$

La Figura 3.5 (a) y (b) muestra las observaciones horarias en formato boxplot de cada año, junto con la probabilidades de excedencia de línea de nieves al 10, 50 y 80%, considerando una latitud arbitraria de 35,06°S, según las ecuaciones 3.1 y 3.2. De esta, se observa que la línea de nieves tuvo una probabilidad de excedencia cercana o menor al 10%, superando elevaciones de 2.500 [m s.n.m.], especialmente para el año 2023.



(a) Línea de nieves del dominio en el año 2022.

Figura 3.5: Línea de nieves con referencia Latitud 35,06°S y 6 estaciones meteorológicas. Boxplots en azul representan los resultados de las observaciones horarias y líneas continuas representan las altitudes asociadas a probabilidades de excedencia.



(b) Línea de nieves del dominio en el año 2023.

Figura 3.5: (Cont.) Línea de nieves con referencia Latitud 35,06°S y 6 estaciones meteorológicas. Boxplots en azul representan los altitudes de las observaciones horarias y líneas continuas representan las altitudes asociadas a probabilidades de excedencia.

La línea de nieves se fluctuó entre los 2.000 y 6.000 [m s.n.m.]. Dado que las cuencas no superan los 3.000 [m s.n.m.] y que estas se encuentran principalmente por debajo de los 2.000 [m s.n.m.], se concluye que durante el periodo de evaluación, la precipitación fue mayormente en forma líquida. Esto pudo haber tenido un efecto aportante en la escorrentía adicional, debido al derretimiento de nieve por contacto con la lluvia. Esta situación resalta la importancia del trabajo, ya que se registraron caudales superiores a los habituales en las cuencas, subrayando la urgencia de poder pronosticar caudales de gran magnitud.

Capítulo 4: Metodología

La metodología propuesta para alcanzar los objetivos de este trabajo se dividen en tres procesos principales. En la Figura 4.1 se muestra un esquema conceptual de cada parte, junto con las tareas correspondientes. Primeramente se realiza el catastro de la información disponible y de los días a evaluar, con esta información se descarga los datos meteorológicos y fluviométricos de observaciones y productos georreferenciados atmosféricos. Con las observaciones, se realiza el análisis hidrológica de la zona y una evaluación cuantitativa de los pronósticos provenientes de WRF-SMN. Luego, pre-procesado los datos históricos de observaciones y ERA-5, se realiza la modelación de caudales con un enfoque en los pronósticos de WRF-SMN.

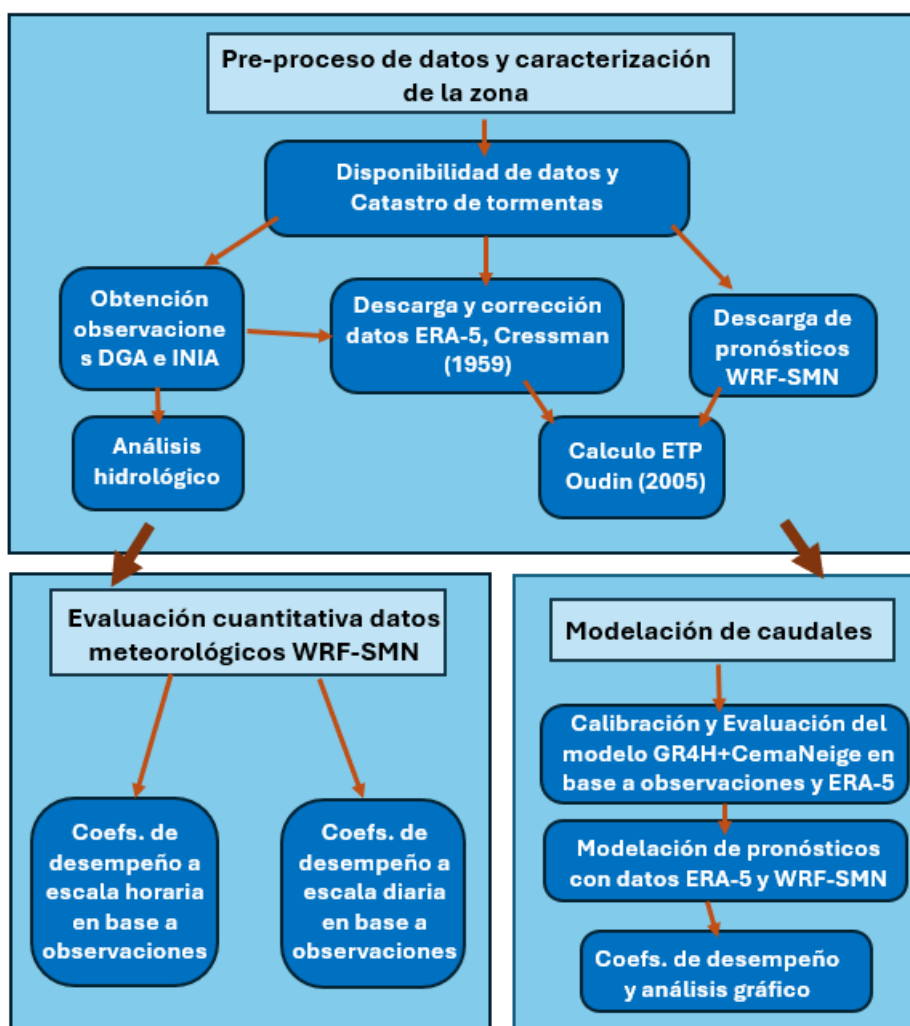


Figura 4.1: Esquema de la metodología del trabajo

4.1. Recopilación y pre-proceso de datos

Para poder realizar una modelación hidrológica se necesita una gama de variables con distintas configuraciones dependiendo de la complejidad del modelo. En este trabajo se utilizaron datos brutos de pronóstico de precipitación y temperatura de WRF-SMN, los datos históricos de ERA-5 corregidos por observaciones, y los caudales observados de la base de datos de la DGA (2024).

4.1.1. Datos observados

Respecto a lo que son observaciones, se utilizaron tres bases de datos: a escala horaria se utilizó la base de datos de DGA satelital (DGA, 2024), la cual permite la descarga de variables en tiempo real de estaciones meteorológicas y fluviométricas. Por la gran cantidad de información, se analizaron 10 estaciones distribuidas a lo largo de la zona de estudio: Río Loncomilla en las Brisas, Chillan Viejo, Linares, Parral, Tutuven Embalse, Digua Embalse, Colorado, Río Maules en Armerillo, Río Melado en el Salto y Río Cipreses en Dasague. Se destaca que solo seis de estas contienen datos de temperatura (Chillan Viejo, Parral, Digua Embalse, Colorado, Río Melado en el Salto y Río Cipreses en Dasague).

A escala diaria, se trabajó con la base de datos de la DGA disponible en la pagina web de CR2met (DGA/DMC, 2024). Se filtraron 19 estaciones meteorológicas que proporcionan datos para el periodo de estudio y se encuentran dentro de la zona delimitada. Sin embargo, no todas las estaciones cuentan con registros de temperatura diaria durante 2022 y 2023, por lo tanto se decidió utilizar la red agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) (DMC/INIA/FDF/AGRICHILE, nd), con 13 estaciones distribuidas a lo largo de la zona.

Cada estación tiene su propio formato y registro de información, por lo tanto es necesario un realizar un pre-procesamiento. Mediante el software Rstudio (RStudio Team, 2020), se ordenaron los datos de forma que presentaran la misma cantidad de registros, completando con vacíos de ser necesario. La información recopilada consta desde el 1 de abril a las 00:00 hasta el 30 de septiembre a las 23:00 (hora Chile) en 2022 y 2023. En el caso de los caudales, se recopila de las estaciones fluviométricas desde el 1 de enero del 2012 hasta el 30 de septiembre del 2023.

4.1.2. Datos de pronósticos

Analizando las estaciones meteorológicas de la zona, se realizó un catastro de los días que presentaron precipitación. Con esta información se descargaron los datos de pronóstico de WRF-SMN de su base de datos (SMN, 2024), la cual permite la descarga de productos grillados horarios a partir del año 2022. Durante ese año, se generaron dos pronósticos por día y a partir de junio de 2023, el número aumentó a cuatro pronósticos diarios. En total, se descargaron 300 pronósticos en 104 días durante los dos años. Si bien cada uno tiene un horizonte temporal de 72 horas, se decidió utilizar solo hasta 48 horas, ya que que la mayoría de las tormentas no se extienden por más de dos días. Además, los archivos están guardados por hora y no por pronóstico y, los productos cubren gran parte de América del Sur. Por lo tanto, se utilizó el software CDO (Climate Data Operators) con el sistema Ubuntu para combinar los archivos y acotarlos según la zona de estudio.

4.2. Evaluación del pronóstico meteorológico WRF-SMN

Antes de llevar a cabo la modelación hidrológica, se realiza una evaluación cuantitativa de los datos WRF-SMN. Para ello, se comparan las observaciones de estaciones meteorológicas con los producto grilados por píxel de los pronósticos, evaluando directamente estación frente al correspondiente píxel. Para esto, se extraen las variables de precipitación y temperatura del píxel correspondiente a cada estación coincidiendo sus coordenadas geográficas, mediante el software de Rstudio y el paquete 'ncdf4'.

Se destaca el caso de la temperatura, variable cual se esta evaluando en un sector cordillerano, es decir, presenta una gran variación dentro de un mismo píxel. Por tanto, para poder evaluar cuantitativamente la temperatura, se implementa una corrección por altura, utilizando una gradiente típica de $-6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$, los datos de las elevaciones de las estaciones y la variable HGT de WRF-SMN. Esta se representa en la ecuación 4.1, con H en [km] y Temp en [$^{\circ}\text{C}$]. En el caso de la evaluación de los datos de ERA-5, se utiliza la variable de geopotencial y la ecuación 4.2, con Φ como geopotencial y una gravedad de $9,806 \text{ [m/s}^2\text{]}$ para obtener su altitud para la corrección.

$$Temp_{corregida} = Temp_{producto} - 6,5 \cdot (H_{estacion} - H_{producto}) \quad (4.1)$$

$$z = \frac{\Phi}{g} \quad (4.2)$$

Para realizar la evaluación horaria, se utilizan tres coeficientes: Bias, RMSE y correlación de Pearson (Pearson, 1896). El coeficiente Bias permite evaluar si se están subestimando o sobrestimando valores, el RMSE cuantifica la diferencia/errores entre los valores observados y modelados, y la correlación de Pearson nos permite observar la correlación entre ambas con un rango de -1 a 1. Estas se presentan en las ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5, donde y_i es el valor observado, \hat{y}_i el valor a evaluar, $cov(X, Y)$ la covarianza entre ambos y σ_i la desviación estándar.:

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad (4.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (4.4)$$

$$\rho_{X,Y} = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \quad (4.5)$$

En la evaluación diaria se procede a acumular y promediar los datos de precipitación y temperatura de los pronósticos de WRF-SMN, considerando los rangos horarios de los datos observados y la zona horaria de Chile. Dado que se está comparando uno o dos valores por pronóstico, se calcula el error y el error absoluto, presentados en las ecuaciones 4.6 y 4.7, con n representando los días por pronóstico. En el caso de la temperatura se utilizan las estaciones meteorológicas presentes en la base de datos de la INIA. En el Anexo B los estadísticos correspondientes de todos los coeficientes mencionados para la evaluación de

precipitación y temperatura.

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (4.6)$$

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i - y_i \quad (4.7)$$

Para los datos históricos de ERA-5, se calculan los mismos coeficientes de Bias, RMSE y Correlación de Pearson, pero en este caso a escala diaria dada la gran cantidad de registros a evaluar, desde 2012 hasta 2023. A diferencia de los pronósticos de WRF-SMN, se evalúan dos estaciones por píxel, ya que estos productos poseen una menor resolución horizontal (0,25°). Cabe destacar la poca disponibilidad de estaciones dentro de las cuencas de estudio, lo que genera que en el caso de ERA-5, solo se evalúen con cuatro estaciones.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de cada pronóstico de WRF-SMN y su evolución en el tiempo, se calcula el error por hora de adelanto de la precipitación y la temperatura en relación a las observaciones, utilizando la ecuación 4.7. En el caso de la precipitación, se determina el error de la precipitación acumulada por hora, es decir, para $t=i$ [hrs] es la precipitación dentro de las i horas del pronóstico, esto permite una mejor evaluación de su distribución durante los eventos de precipitación y la representatividad de la tormenta.

4.3. Producto observacional de referencia ERA-5

Debido a que el objetivo de este trabajo es evaluar los pronósticos de los productos horarios georreferenciados de WRF-SMN, para poder realizar la modelación de pronósticos de caudal, es necesario utilizar un producto observacional de referencia a escala horaria, en este caso los datos de reanálisis de ERA-5 (Hersbach et al., 2023). De este producto, se descargaron las variables de precipitación y temperatura, entre los rangos latitudinales 35,8-36,7°S y longitudinales 71,9-70,8°O desde el 1 de enero del 2012 hasta el 30 de septiembre del 2023. Antes de integrar estos datos a la modelación, es preciso realizar correcciones en base a las observaciones disponibles, este paso es fundamental, ya que no son observaciones directas.

Para realizar la corrección, se aplica el método planteado por Cressman (1959). Esta utiliza los valores de la precipitación y temperatura de cada píxel en función una o más estaciones dentro de un área de influencia definida. En esta instancia se utilizó una distancia limite de 0,4° debido a la poca cantidad de estaciones meteorológicas en los alrededores de las cuencas. Para aplicar el método, se determina el parámetro ponderador W_{ij} como muestra la ecuación , con i siendo la estación de corrección, j el píxel a corregir, D la distancia limite (en este caso en grados) y d la distancia entre el centroide del píxel y la estación. Luego se calcula el error entre el valor de interés (\hat{y}_i) y la observación (y_i) con la ecuación 4.9.

$$W_{ij} = \frac{D^2 - d_{ij}^2}{D^2 + d_{ij}^2}, d_{ij} < D \quad (4.8)$$

$$E_i = \hat{y}_j - y_i \quad (4.9)$$

Obtenidos los valores anteriores, se calcula la corrección mediante las ecuaciones 4.10 y 4.11, con C_{ij} el valor de corrección por estación y píxel y Y_j el Valor corregido por píxel. En caso de tener disponible solo una estación, se utiliza el valor de corrección C_{ij} y no se divide por la ponderación.

$$C_{ij} = -W_{ij} \cdot E_i \quad (4.10)$$

$$Y_j = \hat{y}_j + \frac{\sum C_{ij}}{\sum W_{ij}} \quad (4.11)$$

Debido a la gran cantidad de datos y que la descarga de observaciones horarias toma una gran cantidad de tiempo, se optó por realizar la corrección a escala diaria. Debido a que la datos diarios de temperatura, no contienen registros para los años 2022 y 2023, se recurrió a utilizar los datos horarios, calculando su promedio. Una vez realizada la corrección diaria se utiliza la ecuación 4.12 para ajustar los valores horarios, con y_h^c el valor horario corregido, y_h^{sc} el valor horario sin corregir, y_d^c el valor diario corregido y y_d^{sc} el valor diario sin corregir.

$$y_h^c = \frac{y_h^{sc}}{y_d^{sc}} \cdot y_d^c \quad (4.12)$$

Se tomaron diversas consideraciones para la corrección. Se aseguró que todos los datos estuvieran en [mm] y [K]. En caso de que el valor observado y/o el corregido fuera igual a 0 y el factor entre y_d^c/y_d^{sc} fuera superior a 5000 (valor arbitrario), se opta por reemplazar el valor no corregido con el valor corregido diario dividido en 24. Para representar este proceso, se graficaron los factores diarios y la diferencia diaria para la precipitación y la temperatura, así como la acumulación y el promedio anual de los valores corregidos y no corregidos.

4.4. Modelación hidrológica

El modelo GR4H es un modelo conceptual concentrado, que simplifica las variables de entrada a una serie por cuenca. Esto quiere decir, que para utilizar los valores corregidos de entrada de ERA-5 o WRF-SMN, se deben obtener las forzantes meteorológicas promediadas espacialmente a escala de cuenca. En el caso de los datos de ERA-5 se calcularon los porcentajes de área por píxel para cada cuenca, mediante Qgis y Rstudio, presentados en la Tabla 4.1 y en la Figura 4.2. Para los pronósticos de WRF-SMN, se emplea directamente el promedio de los píxeles contenidos dentro de las cuencas, debido a su mayor resolución horizontal.

Tabla 4.1: Porcentaje de área de cada cuenca por píxeles de ERA-5

Cuenca	Píxel 1	Píxel 2	Píxel 3	Píxel 4
Área Achibueno [%]	21	25	19	35
Área Longaví [%]	29	29	19	23
Área Perquilauquen [%]	20	74	6	-

Mapa de Disposición de la Grilla ERA-5 Sobre las Cuencas

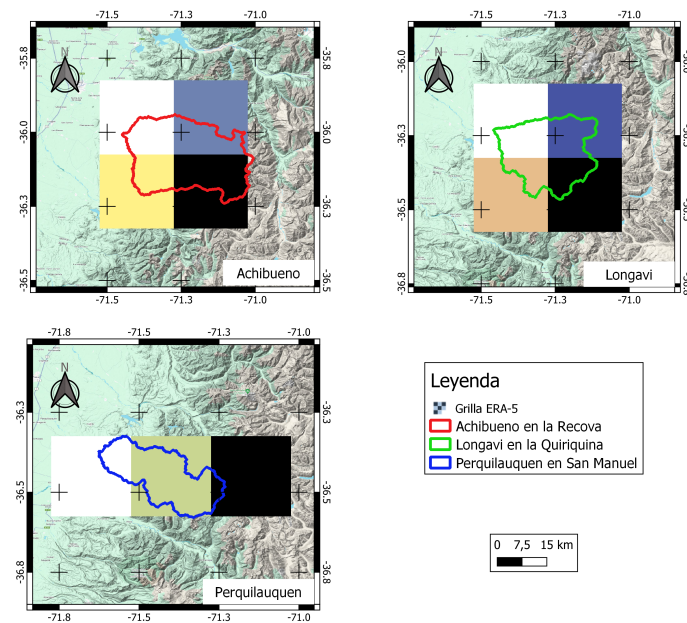


Figura 4.2: Disposición de las grillas sobre las cuencas

4.4.1. Calibración y evaluación

Para realizar la modelación, se necesita obtener los parámetros de del modelo previamente definidos. Puesto que solo se tienen datos de precipitación y temperatura, se procede a calcular la evapotranspiración horaria acorde a Oudin et al. (2005), función incluida en los paquetes de airGR de GR4H en R. Esta función necesita de la variable de temperatura y la coordenada de Latitud de la cuenca. Obtenidas las forzantes necesarias, se procede a calibrar el modelo con distintos periodos de calibración y evaluación, se definieron cuatro alternativas con un periodo de seis años para la calibración y dos para la evaluación, en base a los 10 años descargados de ERA-5 y de observaciones.

Tabla 4.2: Periodos de calibración y evaluación por alternativa

Alternativa	Calibración	Evaluación
Periodo 1	01/04/14 - 31/03/20	01/04/21 - 30/09/23
Periodo 2	01/04/15 - 31/03/21	01/04/21 - 30/09/23
Periodo 3	01/04/16 - 31/03/22	01/04/14 - 31/03/16
Periodo 4	01/04/17 - 30/09/23	01/04/15 - 31/03/17

Para estimar los parámetros óptimos resultantes de las alternativas, se calcularon distintos coeficientes de desempeño, NSE (Nash and Sutcliffe, 1970), RMSE y KGE (Gupta et al., 2009). El coeficiente NSE mide el rendimiento en relación a las observaciones, siendo 1 el valor máximo y óptimo, este se representa por la ecuación 4.13, con \hat{y}_i el valor a evaluar, y_i el valor observado y \bar{y} el valor observado promedio. El coeficiente KGE es similar al NSE, pero en su lugar considera el sesgo y la variabilidad, su calculo se

presenta en la ecuación 4.14, con $\frac{\sigma_s}{\sigma_o}$ la razón entre la desviación estándar de los valores a evaluar y los observados, r la correlación de Pearson y $\frac{\mu_s}{\mu_o}$ la razón entre las medias de los valores a evaluar y los observados.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4.13)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2} \quad (4.14)$$

Para complementar la evaluación de las alternativas, se calcula la curva de duración y ciclo anual de cada periodo. En cada una estas figuras se determinaron distintos coeficientes, para evaluar el rendimiento en la representación anual de la escorrentía y de sus magnitudes acorde a la probabilidad de excedencia. En el caso del ciclo anual, se calcula un promedio por cada hora de los 365 días del año, desde el 2012 hasta el 2023 y luego se calculan los coeficientes NSE, KGE, RMSE, pBias y R^2 . Este último se presenta en la ecuación 4.15, con σ la varianza.

