



**ESTUDIO DE DISPONIBILIDAD HÍDRICA  
( $Q_{85}$ ) DE UNA CUENCA CONTROLADA  
LOCALIZADA EN LA MACROZONA SUR DE  
CHILE**

**STUDY OF WATER AVAILABILITY ( $Q_{85}$ ) OF  
A CONTROLLED BASIN LOCATED IN THE  
SOUTH MACROZONE OF CHILE**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**D. ALONSO ARRIAGADA MONREAL**

**Dirigido por:**

**Dr. FRANCISCO CARREÑO CONDE**

**Alcalá de Henares, a 7 de julio de 2019**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi mujer Ariadna Hayler, a mis hijos Antú y Amira, y a mi madre Angélica Monreal por el apoyo, comprensión y amor.

Agradezco al Dr. Francisco Carreño por confiar en la propuesta, y apoyar y corregir este trabajo.

Mis agradecimientos muy especiales a la Dra. Pilar Barría y a Raúl Díaz, sin su apoyo, este trabajo no habría sido posible.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. OBJETIVOS.....	10
3. METODOLOGÍA .....	11
3.1. Zona de estudio .....	11
3.2. Período de análisis.....	13
3.3. Clima de la zona .....	14
3.4. Estaciones meteorológicas .....	14
3.5. Estaciones Fluviométricas.....	16
3.6. Productos grillados del CR2.....	17
3.7. Entradas del modelo hidrológico .....	20
3.7.1. Modelos GCM del CMIP5.....	20
3.7.2. Downscaling .....	23
3.7.3. Modelo Hidrológico .....	27
3.7.4. Calibración del modelo hidrológico .....	28
4. RESULTADOS.....	33
5. DISCUSIÓN.....	39
6. CONCLUSIONES.....	41
7. BIBLIOGRAFÍA.....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico .....	11
Figura 2. Curva Hipsométrica de la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico.....	13
Figura 3. Modelo digital de elevación Aster GDEM delimitado por la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico.....	13
Figura 4. Ubicación de estaciones meteorológicas en cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico ....	15
Figura 5. Valores promedio mensuales de precipitación en las estaciones meteorológicas de interés .	16
Figura 6. Caudales medios mensuales Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico (DGA, ENDESA).....	16
Figura 7. Promedios mensuales de caudales medios Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico (DGA, ENDESA) .....	17
Figura 8. Precipitación promedio mensual distribuida sobre la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET .....	18
Figura 9. Serie de precipitación promedio mensual distribuida sobre la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET .....	18
Figura 10. Promedios mensuales de precipitación distribuida sobre la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET .....	19
Figura 11. Temperatura promedio mensual distribuida sobre la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET .....	19
Figura 12. Serie de temperatura promedio mensual distribuida sobre la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET .....	20
Figura 13. Promedios mensuales de temperatura distribuida sobre la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET .....	20
Figura 14. Media mensual (arriba) y Desviación Estándar mensual (abajo) de cada GCM (líneas de colores) del RCP 4.5 para la precipitación. A la izquierda sin corrección de sesgo y a la derecha luego de aplicar la corrección.....	24
Figura 15. Media mensual (arriba) y Desviación Estándar mensual (abajo) de cada GCM (líneas de colores) del RCP 4.5 para la temperatura. A la izquierda sin corrección de sesgo y a la derecha luego de aplicar la corrección.....	24
Figura 16. Media mensual (arriba) y Desviación Estándar mensual (abajo) de cada GCM (líneas de	

colores) del RCP 8.5 para la precipitación. A la izquierda sin corrección de sesgo y a la derecha luego de aplicar la corrección.....	25
Figura 17. Media mensual (arriba) y Desviación Estándar mensual (abajo) de cada GCM (líneas de colores) del RCP 8.5 para la temperatura. A la izquierda sin corrección de sesgo y a la derecha luego de aplicar la corrección.....	25
Figura 18. Precipitación proyectada a partir de los GCM del RCP 4.5, corregidas con QMBC .....	26
Figura 19. Precipitación proyectada a partir de los GCM del RCP 8.5, corregidas con QMBC .....	26
Figura 20. Temperatura proyectada a partir de los GCM del RCP 4.5, corregidas con QMBC.....	26
Figura 21. Temperatura proyectada a partir de los GCM del RCP 8.5, corregidas con QMBC.....	27
Figura 22. Estructura del modelo PERM y sus parámetros de calibración (indicados en letras resaltadas en negrita) (Peel, 2015) .....	28
Figura 23. Índices de calibración a nivel mensual .....	29
Figura 24. Índices de calibración a nivel anual.....	30
Figura 25. Correlación entre serie simulada y observada para el período de calibración .....	31
Figura 26. Correlación entre serie simulada y observada para el período de validación .....	32
Figura 27. Series de caudal mensual observadas, resultante de calibración y resultante de validación	32
Figura 28. Caudales proyectados para el RCP 4.5 .....	33
Figura 29. Caudales proyectados para el RCP 8.5 .....	34
Figura 30. Proyección de caudales anuales $Q_{85}$ para cada modelo para el RCP 4.5 .....	35
Figura 31. Proyección de caudales anuales $Q_{85}$ para cada modelo para el RCP 8.5 .....	35
Figura 32. Esquema para definir en caudal de reserva ambiental (Aquaterra Ingenieros Ltda., 2014)..	36
Figura 33. Análisis del caudal ambiental en ventanas de 20 años para el RCP 4.5 .....	37
Figura 34. Análisis del caudal ambiental en ventanas de 20 años para el RCP 8.5 .....	37
Figura 35. Histogramas de cambios anual.....	38
Figura 36. Histogramas de cambios período pluvial.....	39
Figura 37. Histogramas de cambios período de deshielos.....	39

## **TABLA DE ABREVIATURAS**

ASTER GDEM: *Aster Global Digital Elevation Model*

BNA: *Banco Nacional de Cuencas de la DGA*

CMIP5: *Climate Model Intercomparison Project Phase 5*

DGA: *Dirección General de Aguas de la República de Chile*

ECMWF: *European Centre for Medium – Range Weather Forecasts*

GCM: *Global Circulation Model*

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

PERM: *Monthly Conceptual Precipitation – Evapotranspiration – Runoff Model*

QGIS: *Quantum GIS*

QMBC: *Quantile – Mapping Bias Correction*

RCP 4.5: *Representative Concentration Pathway 4.5*

RCP 8.5 *Representative Concentration Pathway 8.5*

WCRP: *World Climate Research Programme*

## RESUMEN

En el presente estudio se expone un análisis de la respuesta hidrológica de una cuenca ubicada en la Macrozona Sur de Chile, utilizando el modelo hidrológico PERM (Peel *et al.*, 2015), las series de registros hidrometeorológicos de terreno y las proyecciones de los GCMs (*Global Circulation Models*, IPCC, 2019) del CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012). A continuación, se resume cada acápite del presente trabajo:

- Como introducción se describe el contexto general y la necesidad de estudios como el entregado en el presente documento.
- Los objetivos describen los alcances del trabajo, listando las actividades más importantes que se realizaron.
- En el acápite de metodología se describe la zona de estudio, se define el período de análisis, se entrega una descripción climatológica y de las fuentes de registros meteorológicos y fluviométricos, se presentan los productos climatológicos grillados disponibles, y finalmente, se describe el modelo hidrológico a utilizar, donde, además se incluye un análisis de calibración.
- En los resultados se presentan las salidas del modelo calibrado, utilizando las proyecciones de los GCM, se analizan las tendencias con enfoque en el caudal con probabilidad de excedencia del 85% ( $Q_{85}$ ), se entrega una evaluación de la disponibilidad del recurso considerando los derechos de aguas de la zona, y finalmente se analiza la respuesta del modelo hidrológico a los cambios proyectados en las precipitaciones.
- En el capítulo asociado a la discusión se analizan las metodologías aplicadas y los índices que verifican los resultados. Cabe señalar que la metodología aplicada entrega resultados satisfactorios, acorde a otros resultados de análisis similares encontrados en la bibliografía.
- Las conclusiones analizan los resultados en un contexto complejo en términos de disponibilidad y conflictos asociados al recurso hídrico en Chile. Se hacen recomendaciones y se proponen mejoras posibles al trabajo realizado.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la Macrozona Sur de Chile (DGA a, 2016) existen grandes conflictos dada la sobre adjudicación de derechos de aguas en la zona, la explotación del recurso sin medidas de gestión adecuadas y la falta de análisis que asegure la sustentabilidad a futuro (Barria *et al.*, 2019). Lo anterior podría generar mayores conflictos entre usuarios, eventos de escasez cada vez más severos, afectación en la calidad de las aguas, entre otros problemas, si no se consideran las estimaciones de las proyecciones cambio climático en la planificación y gestión del recurso hídrico.

No existen estudios, sobre todo en la parte sur de la macrozona en cuestión, que analicen las implicancias de las tendencias que se vienen observando en los registros meteorológicos y la consecuente respuesta hidrológica en las cuencas superficiales, ni cuáles serían las proyecciones según distintos escenarios propuestos por el Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC).

Con el análisis expuesto en el presente trabajo, se espera lograr avances en la estimación de la disponibilidad del recurso hídrico superficial de la zona y aportar de esta manera a promover la mejor gestión del recurso a futuro, anteponerse a los escenarios desfavorables, cuantificar las incertidumbres, y generar planes de alerta temprana en caso de eventos de sequía o de modificación de los regímenes del pasado.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente estudio es analizar la respuesta hidrológica de una cuenca ubicada en la Macrozona Sur de Chile, utilizando el modelo hidrológico PERM (Peel *et al.*, 2015), las series de registros hidrometeorológicos de terreno y las proyecciones de los GCMs (*Global Circulation Models*, IPCC, 2019) del CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012), de manera de estimar la disponibilidad hídrica proyectada en función del caudal con probabilidad de excedencia del 85%.

Los objetivos específicos del presente trabajo se describen a continuación:

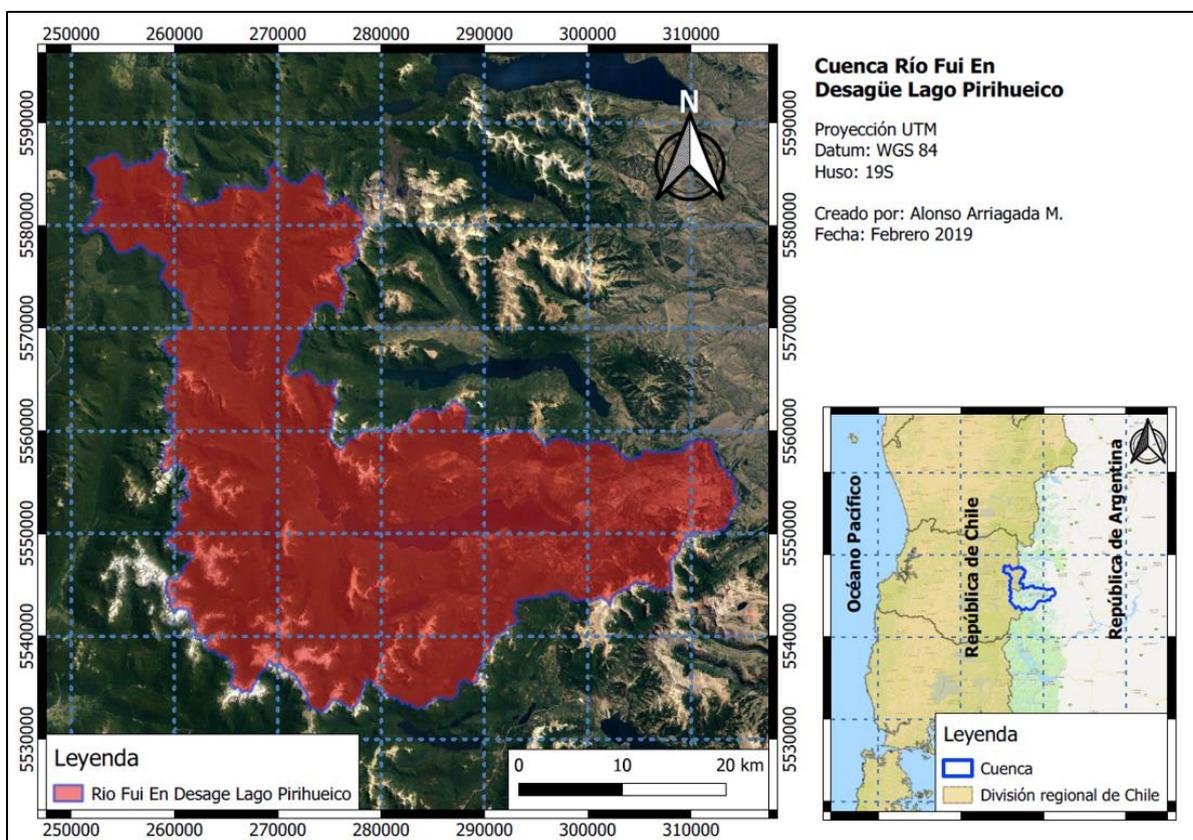
- Recopilación de los antecedentes hidrometeorológicos de interés.
- Revisión de la consistencia de las series meteorológicas y fluviométricas recopiladas para el estudio.
- Analizar las grillas de las simulaciones meteorológicas de los GCM del CMIP5 (Taylor *et al.*, 2015) bajo los escenarios de trayectorias de concentración representativas RCP 4.5 (Thomson *et al.*, 2011) (106 simulaciones) y RCP 8.5 (Riahi *et al.*, 2011) (83 simulaciones), correspondientes a las variables temperatura y precipitación, del período 1979 al 2100.
- Realizar el escalamiento espacial (*Downscaling*) de las simulaciones a la zona de interés.
- Aplicar el método *Quantile – Mapping* (Wood *et al.*, 2004) para la corrección de sesgo, como metodología de escalamiento estadístico.

- Definir los parámetros y variables de entrada (así como sus rangos) para el modelo hidrológico PERM (Peel *et al.*, 2015).
- Ejecutar el modelo hidrológico calibrado, considerando como entrada las proyecciones de las simulaciones escaladas de los GCM para la cuenca objetivo.
- Analizar la proyección de caudales asociada a una probabilidad de excedencia del 85%, en ventanas o períodos de 20 años, con sus respectivos intervalos de confianza.
- Concluir sobre los resultados obtenidos, las metodologías y productos utilizados, y entregar las recomendaciones asociadas y/o propuestas de mejora.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Zona de estudio

La cuenca objetivo del análisis corresponde a “Río Fui en Desagüe Lago Pihueico” (en adelante cuenca), que está localizada en la Macrozona Sur de Chile y cuyo nombre se debe al Inventario Público de Cuencas Hidrográficas y Lagos de la DGA. La cuenca es parte de la hoya alta del Río Valdivia, en la Región de los Ríos, y abarca un sector que incluye la zona cordillerana de la Provincia de Valdivia (Chile) y una porción sobre el departamento de Lácar, en la Provincia de Neuquén (Argentina), con una superficie de 1.498,5 km<sup>2</sup>. En la Figura 1 se muestra la cuenca georreferenciada.



**Figura 1.** Cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pihueico.

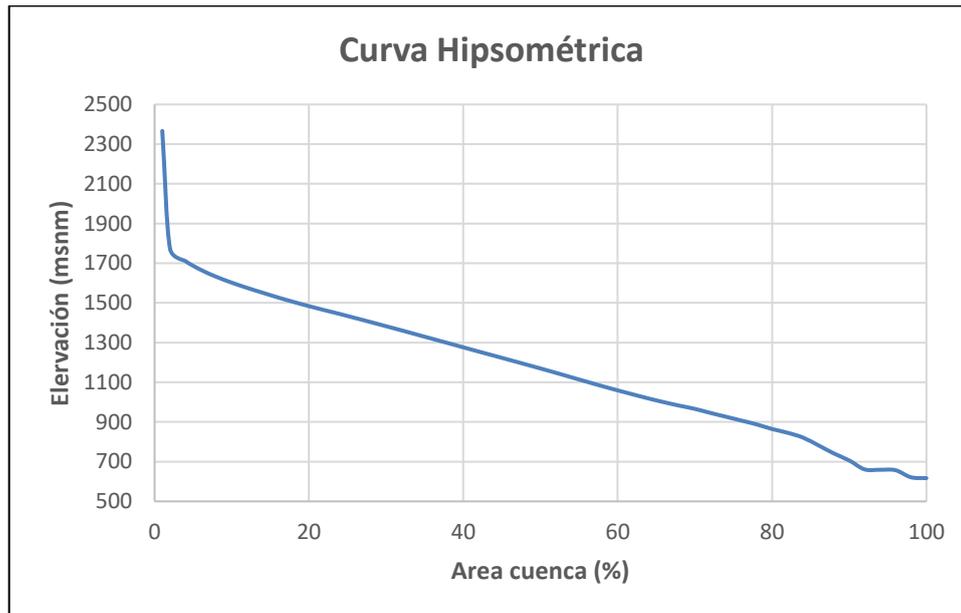
Como lo dice su nombre, la descarga de la cuenca en estudio corresponde a la salida del lago Pihueico,

el cual se localiza en la porción poniente de la cuenca y posee una superficie de 30,45 km<sup>2</sup>, con una elevación promedio de 586 msnm. En el lado argentino de la cuenca se encuentra el lago Lácar, cuya extensión en superficie corresponde a 49 km<sup>2</sup> y una elevación promedio de 625 msnm.