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma_y^2} \quad (4.15)$$

Para la curvas de duración, se calcularon los siguientes coeficientes presentados en las ecuaciones 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 según Yilmaz et al. (2008). En estas, $\%BiasRR$ representa el sesgo en las mediciones, $\%BiasFMS$ el sesgo en el flujo máximo en percentiles específicos como el 20% o 70%, $\%BiasFHV$ el sesgo en la representación de flujos altos con $h=1,2...H$ índices para probabilidad de excedencia menor a 0,02 y $\%BiasFLV$, el sesgo en los flujos bajos con $l=1,2...L$ para probabilidades de excedencia entre 0,7 y 1.

$$\%BiasRR = \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum Q_{obs}} \cdot 100 \quad (4.16)$$

$$\%BiasFMS = \left(\frac{\log(Q_{20,sim}) - \log(Q_{70,sim})}{\log(Q_{20,obs}) - \log(Q_{70,obs})} - 1 \right) \cdot 100 \quad (4.17)$$

$$\%BiasFHV = \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum Q_{obs}} \cdot 100 \quad (4.18)$$

$$\%BiasFLV = -100 \cdot \frac{\sum(\log(Q_{sim,l}) - \log(Q_{sim,L})) - \sum(\log(Q_{obs,l}) - \log(Q_{obs,L}))}{\sum(\log(Q_{obs,l}) - \log(Q_{obs,L}))} \quad (4.19)$$

4.4.2. Generación de pronósticos de caudales con datos WRF-SMN

Seleccionado el periodo de calibración y los parámetros correspondientes, se procede a modelar utilizando los datos corregidos por observaciones de ERA-5 y los pronósticos de WRF-SMN. Para esto, se establece un año de ajuste o "Warm up", desde el 1 de abril del 2019 hasta el 31 de marzo del 2020 con los datos de ERA-5. De esta forma resultan series de caudales desde el año 2020 hasta generación de pronósticos con los datos de WRF-SMN del año 2022 y 2023. Los caudales pronosticados, se evalúan por medio de los coeficientes NSE, pBias, RMSE y R^2 , exclusivamente para las horas correspondientes

a cada pronósticos. En la Figura 4.3 se presenta un diagrama de una modelación tipo.

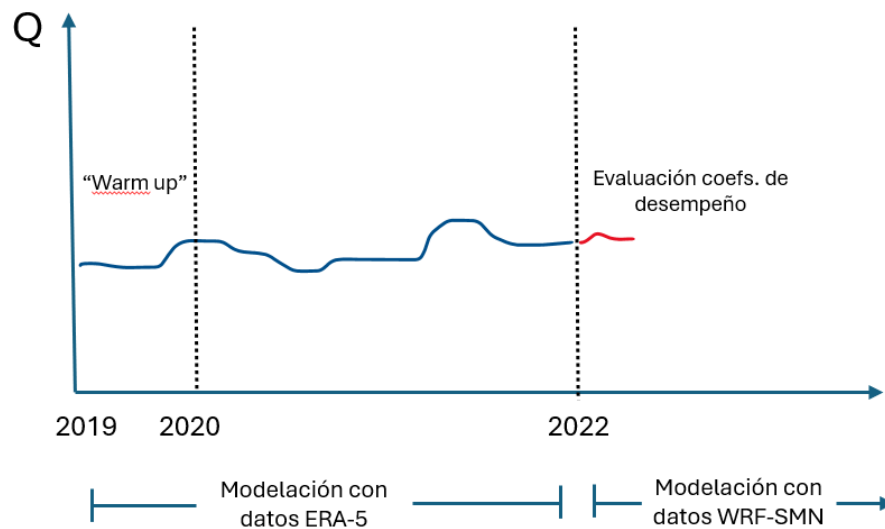


Figura 4.3: Esquema de los resultados de la modelación en base a un pronóstico WRF-SMN.

Para la evaluación de los coeficientes de desempeño, se adoptó un enfoque orientado a la aplicabilidad en eventos de crecida. Por ello, se establece el criterio de que el caudal observado debe superar al caudal base de la cuenca, para definir estos eventos. Para su aplicación, se define un caudal base mensual utilizando la función `gr_baseflow` del paquete `'grwat'` de R, basado en el método de Lyne and Hollick (1979). Esta función calcula el caudal base para cada valor de la serie temporal, aplicándose a las observaciones desde el 1 de enero del 2012 hasta el 31 de marzo del 2022 y obteniendo el promedio mensual, lo que da como resultado 12 valores, como se muestra en la Tabla 5.1 del Anexo E. Es importante señalar que no se consideran las fechas de 2022 y 2023, ya que forman parte del periodo de estudio.

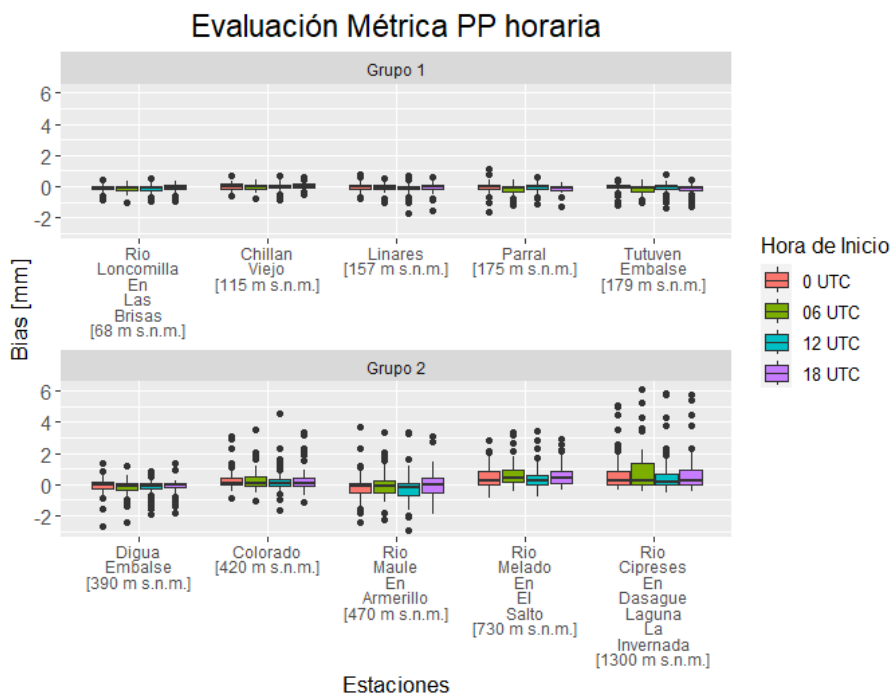
Como última estrategia para evaluar la aplicabilidad de WRF-SMN, se calcula el error por hora de adelanto entre los pronósticos generados con WRF-SMN, en base a dos series de caudales: las observaciones y la modelación utilizando solamente las forzantes de ERA-5. Además, para realizar un análisis más detallado, se extraen dos de los mayores eventos de crecida del año 2022 y 2023, con tal de examinar el comportamiento de los pronósticos ante situaciones extremas.

Capítulo 5: Resultados

El presente capítulo presenta los resultados gráficos de la evaluación de las forzantes meteorológicas del modelo WRF-SMN y la modelación de caudales con GR4H + CemaNeige, así como la corrección de datos horarios de ERA-5. Se calcularon coeficientes de desempeño, incluyendo: NSE, KGE, pBias, RMSE, R^2 , Correlación de Pearson y errores en formato boxplot, además de mapas, gráficos de barras y área sombreada en base a 300 pronósticos.

5.1. Evaluación de forzantes meteorológicas

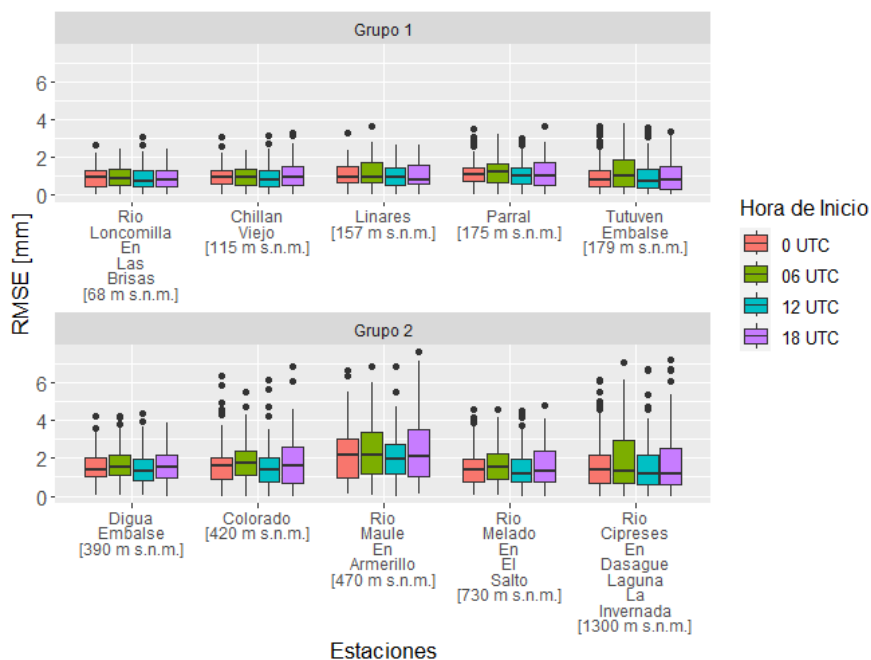
La Figura 5.1 (a), (b) y (c) muestra el primer análisis del trabajo, graficando la distribución de los índices calculados para la precipitación de los pronósticos WRF-SMN, para 10 estaciones dentro del dominio, ordenados de menor a mayor elevación. Los resultados están separados según la hora de inicio de los pronósticos, aunque no se observa una variación significativa en la distribución en función de esta segmentación. No obstante, si se observa un cambio según la altitud, aumentando la distribución del Sesgo y RMSE sobre los 400 [m s.n.m.]. El sesgo aumenta de 2 hasta 6 [mm/hr] máximos, con tendencia a sobreestimar. El RMSE fluctúa alrededor de los 2 [mm/hr], alcanzando máximos de 8 [mm/hr]. Por su parte, la correlación de Pearson presenta valores en torno a los 0,4-0,5 para todas las estaciones.



(a) BIAS/Sesgo Precipitación.

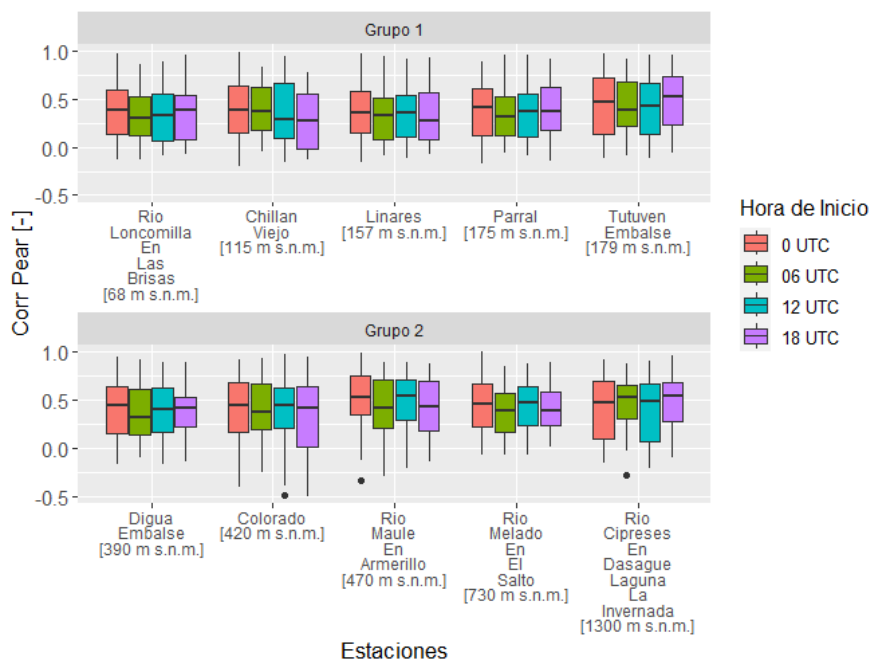
Figura 5.1: Distribución de coeficientes de desempeño para la precipitación por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico WRF-SMN. Cada boxplot representa los N pronósticos horarios en cada estación.

Evaluación Métrica PP horaria



(b) RMSE Precipitación.

Evaluación Métrica PP horaria

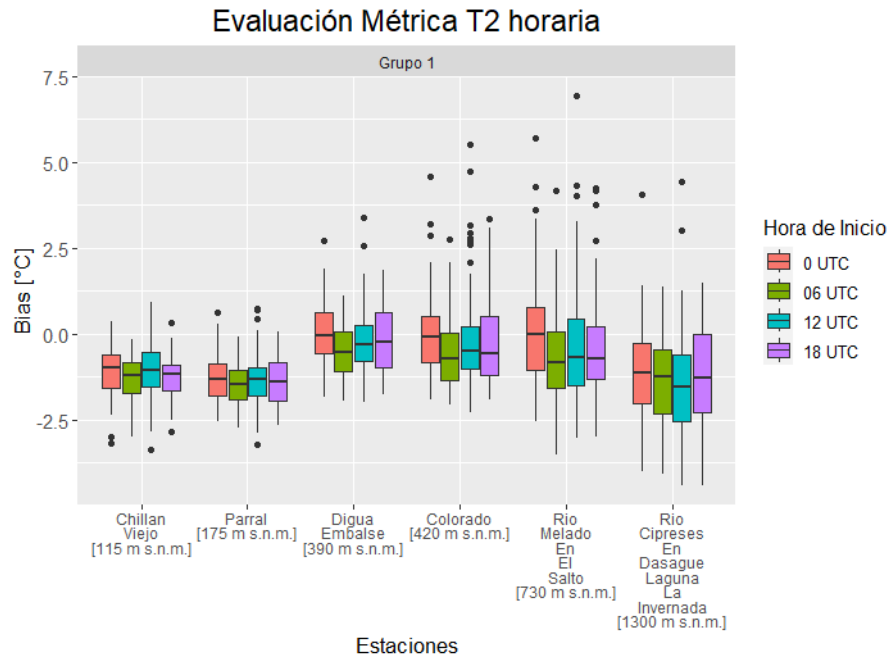


(c) Correlación de Pearson Precipitación.

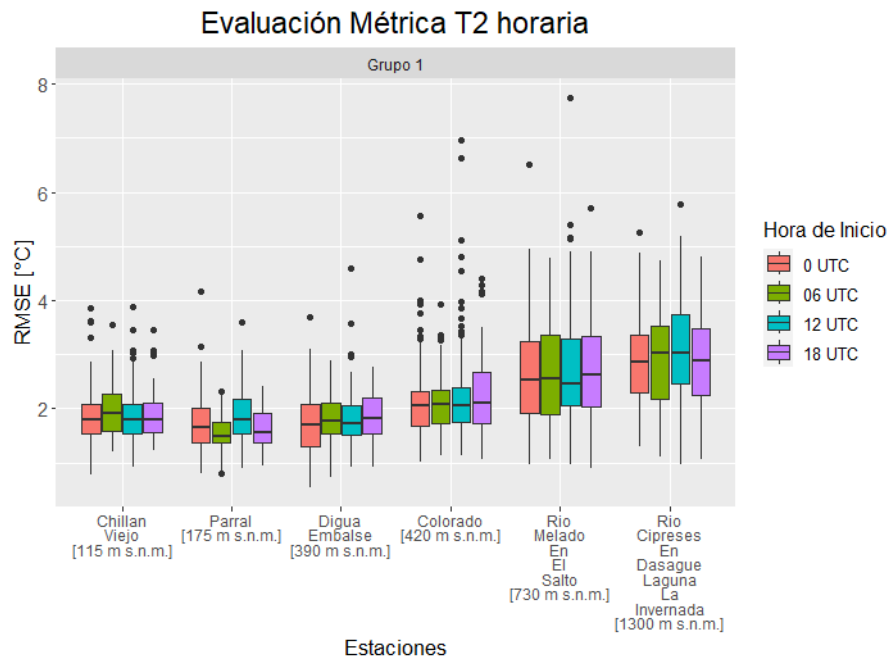
Figura 5.1: (Cont.) Distribución de coeficientes de desempeño para la precipitación por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Cada boxplot representa los N pronósticos horarios en cada estación.

En la Figura 5.2 (a), (b) y (c) se presentan los mismos coeficientes de desempeño para la temperatura a dos metros. En este caso, se consideran seis estaciones en vez de diez. Al igual que la precipitación se observa una mayor variación en los coeficientes en relación con la altitud que con la hora de inicio,

aunque en este caso tiende a subestimar los valores, como indica el Sesgo. Las estaciones de menor altura presentan RMSE cercano a los 2 [°C], aumentando hasta 3-4 [°C] a elevaciones superiores a 400 [m s.n.m.]. La correlación exhibe una mejora respecto a la precipitación, alcanzando resultados cercanos a 1, especialmente a menos de 400 [m s.n.m.].

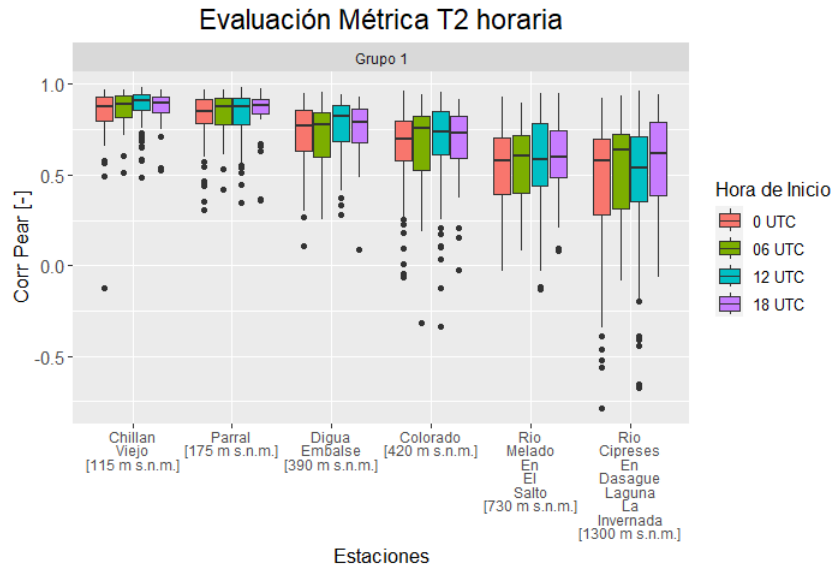


(a) Sesgo/Bias Temperatura.



(b) RMSE T2.

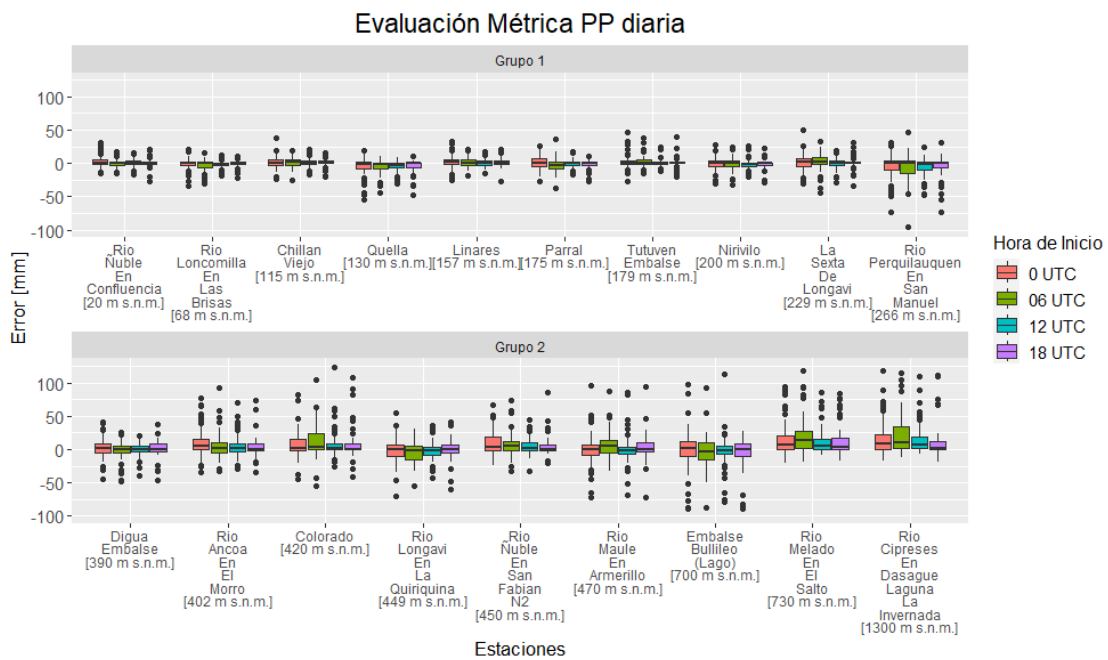
Figura 5.2: Distribución de coeficientes de desempeño para la temperatura a dos metros por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Cada boxplot representa los N pronósticos horarios en cada estación.



(c) Correlación de Pearson T2.

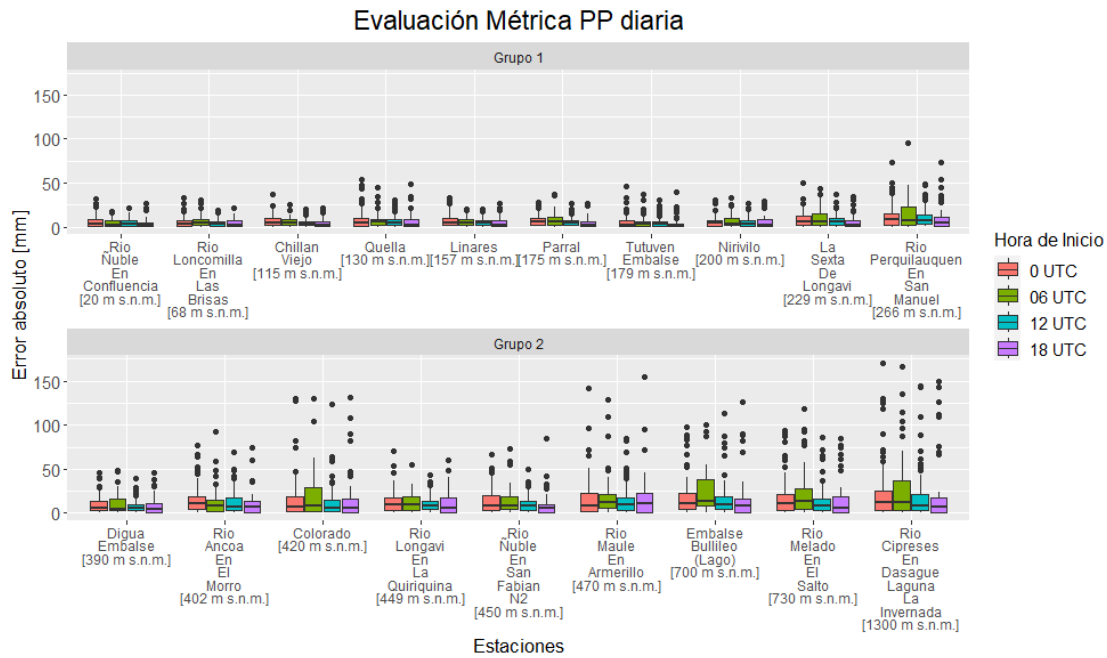
Figura 5.2: (Cont.) Distribución de coeficientes de desempeño para la temperatura a dos metros por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Cada boxplot representa los N pronósticos horarios en cada estación.

A escala diaria, la Figura 5.3 (a) y (b) presenta el error para la precipitación acumulada para todas las estaciones del dominio de estudio, ordenadas de menor a mayor elevación. La precipitación muestra una gran fluctuación del error diario, con valores máximos que oscilan entre los 30 [mm/día] y 170 [mm/día], aumentando a partir de los 400 [m s.n.m.], sobreestimando las observaciones.



(a) Error diario Precipitación.

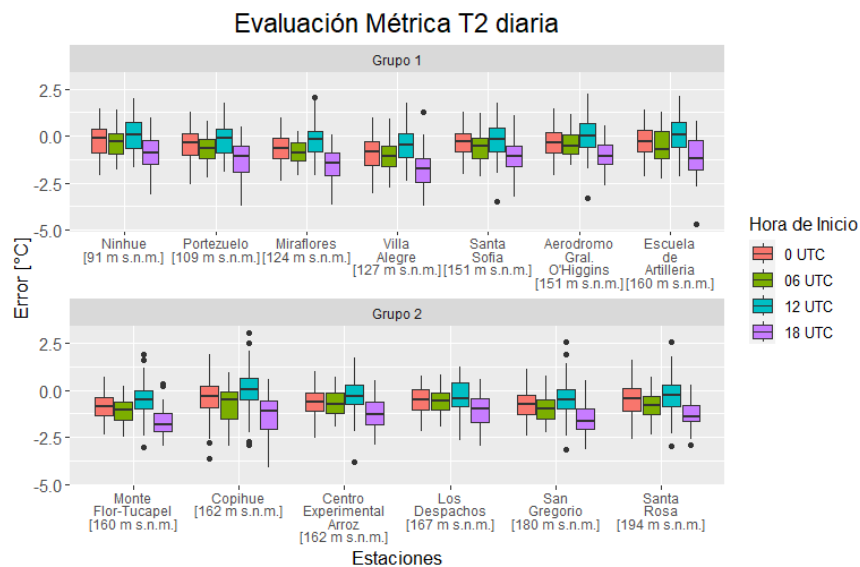
Figura 5.3: Distribución de Errores diarios Pp. por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Boxplot representan N pronósticos horarios en cada estación.



(b) Error absoluto diario Pp.

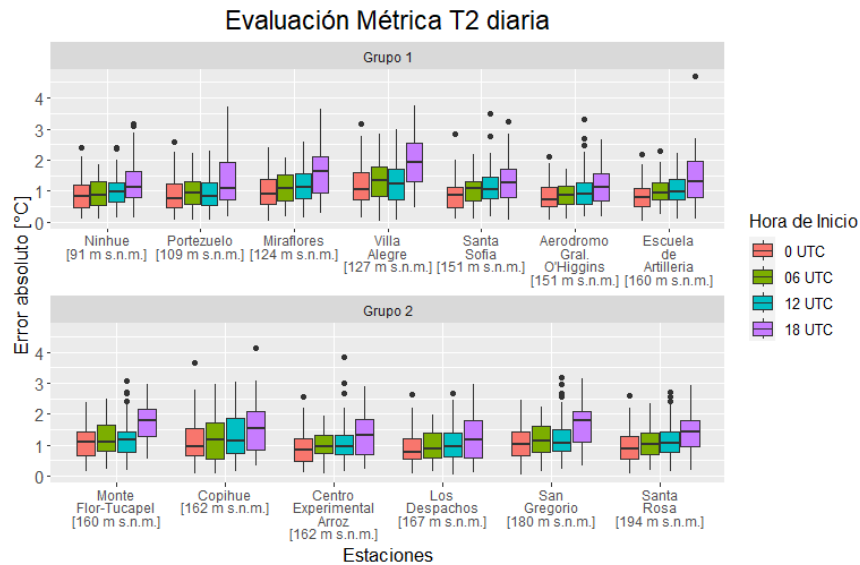
Figura 5.3: (Cont.) Distribución de Errores diarios Pp. por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Boxplots representan N pronósticos horarios en cada estación.

En la Figura 5.4 (a) y (b) se muestra la distribución de los errores diarios para la temperatura a dos metros, utilizando las estaciones de la INIA. En este caso no se observa una diferenciación clara según la altitud, se mantiene el error relativamente constante para todas las estaciones entre los 0 y -2,5 [°C]. Se destaca la hora de inicio de 18 UTC que presenta los mayores errores.



(a) Error diario T2.

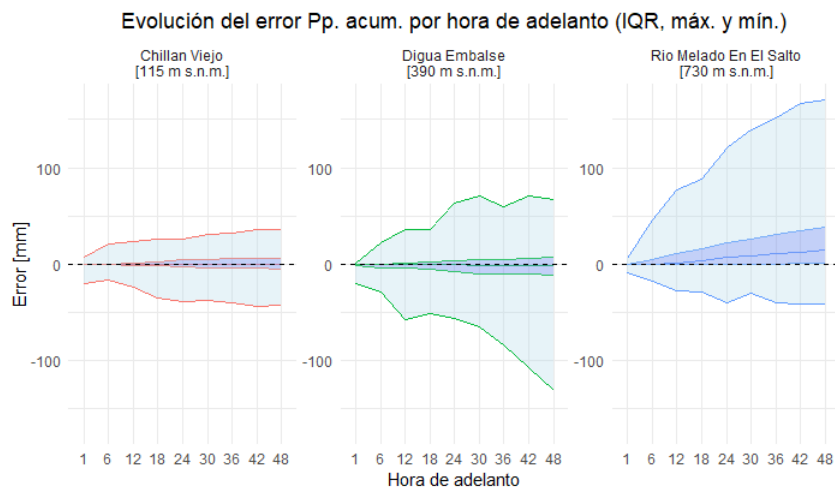
Figura 5.4: Distribución de Errores diarios temperatura por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Boxplots representan N pronósticos horarios en cada estación.



(b) Error absoluto diario T2.

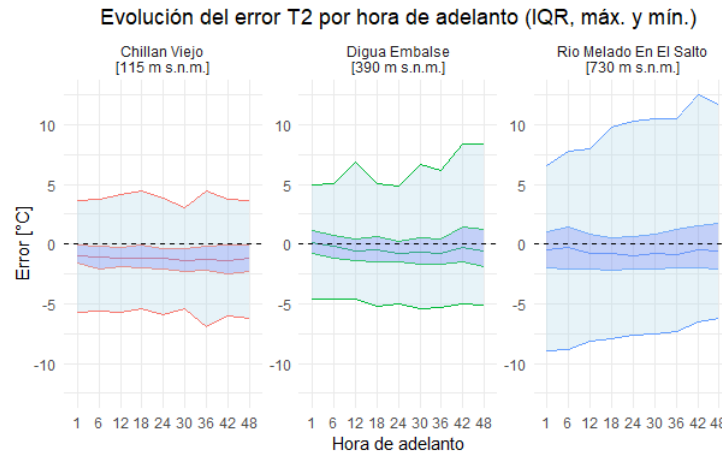
Figura 5.4: (Cont.) Distribución de Errores diarios temperatura por estación meteorológica y hora de inicio de pronóstico. Boxplots representan N pronósticos horarios en cada estación.

En la Figura 5.5 (a) y (b) se grafica los cuantiles 25, 75, máximos y mínimos del error según hora de adelanto para todos los pronósticos para la precipitación acumulada y la temperatura de WRF-SMN. Se puede observar que el error de la precipitación acumulada aumenta con creces según la hora de adelanto, llegando a valores de 100 [mm], especialmente a mayor altitud. En el caso de la temperatura no se observa una tendencia al aumento de su error según la hora de adelanto, aunque si se observa de los valores de IQR (área interior) tiende a subestimar las observaciones.



(a) Error Precipitación Acumulada

Figura 5.5: Error por Hora de Adelanto de los pronóstico para tres estaciones meteorológicas. El área interior representa los cuantiles 25 y 75, y el área exterior representa los máximos y mínimos de los errores.

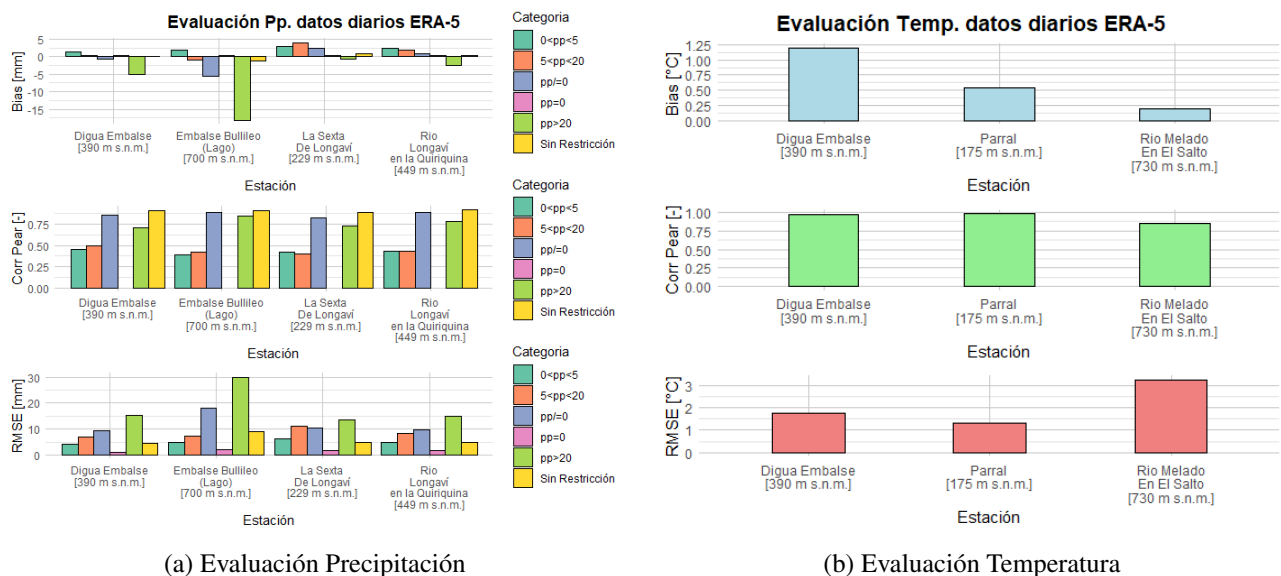


(b) Error Temperatura

Figura 5.5: (Cont.) Error por Hora de Adelanto de los pronóstico para tres estaciones meteorológicas. El área interior representa los cuantiles 25 y 75, y el área exterior representa los máximos y mínimos de los errores.

5.2. Producto observacional de referencia ERA-5

En la Figura 5.6 (a) y (b) se presentan los coeficientes de desempeño para la precipitación y temperatura de los datos históricos de ERA-5 a escala diaria. Para la precipitación, tanto el Bias como el RMSE muestran mayores errores a magnitudes superiores a 20 [mm], especialmente en zonas de mayor altitud, alcanzando un RMSE de hasta 30 [mm]. No obstante, en esas mayores magnitudes se aprecia una mejor correlación que en precipitaciones menores, superando los valores de 0,5. En cuanto a la temperatura, la correlación muestra un rendimiento cercano a 1, el Sesgo indica una sobreestimación alrededor de 1 [°C] sin relación con la altitud, a diferencia del RMSE que aumenta con esta.



(a) Evaluación Precipitación

(b) Evaluación Temperatura

Figura 5.6: Evaluación de datos ERA-5 brutos

De esta manera, se procede a realizar la correcciones de los datos de ERA-5 acorde a la metodología. Con tal de observar el cambio post-corrección, en la Figura 5.7 (a), (b) y (c) y la Figura 5.8 (a), (b) y (c) se presentan el promedio anual de la precipitación y temperatura, junto con la diferencia entre la corrección. En el Anexo C se presentan los valores por año no corregidos y corregidos, así como también mapas de los pesos que contienen cada estación sobre los pixel a corregir. De la Figura 5.7 se aprecia que la precipitación anual oscila entre los 1300 y 1600 [mm] y la corrección aumenta estos valores hasta un 10-15%. De la Figura 5.8 la temperatura varía entre los 7 y 12 [°C], aumentando hasta 4 [°C] con la corrección, con excepción de Achibueno, donde disminuye en 1 [°C] promedio.

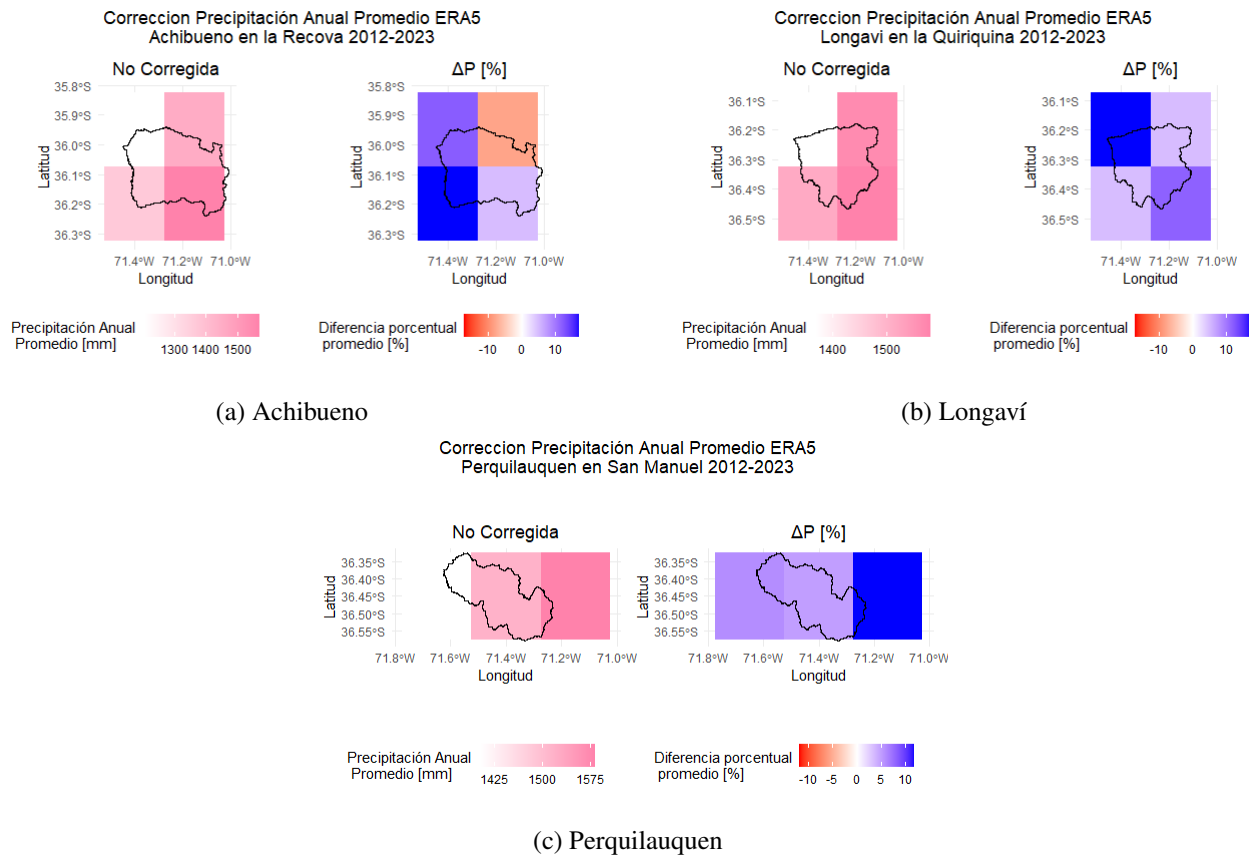


Figura 5.7: Corrección de Precipitación para el periodo de 2012-2023

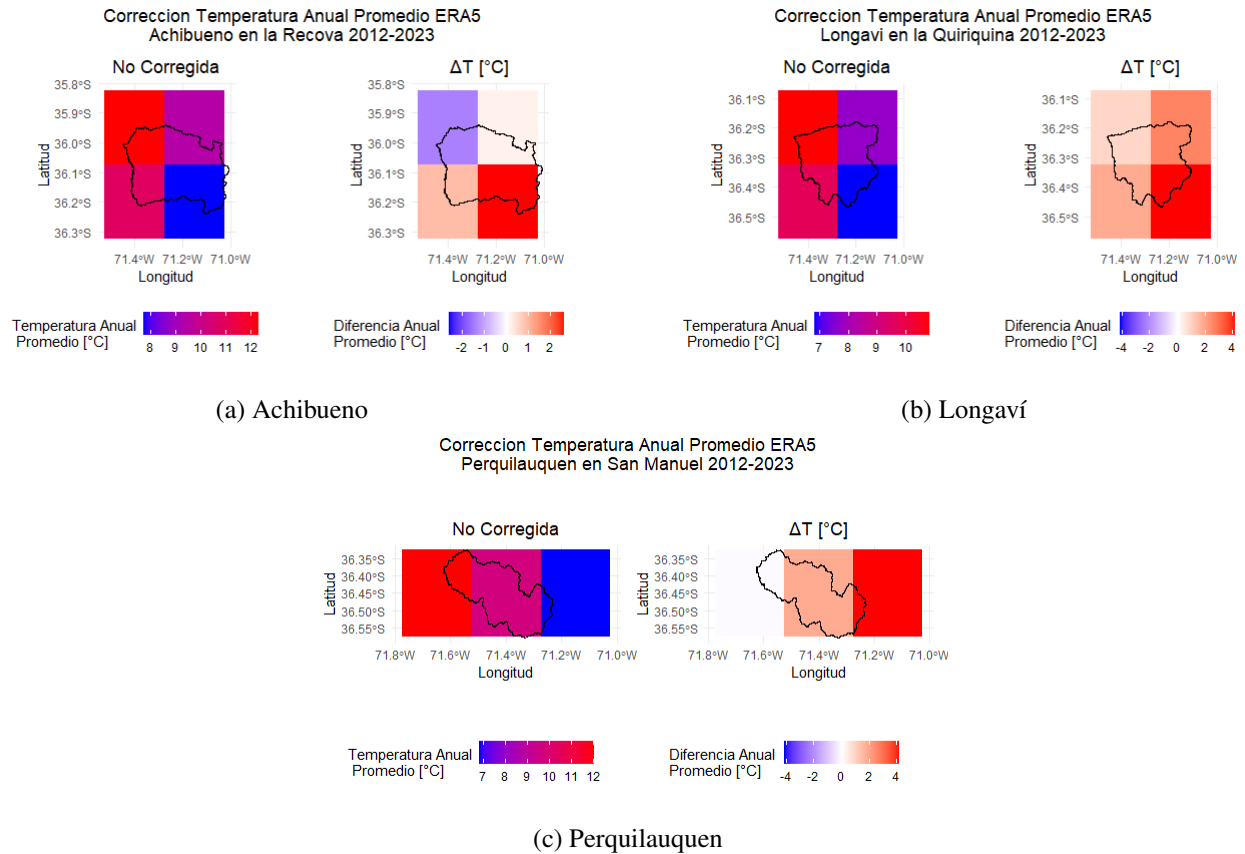


Figura 5.8: Corrección de Temperatura para el periodo de 2012-2023

5.3. Modelación de caudales

5.3.1. Calibración y evaluación

Tras la corrección de las forzantes de entrada, se lleva a cabo la calibración y evaluación de los parámetros a utilizar en el modelo. La Figura 5.9 presenta los índices calculados para el modelo GR4H y la Figura 5.10 presenta la distancia euclidiana del óptimo, tanto para el modelo GR4H como el GR4J. De esta última, se observa que las mejores alternativas están entre P1 y P4 para los tres índices. Se distingue de la Figura 5.9 que la calibración de P4 entrega un mejor rendimiento que las demás combinaciones, con KGE y NSE cercanos a 1 y RMSE a 0, aunque la evaluación entrega un menor rendimiento. Dado que el periodo P4 calibra dentro de los pronósticos de WRF-SMN, se opta por esta alternativa.