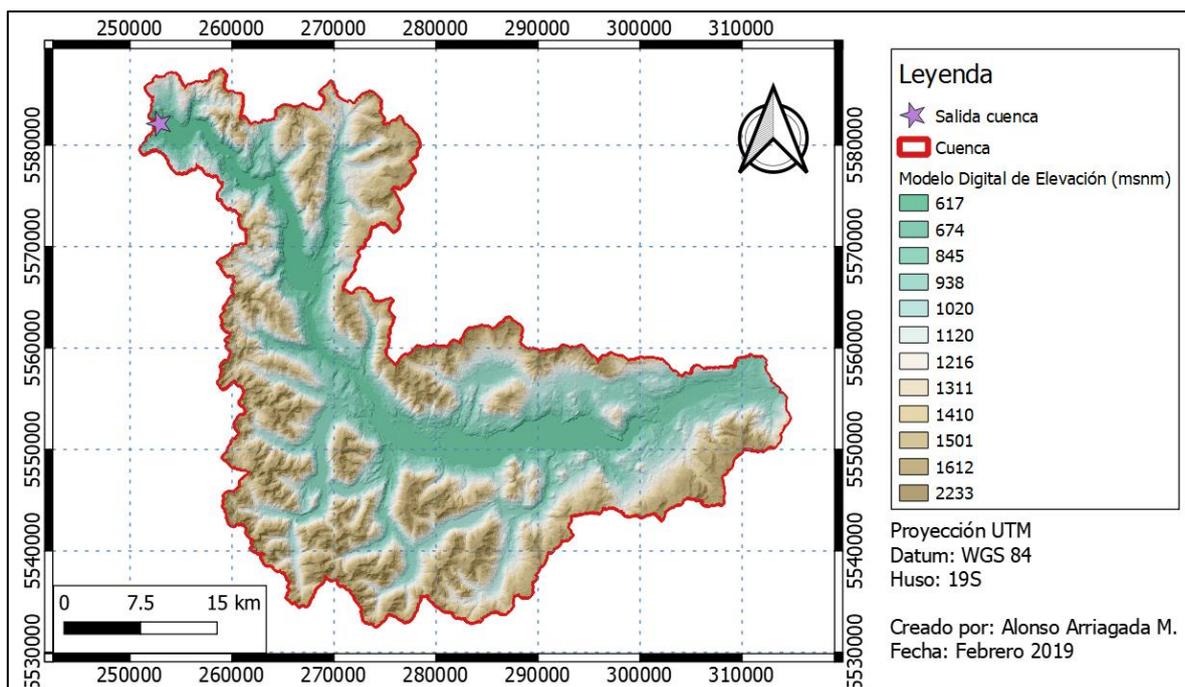
La cuenca posee una cobertura dominada por zonas de bosque, con casi 22% de bosque nativo y de 4,2% de matorral (Alvarez – Garreton *et al.*, 2018), además de los dos lagos mencionados anteriormente, que aportan aproximadamente 5,3% de superficie de agua. Las zonas pobladas de importancia contenidas en la cuenca son la aldea de Pirihueico, aguas arriba del lago del mismo nombre en el lado de Chile, y la ciudad de San Martín de Los Andes, en la vertiente oriente del lago Lácar, en el costado argentino. Las variables morfométricas de interés de la cuenca se obtuvieron utilizando herramientas de análisis de QGIS aplicadas sobre el modelo digital de elevación Aster GDEM (NASA Earthdata, 2011), los resultados se presentan en la Tabla 1, notar que la clasificación de cuencas y sus subdivisiones están de acuerdo al Banco Nacional de Cuencas (BNA) de la DGA. Adicionalmente, se muestra la distribución de elevaciones dentro de la cuenca a través de la curva hipsométrica de la Figura 2 y del mapa de elevaciones de la Figura 3, desarrollado a partir del modelo Aster GDEM anteriormente mencionado.

**Tabla 1.** Variables morfométricas de la cuenca en estudio.

<b>Parámetro</b>	<b>Características</b>
Nombre Subsubcuenca DGA	Río Fui En Desagüe Lago Pirihueico
Nombre Subcuenca DGA	Rio Valdivia Alto (Hasta Desagüe Lago Panguipulli)
Nombre Cuenca DGA	Río Valdivia
Superficie	1.498,5 km <sup>2</sup>
Elevación máxima	2.201 msnm
Elevación mínima	583 msnm
Latitud Salida	39,875 ° S
Longitud Salida	71,890 ° W
Latitud Centroide	40,117 ° S
Longitud Centroide	71,599 ° W
Pendiente media	18,94 %



**Figura 2.** Curva Hipsométrica de la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico.



**Figura 3.** Modelo digital de elevación Aster GDEM delimitado por la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico.

### 3.2. Período de análisis

Dado que el análisis está basado en productos hidrometeorológicos asociados a series temporales desde enero de 1979, el presente estudio se enfocará en el período de abril de 1979 a abril de 2016, considerando 37 años hidrológicos de Chile (de abril a marzo).

Las evaluaciones de posibles escenarios futuros, asociados a Cambio Climático, se ajustan al período de los modelos del CMIP5, que llegan hasta diciembre de 2100.

### 3.3. Clima de la zona

Según la clasificación de Köppen – Geiger (Peel *et al.*, 2007) la cuenca posee 2 tipos de clima, en la zona de Chile corresponde a *Cfb* (Clima oceánico, templado y húmedo, sin estación seca y con veranos cálidos) y en el costado de Argentina a *Csb* (Clima oceánico mediterráneo, con estación seca en verano y verano más suave que el mediterráneo, clima de transición entre *Csa* (mediterráneo) y *Cfb* (oceánico)).

### 3.4. Estaciones meteorológicas

Existen estaciones meteorológicas de la DGA en la zona, las cuales corresponden a Pirihueco en Puerto Fuy, Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico y Pirihueico en Pirihueico, cuyas características se resumen en la Tabla 2 y la Tabla 3.

**Tabla 2.** Estaciones meteorológicas del sector de estudio.

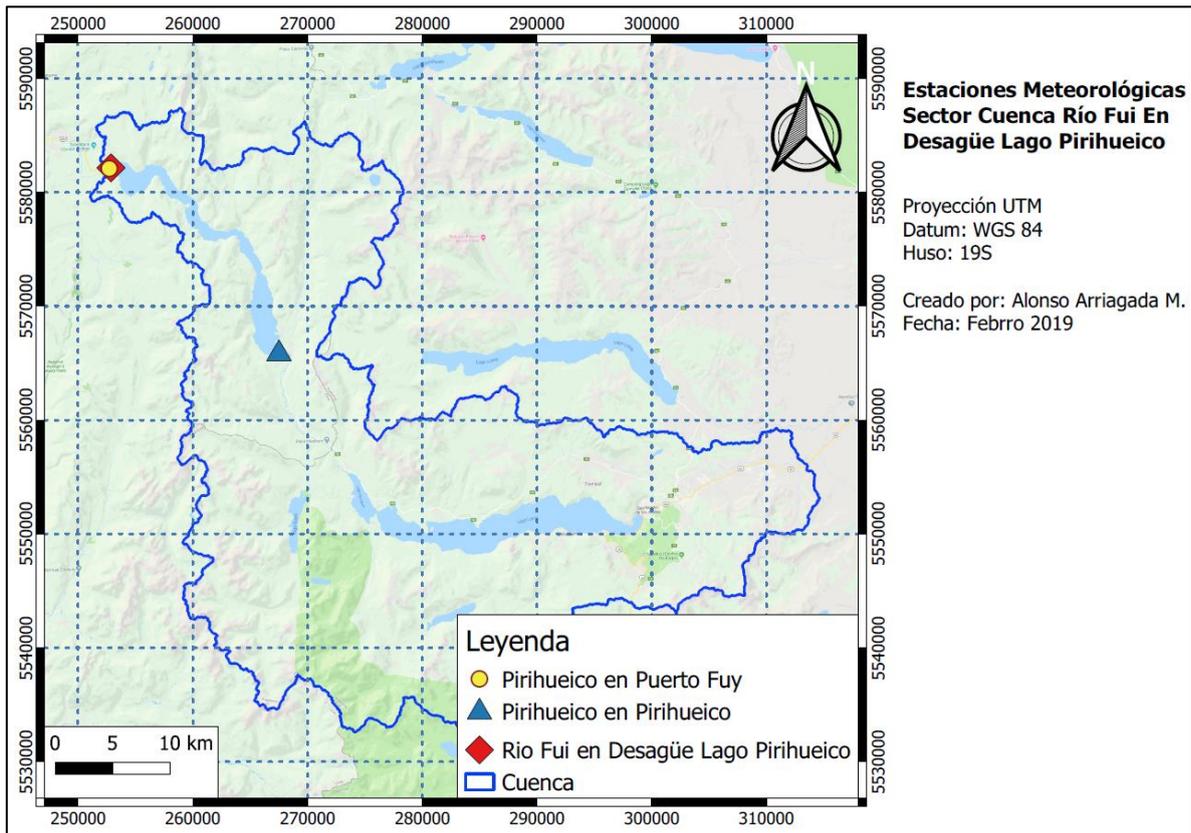
Estación	Latitud S (°)	Longitud W (°)	Elevación (msnm)	Institución
Río Fui En Desagüe Lago Pirihueico	39,875	71,890	600	DGA
Pirihueico En Puerto Fuy*	39,872	71,889	600	DGA
Pirihueico En Pirihueico	40,023	71,722	600	DGA

\* No existen claridad en el nombre Fui/Fuy, se han expuesto los nombres encontrados en la literatura y las instituciones.

**Tabla 3.** Variables medidas en las estaciones meteorológicas del sector de estudio.

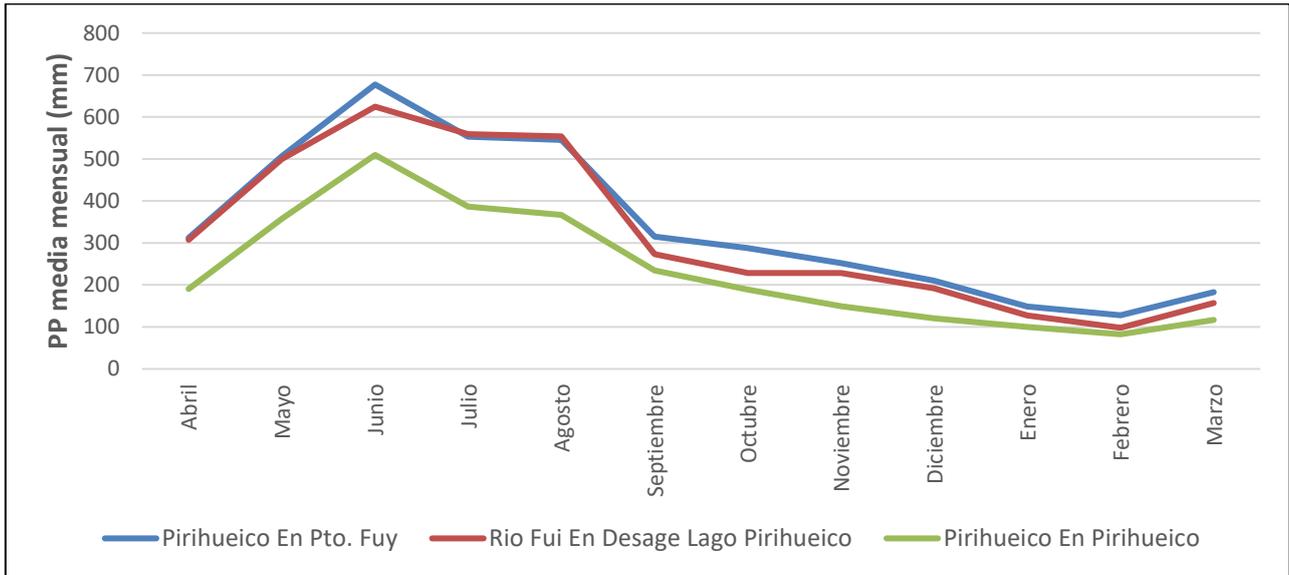
Estación	T° mensual	Longitud registro	Pp. Mensual	Longitud registro	Pp. prom. Anual (mm)*
Río Fui En Desagüe Lago Pirihueico	Si	12/04/2003 - 31/08/2005	Si	01/03/2003 - 31/07/2018	3.630
Pirihueico En Puerto Fuy	No	N/A	Si	01/11/1999 - 31/07/2018	3.999
Pirihueico En Pirihueico	No	N/A	Si	01/05/1939 - 31/07/2018	2.418

\* Período 2004 al 2017



**Figura 4.** Ubicación de estaciones meteorológicas en cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico.

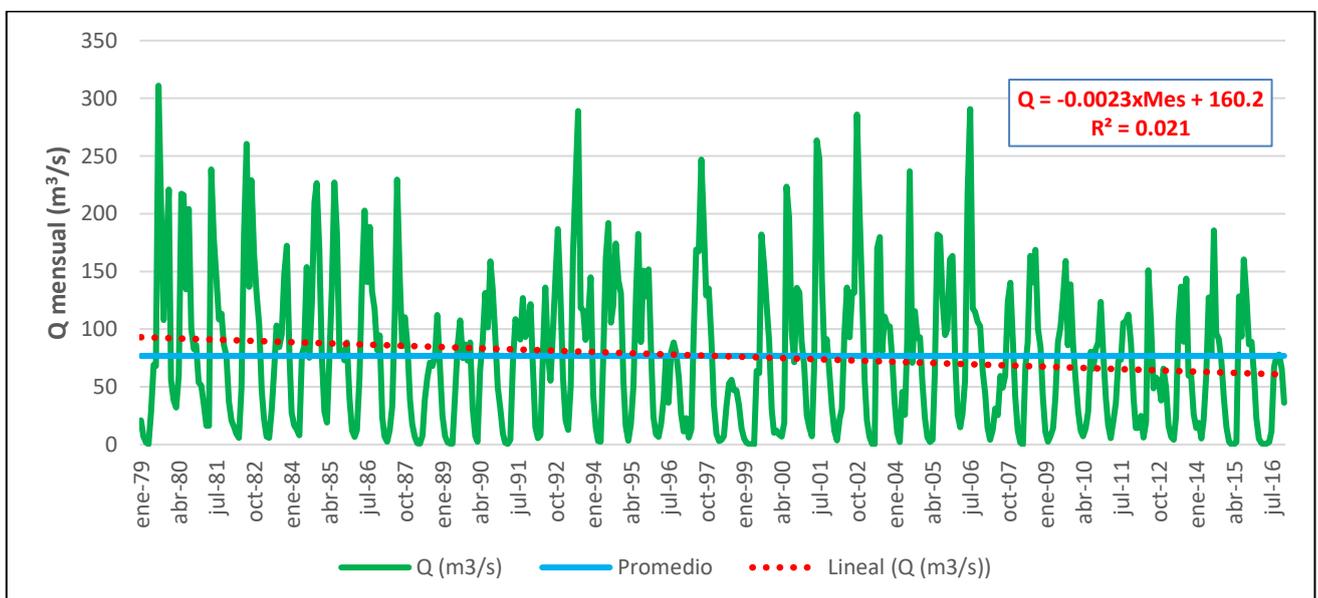
En la Tabla 3 se observa que solo la estación Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico registra temperaturas y precipitaciones, pero los registros no son de una extensión suficiente como para ser considerados completamente representativos (según la bibliografía especializada se debe contar con a los menos 25 o 30 años de datos históricos para considerar los registros de una estación representativos (Sánchez, 2017)). Las otras dos estaciones poseen registros más extensos para las precipitaciones, a pesar de ello la estación Pirihueico en Pirihueico posee un salto sin datos desde 1963 a 1998 (36 años aproximadamente), por lo que su registro más actual corresponde al período 1998 al 2018. A partir de los registros de las estaciones se graficaron los valores promedio de precipitación mensual, considerando un año hidrológico de Chile (abril a marzo), presentados en la Figura 5.



**Figura 5.** Valores promedio mensuales de precipitación en las estaciones meteorológicas de interés (período 1999 a 2016, considerar que hay saltos en los registros).

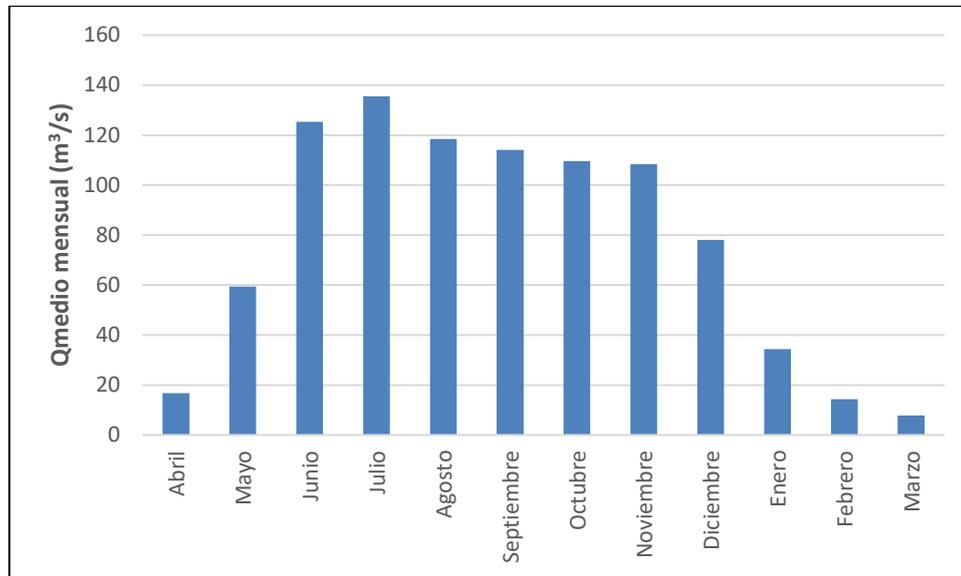
### 3.5. Estaciones Fluviométricas

Respecto a los registros de caudales, se cuenta con las series de caudales mensuales de la estación Río Fui En Desagüe Lago Pirihueico de la DGA y los registros de ENDESA Chile de su estación llamada Fui En Desagüe Lago Pirihueico (Ingendesa, 2010), ubicada en un punto muy cercano a la estación DGA. Dado que el período definido de control (calibración y validación) corresponde a 1979 a 2015 (37 años hidrológicos), se generó una serie de caudales mensuales con los registros de ambas estaciones para dicho período. Una vez llevado a cabo la revisión de consistencia de los datos para dicha generación, se observa que, en los meses de abril de 1995, y marzo y abril de 2009 no se cuenta con registros, por ello, se utilizó el Método Racional Deductivo (Campos, 1998) para completar los registros, considerando lo extenso del registro completo y la factibilidad del uso de dicho método. El resultado se presenta en la Figura 6.



**Figura 6.** Caudales medios mensuales Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico (DGA, ENDESA).

De la Figura 7 se observa que los valores más importantes de caudal se presentan entre junio y diciembre, lo que no concuerda precisamente con el comportamiento de las precipitaciones en las estaciones meteorológicas del sector. Esto último puede deberse al amortiguamiento en la respuesta hidrológica de la cuenca dada la existencia de dos cuerpos de agua en la misma (lago Pirihueico y lago Lácar) y a ciertas acumulaciones de nieve en zonas elevadas de la cuenca (Figura 3).