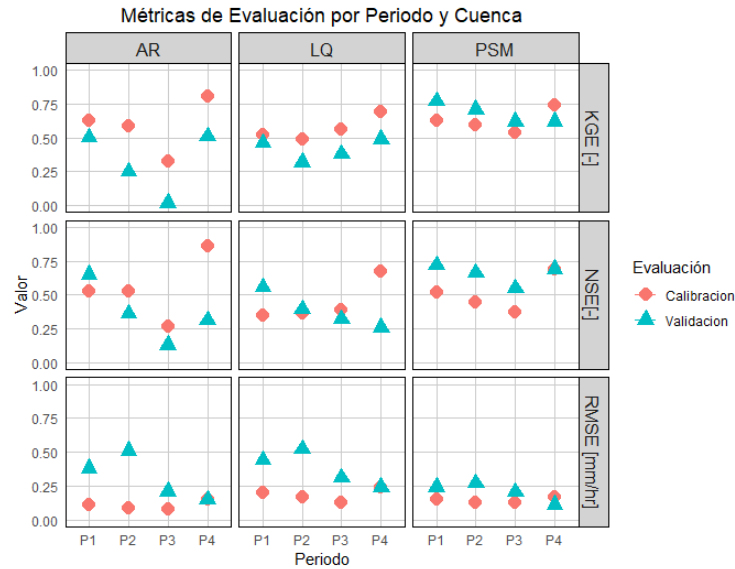


Figura 5.9: Índices de eficiencia por cuenca y por Periodo/Alternativa para calibración y evaluación resultantes del modelo GR4H+CemaNeige.

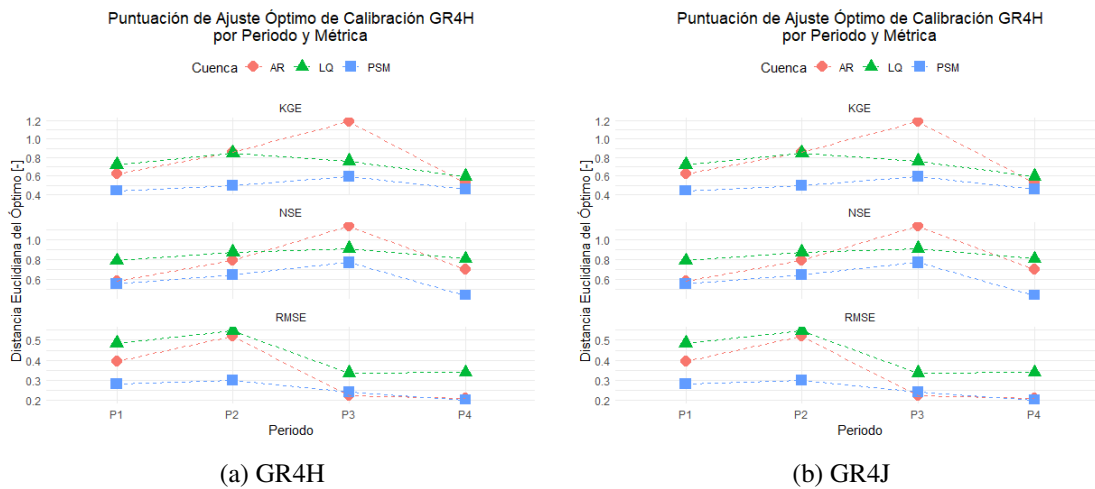
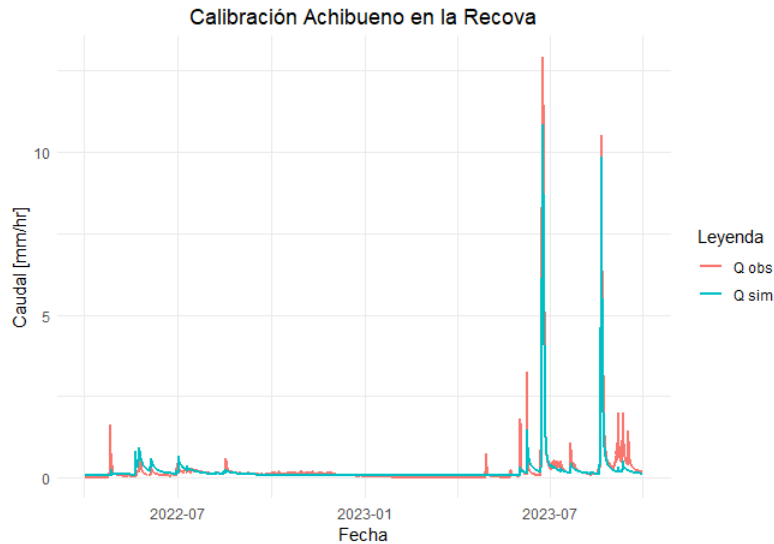
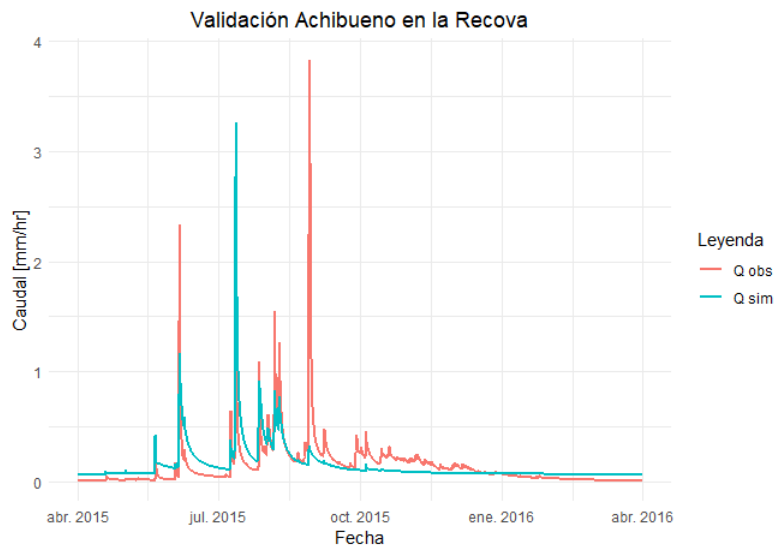


Figura 5.10: Puntaje óptimo para cada coeficiente y cuenca, con 0 el óptimo

En la Figura 5.11 (a) y (b) se presentan una sección de la modelación del periodo de calibración y validación P4 para Achibueno. De estas figuras se refleja que la calibración resulta mejor que la evaluación, con un mala reproducción de la mayor crecida en el año 2015 del periodo de evaluación. En el Anexo D, se muestran las series completas de las modelaciones de calibración y evaluación para P4 en las tres cuencas, además de las respectivas curvas de duración y ciclos anuales con distintos coeficientes de desempeño.



(a) Calibración Achibueno 2022-2023



(b) Evaluación Achibueno 2015

Figura 5.11: Serie modelada de Calibración y Evaluación de alternativa P4 para Achibueno en la Recova. Se presenta desde el año hidrológico 2022-2023 y 2015 respectivamente

Como punto a considerar, se destacan las curvas de duración y ciclos anuales calculados de P4 (Anexo D), en estas se evidencia claramente que el periodo de evaluación presenta un menor desempeño. Para las tres cuencas, los coeficientes calculados de las curvas de duración indican que, el periodo de calibración logra un mejor desempeño del coeficiente %FHV para caudales de mayor magnitud y los de menor magnitud (%FLV), presentan un sesgo cercano al 98%. De las coeficientes de ciclos anuales, se presentan resultados similares a la Figura 5.9, con la calibración obteniendo mejores valores de NSE, RMSE, pBias, KGE y R^2 , manteniéndose la alternativa P4 como la opción óptima.

De esta manera se escoge la alternativa P4 y se calculan los parámetros del modelo para cada cuenca con ayuda del paquete airGR de R. La Tabla 5.1 presenta los parámetros respectivos del modelo a utilizar.

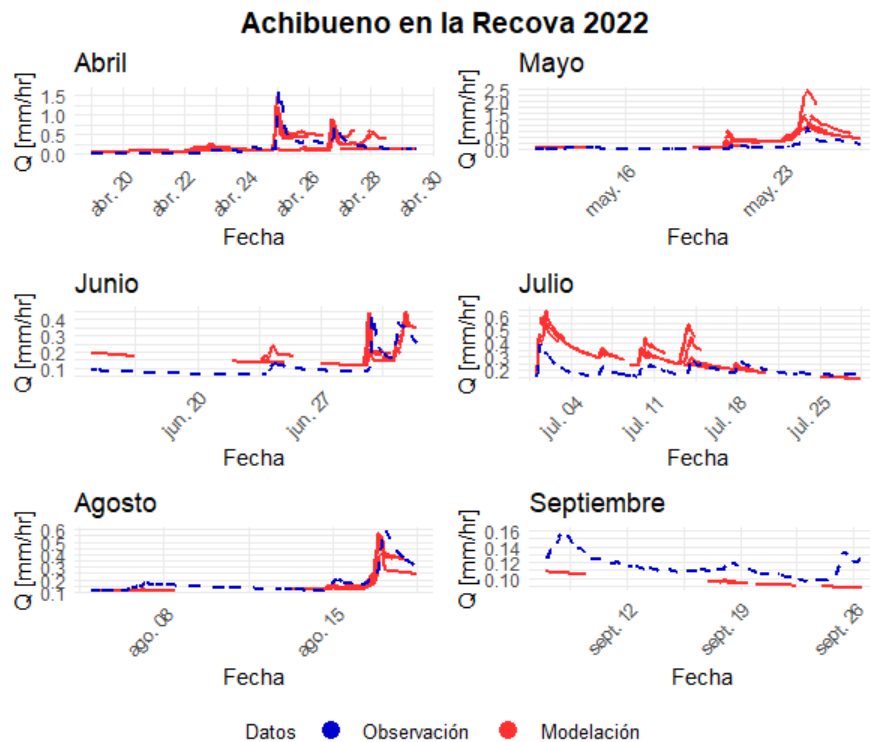
Cabe mencionar que el modelo de airGR no permite un valor menor a 0,01 [mm] para X1, por lo que se utiliza este valor mínimo en los casos en que sea necesario.

Tabla 5.1: Parámetros del modelo GR4H para la alternativa P4 por cuenca

Cuenca	X1 [mm]	X2 [mm/h]	X3 [mm]	X4 [h]	CX1 [-]	CX2 [mm/°C/h]
Achibueno	21,174	6,228	232,014	2,280	0,999	0,004
Longaví	25,107	0,153	198,090	0,500	1,000	0,000
Perquilauquen	0,000	6,452	527,382	3,843	0,995	0,007

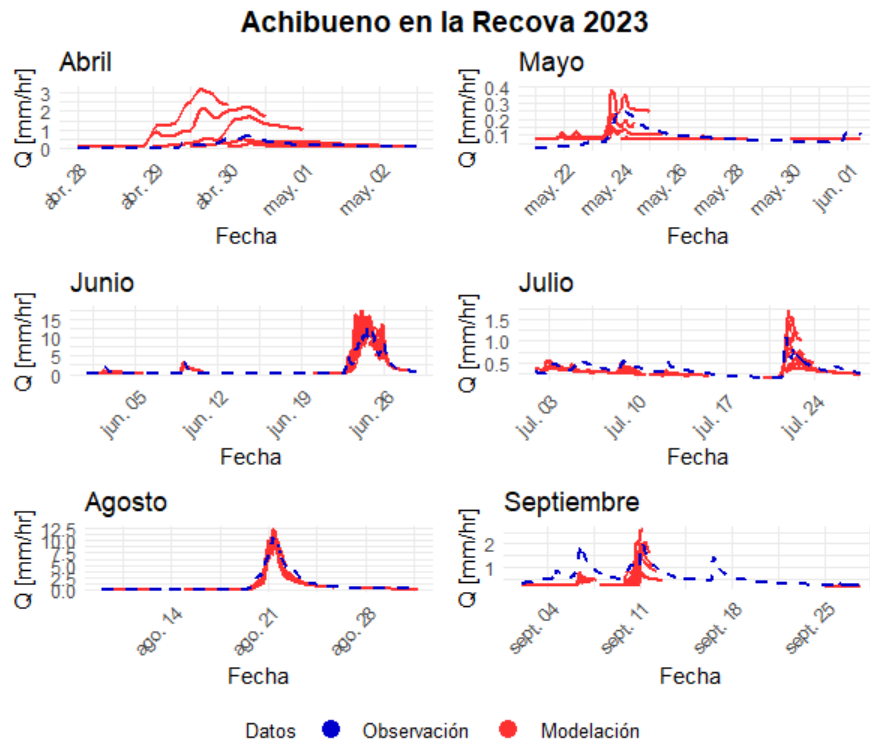
5.3.2. Modelación de pronósticos con WRF-SMN

Seleccionado el periodo de calibración y determinado los parámetros, se modela utilizando los pronósticos de WRF-SMN. En la Figura 5.12 (a) y (b), se presentan todos los caudales pronosticados separados por mes y por año para Achibueno en la Recova. En el Anexo E se muestran las mismas figuras para Longaví y Perquilauquen. De la figura, se destaca que el mes de septiembre del 2022 tiende a subestimar el caudal pronosticado, así como también se apunta a sobreestimar las observaciones del mes de julio. En cuanto al 2023 en general se observa una buena representación entre observación y pronóstico, exceptuando el mes de abril donde existe una mayor fluctuación.



(a) Caudales en Achibueno 2022

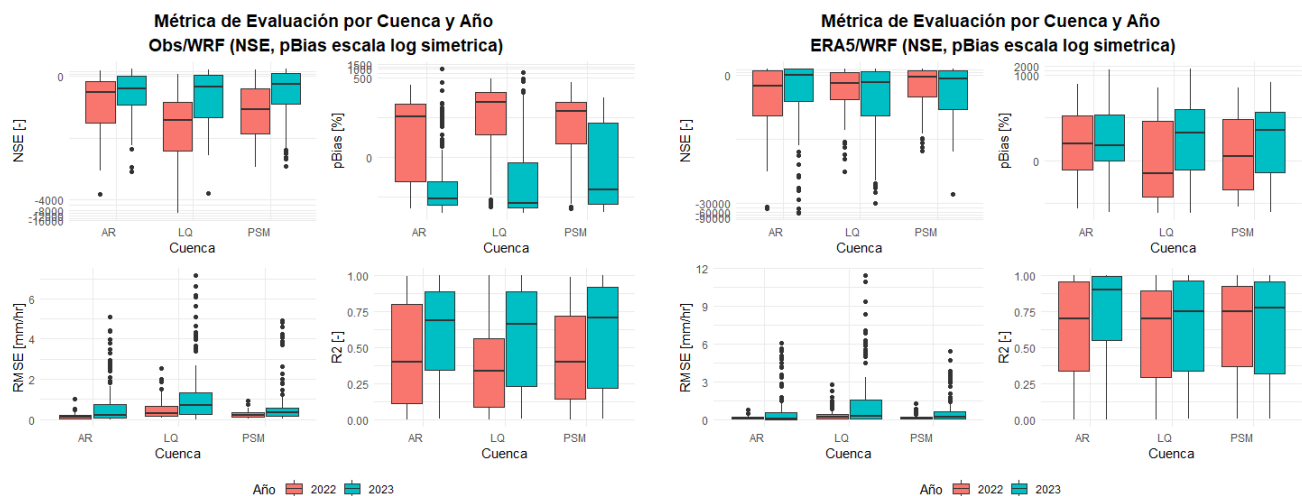
Figura 5.12: Caudales pronosticados en rojo con WRF-SMN por mes, línea azul punteada representa el caudal observado.



(b) Caudales en Achibueno 2023

Figura 5.12: (Cont.) Caudales pronosticados en rojo con WRF-SMN por mes, línea azul punteada representa el caudal observado.

A partir de los datos anteriores se calculan los coeficientes de desempeño especificados. La Figura 5.13 presenta los índices NSE, PBIAS, emse Y R^2 separados por año, entre observación/modelación WRF-SMN y modelación ERA5/modelación WRF-SMN, tomando en cuenta solo los pasos temporales en los que se superan el caudal base. Se distingue que el desempeño es mayoritariamente bajo, indicado por el NSE, que presenta más del 50% de los pronósticos con valores negativos del orden de miles. De manera similar, el pBias muestra una gran discrepancia, tanto para las observaciones como la modelación con ERA-5. De las observaciones (figura (a)) se observa una tendencia a sobreestimar en el año 2022 y a subestimar para el año 2023. De la figura (b), se observa una mayor diferenciación en comparación con las observaciones. Se tiende a sobreestimar los valores, pero obteniendo una mejor correlación en general. No obstante, el coeficiente NSE baja su rendimiento respecto a la figura (a).



(a) Índices entre observaciones y pronósticos generados con WRF-SMN

(b) Índices entre caudal modelado con ERA-5 y pronósticos generados con WRF-SMN

Figura 5.13: Coeficientes de desempeño por año para los caudales de las tres cuencas. AR representa la cuenca de Achibueno en la Recova, LQ es Longaví en la Quiriquina y PSM es Perquilauquen en San Manuel.

De la Figura 5.13 se observa un muy bajo desempeño del coeficiente NSE. Sin embargo un porcentaje de las pronósticos generados, correspondientes a las grandes crecidas del año 2023, indicaron un mejor desempeño con valores superiores a 0. Estos valores se separaron y se calcularon estadísticos como aparece en la Tabla 5.2, de esta se aprecia que un 18,6% del total de pronósticos presentan valores de NSE mayor a 0, con una media entre los valores 0,4 y 0,5.

Tabla 5.2: Estadísticos calculados para subconjunto de NSE>0, para cada cuenca entre observaciones y WRF-SMN

NSE [-]	Achibueno en la Recova	Longavi en la Quiriquina	Perquilauquen en San Manuel
Max	0,97	0,90	0,94
Min	0,02	0,01	0,07
Media	0,47	0,42	0,52
Mediana	0,41	0,37	0,52
Desviación	0,29	0,28	0,24
Cantidad de pronosticos	56	41	71

Debido al hallazgo anterior, en la Figura 5.14 (a) y (b) se grafican dos de los casos específicos, en 2022 y 2023, donde se presentaron las mayores crecidas de caudal. En el Anexo E en la Figura 5.2 se presenta las mismas tormentas para las cuencas de Longaví y Perquilauquen. El año 2022 exhibe las principales diferencias entre las series, donde los datos de ERA-5 fallan al replicar la crecida de la tormenta, no así los datos de WRF-SMN que llegan a acercarse más a las observaciones, aunque sin igualarse a estas. El

año 2023 muestra un mejor rendimiento que el 2022, tanto para WRF-SMN como ERA-5, para todos los pronósticos, reflejando una mejor modelación para los grandes crecidas y el pequeño porcentaje de los resultados de la Tabla 5.2. Los pronósticos muestran una leve sobreestimación de las observaciones, aunque durante la fase final de la crecida se aproximan más a la modelación de ERA-5.

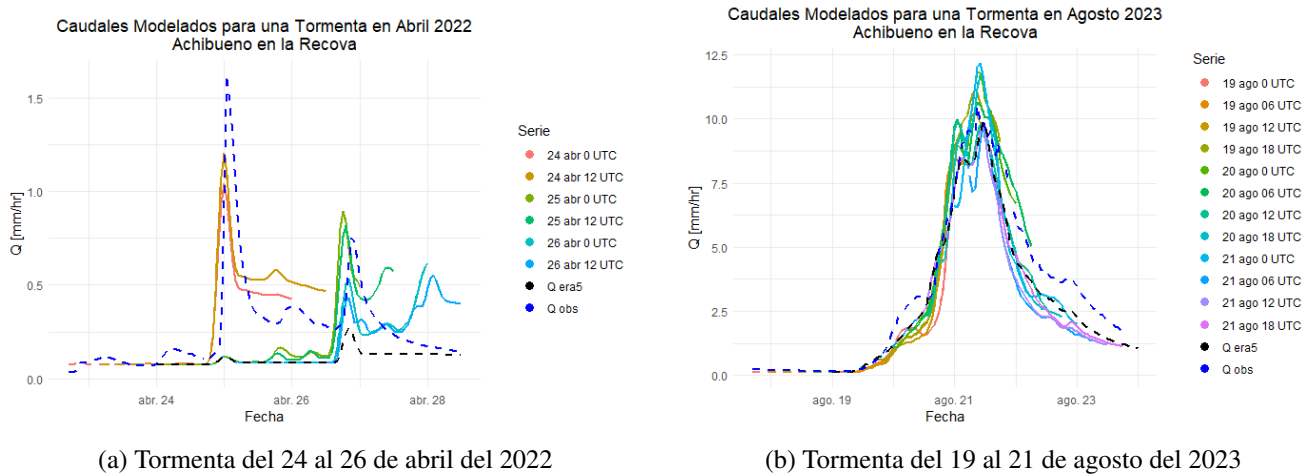


Figura 5.14: Modelación de pronósticos para las mayores tormentas de cada año en Achibueno en la Recova. Línea azul representa las observaciones y la negra el caudal utilizando solo el producto de ERA-5.

Finalmente en la Figura 5.15 se muestra el error por hora de adelanto entre pronósticos de caudal generados y los caudales modelados solo con las forzantes meteorológicas de ERA-5. En el Anexo E se presenta la misma Figura pero con los valores máximos y mínimos. Al igual que la Figura 5.5 de error por hora de adelanto para variables meteorológicas, el error aumenta con la hora, con una inclinación a sobreestimar los caudales de la modelación de ERA-5.