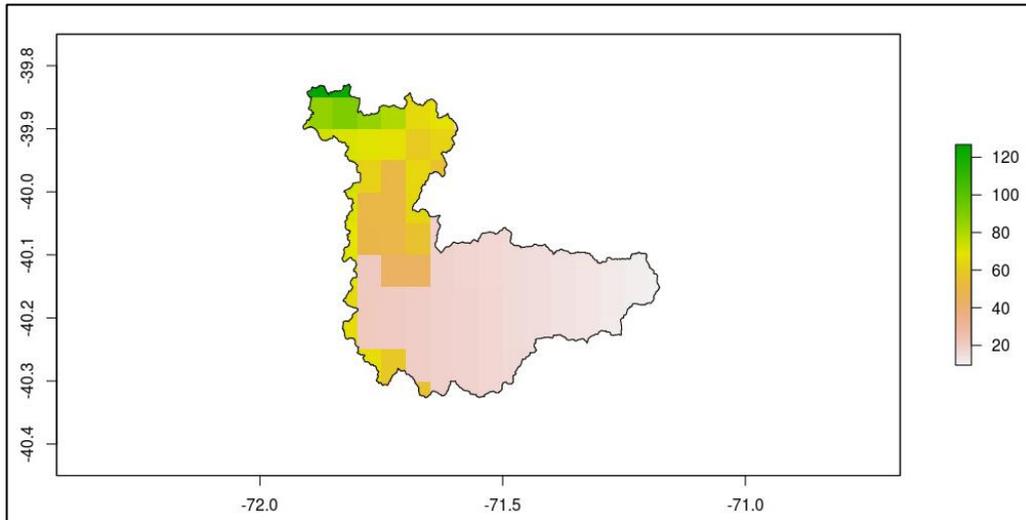


**Figura 7.** Promedios mensuales de caudales medios Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico (DGA, ENDESA).

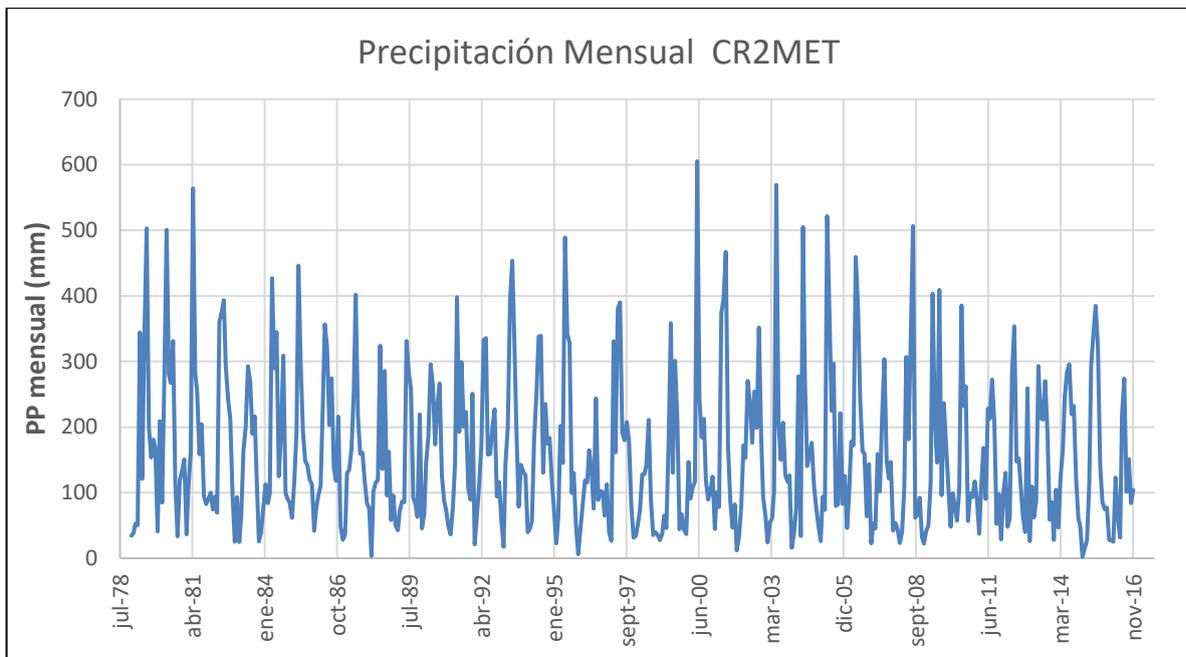
### 3.6. Productos grillados del CR2

El Centro del Clima y la Resiliencia CR2 cuenta en su base de datos con productos grillados llamados CR2MET (CR2, 2017), que corresponde a grillas de  $0,05^\circ$  latitud – longitud con información meteorológica (precipitación, temperaturas medias y extremas) para el territorio de Chile continental en el período 1979 a 2016. El desarrollo de este producto responde a la necesidad de contar con datos distribuidos espacialmente en concordancia con la información observacional disponible para el estudio del clima e hidrología a escala regional, la evaluación de modelos atmosféricos e hidrológicos, entre otras aplicaciones. Los productos se generan basándose en información topográfica, observaciones de terreno, reanálisis atmosférico ERA – Interim (ECMWF, 2019) e información estimada mediante imágenes satelitales MODIS LST (NASA).

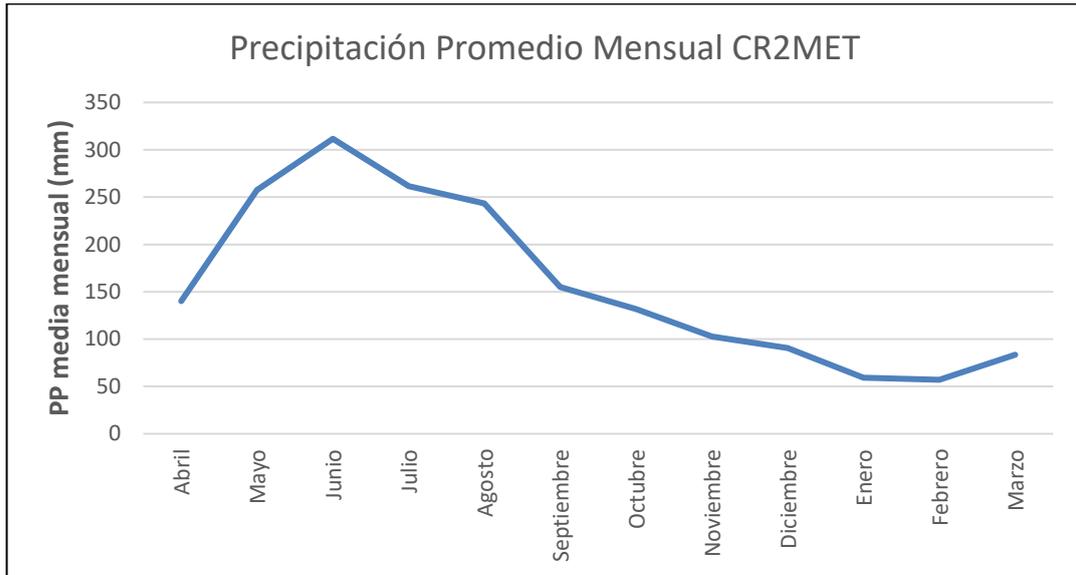
En la presente evaluación se escaló el producto CR2MET de precipitaciones mensuales y el de temperaturas medias a la cuenca objetivo, y luego, se realizó un resampleo (utilizando la metodología de vecino más cercano) de las grillas resultantes. Se consideraron paquetes y rutinas de cálculo en R para llevar a cabo estas tareas. Para el caso de la temperatura se realiza un promedio sobre la grilla y las precipitaciones corresponden a una suma ponderada con el tamaño de la grilla. Los rásters resultantes sobre la cuenca objetivo se presentan en la Figura 8 y la Figura 11, mientras que en la Figura 9 y la Figura 12 se presentan las series de tiempo obtenidas del proceso.



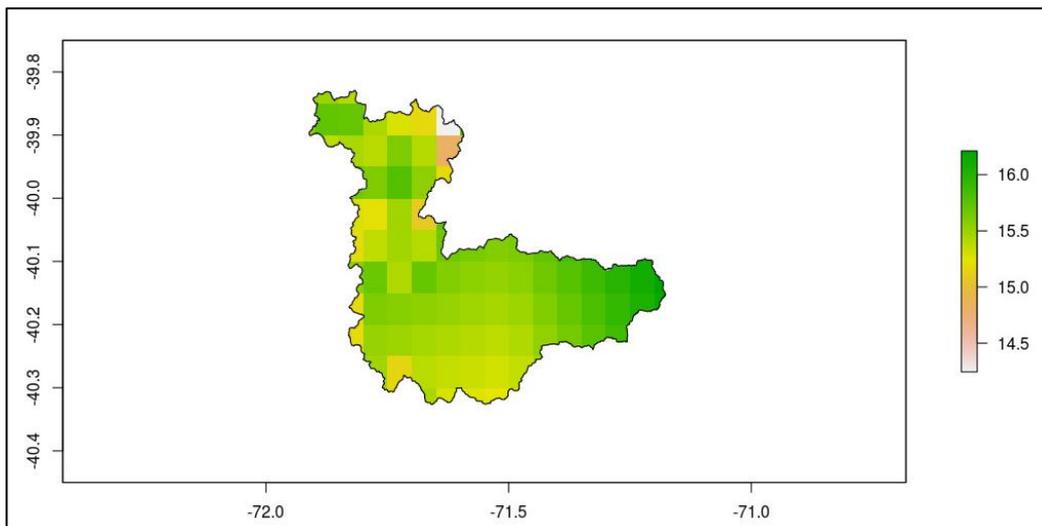
**Figura 8.** Precipitación promedio mensual (mm) distribuida sobre la cuenca Ríu Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET.



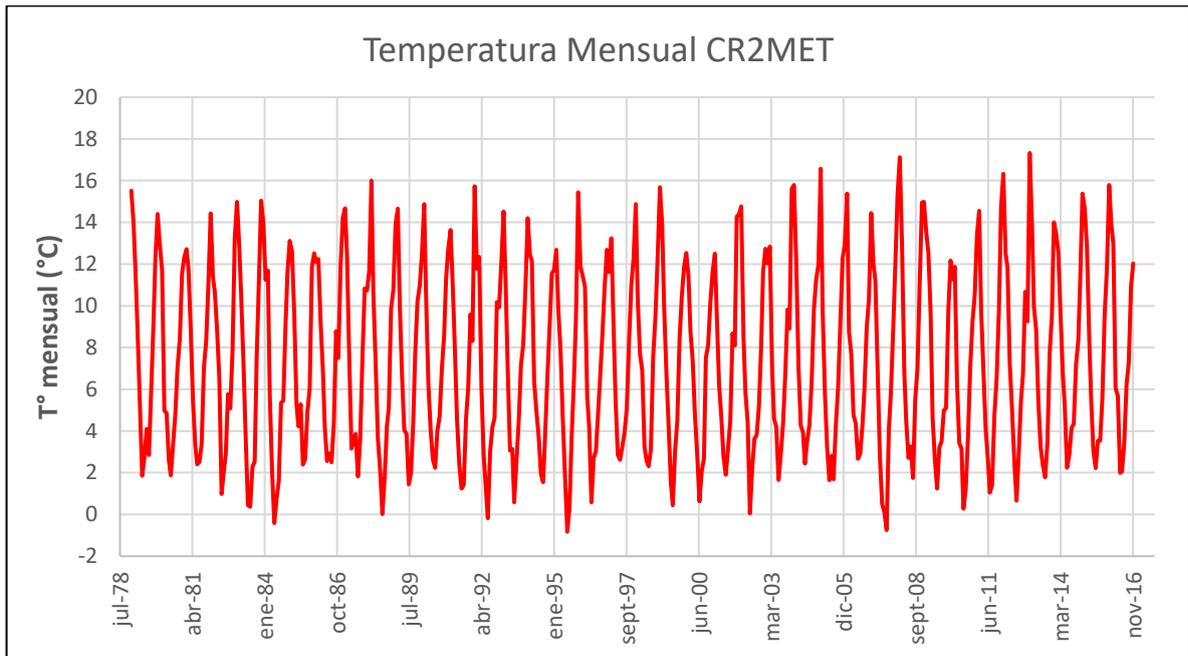
**Figura 9.** Serie de precipitación promedio mensual distribuida sobre la cuenca Ríu Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET.



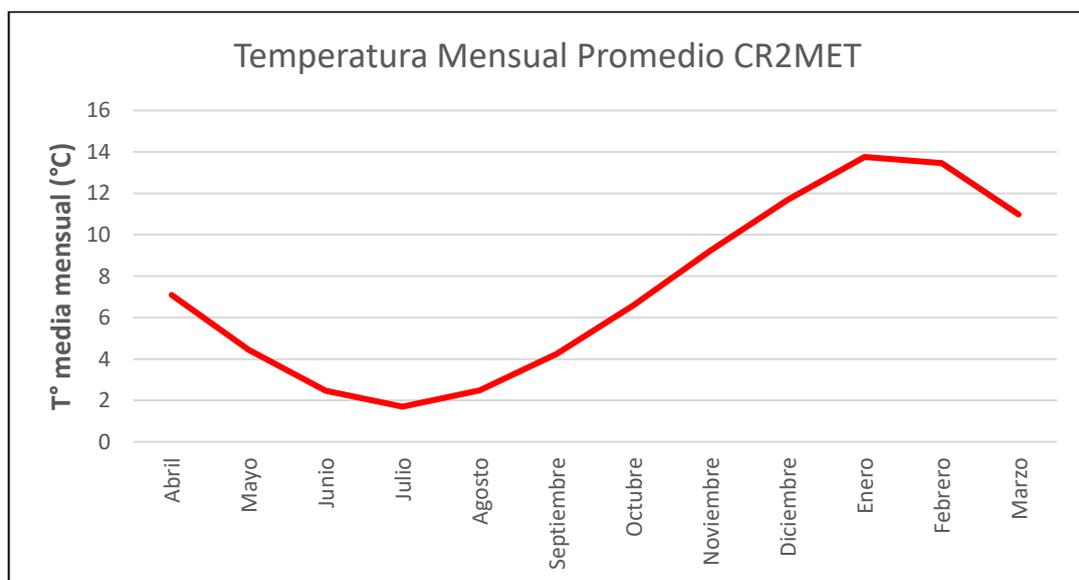
**Figura 10.** Promedios mensuales de precipitación distribuida sobre la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET.



**Figura 11.** Temperatura promedio mensual (°C) distribuida sobre la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET.



**Figura 12.** Serie de temperatura promedio mensual distribuida sobre la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET.



**Figura 13.** Promedios mensuales de temperatura distribuida sobre la cuenca Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico, estimada utilizando CR2MET.

### 3.7. Entradas del modelo hidrológico

#### 3.7.1. Modelos GCM del CMIP5

Las simulaciones climáticas globales del CMIP5 (Stocker *et al.*, 2013) se realizaron en el marco de la preparación del quinto reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) como ejercicio de comparación interna de modelos, organizado por el Programa Mundial de Investigación Climática (WCRP).

Para el presente análisis se consideraron los 106 modelos GCM bajo el escenario RCP 4.5 (Thomson *et*

al., 2011) y 83 modelos GCM bajo el escenario RCP 8.5 (Riahi *et al.*, 2011) de CMIP5, con el objetivo de estimar proyecciones de escorrentía en la cuenca del río Fui en el desagüe del Lago Pirihueico, visualizando el rango de incertidumbre entregada por los GCM.

Los modelos del CMIP5 provienen de los distintos centros de modelación climática alrededor del mundo, los cuales fueron descargados del sitio web asociado al WCRP para la presente evaluación, y se listan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Listado de las características de los GCMs del CMIP5.

N°	GCM	Centro de modelamiento climatológico y ubicación	Ensamble	Resolución	Referencia	Stratospheric Ozone
1	ACCESS1-0	Centre for Australian Weather and Climate Research, Australia	r1i1p1	Atmospheric: 1.875°x1.25°, Ocean: 1°x1°	Dix et al. (2013)	No Chem.
2	ACCESS1-3	Centre for Australian Weather and Climate Research, Australia	r1i1p1	Atmospheric: 1.875°x1.25°, Ocean: 1°x1°	Dix et al. (2013)	No Chem.
3	BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, China	r1i1p1	Atmospheric: 2.7906°x2.8125°, Ocean: 1°x1°	Ji et al. (2014)	Chem.
4	CCSM4	National Centre for Atmospheric Research, USA	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1, r4i1p1, r5i1p1, r6i1p1	Atmospheric: 0.9424°x1.25°, Ocean: 1°x1°	Meehl et al. (2012)	Chem.
5	CESM1-BGC	Community Earth System Model Contributors	r1i1p1	Atmospheric: 0.9424°x1.25°, Ocean: 1°x1°	Gent et al. (2011)	Chem.
6	CESM1-CAM5	Community Earth System Model Contributors	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1	Atmospheric: 0.9424°x1.25°, Ocean: 1°x1°	Gent et al. (2011)	Chem.
7	CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italy	r1i1p1	Atmospheric:3.7111° x3.75°	Vichi et al. (2011)	No Chem.
8	CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italy	r1i1p1	Atmospheric: 0.7484°x0.75°	Vichi et al. (2011)	No Chem.
9	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques, France	r1i1p1	Atmospheric: 1.4008°x1.40625°, Ocean: 1°x1°	Voltaire et al. (2013)	Chem.
10	CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1, r4i1p1, r5i1p1, r6i1p1, r7i1p1, r8i1p1, r9i1p1, r10i1p1	Atmospheric: 1.8653°x1.875°, Ocean: 1.875°x1.875°	Rotstayn et al. (2012)	No Chem.
11	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1, r4i1p1, r5i1p1	Atmospheric: 2.7906°x2.8125°, Ocean: 0.9303°x1.1407°	Arora et al. (2011)	No Chem.
12	EC-EARTH	EC-EARTH consortium, Europe	r2i1p1, r8i1p1, r9i1p1, r12i1p1	Atmospheric: 1.1215°x1.125°	Hazeleger et al. (2011)	No Chem.
13	FGOALS-g2	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences and CESS, Tsinghua University, China	r1i1p1	Atmospheric: 2.7906°x2.8125°, Ocean: 1°x1°	Li et al. (2013)	No Chem.
14	FGOALS-s2	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, China, The First Institute of Oceanography, SOA, China	r1i1p1	Atmospheric: 1.6590°x2.8125°, Ocean: 1°x1°	Bao et al. (2013)	No Chem.
15	FIO-ESM	The First Institute of Oceanography, SOA, China	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1	Atmospheric: 2°x2°	Qiao et al. (2013)	No Chem.
16	GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	r1i1p1	Atmospheric: 2°x2.5°, Ocean: 0.3344°x1°	Donner et al. (2011)	Chem.
17	GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	r1i1p1	Atmospheric: 2.0225°x2°, Ocean: 0.375°x1°	Dunne et al. (2012)	No Chem.

N°	GCM	Centro de modelamiento climatológico y ubicación	Ensamble	Resolución	Referencia	Stratospheric Ozone
18	GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	r1i1p1	Atmospheric: 2.0225°x2.5°, Ocean: 0.3344°x1°	Dunne et al. (2012)	No Chem.
19	GISS-E2-H-CC	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	r1i1p1	Atmospheric: 2°x2.5°, Ocean: 1°x1°	Schmidt et al. (2006)	No Chem.
20	GISS-E2-H-p1	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1, r4i1p1, r5i1p1	Atmospheric: 2°x2.5°, Ocean: 1°x1°	Schmidt et al. (2006)	No Chem.
21	GISS-E2-H-p2 and GISS-E2-H-p3	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	r1i1p2, r1i1p3, r2i1p2, r2i1p3, r3i1p2, r3i1p3, r4i1p2, r4i1p3, r5i1p2, r5i1p3	Atmospheric: 2°x2.5°, Ocean: 1°x1°	Schmidt et al. (2006)	Chem.
22	GISS-E2-R-CC	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	r1i1p1	Atmospheric: 2°x2.5°, Ocean: 1°x1.25°	Schmidt et al. (2006)	No Chem.
23	GISS-E2-R-p1	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1, r4i1p1, r5i1p1, r6i1p1	Atmospheric: 2°x2.5°, Ocean: 1°x1.25°	Schmidt et al. (2006)	No Chem.
24	GISS-E2-R-p2 and GISS-E2-R-p3	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	r1i1p2, r1i1p3, r2i1p2, r2i1p3, r3i1p2, r3i1p3, r4i1p2, r4i1p3, r5i1p2, r5i1p3, r6i1p3	Atmospheric: 2°x2.5°, Ocean: 1°x1.25°	Schmidt et al. (2006)	Chem.
25	HadGEM2-AO	National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Korea	r1i1p1	Atmospheric: 1.25°x1.875°, Ocean: 1°x1°	Martin et al. (2011)	No Chem.
26	HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre, UK	r1i1p1	Atmospheric: 1.25°x1.875°, Ocean: 1°x1°	Martin et al. (2011)	No Chem.
27	HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre, UK	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1, r4i1p1	Atmospheric: 1.25°x1.875°, Ocean: 1°x1°	Collins et al. (2011)	No Chem.
28	IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace, France	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1, r4i1p1	Atmospheric: 1.8947°x3.75°, Ocean: 2°x2°	Dufresne et al. (2013)	Chem.
29	IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace, France	r1i1p1	Atmospheric: 1.2676°x2.5°, Ocean: 2°x2°	Dufresne et al. (2013)	Chem.
30	IPSL-CM5B-LR	Institut Pierre Simon Laplace, France	r1i1p1	Atmospheric: 1.8947°x3.75°, Ocean: 2°x2°	Dufresne et al. (2013)	Chem.
31	MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan	r1i1p1	Atmospheric: 2.7906°x2.8125°, Ocean: 0.5582°x1.40625°	Watanabe et al. (2011)	Chem.
32	MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan	r1i1p1	Atmospheric: 2.7906°x2.8125°, Ocean: 0.5582°x1.40625°	Watanabe et al. (2011)	Nochem.
33	MIROC5	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1	Atmospheric: 1.4008°x1.40625°, Ocean: 0.5°x1.40625°	Watanabe et al. (2011)	Nochem.
34	MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1	Atmospheric: 1.8653°x1.875°	Giorgetta et al. (2013)	No Chem.
35	MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1	Atmospheric: 1.8653°x1.875°	Giorgetta et al. (2013)	No Chem.
36	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Japan	r1i1p1	Atmospheric: 1.8653°x1.875°	Yukimoto et al. (2012)	No Chem.
37	NorESM1-ME	Norwegian Climate Centre, Norway	r1i1p1	Atmospheric: 1.8947°x2.5°	Iversen et al. (2013)	Chem.
38	NorESM1-M	Norwegian Climate Centre, Norway	r1i1p1	Atmospheric: 1.8947°x2.5°	Iversen et al. (2013)	Chem.
39	bcc-csm1-1-m	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China	r1i1p1	Atmospheric: 2.7906°x2.8125°, Ocean: 1°x1°	Wu (2012)	No Chem.
40	bcc-csm1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China	r1i1p1	Atmospheric: 2.7906°x2.8125°, Ocean: 1°x1°	Wu (2012)	No Chem.

N°	GCM	Centro de modelamiento climatológico y ubicación	Ensamble	Resolución	Referencia	Stratospheric Ozone
41	inmcm4	Russian Institute for Numerical Mathematics, Russia	r1i1p1	Atmospheric: 1.5°x2°, Ocean: 0.5°x1°	Volodin et al. (2010)	No Chem.

### 3.7.2. Downscaling

Considerando la grilla de cada GCM, se utilizaron rutinas y paquetes en R para seleccionar el cuadrante representativo de la cuenca analizada en el presente estudio (escalamiento espacial).

Cada serie temporal a escala mensual, obtenida a partir del proceso descrito anteriormente, debe ser ajustado para corregir su sesgo a través de un escalamiento estadístico llamado *Bias Correction* (Corrección de Sesgo). Esta corrección de sesgo se realizó considerando el método *Quantile – Mapping* (Wood *et al.*, 2004), mediante rutinas y paquetes en R, el cual considera la aplicación de una relación estadística para aplicar el escalamiento. Notar que el período de control corresponde al rango entre 1979 y 2005, de acuerdo a lo definido por los resultados de Taylor. Se considera que las precipitaciones se distribuyen como una función Gamma de dos parámetros (Sharma *et al.*, 2007) y las temperaturas como una función Normal (Wilks, 2011). La expresión general de la transformación se presenta en la ecuación 1.

$$x_{BC\_GCM} = F_{obs}^{-1}[F_{GCM\_Control}(x_{GCM})] \quad [1]$$

Donde,

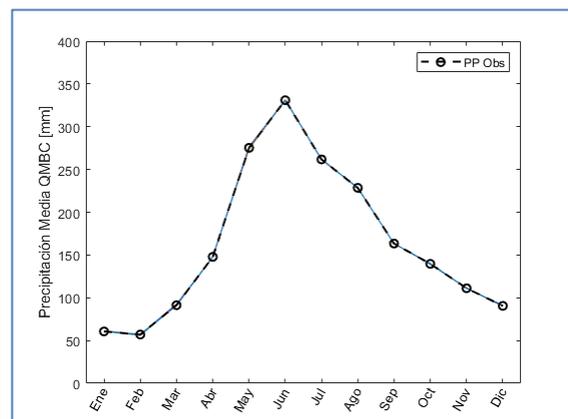
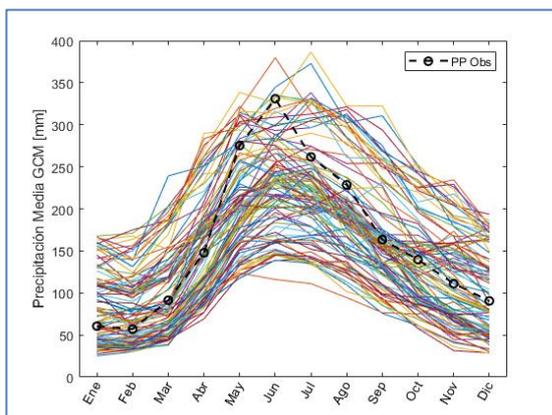
$x_{GCM}$ : Variable proveniente de un GCM (Temperatura o precipitación).

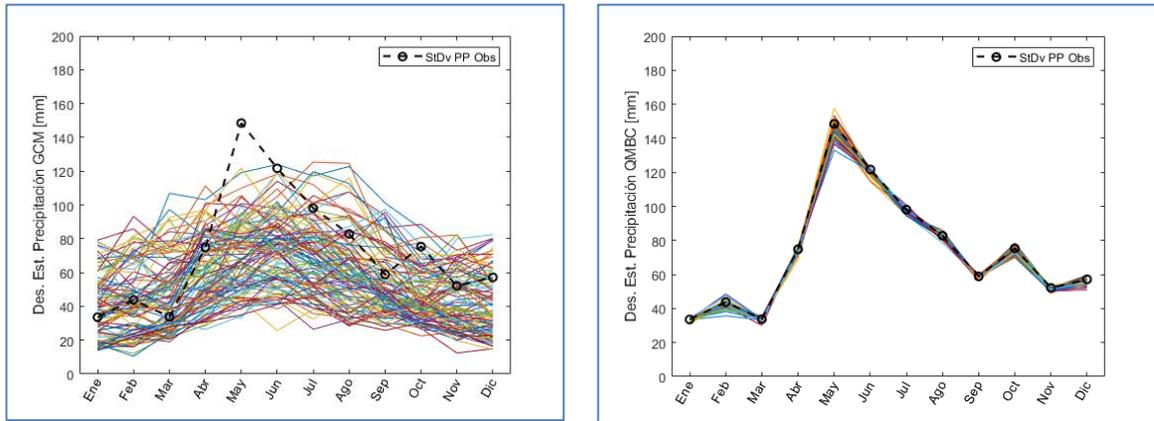
$x_{BC\_GCM}$ : Variable corregida del GCM (Temperatura o precipitación).

$F_{obs}^{-1}$ : Función de distribución de probabilidad acumulada del período de control para la serie observada.

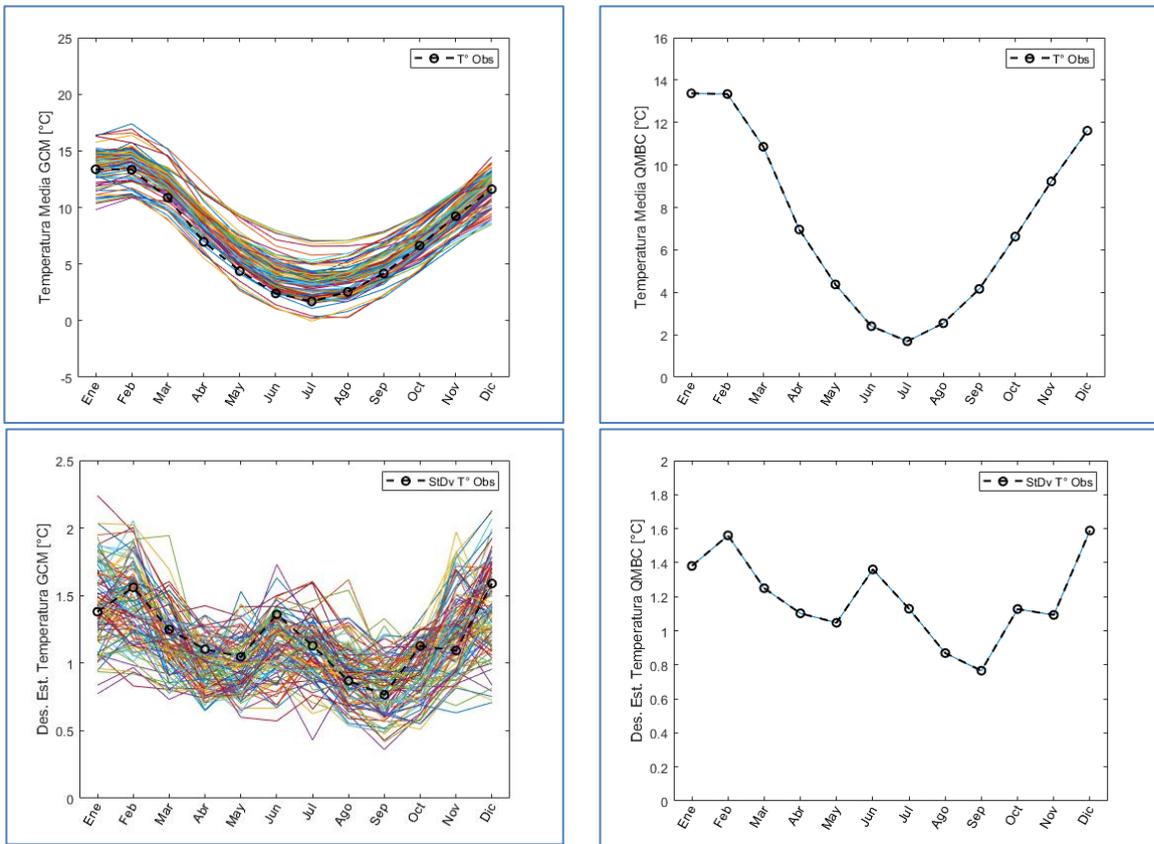
$F_{GCM\_Control}$ : Función de distribución de probabilidad acumulada del período de control para la serie del GCM histórico.

Para reflejar las transformaciones ejecutadas por el escalamiento se presentan a los gráficos de las Figura 14 a la Figura 17, donde se muestran los estadígrafos media y desviación estándar, para cada mes y cada GCM, realizados para el período histórico de control.

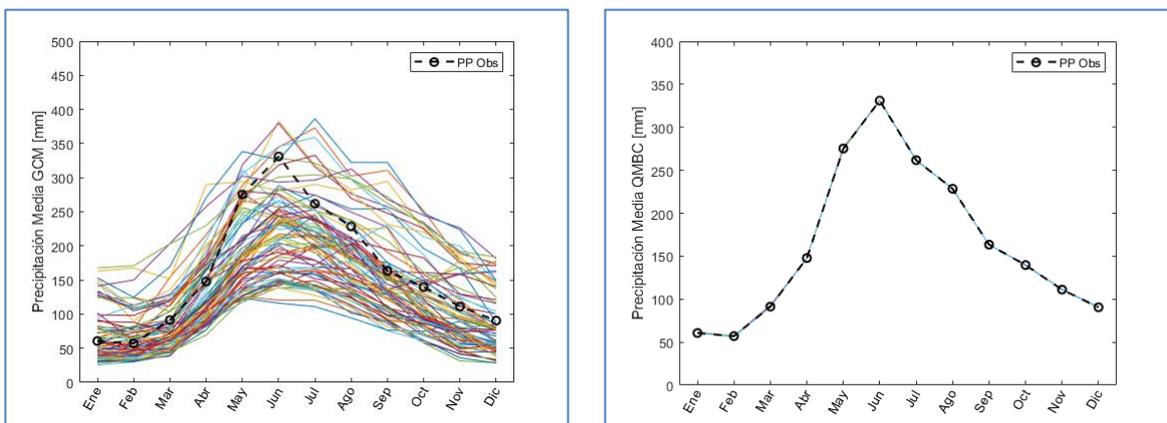


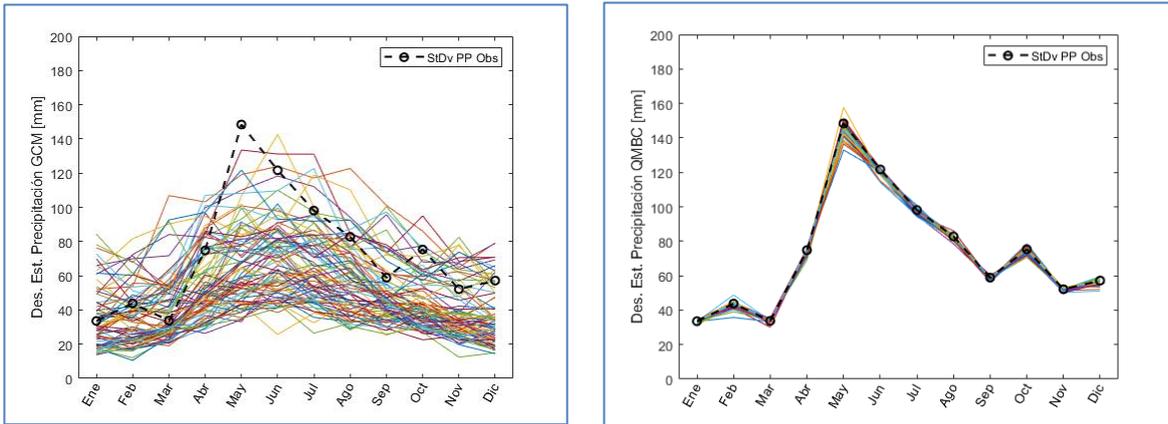


**Figura 14.** Media mensual (arriba) y Desviación Estándar mensual (abajo) de cada GCM (líneas de colores) del RCP 4.5 para la precipitación. A la izquierda sin corrección de sesgo y a la derecha luego de aplicar la corrección.