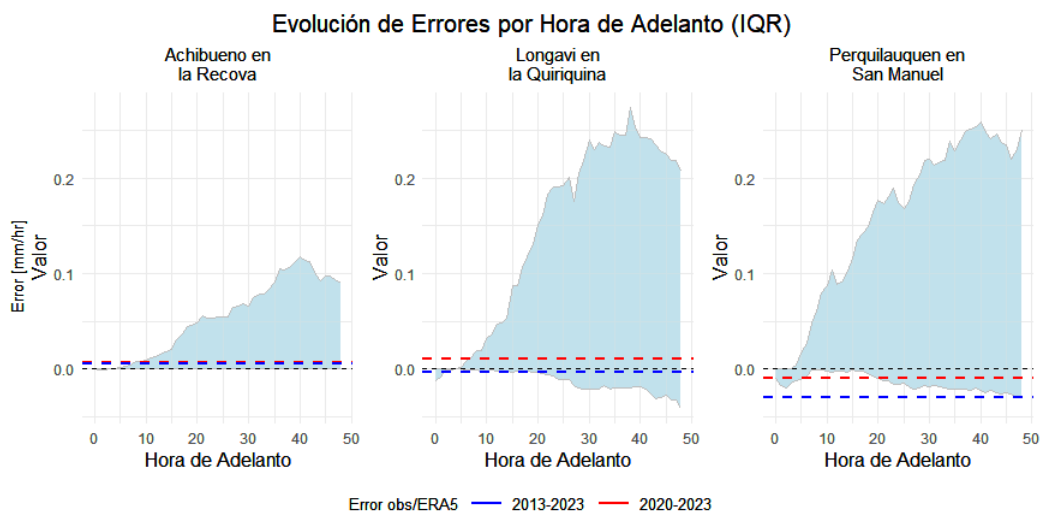


Figura 5.15: Error por Hora de Adelanto para las tres estaciones fluviométricas. Área sombreada representa cuantiles 25 y 75, línea punteada azul es el error promedio entre las observaciones y la modelación ERA-5 entre 2013 y 2023, la línea roja es el error promedio entre 2020 y 2023.

Capítulo 6: Discusión

6.1. Evaluación de pronósticos WRF-SMN

La temperatura presentó un coeficiente RMSE distribuido entre 1 y 4 [°C], resultando de forma cercana con el estudio de WRF-SMN en Argentina de García Skabar et al. (2018) (que se evaluó en estaciones meteorológicas de Chile, Argentina, Uruguay, Brasil y Paraguay), el cual marcó un RMSE entre los 2 y 3,2 [°C]. A diferencia de este estudio, donde el Sesgo indicó una sobreestimación de las observaciones en menos de 2 [°C], los resultados mostraron una subestimación de las observaciones, entre 0 y -2,5 [°C]. Para ambos índices se observó un menor desempeño a medida que aumenta la altitud de la evaluación.

Para la precipitación, el valor del RMSE y el Sesgo resultan menores a 2 [mm/hr], con el último entregando valores más cercanos a 0. En general no se observa una tendencia a subestimar o sobreestimar en todas las estaciones meteorológicas, exceptuando aquellas de mayor altura que superan los 400 [m s.n.m.], con una sesgo húmedo máximo de 6 [mm/hr]. Comparando con el estudio de WRF-SMN de García Skabar et al. (2018), se aprecia la misma inclinación a sobreestimar, pero en menor magnitud con valores menores a 1,6 [mm/hr]. A escala diaria, la mayoría de las estaciones presentan errores menores a 25 [mm/día], sin embargo, este valor aumenta con la altitud, alcanzando máximos cercanos a los 150 [mm/día]. Estos últimos resultados asemejan al análisis de error por hora de adelanto de precipitación acumulada, con errores que superan los 100 [mm/día] a estaciones sobre 400 [m s.n.m.].

Si bien los resultados de precipitación y temperatura presentan buenos desempeños, existe lugar para mejora, como evidencia el análisis a escala diaria, el cual muestra que la representatividad de tormentas en sí no es tan buena al alcanzar errores superiores a 100 [mm/día]. El estudio tiene distintas fuentes de incertidumbre. Primeramente, la realización de la evaluación comparando un punto de una estación vs un píxel de 4 [km], que a diferencia del estudio en Argentina cuya geografía no está dominada por cordones montañosos, la zona de estudio se encuentra en un sector precordillerano, esto significa que la altitud y los datos de cualquier píxel de WRF-SMN no son completamente representativos, ya que en un mismo píxel la altitud puede variar significativamente. Otro factor importante de mencionar es la disponibilidad de las observaciones, en varias estaciones utilizadas en la evaluación faltaban datos, en especial para la temperatura, variable que pocas estaciones la medían y algunas no registraban sus valores en el periodo de estudio.

Dado la complejidad de pronosticar forzantes meteorológicas en zonas cordilleranas, es importante contar con un modelo adecuado que se ajuste a la zona de interés. En el estudio de Yáñez-Morroni et al. (2018), se analizaron distintas configuraciones de un modelo WRF de resolución horizontal de 6 [km], para un área de topografía compleja cercana a la capital. La mejor configuración (WSM6), entregó sesgos de pronósticos de precipitación entre los 10 [mm/hr], como recomendación se concluyó utilizar métodos geostadísticos para mejorar estos pronósticos. Este último punto se podría implementar en el mismo mo-

delo WRF-SMN o en sus productos para mejorar la reproducción de observaciones.

Por último, es importante destacar que los resultados de los coeficientes de desempeño se separaron según la hora de inicio del pronóstico. En su mayoría no se distingue un efecto sobre la evaluación, excepto para el error de la temperatura a escala diaria, con hora de inicio 18 UTC, la cual presentó la mayor diferenciación. Se intentó analizar si existía alguna relación entre estas series y las observaciones, pero al no encontrar ninguna correlación evidente, se decidió no incluir estos resultados en el trabajo.

6.2. Producto observacional de referencia ERA-5

Dado que se trabajó en escala horaria, se utilizó el producto de reanálisis de ERA-5 para complementar las modelaciones hidrológicas. Este producto tiene una resolución de 0,25°, por lo tanto no es ideal para utilizar como datos de entrada para el modelo hidrológico, en especial en una zona topografía compleja. Si bien se realizó una evaluación de sus datos, esta fue realizada con pocas estaciones, se destaca la estación Embalse Bullileo que mostró, para precipitaciones de gran magnitud (>20 [mm]), un sesgo seco de 15 [mm] y un RMSE de 30 [mm]. Por estas razones, se aplicó la corrección de Cressman (1959), esta resultó en un aumento de la precipitación del producto observacional de hasta 15% y en la temperatura un aumento de hasta 4 [°C]. Es importante mencionar que el método está influenciado por la cantidad de estaciones dentro de la zona de influencia (distancia D). Se escogió un radio de influencia de 0,4°, debido a la poca cantidad de estaciones con observaciones cercanas a las cuencas. Se utilizaron entre 4 y 5 estaciones para la precipitación y solo 1 o 2 para la temperatura (Anexo C). Adicionalmente, se menciona que el método de Cressman no se aplica a los pronósticos WRF-SMN, con el objetivo de evaluar la capacidad de pronóstico de sus productos.

6.3. Pronósticos hidrológicos

Los resultados obtenidos muestran un rendimiento mayormente bajo, aproximadamente solo un 18,6% de los pronósticos alcanzan valores de NSE superiores a 0. En el análisis comparativo con las observaciones (Figura 5.13 (a)), se observa una sobreestimación de los datos para el año 2022, reflejado por el pBias y los gráficos de caudales; en contraste, para el 2023 se observa una ligera subestimación de las observaciones. Estos resultados sugieren que la modelación es más precisa ante caudales de gran magnitud, los cuales se presentaron en el año 2023 con máximos superando los 2.000 [m^3/s], mientras que en 2022 estos alcanzaron hasta 400 [m^3/s]. A pesar del bajo desempeño general, la métrica de RMSE entregó valores menores a 1 [mm/hr] tanto para el 2022 como el año 2023.

En el análisis comparativo con el caudal modelado solo con las forzantes meteorológicas de ERA-5 (Figura 5.13 (b)), se observa una mayor diferenciación respecto a las observaciones. El índice pBias se mantiene similar en los dos años distribuyéndose entre 0 y 1000%, el RMSE aumenta ligeramente, alcanzando máximos entre 3 y 12 [mm/hr]. Además, el coeficiente NSE empeora significativamente, distribuyéndose en valores negativos del orden de los miles. Es relevante destacar lo analizado de la corrección de ERA-5, donde sus datos tienden a subestimar las observaciones. Por tanto, un rendimiento

deficiente con tendencia a sobreestimar los pronósticos en comparación al caudal modelado con ERA-5, puede considerarse positivo en este contexto. Este fenómeno se refleja en la Figura 5.14 (a) de la tormenta del 24 de abril, donde se aprecia una gran diferencia entre el caudal observado y el caudal modelado con ERA-5, mientras que al integrar WRF-SMN esta diferencia se reduce.

Un factor clave que introduce incertidumbre en la modelación, es la calibración. Para calibrar los parámetros del modelo, se utilizaron seis años desde el 2017 hasta el 2023 con la función objetivo NSE, esto es destacable, ya que el año 2023 presenta una diferencia significativa al aumentar considerablemente el caudal observado. Aunque es común emplear la función NSE debido a que su fórmula puede enfatizar los caudales altos, esto puede ser contraproducente. En este caso, la modelación se pudo centrar en los grandes caudales, descuidando los demás años. Dado esto, no siempre es recomendable utilizar métricas como esta, como especifica el estudio de Mizukami et al. (2019), donde señala que al utilizar métricas como NSE o KGE puede resultar en una mala reproducción de los máximos anuales.

Como punto de comparación, Acuña and Pizarro (2023), un estudio similar y más íntegro en 101 cuencas de Chile, utilizó el modelo GR4J+CemaNeige de escala diaria, junto con el producto de CR2met, el cual es un escalamiento en base a observaciones de ERA-Interim, adecuado en Chile. Los resultados fueron significativamente mejores que los de este estudio, con 66-82% de los datos obteniendo coeficientes NSE mayores a 0 en cuencas húmedas, sin una tendencia a subestimar o sobrestimar. Además, Acuña and Pizarro (2023) no empleó directamente los índices NSE o KGE, sino variantes que podrían mejorar la modelación. A partir de esto, se identifican dos posibles mejoras: utilizar otro producto base georreferenciado ajustado directamente a la zona de estudio y optar por una variación que se ajuste a la diferencia entre caudales menores y mayores.

Otro aspecto a mejorar, sería emplear un modelo distinto al concentrado de GR que sea más completo, incorporando otras variables de la cuenca o que utilice datos más completos de la grilla del producto WRF. Por ejemplo, el estudio de Fustos et al. (2022), compara distintos productos escalonados con WRF para una modelación hidrológica, utilizando el modelo Variable Infiltration Capacity (Liang et al., 1994), logrando valores de NSE superiores a 0 en todos los casos. Esto sugiere que el uso de un modelo distinto puede obtener mejores resultados de los pronósticos de WRF-SMN.

En términos generales, los resultados obtenidos indican, en su mayor parte, que existe un desafío para alcanzar pronósticos con alta precisión, especialmente en la estimación de caudales menores. Es importante mencionar que no se realizó pre-procesamiento al ajustar los sesgos de los pronósticos meteorológicos de WRF-SMN, así como tampoco post-procesamiento de los caudales pronosticados para corregir errores, quedando como punto de mejora del estudio. A pesar de esto, la combinación del modelo WRF-SMN con ERA-5 demostró ser efectiva en los pronósticos de caudales en eventos de mayor magnitud, como demuestra las tormentas del año 2023 que presentan valores de NSE mayores a 0, con promedio entre 0,4-0,5.

Capítulo 7: Conclusiones

El presente trabajo evaluó la aplicabilidad de los productos meteorológicos del modelo numérico del tiempo, WRF-SMN, del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina en la modelación de pronósticos de crecidas de caudal en Chile. Se compararon los pronósticos de WRF-SMN en base a estaciones meteorológicas, calculando índices como el sesgo. Luego, con el producto observacional de referencia ERA-5 corregido con observaciones y los pronósticos de WRF-SMN, se calibró e implementó el modelo GR4H+CemaNeige para modelar y pronosticar caudales en los eventos de crecida de 2022 y 2023. La modelación enfrentó desafíos en la precisión en los caudales de menor magnitud, sin embargo para los eventos de mayor magnitud ocurridos en 2023, se presentaron buenos desempeños con valores de NSE mayores a cero.

La evaluación de las variables meteorológicas presentaron un buen desempeño a escala horaria, con valores cercanos a las 2 unidades (mm para la precipitación y °C para la temperatura) para el Sesgo y RMSE, aunque se presenta una disminución en el rendimiento conforme aumenta la elevación. Al evaluar la hora de adelanto los errores de los pronósticos aumentan alcanzando valores de 100 [mm] para la precipitación acumulada y 10 [°C] para la temperatura.

La evaluación de crecidas de caudales afrontó diversos obstáculos. Al trabajar a escala horaria los datos disponibles fueron menores, teniendo que usar el renálisis de ERA-5 como producto de referencia para la modelación, el cual presenta una baja resolución horizontal de 0,25°. La calibración del modelo se vio afectada por el contraste entre los eventos de sequía ocurridos en los últimos años y las crecidas manifestadas en el año 2023, resultando en un bajo rendimiento del modelo en caudales menores, con coeficientes NSE menores a cero. No obstante, dado que la calibración se centró en los eventos del 2023, los caudales de mayor magnitud, que representan el 18,6% del total de los datos, lograron un buen desempeño con una media de NSE entre 0,4 y 0,5.

Aunque el estudio logró modelar y evaluar los eventos de crecida en la región, los resultados muestran que solo un pequeño porcentaje presenta un buen desempeño, lo que indica un margen para mejoras. Se recomienda emplear modelos meteorológicos ajustados específicamente a la zona de estudio, así como utilizar modelos hidrológicos más complejos que consideren variables adicionales o que ofrezcan una mejor discretización de las forzantes de entrada. El conocimiento adquirido en este estudio puede ser relevante para otras regiones con características similares, además de ser de utilidad para otros estudios o proyectos de pronósticos de crecidas, contribuyendo a la confiabilidad de los sistemas de alerta temprana y la gestión eficaz de riesgos hidrológicos en áreas vulnerables.

Bibliografía

- Acuña, P. and Pizarro, A. (2023). Can continuous simulation be used as an alternative for flood regionalisation? a large sample example from Chile. *Journal of Hydrology*, 626:130118.
- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., et al. (2018). The camels-cl dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies—Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11):5817–5846.
- Castro, G. (n.d.). Planilla en Excel que realiza análisis de frecuencia. Extraído del curso de Hidrología.
- Cherif, R., Bouteffeha, M., Gargouri-Ellouze, E., and Eslamian, S. (2023). Hydrologic models classification, calibration, and validation. In *Handbook of Hydroinformatics*, pages 155–168. Elsevier.
- Colbun (2023). ¿qué rol cumplieron los embalses en la reciente emergencia climática? <https://www.colbun.cl/corporativo/sala-de-prensa/newsletter/suministradores/detalle/que-rol-cumplieron-los-embalses-en-la-reciente-emergencia-climatica>.
- CORFO (2024). Alerta hídrica. <https://alertahidrica.com/>.
- Covián, F. and Stowhas, L. (2015). Modelación probabilística de la línea de nieves durante eventos de tormenta entre los 28,5° y 46,5° ls. In *Actas del XXII Congreso de Ingeniería Hidráulica*, Santiago, Chile. Universidad Católica. Trabajo 16.
- Cressman, G. P. (1959). An operational objective analysis system. *Monthly Weather Review*, 87(10):367–374.
- DGA (2024). Datos de precipitación, temperatura y caudales. División de Hidrología, https://snia.mop.gob.cl/dgasat/pages/dgasat_main/dgasat_main.htm, Accedido: [marzo de 2024].
- DGA/DMC (2024). Datos de precipitación y temperatura. Recuperados de Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia - CR2.
- DMC (2024). Servicios climáticos. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/requerimiento/producto/RE5062>.
- DMC/INIA/FDF/AGRICHILE (n.d.). Datos de temperatura. Accedido: [2024]. <https://agrometeorologia.cl/>.
- Espinoza Calderón, C. (2022). Escasez hídrica en Chile: Desafíos de un futuro con menos agua. <https://uchile.cl/noticias/200549/escasez-hidrica-en-chile-desafios-de-un-futuro-con-menos-agua>.
- Fustos, I., del Río, R. A., Artal, O., Alvia, F., and Sepúlveda, H. (2022). Impact on discharge modelling using different spatial and temporal resolution scenarios in south of Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 115:103727.
- García, A. (2007). Medidas estructurales y medidas no estructurales de defensa frente a inundaciones.

- García Skabar, Y., Matsudo, C. M., Sacco, M., Ruiz, J. J., Righetti, S. A., et al. (2018). Implementación modelo de pronóstico numérico wrf.
- Garreaud, R. (1993). Impacto de la variabilidad de la línea de nieve en crecidas invernales en cuencas pluvio-nivales de Chile central. In *XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*, pages 271–285.
- Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in geosciences*, 22:3–11.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2):80–91.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., and Thépaut, J.-N. (2023). Era5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.adbb2d47 (Accedido: [mayo de 2024]).
- Hong, S.-Y. and Lim, J.-O. J. (2006). The wrf single-moment 6-class microphysics scheme (wsm6). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42(2):129–151.
- Infraestructura de Datos Geospaciales Chile (2016). Mapa de elevación digital de la región del Maule. <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/35437/DEM%20Alos%20Palsar%20Regi%C3%B3n%20del%20Maule>, Accedido: [2024].
- JPL, N. (2013). Nasa shuttle radar topography mission global 1 arc second [data set]. <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003>, Accedido: 2024-05-22.
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7):14415–14428.
- Lyne, V. and Hollick, M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. In *Institute of Engineers Australia national conference*, volume 79, pages 89–93. Institute of Engineers Australia Barton, Australia.
- Mathevet, T. (2005). *Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants*. PhD thesis, Doctorat spécialité Sciences de l'eau, ENGREF Paris.
- Mizukami, N., Rakovec, O., Newman, A. J., Clark, M. P., Wood, A. W., Gupta, H. V., and Kumar, R. (2019). On the choice of calibration metrics for “high-flow” estimation using hydrologic models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(6):2601–2614.
- Najafi, H., Shrestha, P. K., Rakovec, O., Apel, H., Vorogushyn, S., Kumar, R., Thober, S., Merz, B., and Samaniego, L. (2024). High-resolution impact-based early warning system for riverine flooding. *Nature communications*, 15(1):3726.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part i—a discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3):282–290.
- NSF National Center for Atmospheric Research (2024). Información recuperada en 2024. <https://www>.

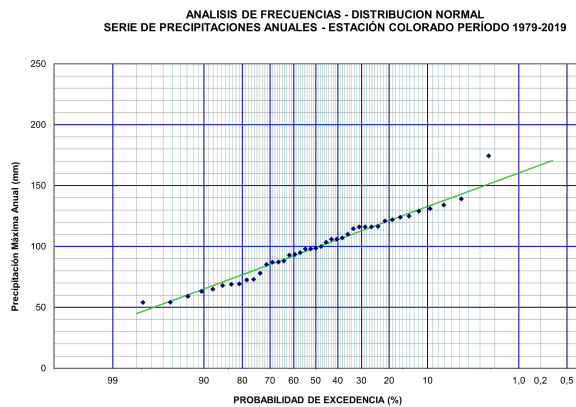
mmm.ucar.edu/models/wrf.

- Ogden, F. L. (2021). *Geohydrology: hydrological modeling*.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of hydrology*, 303(1-4):290–306.
- Pearson, K. (1896). Vii. mathematical contributions to the theory of evolution.—iii. regression, heredity, and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, (187):253–318.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4):275–289.
- Pu, Z. and Kalnay, E. (2019). Numerical weather prediction basics: Models, numerical methods, and data assimilation. *Handbook of hydrometeorological ensemble forecasting*, pages 67–97.
- QGIS.org (2024). Qgis geographic information system. <http://qgis.org>.
- Riquelme, J., Andrade, D., and Guerra, I. (2023). Sistema frontal: Ordenan evacuar tres nuevos sectores del maule y declaran alerta roja en san javier. <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2023/08/20/1104638/sistema-frontal-personas-albergadas-aisladas.html>.
- RStudio Team (2020). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. RStudio, PBC., Boston, MA.
- Rummukainen, M. (2010). State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1):82–96.
- Schumacher, V., Fernández, A., Justino, F., and Comin, A. (2020). Wrf high resolution dynamical downscaling of precipitation for the central andes of chile and argentina. *Frontiers in Earth Science*, 8:328.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J. G., et al. (2008). A description of the advanced research wrf version 3. *NCAR technical note*, 475(125):10–5065.
- SMN (2024). Hi-res weather forecast over argentina. Accedido: Marzo 2024 de [https://registry.opendat a.aws/smn-ar-wrf-dataset](https://registry.opendat.aws/smn-ar-wrf-dataset).
- Valéry, A., Andréassian, V., and Perrin, C. (2014). ‘as simple as possible but not simpler’: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? part 2—sensitivity analysis of the cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of hydrology*, 517:1176–1187.
- Weibull, W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of applied mechanics*.
- Wu, H., Huang, M., Tang, Q., Kirschbaum, D. B., and Ward, P. (2016). Hydrometeorological hazards: monitoring, forecasting, risk assessment, and socioeconomic responses. *Advances in Meteorology*, 2016.
- Yáñez-Morroni, G., Gironás, J., Caneo, M., Delgado, R., and Garreaud, R. (2018). Using the weather

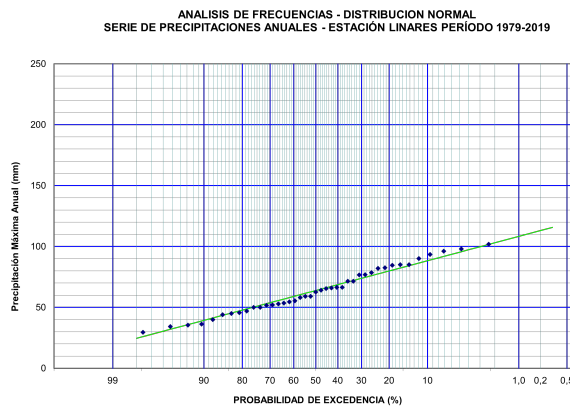
research and forecasting (wrf) model for precipitation forecasting in an andean region with complex topography. *Atmosphere*, 9(8):304.