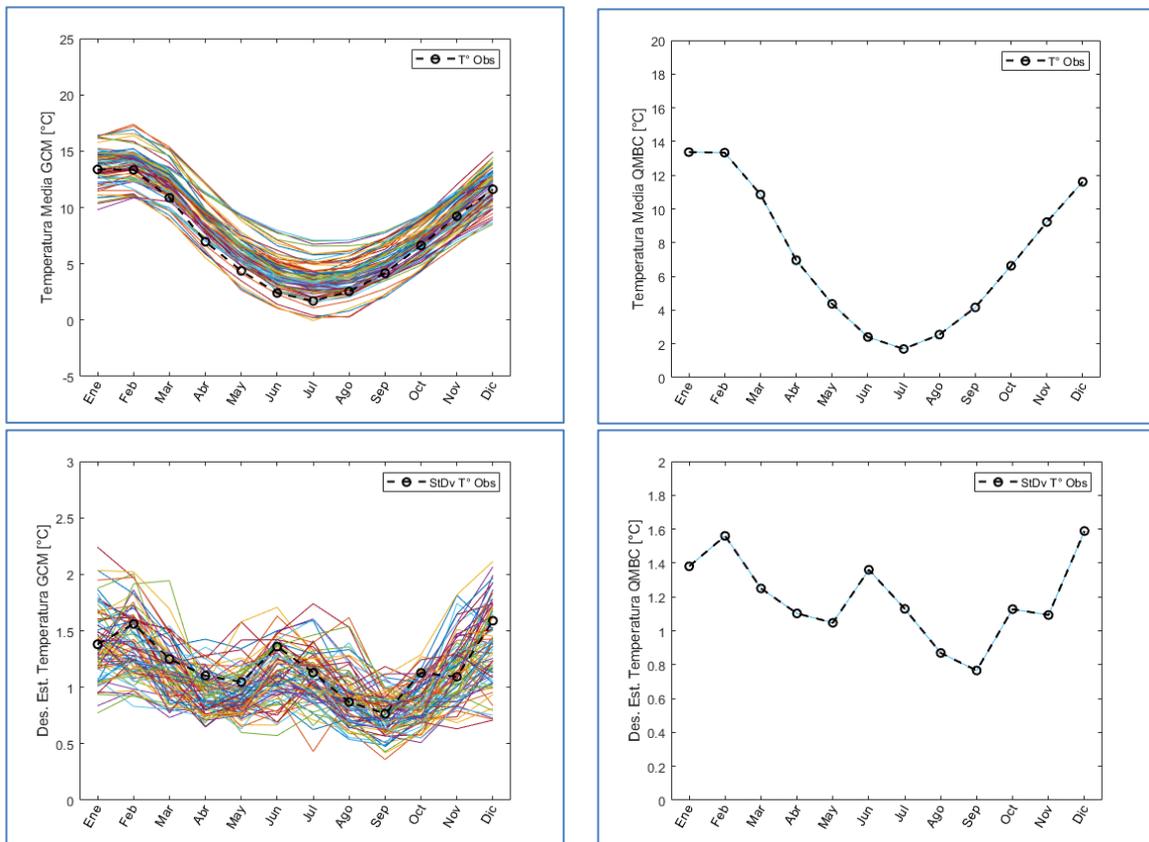


**Figura 15.** Media mensual (arriba) y Desviación Estándar mensual (abajo) de cada GCM (líneas de colores) del RCP 4.5 para la temperatura. A la izquierda sin corrección de sesgo y a la derecha luego de aplicar la corrección.



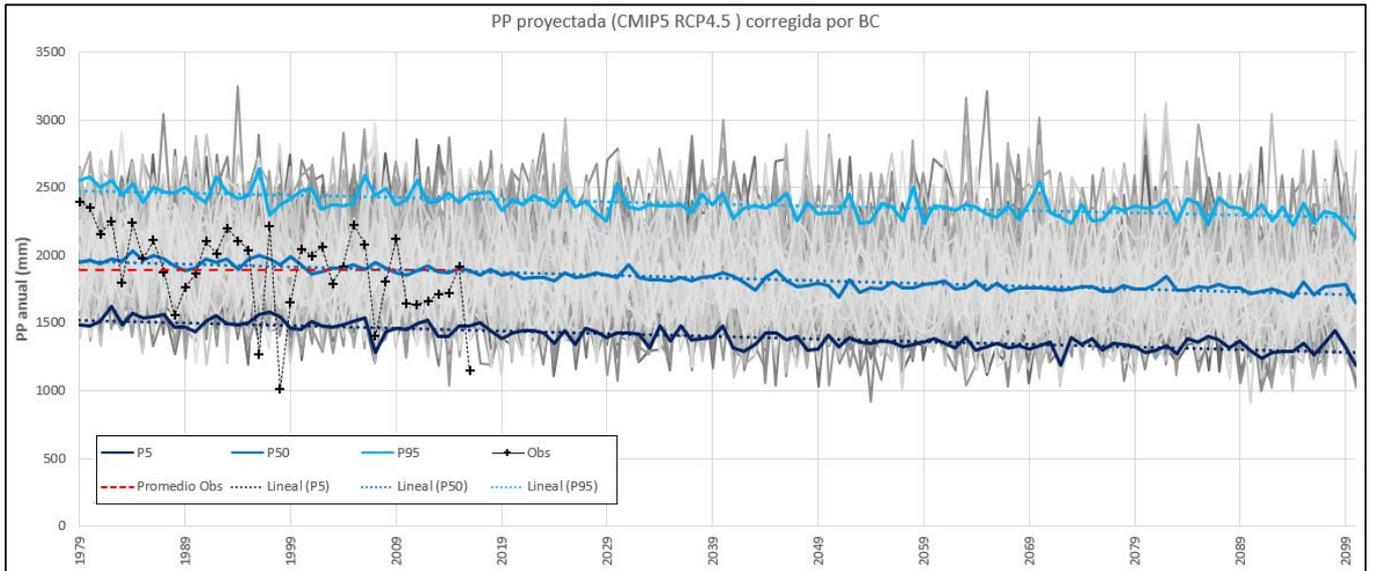


**Figura 16.** Media mensual (arriba) y Desviación Estándar mensual (abajo) de cada GCM (líneas de colores) del RCP 8.5 para la precipitación. A la izquierda sin corrección de sesgo y a la derecha luego de aplicar la corrección.

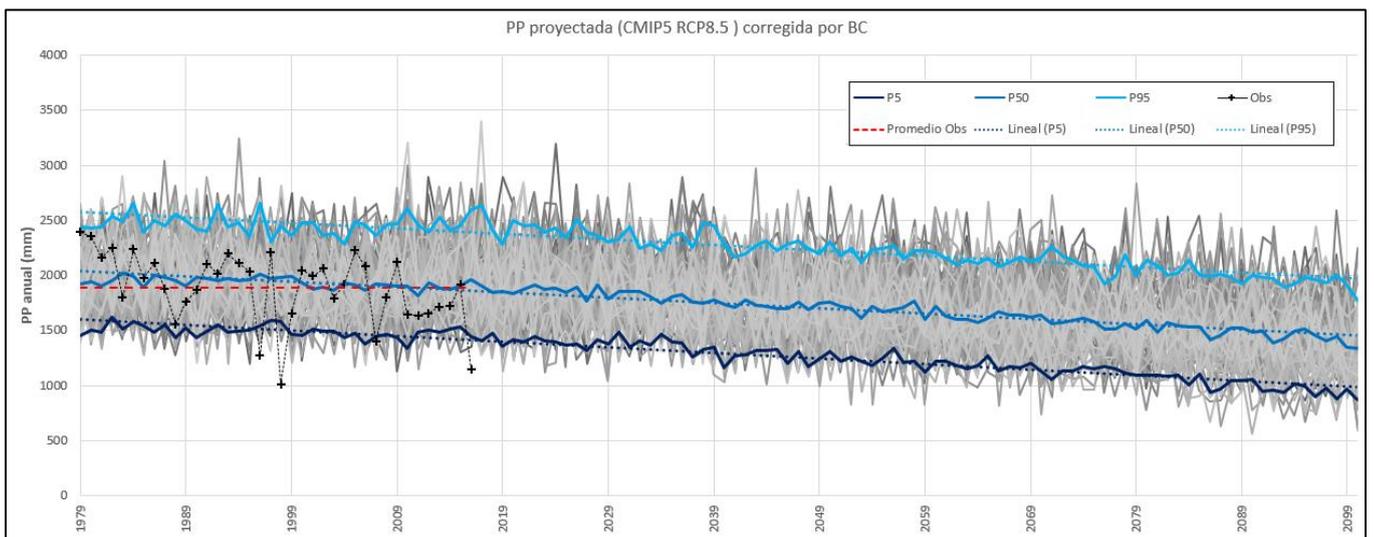


**Figura 17.** Media mensual (arriba) y Desviación Estándar mensual (abajo) de cada GCM (líneas de colores) del RCP 8.5 para la temperatura. A la izquierda sin corrección de sesgo y a la derecha luego de aplicar la corrección.

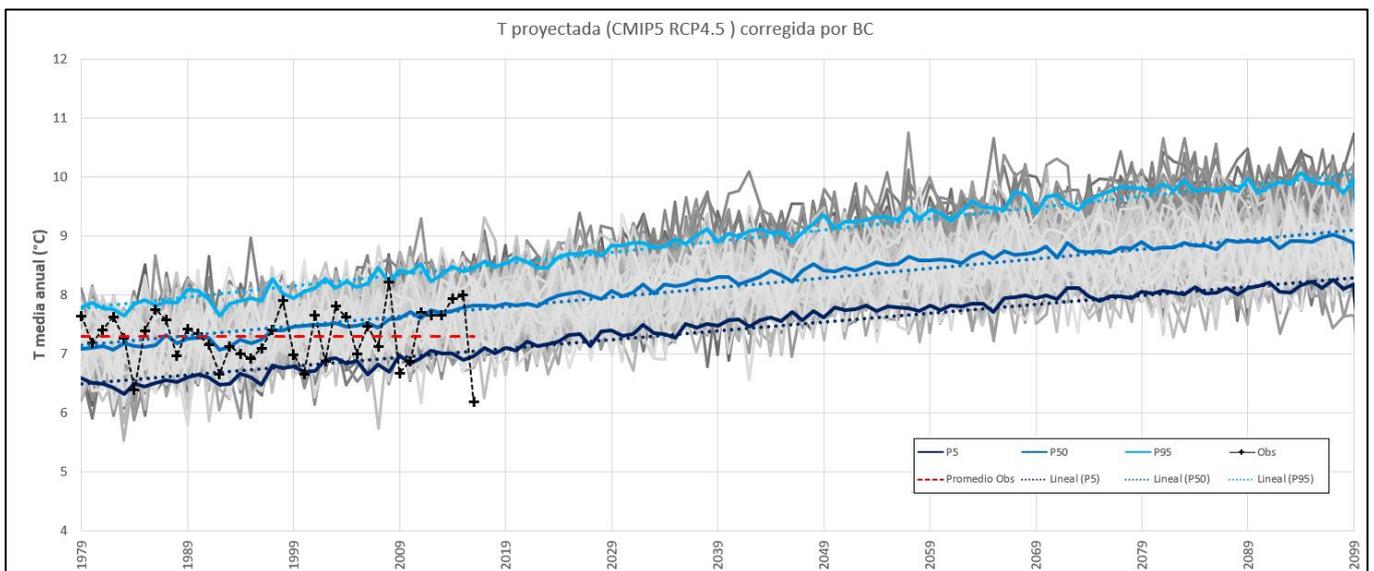
Los resultados de la aplicación de QMBC (*Quantile – Mapping Bias Correction*) a las series de precipitaciones y temperaturas proyectadas de los GCM se presentan de la Figura 18 la Figura 21, a escala anual, donde además se incluyen los percentiles 5, 50 y 95%.



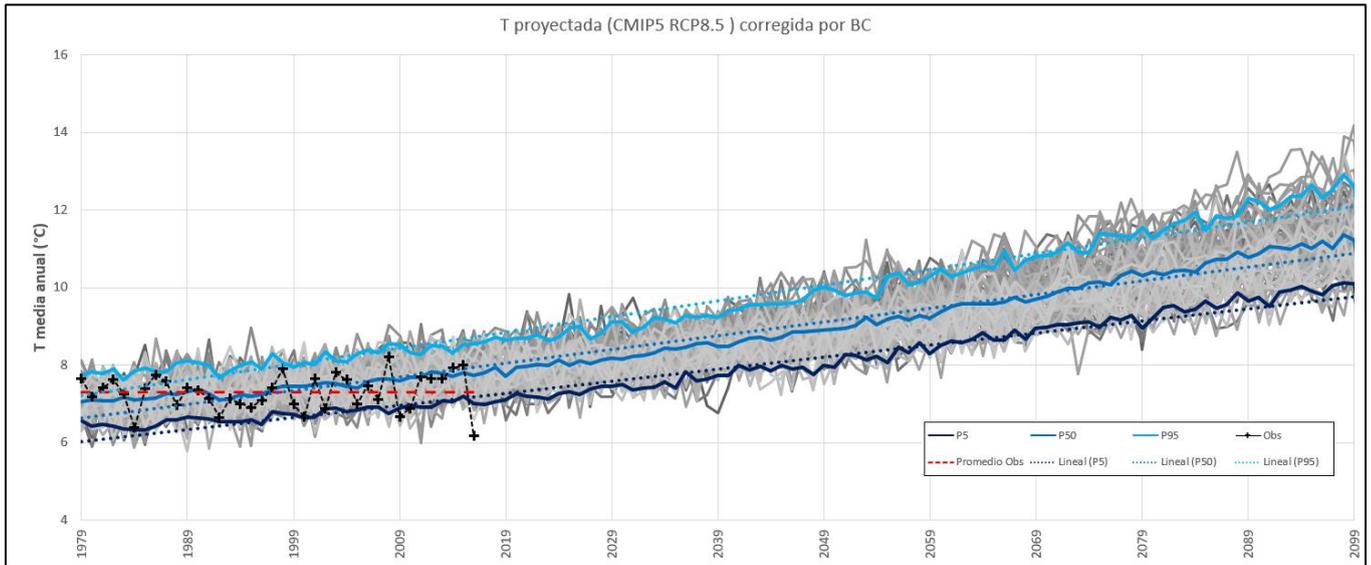
**Figura 18.** Precipitación proyectada a partir de los GCM del RCP 4.5, corregidas con QMBC.



**Figura 19.** Precipitación proyectada a partir de los GCM del RCP 8.5, corregidas con QMBC.



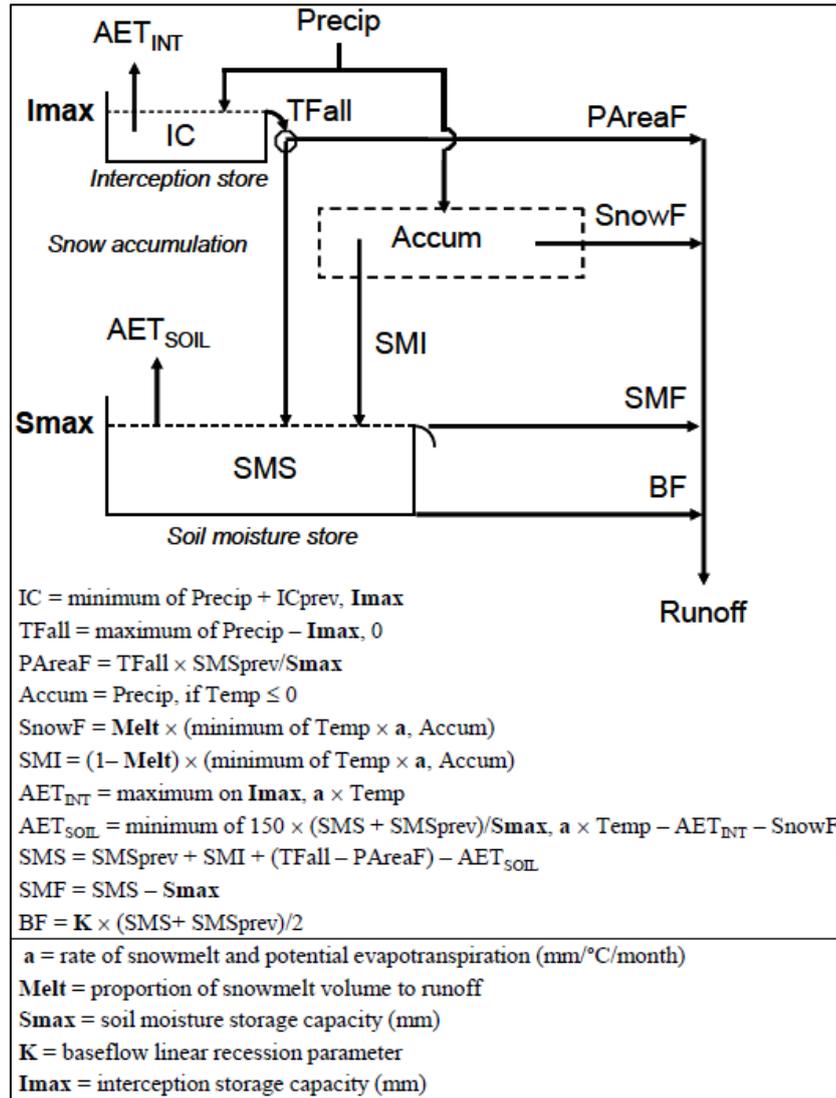
**Figura 20.** Temperatura proyectada a partir de los GCM del RCP 4.5, corregidas con QMBC.



**Figura 21.** Temperatura proyectada a partir de los GCM del RCP 8.5, corregidas con QMBC.

### 3.7.3. Modelo Hidrológico

Para el presente estudio se considera un modelo hidrológico agregado en base física llamado PERM (*Monthly Conceptual Precipitation – Evapotranspiration – Runoff Model*, Peel et al., 2015), cuyo desarrollo está orientado específicamente a estimar caudales considerando series de precipitaciones y temperaturas obtenidas de los GCMs. PERM es un modelo conceptual de sencilla aplicación, a escala mensual, con un número reducido de parámetros agregados de calibración (5 en total). El modelo estima la escorrentía considerando cuatro contenedores, a saber, el de intercepción de almacenamiento superficial, el de acumulación de nieves, el de acumulación de humedad del suelo (aguas subterráneas) y el de flujo base. En la Figura 22 se muestra el esquema conceptual del modelo PERM.



**Figura 22.** Estructura del modelo PERM y sus parámetros de calibración (indicados en letras resaltadas en negrita) (Peel, 2015).

### 3.7.4. Calibración del modelo hidrológico

La calibración del modelo se realizó considerando rangos de 24 (1979 – 2002) a 37 años hidrológicos (1979 – 2015), determinando en cada caso el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) y la Eficiencia de Nash – Sutcliffe ( $NSE$ ) (Nash y Sutcliffe, 1970) como los indicadores de eficiencia de la calibración, en escala mensual y anual.

$$R^2 = \frac{\sum_k (x_{S_k} - \bar{x}_O)^2}{\sum_k (x_{O_k} - \bar{x}_O)^2} \quad [2]$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_k (x_{S_k} - x_{O_k})^2}{\sum_k (x_{O_k} - \bar{x}_O)^2} \quad [3]$$

Donde,

$R^2$ : Coeficiente de determinación, donde  $R^2 = 1$  representa un ajuste perfecto.