Yilmaz, K. K., Gupta, H. V., and Wagener, T. (2008). A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the nws distributed hydrologic model. *Water resources research*, 44(9).

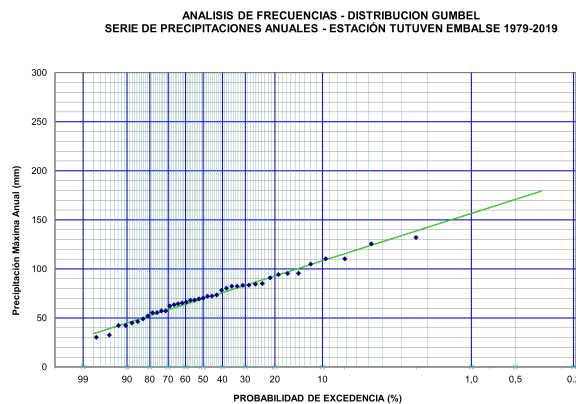
Anexo A: Análisis de frecuencia



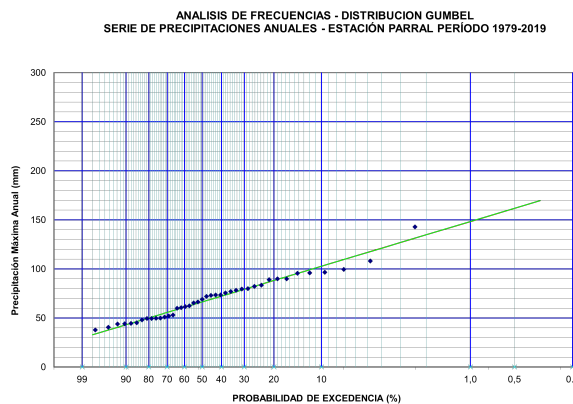
(a) AF Colorado.



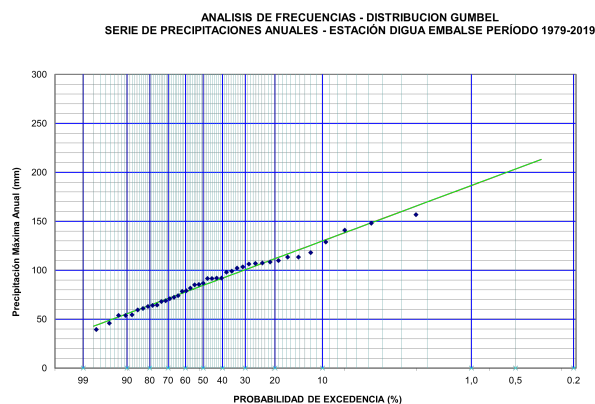
(b) AF Linares



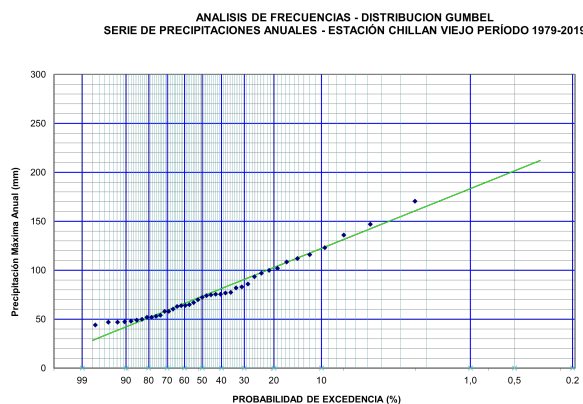
(c) AF Tutuven Embalse



(d) AF Parral

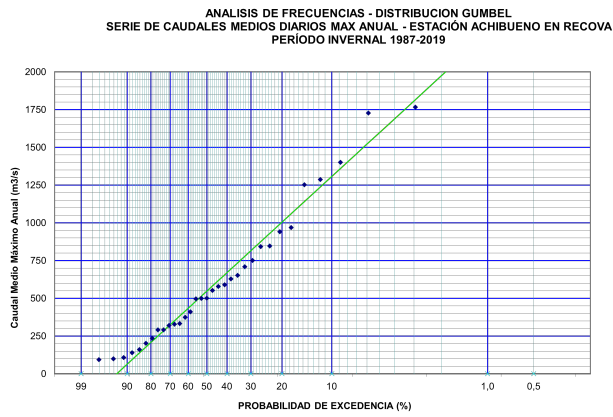


(e) AF Digua Embalse

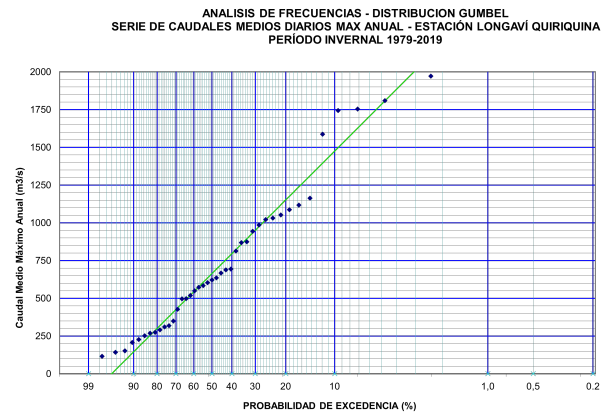


(f) AF Chillán Viejo

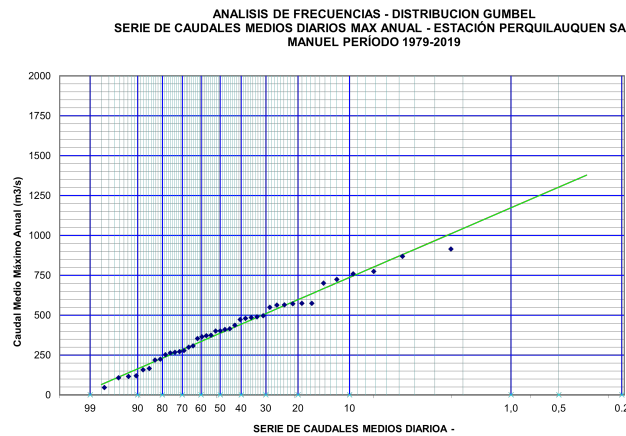
Figura 1.1: Análisis de frecuencia Pp. diaria máx. anual para estaciones meteorológicas arbitrarias. Confección realizada por medio de Excel elaborado por Gabriel Castro (nd)



(a) AF Achibueno en la Recova



(b) AF Longaví en la Quiriquina



(c) AF Perquilauquen en San Manuel

Figura 1.2: Análisis de frecuencia Caudal medio diario máx. anual para estaciones fluviométricas. Confección realizada por medio de Excel elaborado por Gabriel Castro (nd)

Tabla 1.1: Periodos de retorno de precipitación para los días anteriores de los máximos eventos del 2023

Estación	Variable	Dist.	Valor 23/06/23	Periodo de retorno	Valor 20/08/23	Periodo de retorno
Colorado	PP [mm]	Normal	57,8	1,06	41	1,01
Linares		Normal	20,7	1,01	59,7	1,69
Tutuvén emb.		Gumbell	60,2	1,49	108,4	10
Parral		Gumbell	21,2	1,01	40,3	1,07
Digua emb.		Gumbell	65,25	1,27	120,5	7
Chillán Viejo		Gumbell	30,2	1,03	32,6	1,04

Anexo B: Evaluación cuantitativa datos WRF-SMN

Se calculan distintos estadísticos a partir de los resultados obtenidos para los coeficientes de desempeño de los pronósticos descargadas de WRF-SMN.

Tabla 2.1: Evaluación métrica coef. Bías para Precipitación en escala horaria en 2022 y 2023

Bías PP	Loncomilla	Chillan Viejo	Linares	Parral	Tutuven Embalse	Digua Embalse	Colorado	Maule Armerillo	Melado Salto	Rio Cipreses
Máx	0,50	0,72	0,80	1,15	0,81	1,37	4,59	3,66	3,47	6,13
Mín	-1,03	-0,87	-1,71	-1,66	-1,41	-2,68	-1,66	-2,92	-0,85	-0,53
Mediana	-0,06	0,00	-0,04	-0,04	-0,04	-0,05	0,08	-0,13	0,29	0,21
Media	-0,12	-0,01	-0,07	-0,09	-0,12	-0,11	0,26	-0,12	0,50	0,70
Desviación	0,25	0,22	0,30	0,30	0,30	0,48	0,72	0,89	0,71	1,24

Tabla 2.2: Evaluación métrica coef. RMSE para Precipitación en escala horaria en 2022 y 2023

RMSE PP	Loncomilla	Chillan Viejo	Linares	Parral	Tutuven Embalse	Digua Embalse	Colorado	Maule Armerillo	Melado Salto	Rio Cipreses
Máx	3,10	3,30	3,65	3,61	3,80	4,34	6,83	7,61	4,79	7,20
Mín	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mediana	0,83	0,90	0,94	1,07	0,81	1,41	1,55	2,09	1,31	1,29
Media	0,92	0,98	1,06	1,15	1,06	1,57	1,66	2,25	1,56	1,75
Desviación	0,63	0,64	0,68	0,69	0,88	0,90	1,24	1,53	1,09	1,57

Tabla 2.3: Evaluación métrica correlación de Pearson para Precipitación en escala horaria en 2022 y 2023

Corr. Pear PP	Loncomilla	Chillan Viejo	Linares	Parral	Tutuven Embalse	Digua Embalse	Colorado	Maule Armerillo	Melado Salto	Rio Cipreses
Máx	0,98	0,99	0,96	0,95	0,97	0,97	0,99	1,00	0,96	0,97
Mín	-0,50	-0,20	-0,28	-0,17	-0,16	-0,13	-0,34	-0,08	-0,18	-0,12
Mediana	0,44	0,34	0,51	0,41	0,35	0,35	0,50	0,44	0,39	0,47
Media	0,40	0,37	0,43	0,40	0,35	0,35	0,47	0,43	0,37	0,43
Desviación	0,31	0,30	0,31	0,29	0,29	0,28	0,29	0,27	0,28	0,31

Tabla 2.4: Evaluación métrica coef. Bias para Temperatura en escala horaria en 2022 y 2023

Bias T2	Chillan Viejo	Parral	Digua Embalse	Colorado	Melado Salto	Rio Cipreses
Máx	0,99	0,95	0,97	0,99	0,96	0,97
Mín	-0,20	-0,17	-0,13	-0,34	-0,18	-0,12
Mediana	0,34	0,41	0,35	0,50	0,39	0,47
Media	0,37	0,40	0,35	0,47	0,37	0,43
Desviación	0,30	0,29	0,28	0,29	0,28	0,31

Tabla 2.5: Evaluación métrica coef. RMSE para Temperatura en escala horaria en 2022 y 2023

RMSE T2	Chillan Viejo	Parral	Digua Embalse	Colorado	Melado Salto	Rio Cipreses
Máx	3,87	4,16	4,60	6,97	7,75	5,79
Mín	0,78	0,80	0,54	1,02	0,90	0,97
Mediana	1,82	1,66	1,74	2,07	2,54	2,95
Media	1,88	1,73	1,79	2,22	2,69	3,00
Desviación	0,53	0,48	0,51	0,83	1,01	0,92

Tabla 2.6: Evaluación métrica correlación de Pearson para Temperatura en escala horaria en 2022 y 2023

Corr. Pear T2	Chillan Viejo	Parral	Digua Embalse	Colorado	Melado Salto	Rio Cipreses
Max	0,98	0,98	0,96	0,96	0,95	0,96
Min	-0,12	0,30	0,09	-0,34	-0,13	-0,78
Mediana	0,90	0,87	0,79	0,73	0,59	0,58
Media	0,86	0,83	0,74	0,67	0,57	0,49
Desviacion	0,11	0,13	0,17	0,23	0,22	0,33

Tabla 2.7: Evaluación métrica error promedio para Precipitación en escala diaria en 2022 y 2023

Error PP	Máx	Mín	Mediana	Media	Desviación
Ñuble Confluencia	31,48	-26,47	0,12	1,20	7,16
Loncomilla	20,09	-33,40	-0,25	-1,75	6,93
Chillan Viejo	37,25	-25,38	0,41	0,93	7,31
Quella	19,04	-54,13	-1,76	-4,83	10,69
Linares	32,86	-27,20	0,20	1,42	8,07
Parral	35,70	-36,98	0,07	-0,55	7,98
Tutuven Embalse	46,09	-27,40	0,10	1,41	7,81
Nirivilo	27,81	-32,79	-0,42	-1,53	8,71
Sexta Longavi	50,27	-44,05	0,70	0,84	11,16
Perquilauquen	46,48	-94,96	-0,53	-5,02	16,58
Digua Embalse	40,97	-47,94	0,37	0,48	12,47
Ancoa Morro	93,15	-34,88	2,29	6,16	18,63
Colorado	131,92	-54,61	2,33	9,91	25,49
Longavi Quiriquina	54,30	-70,07	-0,88	-1,63	15,54
Ñuble San Fabian	85,42	-32,04	2,48	6,17	16,10
Maule Armerillo	154,72	-108,97	0,00	1,77	27,32
Embalse Bullileo	125,84	-100,44	0,00	-2,59	27,77
Melado salto	118,80	-20,48	7,00	14,59	23,03
Río Cipreses	170,43	-18,38	7,08	19,75	34,37

Tabla 2.8: Evaluación métrica error promedio para Temperatura en escala diaria en 2022 y 2023

Error T2	Máx	Mín	Mediana	Media	Desviación
Ninhue	1,98	-3,10	-0,16	-0,24	0,88
Portezuelo	1,76	-3,70	-0,45	-0,51	0,88
Miraflores	2,06	-3,65	-0,69	-0,69	0,91
Villa Alegre	1,78	-3,69	-0,91	-0,92	0,96
Santa Sofia	1,73	-3,49	-0,44	-0,45	0,88
Aeródromo Gral Ohiggins	2,25	-3,30	-0,36	-0,31	0,85
Escuela Artilleria	2,14	-4,70	-0,30	-0,33	0,98
Monte Flor-Tucapel	1,91	-3,06	-0,88	-0,90	0,84
Copihue Retiro	3,02	-4,12	-0,32	-0,45	1,14
CF Arroz	1,72	-3,85	-0,60	-0,61	0,83
Despachos	1,26	-2,97	-0,54	-0,55	0,80
San Gregorio	2,57	-3,17	-0,85	-0,81	0,89
Santa Rosa	2,59	-2,96	-0,58	-0,58	0,89

Tabla 2.9: Evaluación métrica error absoluto promedio para Precipitación en escala diaria en 2022 y 2023

Error absoluto PP	Máx	Mín	Mediana	Media	Desviación
Ñuble Confluencia	31,48	0,00	2,90	5,00	5,62
Loncomilla	33,40	0,00	2,93	4,83	5,55
Chillan Viejo	37,25	0,00	3,55	5,36	5,48
Quella	54,13	0,00	4,38	7,38	9,29
Linares	32,86	0,00	4,17	5,91	6,12
Parral	36,98	0,00	4,41	5,88	5,92
Tutuven Embalse	46,09	0,00	2,45	4,77	6,85
Nirivilo	32,79	0,00	3,03	5,82	6,98
Sexta Longavi	50,27	0,00	5,33	8,01	8,48
Perquilauquen	94,96	0,00	7,30	11,42	13,47
Digua Embalse	47,94	0,00	5,57	8,88	9,35
Ancoa Morro	93,15	0,00	8,17	12,94	14,96
Colorado	131,92	0,00	6,47	15,02	23,26
Longavi Quiriquina	70,07	0,00	8,31	11,53	11,21
Ñuble San Fabian	85,42	0,00	7,23	11,64	13,10
Maule Armerillo	154,72	0,00	9,13	16,38	22,67
Embalse Bullileo	125,84	0,00	10,75	17,79	22,44
Melado salto	118,80	0,00	8,93	16,68	21,81
Río Cipreses	170,43	0,00	8,55	21,80	33,33

Tabla 2.10: Evaluación métrica error absoluto promedio para Temperatura en escala diaria en 2022 y 2023

Error absoluto T2	Máx	Mín	Mediana	Media	Desviación
Ninhue	3,16	0,09	0,95	0,97	0,54
Portezuelo	3,70	0,05	0,88	0,97	0,59
Miraflores	3,65	0,03	1,09	1,16	0,64
Villa Alegre	3,76	0,03	1,29	1,33	0,72
Santa Sofia	3,49	0,07	0,97	1,04	0,57
Aeródromo Gral O'higgins	3,30	0,05	0,87	0,94	0,53
Escuela Artilleria	4,70	0,02	0,95	1,02	0,57
Monte Flor-Tucapel	3,06	0,15	1,18	1,23	0,59
Copihue Retiro	4,12	0,06	1,11	1,25	0,75
CF Arroz	3,85	0,07	0,97	1,03	0,58
Despachos	2,97	0,05	0,88	1,00	0,56
San Gregorio	3,17	0,04	1,09	1,22	0,62
Santa Rosa	2,91	0,09	1,06	1,11	0,56

Anexo C: Corrección de datos ERA-5

Aplicado lo mencionado en la metodología con las distintas formula se obtienen las ponderación de las estaciones sobre los píxeles de ERA-5. Con los resultados finales se calcula la precipitación anual y la temperatura promedio anual.

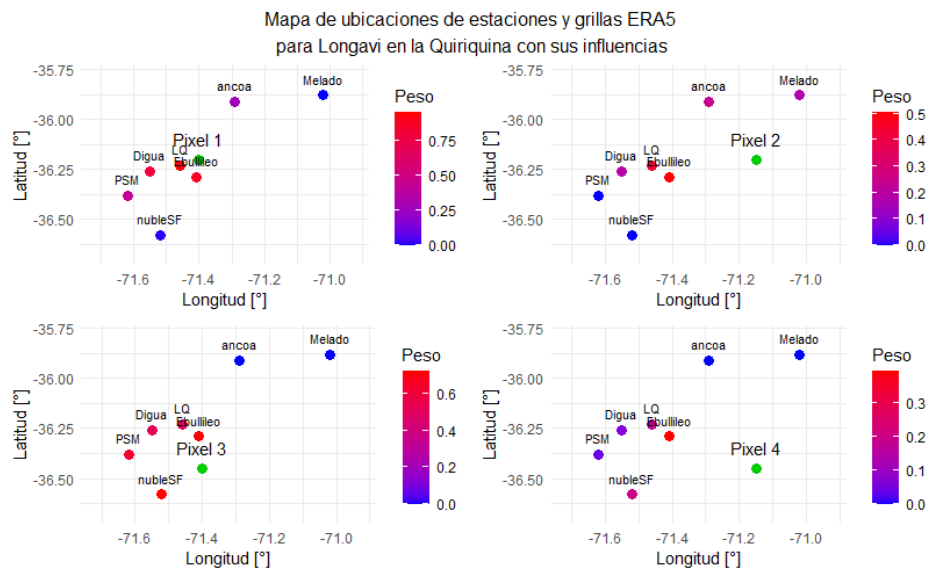
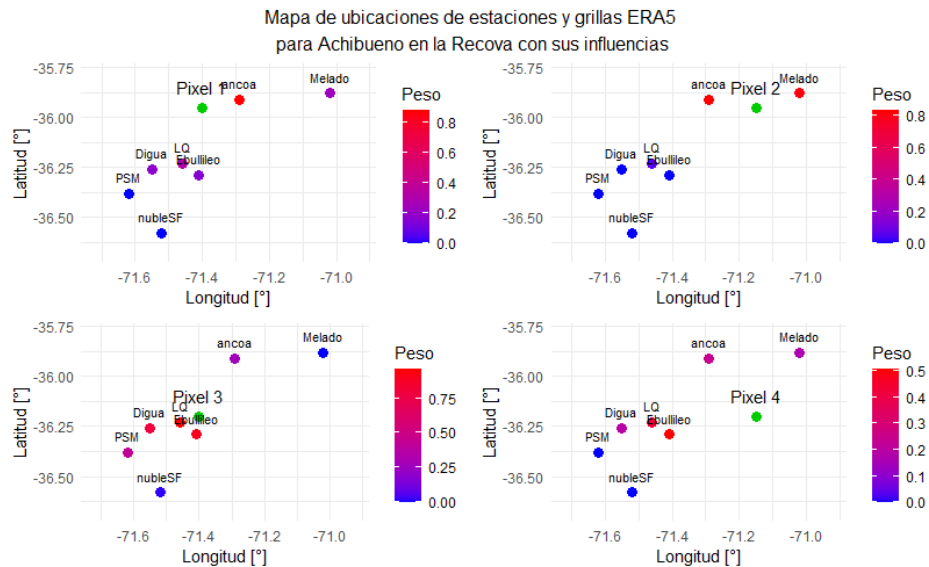
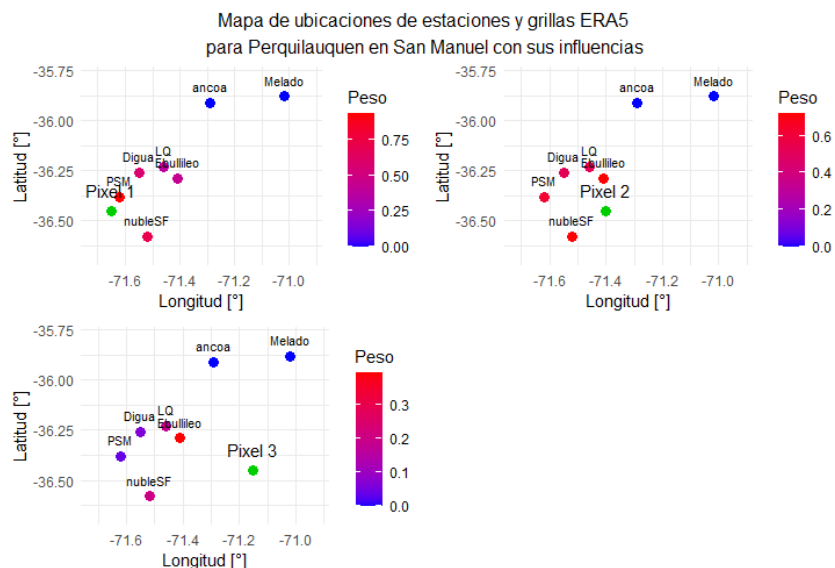


Figura 3.1: Mapas de ponderaciones de estaciones sobre píxeles del producto grillado ERA-5. Los puntos 'Pixel' representan el centroide de este y no su tamaño.