$NSE$ : Criterios de eficiencia de Nash – Sutcliffe, donde  $NSE = 1$  representa un ajuste perfecto.

$X_{S_k}$ : Variable simulada  $k$  – ésima.

$X_{O_k}$ : Variable observada  $k$  – ésima.

$\overline{X_O}$ : Promedio de la variable observada.

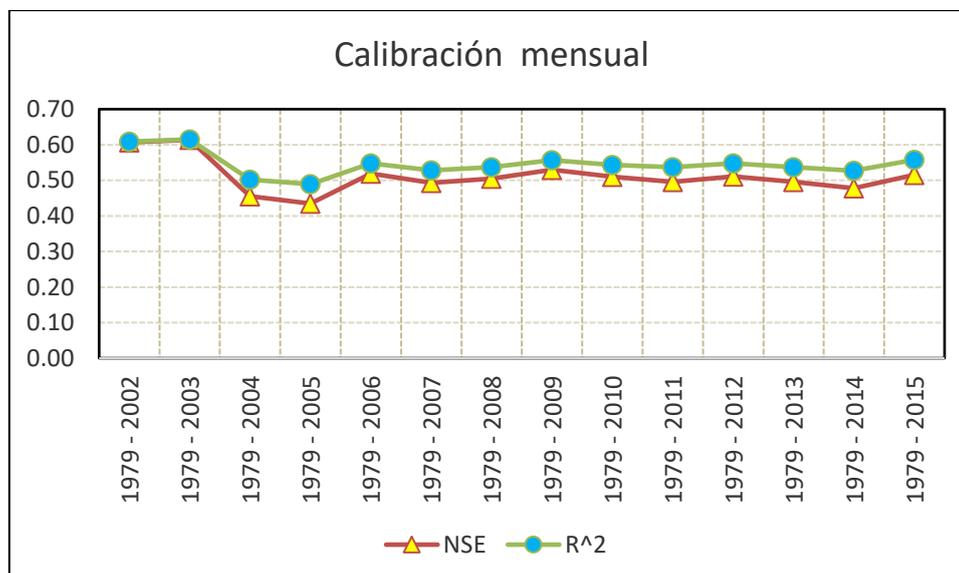
La calibración considera un esquema de validación cruzada ( $K$ – *Fold Cross – Validation*, con  $K = 3$ , Efron y Tibshirani, 1993). La serie de caudales observados de la Figura 6 fue utilizada como serie objetivo de calibración, además de las series de precipitaciones y temperaturas mensuales de la Figura 9 y Figura 12, respectivamente, como entradas al modelo. La calibración toma en cuenta las recomendaciones de Peel (que calibró el modelo para 699 cuencas alrededor del mundo) para definir rangos sobre los cuales evaluar cada parámetro de calibración, dichos rangos corresponden a los indicados en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Valores medios de los parámetros del modelo y sus rangos para 699 cuencas estudiadas por Peel.

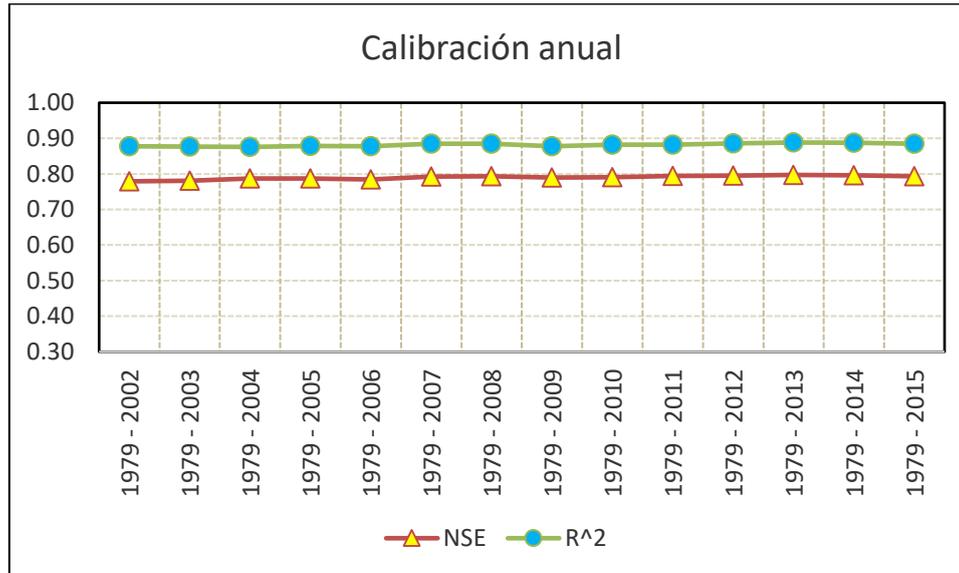
Item	$S_{max}$ (mm)	$a$ (mm/°C/mes)	$K$	$Melt^*$	$IC$ (mm)
Límites	50 - 2000	0 - 200	0 - 1	0 - 1	0 - 300
Mediana	838	6,8	0,20	0,34	47,2
Percentil 25	368	4,0	0,07	0,11	16,2
Percentil 75	1602	18,0	0,43	0,62	102
Número de cuencas en los límites	50: 23 2000: 114	0: 6 200: 0	0: 37 1: 51	0: 103 1: 12	0: 98 300: 19

\* 179 cuencas exhibieron escorrentía por derretimiento mensual

Los resultados de la evaluación de la calibración indican que para un rango de para 25 años (1979 a 2003) se logra maximizar el  $R^2$  y  $NSE$  a nivel mensual, tal como se muestra en la Figura 23. Mientras que, a nivel anual, no hay diferencias significativas entre los distintos rangos evaluados, como se muestra en la Figura 24.



**Figura 23.** Índices de calibración a nivel mensual.



**Figura 24.** Índices de calibración a nivel anual.

Los parámetros de calibración seleccionados se presentan en la Tabla 6. Los indicadores de eficiencia de la calibración, sumado a estadísticos de bondad de ajuste adicionales, se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 6.** Parámetros obtenidos de la calibración de PERM para la cuenca Fui en Desagüe Lago Pirihueico.

<i>S<sub>max</sub></i>	<i>a</i>	<i>K</i>	<i>Melt</i>	<i>IC</i>
2000	3,906	0,677	0,693	12,813

**Tabla 7.** Estadísticos cuantitativos del análisis de bondad de ajuste de la calibración de PERM para la cuenca Fui en Desagüe Lago Pirihueico.

Indicador	Valor	Indicador	Valor
<i>ME</i>	-0,53	<i>r</i>	0,82
<i>MAE</i>	30,74	<i>R<sup>2</sup></i>	0,67
<i>NSE</i>	0,67	<i>KGE</i>	0,71

Los indicadores de la Tabla 7 corresponde a los siguientes: Error Medio (*ME*), Error Medio Absoluto (*MAE*), Coeficiente de Correlación del Producto del Momento de Pearson (*r*), Coeficiente de Determinación (*R<sup>2</sup>*), Eficiencia de Nash – Sutcliffe (*NSE*) y Eficiencia de Kling – Gupta (*KGE*) (Zambrano – Bigiarini, 2017).

$$ME = \frac{\sum_k (X_{S_k} - X_{O_k})}{N} \quad [4]$$

$$r = \sqrt{R^2} \quad [5]$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad [6]$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad \gamma = \frac{cv_s}{cv_o} = \frac{\sigma_s/\mu_s}{\sigma_o/\mu_o}$$

Donde,

$ME$ : Error medio.

$N$ : Tamaño de la muestra.

$r$ : Coeficiente de correlación de Pearson.

$KGE$ : Criterio de eficiencia de Kling – Gupta, donde  $KGE = 1$  representa un ajuste perfecto.

$\beta$ : BIAS

$\gamma$ : Coeficiente de variación.

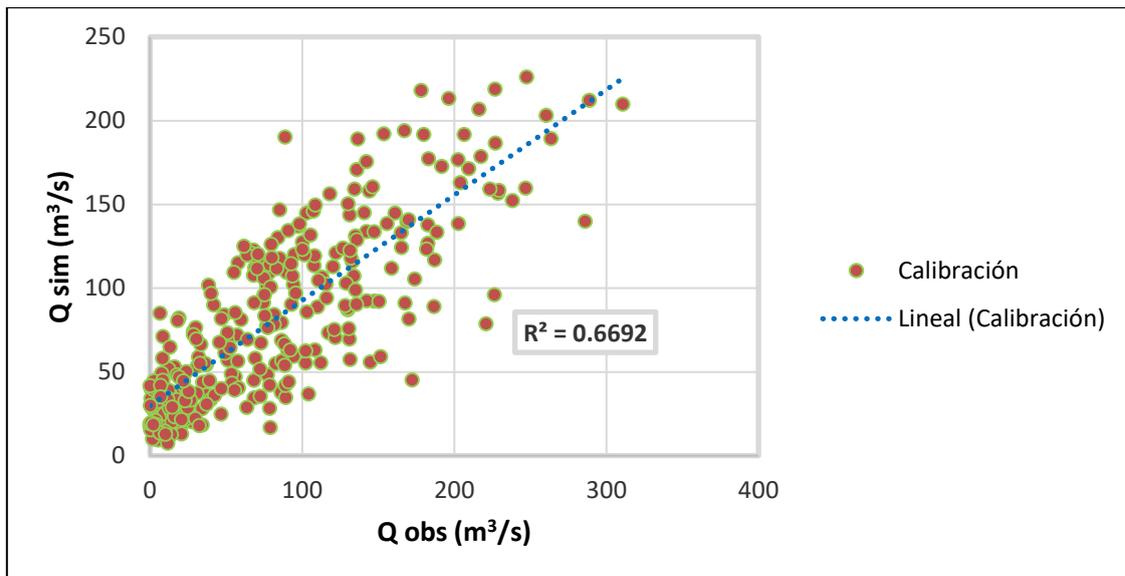
$\mu$ : Promedio.

$\sigma$ : Desviación estandar.

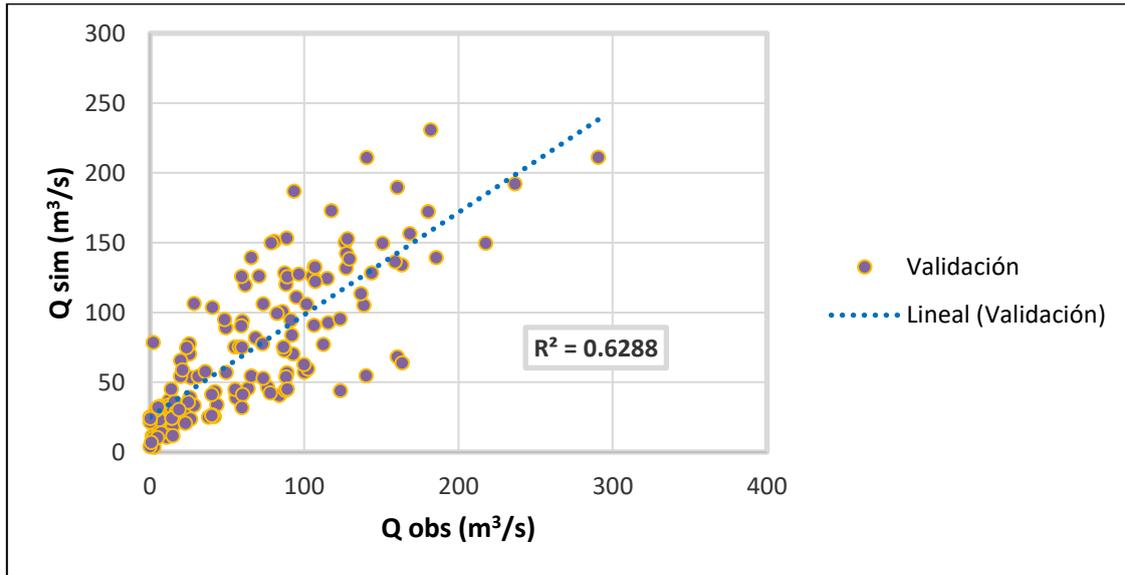
$S$ : Simulación.

$O$ : Observación.

En los gráficos de la Figura 25 y la Figura 26 se muestra la correlación entre los valores de caudales observados y simulados, para el período de calibración (25 años) y el de validación (12 años), respectivamente.

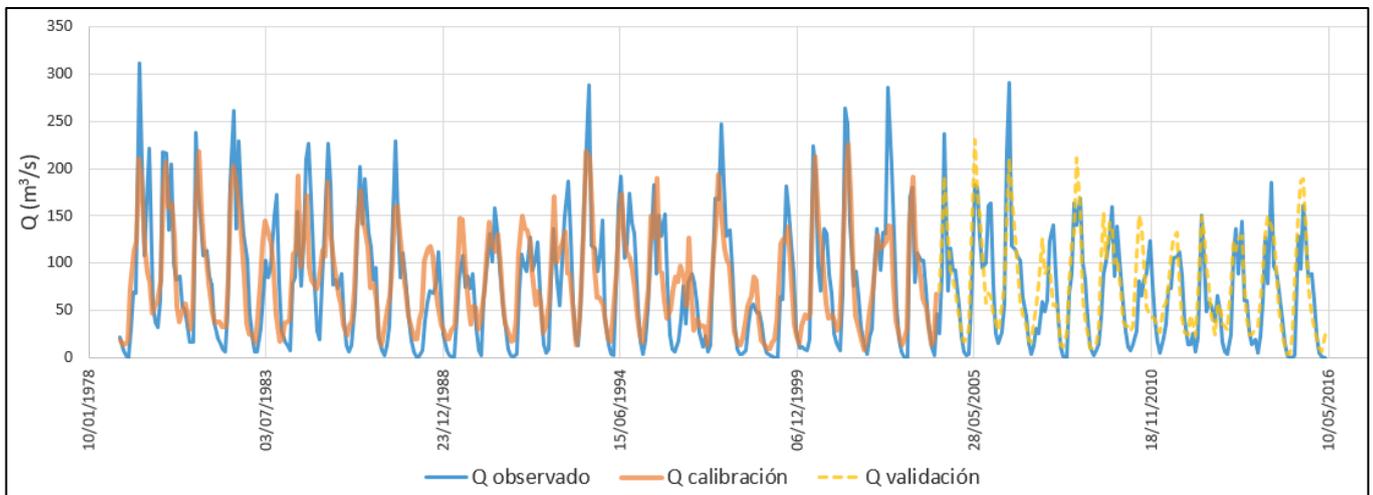


**Figura 25.** Correlación entre serie simulada y observada para el período de calibración.



**Figura 26.** Correlación entre serie simulada y observada para el período de validación.

En el gráfico de la Figura 27 se muestran los resultados como series de tiempo del modelo para los períodos de calibración y validación. Adicionalmente, se incluyen los estadísticos obtenidos de las series de tiempo en la Tabla 8.



**Figura 27.** Series de caudal mensual observadas, resultante de calibración y resultante de validación.

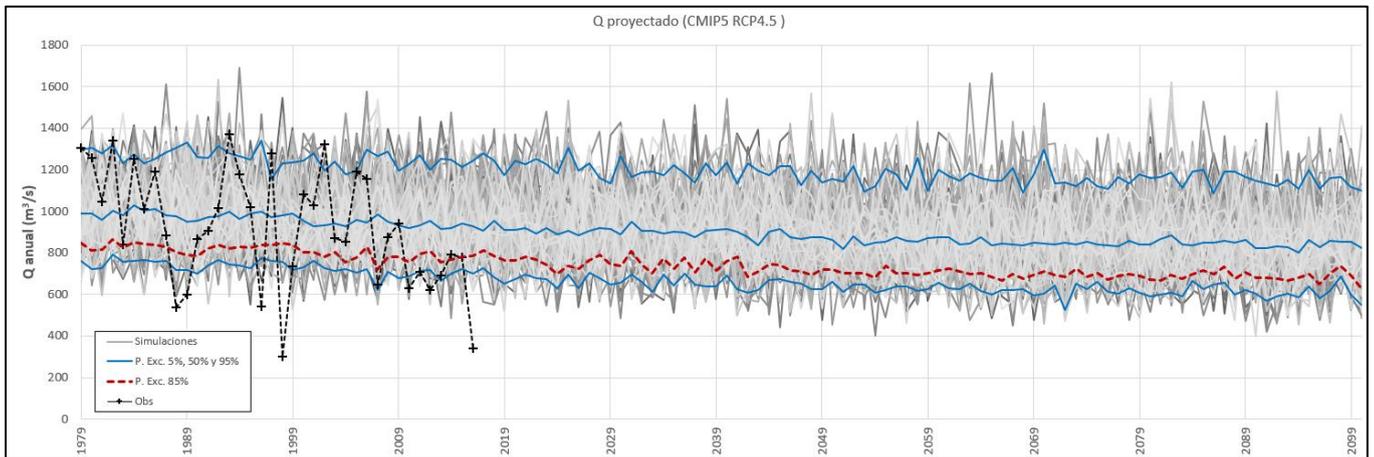
**Tabla 8.** Estadísticos de la serie observada y simulada en el período de calibración y validación.