(c) Perquilauquen

Figura 3.1: (Cont.) Mapas de ponderaciones de estaciones sobre píxeles del producto grillado ERA-5. Los puntos 'Pixel' representan el centroide de este y no su tamaño.

En las siguientes tablas se presentan las estaciones utilizadas para corregir el producto de reanálisis de ERA-5. Donde Melado es Río Melado en el Salto, Ancoa es Río Ancoa en el Morro, LQ es Longavi en la Quiriquina, Ebulileo es Embalse Bullileo, Digua es Digua Embalse, PSM es Perquilauquen en San Manuel y nubleSF es Río Ñuble en San Fabián

Tabla 3.1: Estaciones utilizadas para corregir los pixeles de ERA-5 en la cuenca de Achi-bueno en la Recova

Pixel	Estaciones para Pp.	Estaciones para Temp.
1	Melado, ancoa, LQ, Ebulileo	Digua, Melado
2	Melado, ancoa, LQ, Ebulileo	Melado
3	ancoa, LQ, Ebulileo, PSM, nubleSF	Digua
4	Melado, ancoa, LQ, Ebulileo	Digua, Melado

Tabla 3.2: Estaciones utilizadas para corregir los pixeles de ERA-5 en la cuenca de Lon-gaví en la Quiriquina

Pixel	Estaciones para Pp.	Estaciones para Temp.
1	ancoa, LQ, Ebulileo, PSM, nubleSF	Digua
2	Melado, ancoa, LQ, Ebulileo	Digua, Melado
3	LQ, Ebulileo, PSM, nubleSF	Digua
4	LQ, Ebulileo, PSM, nubleSF	Digua

Tabla 3.3: Estaciones utilizadas para corregir los píxeles de ERA-5 en la cuenca de Perquillauquen en San Manuel

Pixel	Estaciones para Pp.	Estaciones para Temp.
1	LQ, Ebulileo, PSM, nubleSF	Digua
2	LQ, Ebulileo, PSM, nubleSF	Digua
3	LQ, Ebulileo, PSM, nubleSF	Digua

La Figura 3.2 presenta los factores y diferencias de la corrección para la precipitación y la temperatura

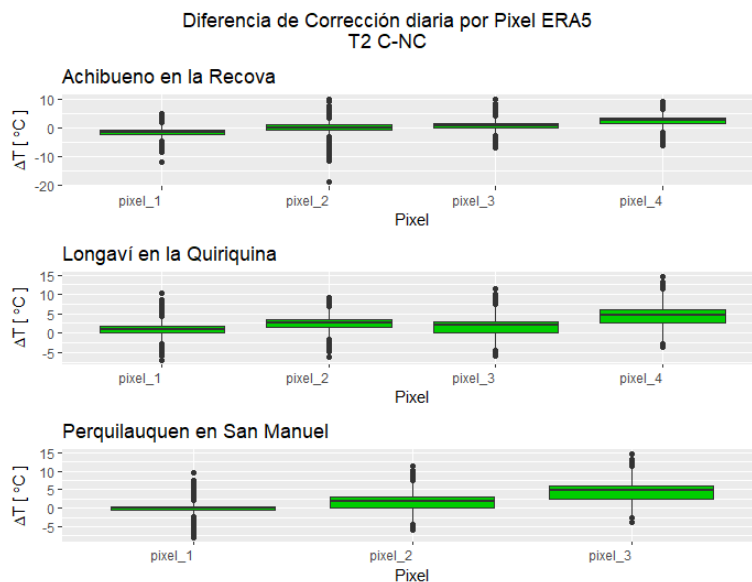
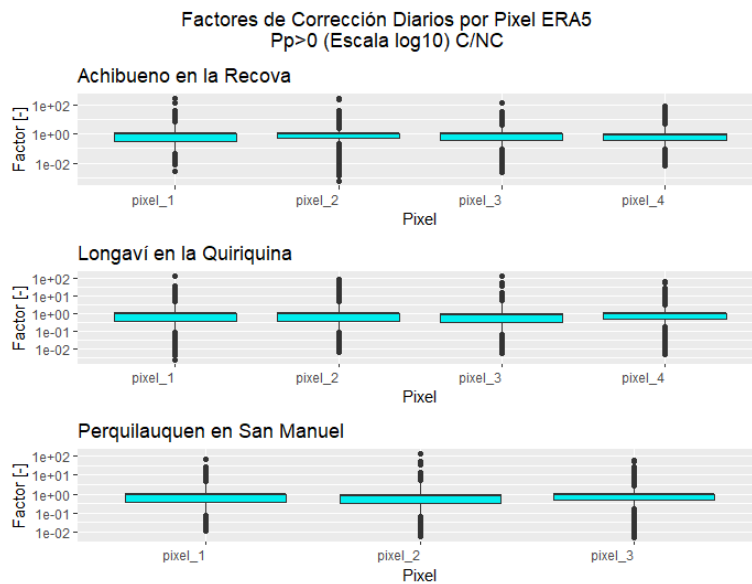


Figura 3.2: Factores de corrección aplicados para corregir los datos de ERA-5

Las tablas a continuación presentan los valores anuales corregidos y no corregidos de ERA-5.

Tabla 3.4: Precipitación anual ERA-5, Achibueno en la Recova

Año	Sin Corrección	Con Corrección
2012	1541	1581
2013	1290	1382
2014	1587	1714
2015	1595	1815
2016	1164	1112
2017	1623	1658
2018	1428	1493
2019	1040	1129
2020	1314	1428
2021	1135	1104
2022	1276	1486
2023	2130	2064

Tabla 3.5: Temperatura anual ERA-5, Achibueno en la Recova

Año	Sin Corrección	Con Corrección
2012	9,64	9,38
2013	9,50	9,69
2014	9,23	10,34
2015	9,74	10,82
2016	10,44	11,26
2017	9,37	10,41
2018	9,50	10,25
2019	9,87	10,54
2020	10,17	10,99
2021	9,86	10,86
2022	9,39	10,79
2023	9,53	10,99

Tabla 3.6: Precipitación anual ERA-5, Longaví en la Quiriquina

Año	Sin Corrección	Con Corrección
2012	1601	1770
2013	1389	1526
2014	1699	2068
2015	1670	1875
2016	1201	1153
2017	1717	1676
2018	1532	1506
2019	1125	1270
2020	1394	1527
2021	1190	1298
2022	1354	1751
2023	2176	2411

Tabla 3.7: Temperatura anual ERA-5, Longaví en la Quiriquina

Año	Sin Corrección	Con Corrección
2012	8,76	8,94
2013	8,67	9,05
2014	8,31	11,44
2015	8,85	11,75
2016	9,57	12,13
2017	8,41	11,32
2018	8,62	11,09
2019	8,97	11,16
2020	9,26	11,62
2021	9,00	11,50
2022	8,50	11,57
2023	8,66	11,75

Tabla 3.8: Precipitación anual ERA-5, Perquilauquen en San Manuel

Año	Sin Corrección	Con Corrección
2012	1576	1759
2013	1408	1589
2014	1706	2045
2015	1691	1785
2016	1156	1092
2017	1720	1444
2018	1499	1295
2019	1142	1183
2020	1379	1517
2021	1176	1280
2022	1366	1680
2023	2162	2299

Tabla 3.9: Temperatura anual ERA-5, Perquilauquen en San Manuel

Año	Sin Corrección	Con Corrección
2012	9,95	9,95
2013	9,89	10,00
2014	9,60	11,90
2015	10,10	12,09
2016	10,80	12,44
2017	9,62	11,64
2018	9,81	11,42
2019	10,15	11,46
2020	10,36	12,11
2021	10,22	12,03
2022	9,68	11,84
2023	9,82	12,01

Anexo D: Calibración y Evaluación del modelo GR4H+CemaNeige

A continuación se presentan las series completas modeladas de la calibración-evaluación, las curvas de duración con los coeficientes pertinentes y los ciclos anuales junto con sus coeficientes de desempeño.

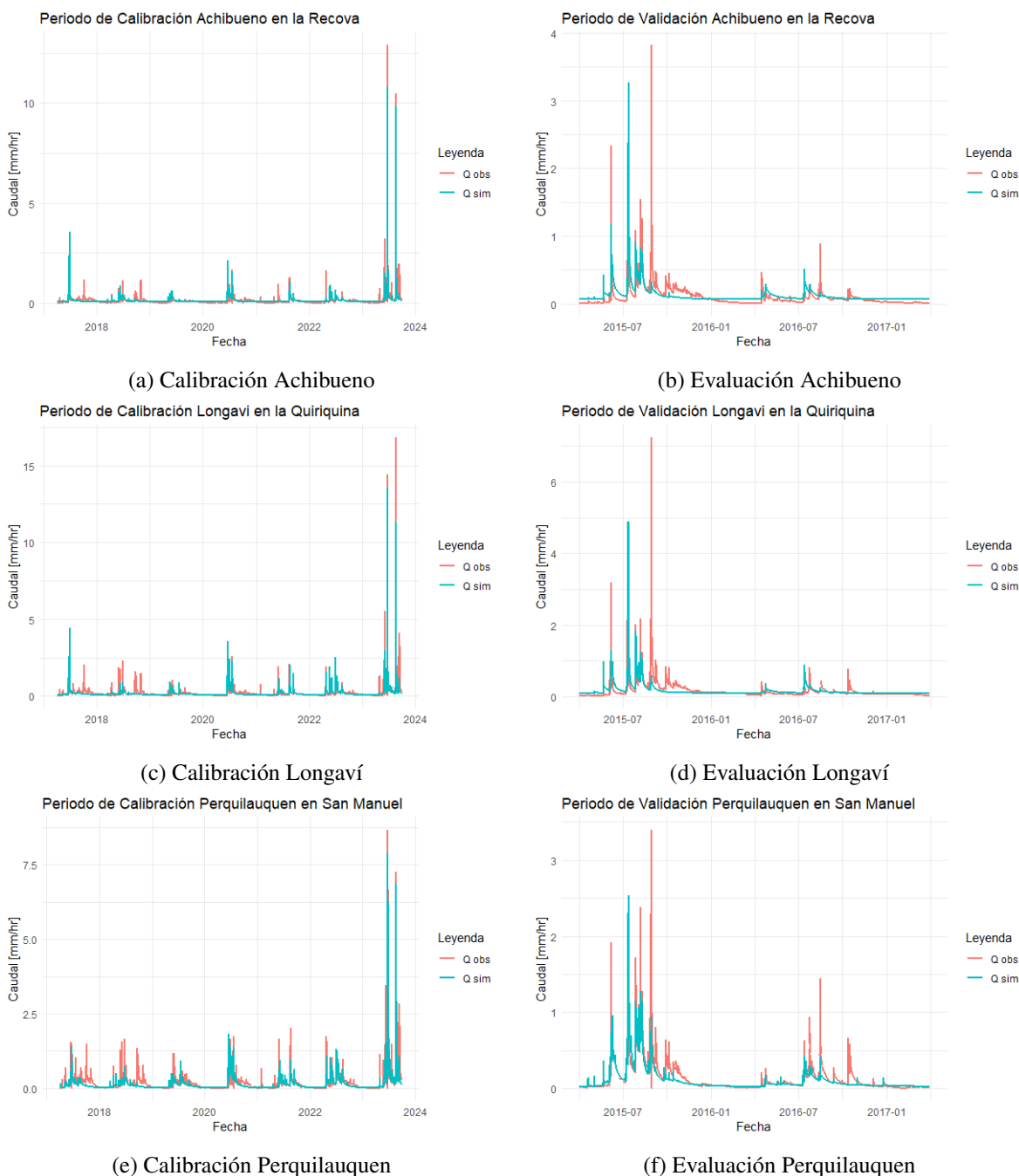


Figura 4.1: Serie completa modelada para Calibración y Evaluación por cuenca.

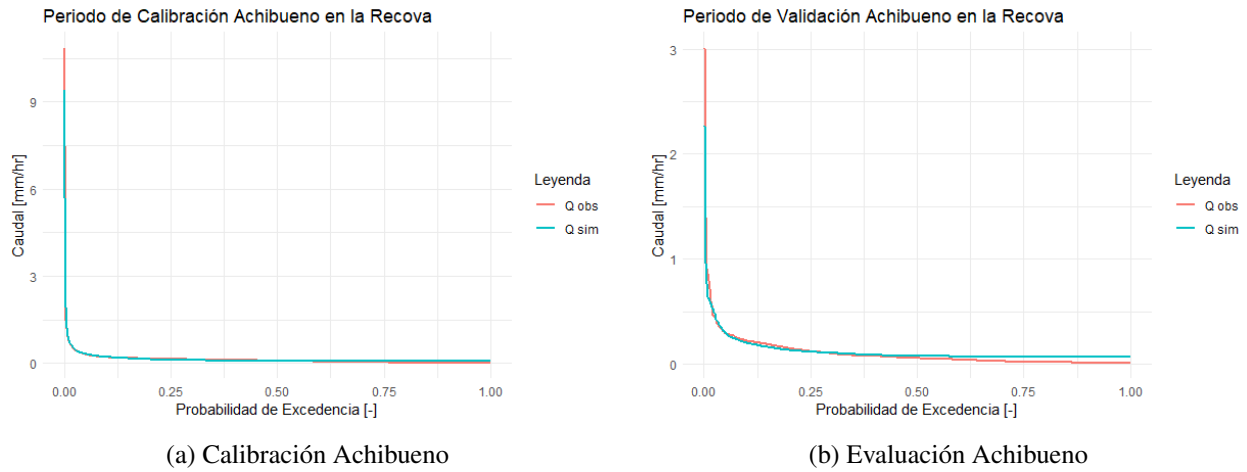


Figura 4.2: Curvas de duración de periodos de calibración y evaluación para Achibueno en la Recova

Tabla 4.1: Coeficientes de la curva de duración Achibueno en la Recova

Proceso	Coef	P1	P2	P3	P4
Calibración	KGE	0,78	0,71	0,54	0,82
	%RR	-6,59	-2,44	-1,31	6,95
	%FMS	-6,89	-20,12	-96,66	-59,37
	%FHV	-19,76	-28,84	-22,81	-7,89
	%FLV	57,25	31,78	99,99	98,42
Evaluación	KGE	0,52	0,31	0,12	0,73
	%RR	-15,31	-20,22	-34,6	17,21
	%FMS	14,53	-3,79	-86,98	-63,74
	%FHV	-41,12	-58,486	-75,05	17,22
	%FLV	49,98	55,86	99,94	97,54

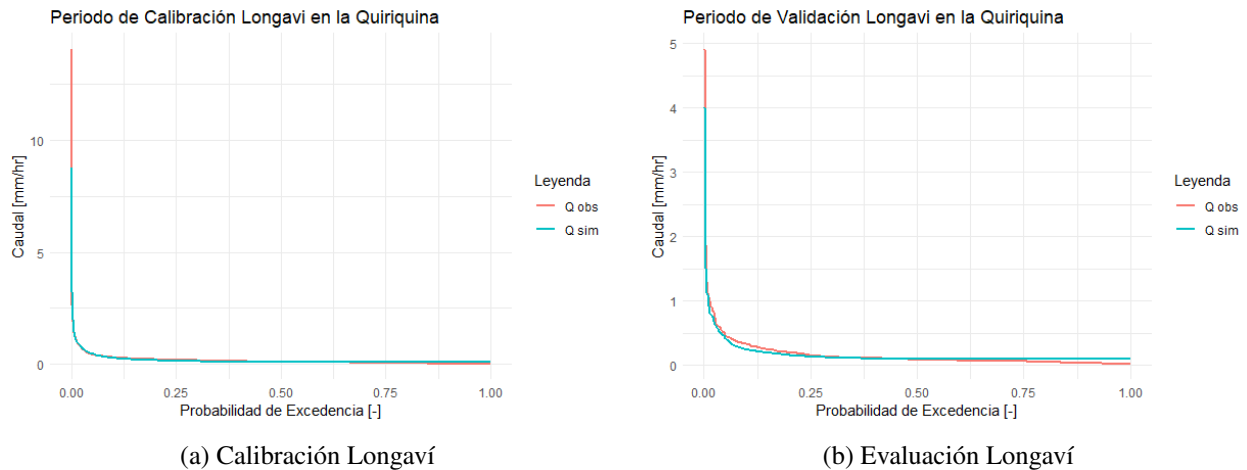
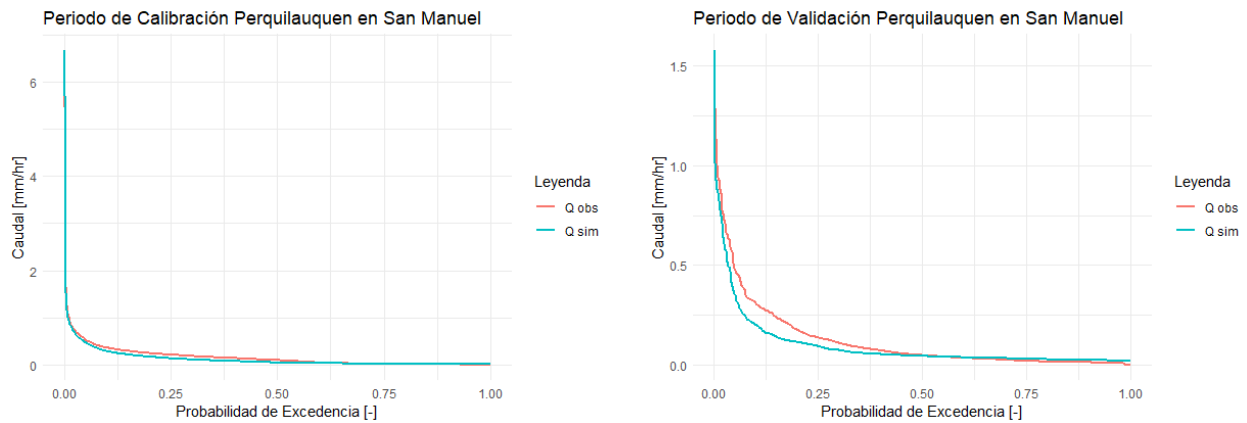


Figura 4.3: Curvas de duración de periodos de calibración y evaluación para Longaví en la Quiriquina

Tabla 4.2: Coeficientes de la curva de duracion Longavi en la Quiriquina

Proceso	Coef	P1	P2	P3	P4
Calibración	KGE	0,79	0,68	0,76	0,75
	%RR	-16,77	-16,05	-15,56	-0,89
	%FMS	34,21	20,45	22,63	-36,99
	%FHV	-15,16	-26,68	-20,26	-10,13
	%FLV	83,86	58,83	61,01	99,69
Evaluación	KGE	0,52	0,40	0,57	0,79
	%RR	-10,99	-11,82	-14,13	-0,41
	%FMS	72,31	51,20	31,65	-51,56
	%FHV	-45,95	-55,28	-48,73	-17,84
	%FLV	70,33	68,72	81,19	99,55



(a) Calibración Perquilauquen

(b) Evaluación Perquilauquen

Figura 4.4: Curvas de duración de periodos de calibración y evaluación para Perquilauquen en San Manuel

Tabla 4.3: Coeficientes de la curva de duracion Perquilauquen en San Manuel

Proceso	Coef	P1	P2	P3	P4
Calibración	KGE	0,80	0,79	0,75	0,80
	%RR	-2,98	-9,12	-7,29	-20,40
	%FMS	-46,19	-49,14	-49,73	-22,08
	%FHV	-7,31	-8,84	-10,70	-1,87
	%FLV	97,77	97,08	97,15	97,12
Evaluación	KGE	0,84	0,81	0,77	0,71
	%RR	15,87	4,55	-1,64	-21,39
	%FMS	-34,45	-36,12	-38,15	-36,78
	%FHV	-3,13	-14,45	-28,38	-11,13
	%FLV	97,59	97,24	68,31	96,57