Estadísticos	Calibración			Validación		
	Q simulado	Q observado	Diferencia (Obs – Sim)	Q simulado	Q observado	Diferencia (Obs – Sim)
Media	81,23	81,76	0,53	75,11	68,31	-6,80
Desv. Estándar	52,38	68,12	15,74	51,80	56,01	4,21
Coef. Asim.	0,66	0,83	0,18	0,77	0,96	0,20
Curtosis	-0,38	0,15	0,53	-0,18	1,09	1,27
Max	226,03	310,94	84,91	230,74	290,74	60,00
Min	7,51	0,02	-7,49	3,46	0,08	-3,38
1 cuartil	36,69	20,81	-15,88	32,01	19,54	-12,47
2 cuartil	71,57	74,71	3,13	59,11	59,78	0,67
3 cuartil	117,94	128,51	10,57	114,97	100,52	-14,46

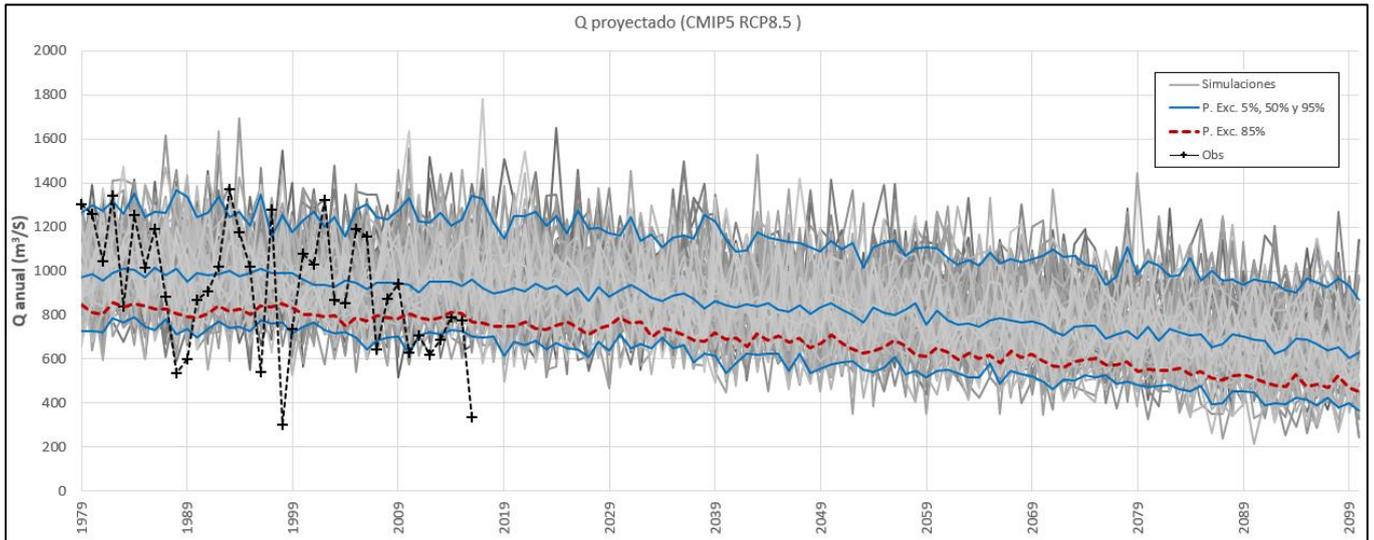
## 4. RESULTADOS

### 4.1. Proyecciones de escorrentía basadas en los GCM

Las series obtenidas del escalamiento estadístico, mostradas de la Figura 18 a la Figura 21, fueron utilizadas de entrada al modelo hidrológico calibrado, para luego obtener las proyecciones de caudales para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, los resultados se muestran en la Figura 28 y Figura 29, respectivamente.



**Figura 28.** Caudales proyectados para el RCP 4.5.



**Figura 29.** Caudales proyectados para el RCP 8.5.

#### 4.2. Análisis de tendencias

Se evaluó la tendencia de las proyecciones a través de la prueba de Mann – Kendall (Kendall, 1975) con un nivel de significancia estadística de  $\alpha = 5\%$ , encontrando que la mayoría de las simulaciones tienen una tendencia significativa para el RCP 4.5 (77 de 106) y que todas las simulaciones tienen tendencia significativa para el RCP 8.5. Las expresiones que definen la prueba de Mann – Kendall se presentan en las ecuaciones 7 a la 11.

$$S = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=k+1}^N \text{signo}(X_j - X_k) \quad [7]$$

$$\text{signo}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } = 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad [8]$$

$$V(S) = \frac{N(N-1)(2 \times N + 5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2 \times t_i + 5)}{18} \quad [9]$$

$$E(S) = 0 \quad [10]$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} \rightarrow S > 0 \\ 0 \rightarrow S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} \rightarrow S < 0 \end{cases} \quad [11]$$

Donde,

$S$ : Número de diferencias positivas menos número de diferencias negativas.

$V$ : Varianza.

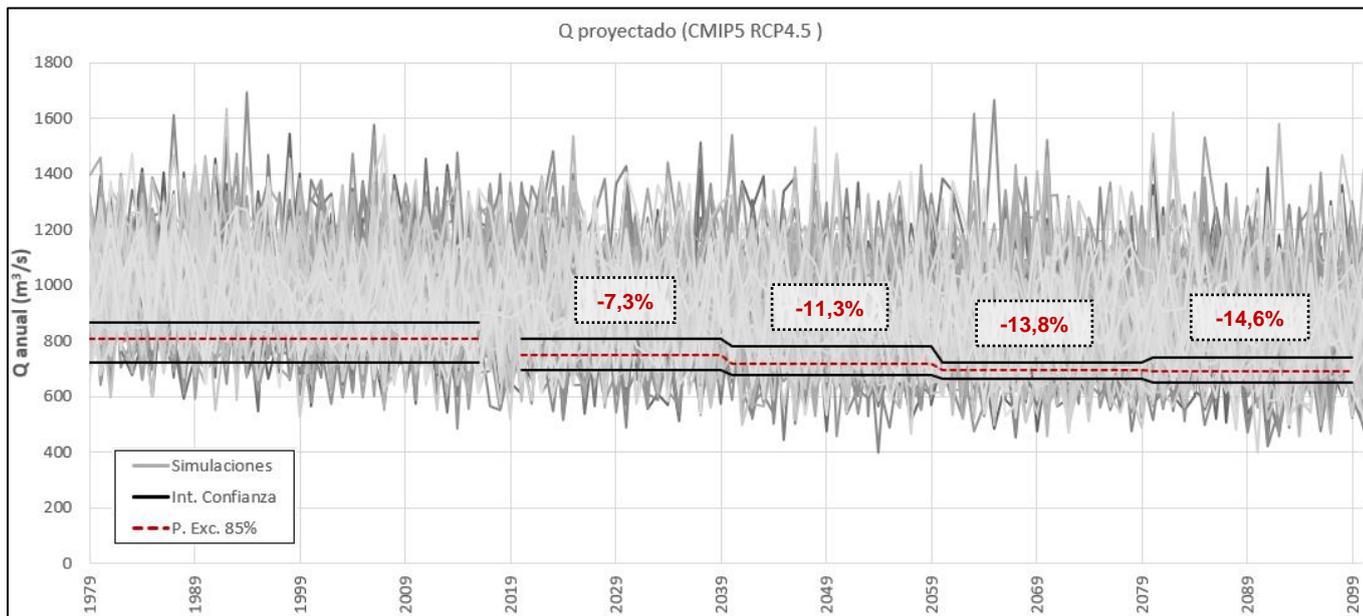
$E$ : Esperanza.

$p$ : Número de lazos de la serie.

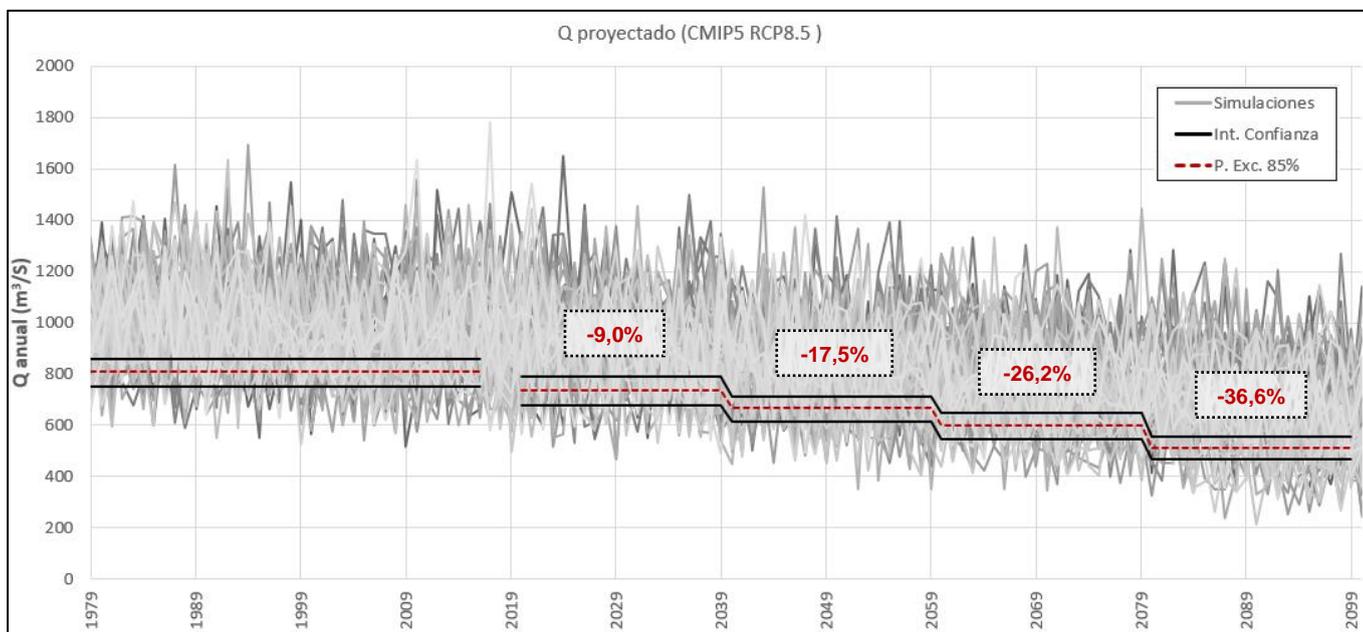
$t_i$ : Número de observaciones en el grupo  $p$  – ésimo.

$Z$ : Estadístico del test de Mann – Kendall.

En la Figura 30 y Figura 31 se muestra la tendencia del caudal con probabilidad de excedencia del 85% ( $Q_{85}$ ) en ventanas de 20 años, donde se observa una clara disminución para los dos escenarios evaluados.



**Figura 30.** Proyección de caudales anuales  $Q_{85}$  para cada modelo para el RCP 4.5.



**Figura 31.** Proyección de caudales anuales  $Q_{85}$  para cada modelo para el RCP 8.5.

#### 4.3. Comparación con estimaciones de derechos de aguas en la zona

Existen derechos de aguas no consuntivos (derecho de aprovechamiento que permite emplear el agua sin consumirla y obliga a restituirla en la forma que lo determine el acto de adquisición o de constitución del derecho) equivalentes a un caudal superficial de 522  $m^3/s$  según la DGA al 2014 (Aquaterra Ingenieros Ltda., 2014) en la cuenca evaluada en el presente estudio. Este volumen de demanda es bajo

comparado con otras cuencas de la zona; a pesar de ello, se observa que para el caso del RCP 8.5 en los últimos 20 años evaluados este valor equivaldría aproximadamente a un 84% de probabilidad de excedencia (muy cercano al  $Q_{85}$ ).

Se define el caudal de reserva con fines de conservación ambiental y desarrollo local de las cuencas (DGA, 2014), como la diferencia entre el caudal con 20% de probabilidad de excedencia y el caudal ecológico, este último estimado de manera conservadora como 20% del caudal medio anual (basado en el Código de Aguas de Chile (BCN, 2018)), según la ecuación 12.

$$Q_{ambiental} = Q_{20} - Q_{ecol} \quad [12]$$

$$Q_{ecol} = 0,2 \times Q_{anual} \quad [13]$$

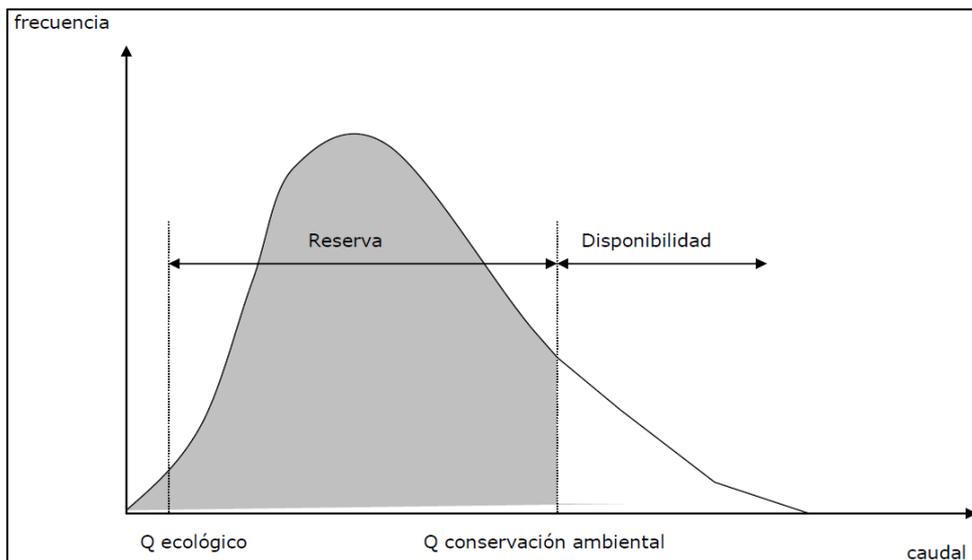
Donde,

$Q_{ambiental}$ : Caudal de reserva ( $m^3/s$ ).

$Q_{20}$ : Caudal con probabilidad de excedencia de 20% ( $m^3/s$ ).

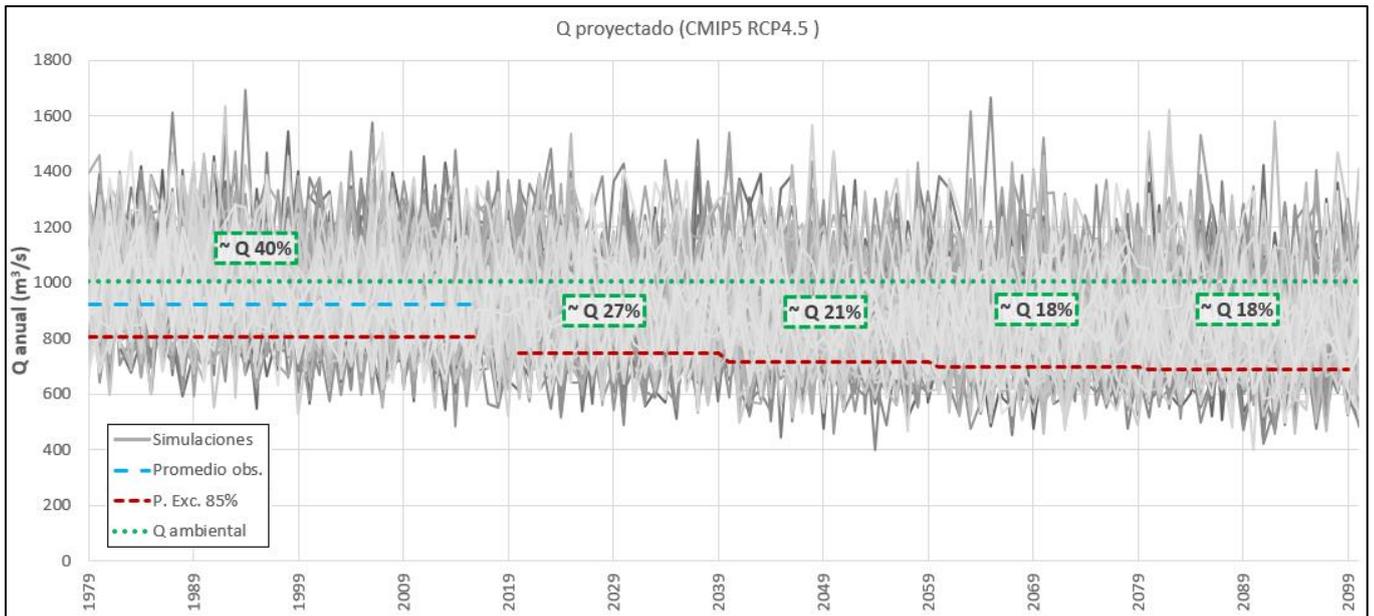
$Q_{ecol}$ : Caudal ecológico ( $m^3/s$ ).

$Q_{anual}$ : Caudal promedio anual ( $m^3/s$ ).

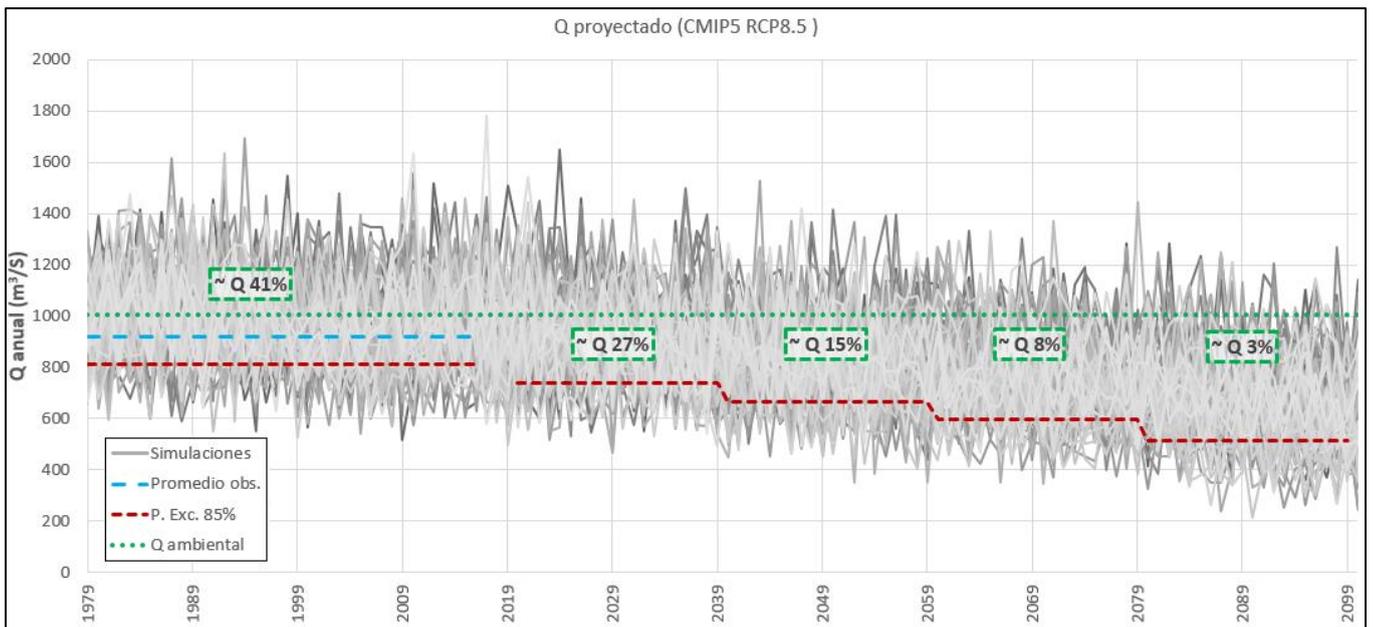


**Figura 32.** Esquema para definir en caudal de reserva ambiental (Aquaterra Ingenieros Ltda., 2014).

Con la expresión de las ecuaciones 12 y 13, se estima a través de la serie de la Figura 6 un caudal ecológico de  $183,7 m^3/s$  y un caudal de reserva ambiental de  $1.006,7 m^3/s$ . Si se comparan con las tendencias en ventanas de 20 años, se ve que el panorama es dramático en términos ambientales, sobre todo dado que para los últimos 20 años analizados el caudal ambiental actual sería equivalente a un caudal con probabilidad de excedencia de 18% y de 3% para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente (Figura 33 y Figura 34). Notar que en el período 1979 a 2016 la equivalencia es de un caudal con 40% de probabilidad de excedencia aproximadamente para ambos escenarios.