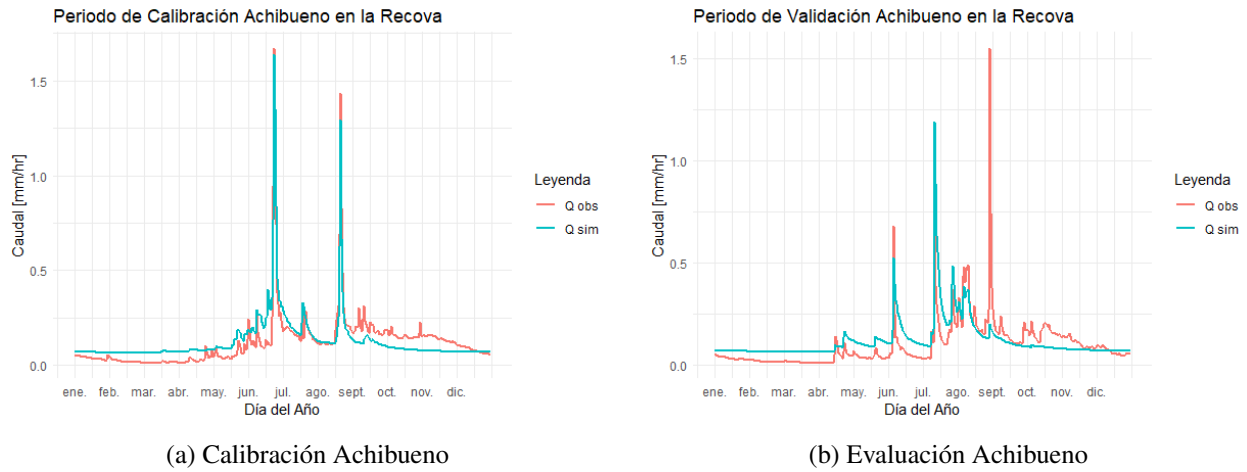


Figura 4.5: Ciclo anual de periodos de calibración y evaluación para Achibueno en la Recova

Tabla 4.4: Coeficientes del ciclo anual de Achibueno en la Recova

Proceso	Coef	P1	P2	P3	P4
Calibración	RMSE	0,05	0,04	0,05	0,06
	NSE	0,58	0,64	0,24	0,85
	KGE	0,33	0,80	0,26	0,87
	R2	0,61	0,66	0,24	0,85
	pBias	-6,40	-2,30	-1,20	6,50
Evaluación	RMSE	0,19	0,26	0,16	0,11
	NSE	0,70	0,40	0,17	0,28
	KGE	0,54	0,30	0,09	0,53
	R2	0,80	0,52	0,46	0,35
	pBias	-16,2	-19,3	-34,5	17,3

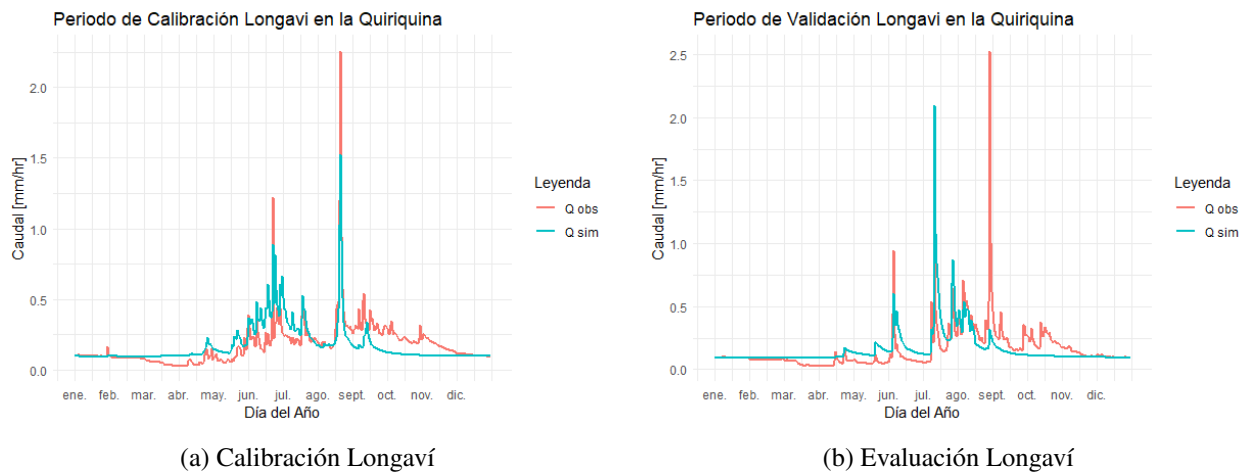
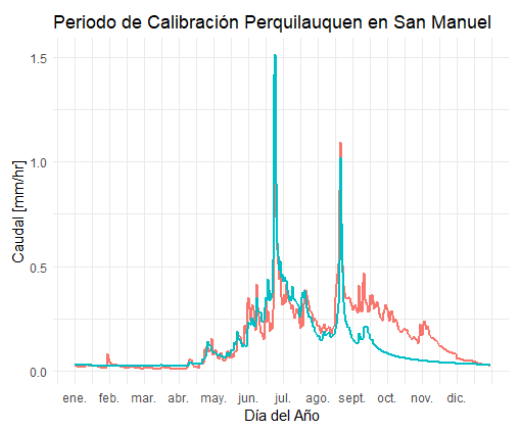


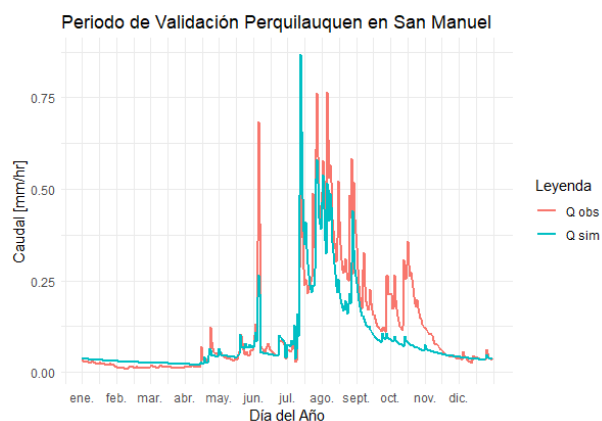
Figura 4.6: Ciclo anual de periodos de calibración y evaluación para Longaví en la Quiriquina

Tabla 4.5: Coeficientes del ciclo anual de Longavi en la Quiriquina

Proceso	Coef	P1	P2	P3	P4
Calibración	RMSE	0,10	0,09	0,06	0,11
	NSE	0,29	0,33	0,38	0,62
	KGE	0,64	0,66	0,70	0,75
	R2	0,46	0,49	0,57	0,62
	pBias	-16,70	-15,90	-15,50	-0,90
Evaluación	RMSE	0,22	0,26	0,20	0,17
	NSE	0,63	0,48	0,49	0,24
	KGE	0,57	0,43	0,57	0,53
	R2	0,66	0,53	0,5	0,311
	pBias	-9,8	-9,6	-14,1	-0,5



(a) Calibración Perquilauquen



(b) Evaluación Perquilauquen

Figura 4.7: Ciclo anual de periodos de calibración y evaluación para Perquilauquen en San Manuel

Tabla 4.6: Coeficientes del ciclo anual de Perquilauquen en San Manuel

Proceso	Coef	P1	P2	P3	P4
Calibración	RMSE	0,07	0,06	0,06	0,09
	NSE	0,71	0,68	0,66	0,72
	KGE	0,76	0,76	0,72	0,76
	R2	0,72	0,69	0,67	0,78
	pBias	-2,7	-8,8	-7,3	-20,7
Evaluación	RMSE	0,13	0,15	0,14	0,07
	NSE	0,82	0,77	0,72	0,73
	KGE	0,79	0,79	0,77	0,68
	R2	0,84	0,78	0,72	0,76
	pBias	18,6	7	0,8	-21,2

Anexo E: Modelación de caudales con datos WRF-SMN

Tabla 5.1: Caudales bases promedio por mes y cuenca

Mes	Caudal base Achibueno [mm/hr]	Caudal base Longaví [mm/hr]	Caudal base Perquilauquen [mm/hr]
Enero	0,043	0,104	0,030
Febrero	0,024	0,089	0,020
Marzo	0,017	0,055	0,014
Abril	0,028	0,044	0,025
Mayo	0,052	0,103	0,097
Junio	0,151	0,248	0,279
Julio	0,172	0,272	0,292
Agosto	0,214	0,314	0,331
Septiembre	0,170	0,262	0,245
Octubre	0,160	0,233	0,202
Noviembre	0,130	0,156	0,121
Diciembre	0,086	0,114	0,068

En la Figura 5.1 se presentan las series pronosticas para Longaví y Perquilauquen. Se destaca que no se presentan datos de observaciones para Perquilauquen en junio del 2022 y para Longaví en julio del 2023.

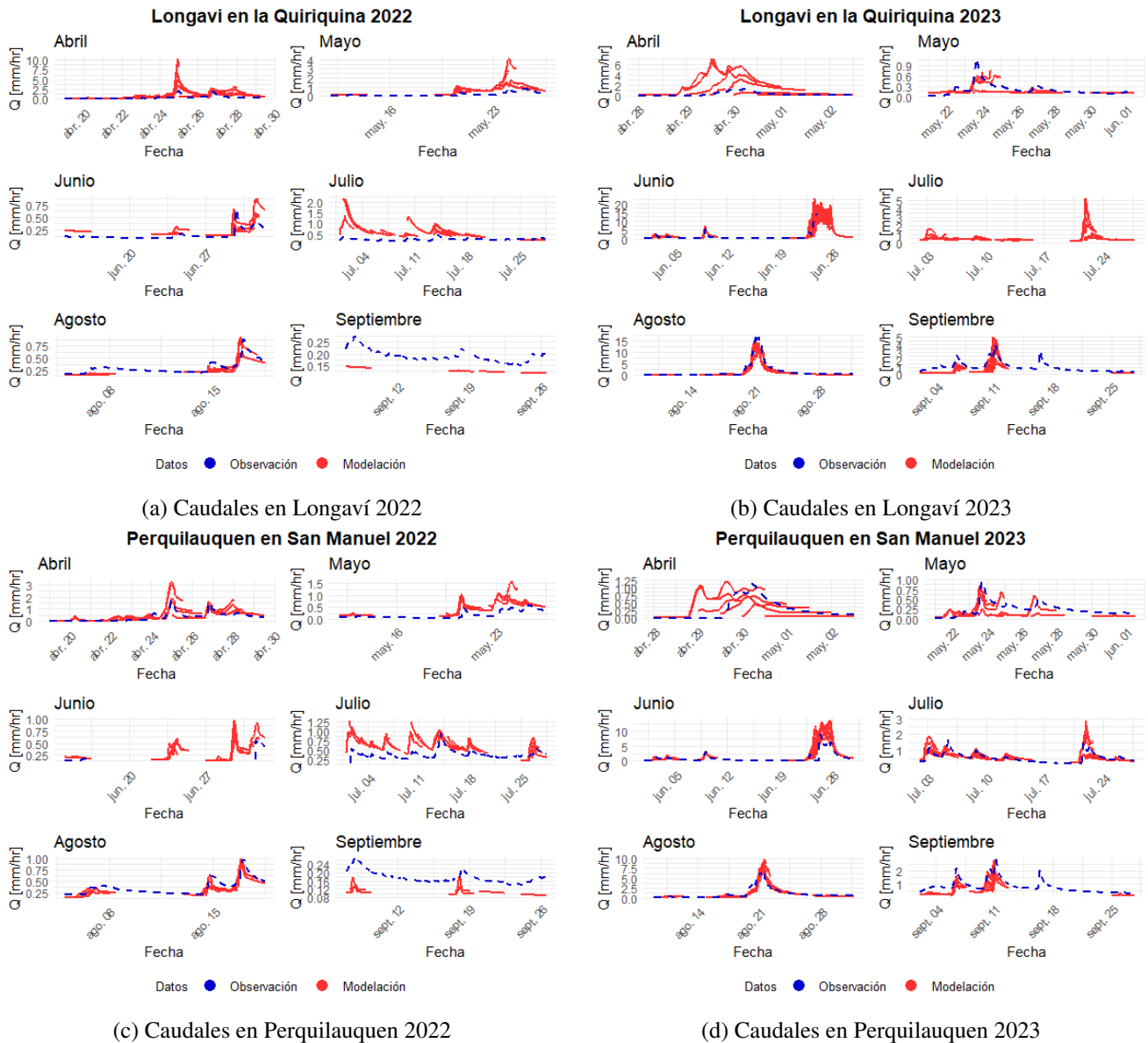


Figura 5.1: Caudales modelados con WRF-SMN por mes, línea azul punteada representa el caudal observado.

Modelado los datos con WRF-SMN, se calculan diversos coeficientes desempeño, a continuación se presentan los estadísticos por cuenca entre los pronósticos y las observaciones y, entre los pronósticos y la modelación con ERA-5.

Tabla 5.2: Evaluación métrica NSE entre observaciones y WRF-SMN

NSE [-]	Achibueno en la Recova	Longavi en la Quiriquina	Perquilauquen en San Manuel
Max	0,97	0,90	0,94
Min	-2782,89	-9905,21	-437,37
Mediana	-28,39	-278,25	-23,12
Media	-2,18	-5,29	-1,77

Tabla 5.3: Evaluación métrica pBias entre observaciones y WRF-SMN

pBias [%]	Achibueno en la Recova	Longavi en la Quiriquina	Perquilauquen en San Manuel
Max	1007,5	765,9	347,4
Min	-77,5	-78,9	-74,6
Mediana	0,16303502	30,487766	6,78208955
Media	-18,7	-20,45	-1,75

Tabla 5.4: Evaluación métrica RMSE entre observaciones y WRF-SMN

RMSE [mm/hr]	Achibueno en la Recova	Longavi en la Quiriquina	Perquilauquen en San Manuel
Max	5,08	7,17	4,90
Min	0,01	0,01	0,02
Mediana	0,50	1,00	0,51
Media	0,17	0,54	0,29

Tabla 5.5: Evaluación métrica R^2 entre observaciones y WRF-SMN

R2 [-]	Achibueno en la Recova	Longavi en la Quiriquina	Perquilauquen en San Manuel
Max	1,00	1,00	1,00
Min	0,00	0,00	0,00
Mediana	0,56	0,51	0,54
Media	0,61	0,54	0,61

Tabla 5.6: Evaluación métrica NSE entre ERA-5 y WRF-SMN

NSE [-]	Achibueno en la Recova	Longavi en la Quiriquina	Perquilauquen en San Manuel
Max	1,00	1,00	1,00
Min	-65867,65	-28421,58	-13820,43
Mediana	-1265,68	-399,63	-77,62
Media	-0,21	-1,32	-0,43

Tabla 5.7: Evaluación métrica pBias entre ERA-5 y WRF-SMN

pBias [%]	Achibueno en la Recova	Longavi en la Quiriquina	Perquilauquen en San Manuel
Max	1506,4	1628,7	537,5
Min	-65,5	-72,7	-66,7
Mediana	48,2180392	69,9984252	38,1101449
Media	3,2	2,6	6,15

Tabla 5.8: Evaluación métrica RMSE entre ERA-5 y WRF-SMN

RMSE [mm/hr]	Achibueno en la Recova	Longavi en la Quiriquina	Perquilauquen en San Manuel
Max	6,08	11,47	5,40
Min	0,00	0,00	0,00
Mediana	0,44	0,95	0,44
Media	0,05	0,20	0,14

Tabla 5.9: Evaluación métrica R^2 entre ERA-5 y WRF-SMN

R2	Achibueno en la Recova	Longavi en la Quiriquina	Perquilauquen en San Manuel
Max	1,00	1,00	1,00
Min	0,00	0,00	0,00
Mediana	0,71	0,63	0,64
Media	0,85	0,72	0,77

Adicionalmente, se presentan los graficos de dos de las mayores tormentas de 2022 y 2023 para Longaví y Perquilauquen y, el error por hora de adelanto entre ERA-5 y WRF-SMN con sus valores máximos y mínimos.

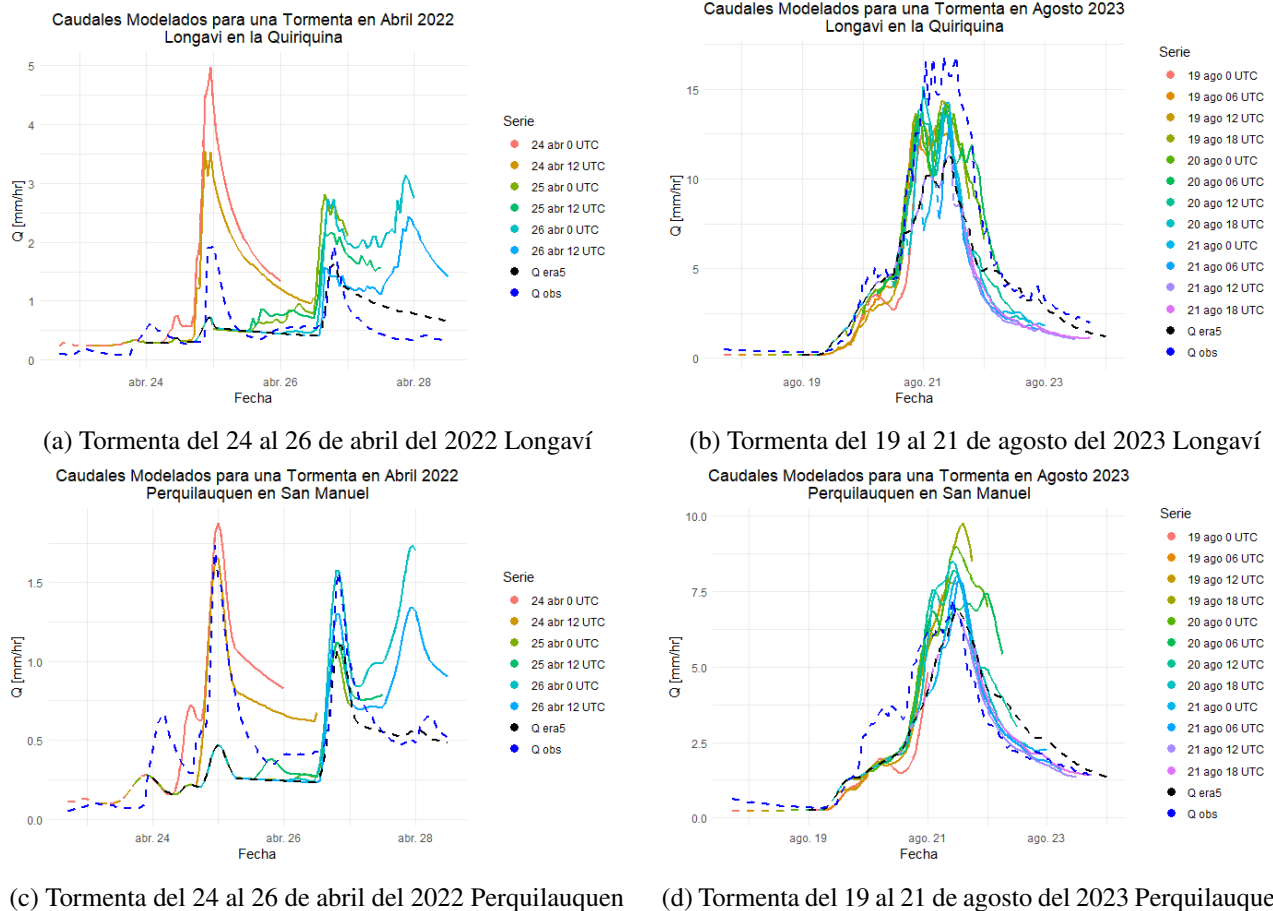


Figura 5.2: Modelación para las mayores tormentas de cada año en Longaví en la Quiriquina y Perquillauquen en San Manuel.

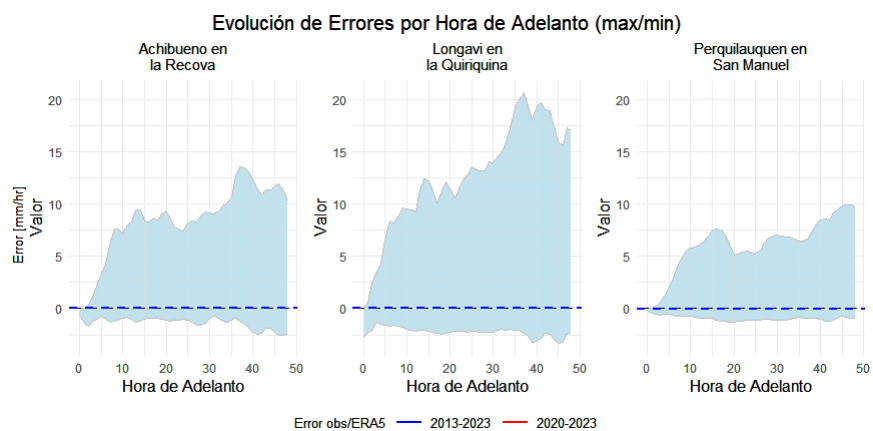


Figura 5.3: Error por Hora de Adelanto para las tres estaciones fluviométricas, valores máx. y mín.