**Figura 33.** Análisis del caudal ambiental en ventanas de 20 años para el RCP 4.5.



**Figura 34.** Análisis del caudal ambiental en ventanas de 20 años para el RCP 8.5.

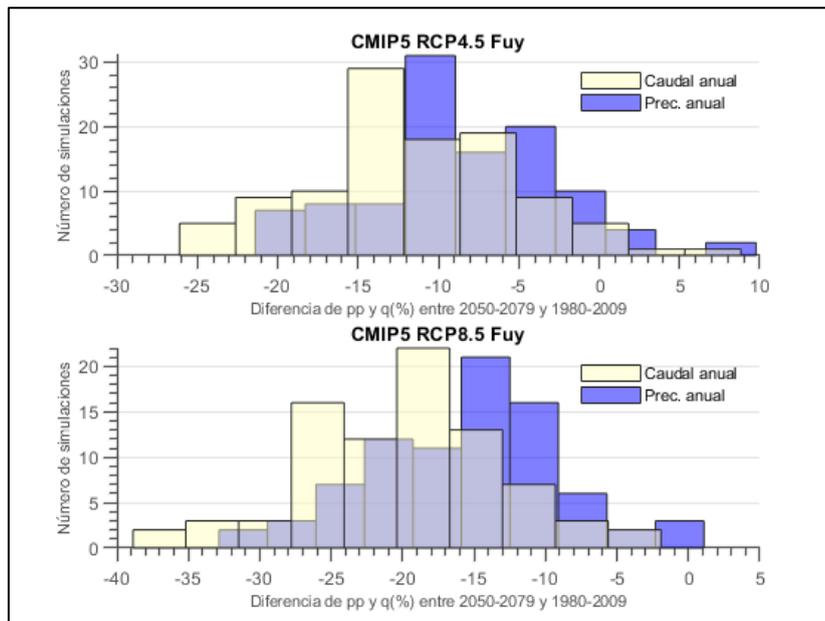
#### 4.4. Análisis de cambios en la escorrentía y precipitaciones proyectadas

Se evaluó el cambio en las proyecciones de la escorrentía y la precipitación entre el período 1997 – 2016 y 2080 – 2099, donde se observa que, en promedio, cambios en la precipitación de 8% representan cambios en la escorrentía de 11% para el RCP 4.5, y cambios en la precipitación de 25% representan cambios en la escorrentía de 31% para el RCP 8.5, como se muestra en la Tabla 9.

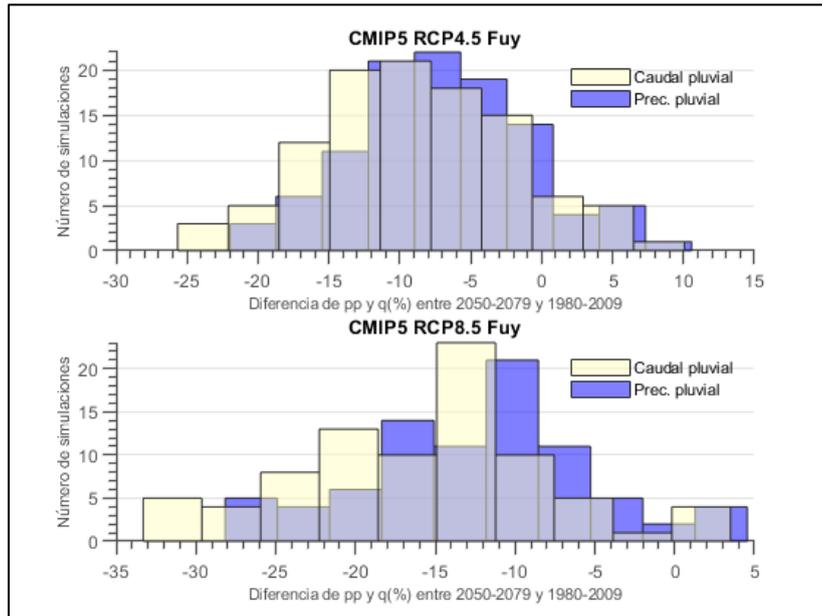
**Tabla 9.** Cambios promedios en las proyecciones de precipitación y escorrentía para los períodos comprendidos entre 1997 – 2016 y 2080 – 2099.

Percentiles	Cambios en Precipitación		Cambios en Escorrentía		Índice P50% Q/PP	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
5%	-14,95	-32,31	-18,51	-40,46		
50%	-8,44	-25,32	-10,75	-30,65	1,27	1,21
95%	-3,45	-17,32	-5,02	-20,82		
Dif. 95 - 5 %	11,49	14,99	13,49	19,64		

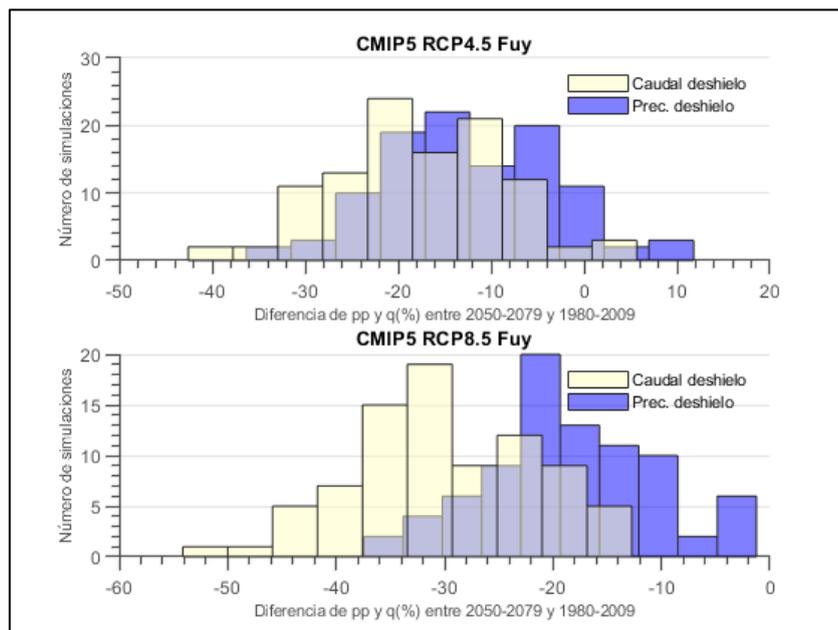
Paralelamente se estudió el cambio entre el período histórico 1980 – 2009 y el proyectado 2050 – 2079, considerando los histogramas de cambios en ambos períodos considerando años completos, la estación pluvial y la estación de deshielos, de manera de analizar respuestas en los caudales a las precipitaciones e incertidumbres de los modelos, los resultados se presentan en la Figura 35 a la Figura 37.



**Figura 35.** Histogramas de cambios anual.



**Figura 36.** Histogramas de cambios período pluvial.



**Figura 37.** Histogramas de cambios período de deshielos.

## 5. DISCUSIÓN

Los productos grillados del CR2 son parte de la robusta base de datos hidroclimatológicos para Chile que mantiene el mismo CR2, son parte de un esfuerzo y apoyo permanente entre las instituciones competentes (Dirección General de Aguas de Chile DGA, Ministerio del Medio Ambiente de Chile MMA y Dirección Meteorológica de Chile DMC), la academia tradicional chilena (Universidad de Chile, Universidad de Concepción y Universidad Austral de Chile) y la comunidad científica (CONICYT, CR2, etc.). Por ello, se tiene plena confianza en el producto utilizado, considerando además la cantidad de estudios e investigaciones que han validado estos productos (CR2, 2019).

La aplicación del Método Racional Deductivo para el relleno de datos faltantes de la serie de caudales es factible, dado que 0,7% (solo 3 meses) del registro completo no cuenta con datos.

Como se esperaba, las tendencias en el comportamiento de las precipitaciones a futuro indican disminución en los montos anuales, para ambos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 (Figura 9). Por otro lado, las temperaturas, también como era de esperarse, debiesen aumentar a futuro, llegando al 2100 con aumento de 2 a 4 °C (Figura 12). Estas tendencias podrían generar grandes cambios en los regímenes hidrológicos, en la gestión del recurso hídrico y en la disponibilidad del recurso a futuro.

De los gráficos de la Figura 14 a la Figura 17 se observa que la aplicación de la corrección de sesgo es satisfactoria, solo en la desviación estándar de la precipitación se observa un ajuste menor, pero de todas formas es aceptable.

Se considera que los resultados de la calibración del modelo PERM son satisfactorios, dado que el coeficiente de determinación es 0,67, el Nash – Sutcliffe es 0,67 y el Kling – Gupta es 0,71 (Tabla 7).

En la Figura 27 se observa que la serie resultante del modelo hidrológico se ajusta bastante en la tendencia media e interanual de la serie observada, siendo subestimados algunos de los valores extremos de la serie observada, por parte del modelo.

A pesar de que desde el año 2007 la media y los eventos máximos de caudales registrados han modificado sus tendencias, respectos a años y décadas anteriores, el modelo logra interpretar bien estos cambios, como se observa en los resultados del período de validación (Figura 27) y en el ajuste del mismo período (Figura 26).

Se confirma que las simulaciones entregan proyecciones estimadas con una tendencia estadísticamente significativa a la baja (en la mayoría de las simulaciones se verifica la prueba de Mann – Kendall), siendo más importante en el escenario RCP 8.5.

Las series de simulaciones resultantes del modelo PERM, basadas en las tendencias de los GCM, no representan adecuadamente los mínimos extremos observados, lo que es preocupante, ya que indica que en la realidad los años secos muestran tendencias más desfavorables que lo representado por los GCMs (Figura 28 y Figura 29).

Considerando una probabilidad de excedencia de 85% en los caudales anuales, se aprecia una disminución de la disponibilidad de un 14,2% y 36% para los escenarios RCP 4.5 y 8.5, respectivamente (Figura 30 y Figura 31).

La comparación con las tendencias en ventanas de 20 años y el caudal ambiental muestra un panorama

complejo en términos ambientales y de sustentabilidad del recurso, dado que para los últimos 20 años analizados el caudal ambiental actual sería equivalente a un caudal con probabilidad de excedencia de 18% y de 3% para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente (Figura 33 y Figura 34), más aun si se compara con la situación más actual del período 1979 a 2016, donde la equivalencia es de un caudal con 40% de probabilidad de excedencia aproximadamente para ambos escenarios.

Las tasas de cambio en las proyecciones de la escorrentía y la precipitación entre el período 1997 – 2016 y 2080 – 2099 fueron evaluadas en la Tabla 9, donde en promedio se observa que cambios en la precipitación de 8% representa un cambio en la escorrentía de 11% para el RCP 4.5 y que un cambio en la precipitación de 25% representa un cambio en la escorrentía de 31% para el RCP 8.5. Estos resultados están acorde a los análisis llevados a cabo por Barria (Barria, 2017) en cuencas de la VIII y IX regiones de Chile, solo que, en el presente caso, al ser una cuenca ubicada más al sur del país, el índice de cambio entre la escorrentía y la precipitación disminuye, a pesar de que los GCM siguen mostrando tendencias de cambio a la baja, al igual que las respuestas hidrológicas de la cuenca. Esto puede deberse a que en el presente caso existe menos incertidumbre o sesgo en los modelos climáticos, con respecto a las tendencias observadas, debido a la complejidad orográfica que presenta Chile en las zonas norte y central.

Los histogramas de la Figura 35 a la Figura 37 muestran las diferencias entre escorrentía simulada y las precipitaciones de entradas para los períodos 1980-2009 y 2050-2079, los mayores cambios en estas diferencias se observan para la estación de deshielo, donde además los valores de diferencia llegan a ampliarse sobre los resultados anuales y en estación pluvial, sobre todo para el RCP 8.5.

## **6. CONCLUSIONES**

Chile ha comenzado a presentar severos problemas con respecto a la gestión y disponibilidad del recurso hídrico, sobre todo en la zona central y norte del país, dados los escenarios hídricos y climatológicos actuales, donde el régimen de hidrológico se ha modificado (como respuesta al cambio climático (Chadwick *et al.*, 2018)), y a los eventos extremos cada vez más complejos y recurrentes (como sequías (Garreaud *et al.*, 2017), altas temperaturas (La Tercera, 2019), crecidas (Lagos *et al.*, 2014), etc.). Lo anterior se suma a un problema gravísimo de sobreexplotación del recurso, debido a la entrega de derechos de aguas sin un criterio que considere al recurso como un bien público, de interés ambiental y sustentable (demostrado, entre otros, con los casos de la desaparecida laguna Aculeo (U. de Chile, 2019) y los conflictos por las aguas del río Petorca y La Ligua (El País, 2019)).

El presente estudio pretende entregar un avance en el análisis con enfoque en la óptima y sustentable gestión del recurso, de manera de anteponerse a los efectos del cambio climático y de la inadecuada gestión de las aguas, como se ha venido sucediendo en cuencas más al norte y en otras mayormente explotadas. Se espera que el presente análisis sirva como avance en el estudio de las cuencas de la Macrozona Sur del país, donde se encuentran importantes cuerpos de aguas naturales e inigualables

reservas ambientales con grandes potenciales turísticos.

La cuenca analizada no ha estado ajena a conflictos por los usos que se le quiera dar a los caudales superficiales, así quedó de manifiesto entre los años 2007 a 2015, donde se sucedieron importantes conflictos legales, sociales y ambientales asociados a dos proyectos hidroeléctricos de centrales de pasada llamados Neltume y Choshuenco (U. de los Lagos, 2016), el primero proyectado aguas abajo de la estación fluviométrica considerada en el presente estudio.

Los resultados del presente estudio muestran las tendencias a la baja de precipitaciones, así como el aumento de las temperaturas medias, para la segunda mitad del siglo XXI en el sector evaluado. Estas tendencias reflejan una disminución importante en la disponibilidad del recurso hídrico superficial, dados los resultados del modelo hidrológico, que podrían afectar eventualmente los derechos de aguas ya asignados y los posibles usos futuros, si no se toman los resguardos necesarios en todo ámbito.

El presente estudio utiliza una herramienta hidrológica de sencilla aplicación, considerando que solo posee dos variables de entrada y cinco parámetros a calibrar, con buenos resultados, dados los aceptables índices de calibración. Las correlaciones entre simulaciones y observaciones son satisfactorias, tanto en el período de calibración como el de validación, aunque no se descartan mejoras posteriores, ya sea en términos de metodologías de escalamiento o productos hidroclimatológicos, así como otras herramientas de modelación.

Finalmente, es importante señalar que las proyecciones cuantificadas en el presente estudio llevan intrínsecas las incertidumbres de los GCMs, sumado a las incertidumbres asociadas a la metodología de escalamiento, utilizada para corregir las proyecciones climatológicas, y en el modelo hidrológico utilizado para simular la escorrentía, y que no se analizan en profundidad en este estudio. Por lo tanto, es probable que los resultados entregados subestimen la verdadera incertidumbre de las proyecciones de escorrentía, lo que se debe tener en cuenta al realizar evaluaciones hidrológicas de impacto del cambio climático.

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

Alvarez – Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano – Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., and Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5817-5846. <Accesible en URL: <https://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/hess-2018-23/>>.

Aquaterra Ingenieros Ltda. (2014). Determinación de Necesidades de Reserva de Aguas, Art. 147 BIS del Código de Aguas – Regiones IX, XIV y X, Informe Final, SIT N° 352, DGA. <Accesible en URL: <http://www.dga.cl/estudiospublicaciones/>>.

Barria, P., Peel, M., Walsh, K. and Garreaud, R. (2017). Analysis of within and between-GCM

- uncertainties of runoff projections in Mediterranean-like catchments, *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 67:3, 181-213. <Accesible en URL: <http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/Barria.pdf>>.
- Barria, P., Rojas, M., Moraga, P., Muñoz, A., Bozkurt, D. and Alvarez – Garreton, C. (2019). Anthropocene and streamflow: Long – term perspective of streamflow variability and water rights. *Elem Sci Anth*, 7(1), p.2. <Accesible en URL: <https://www.elementascience.org/articles/10.1525/elementa.340/>>.
- BNC. (2018). Código de Aguas, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Ministerio de Justicia, Gobierno de Chile, <Accesible en URL: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=5605>>.
- Campos, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*, Editorial Universitaria Potosina, Universidad Autónoma de San Luís de Potosí, Facultad de Ingeniería, México.
- Chadwick, C., J. Gironás, S. Vicuña, F. Meza, and J. McPhee, 2018: Using a statistical pre-analysis approach as an ensemble technique for the unbiased mapping of GCM changes to local stations. *J. Hydrometeor.* doi:10.1175/JHM-D17-0198.1, in press.
- CR2. (2019). *Productos Grillados CR2MET*, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, DGF – FCFM, Universidad de Chile. <Accesible en URL: <http://www.cr2.cl/>>.
- DGA a. (2016). *Atlas del Agua*, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. <Accesible en URL: <http://www.dga.cl/DGADocumentos/Atlas2016parte1-17marzo2016b.pdf>>.
- DGA b. (2016). *Inventario Público de Cuencas Hidrográficas y Lagos*, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. <Accesible en URL: [http://www.dga.cl/administracionrecursoshidricos/inventario\\_cuencas\\_lagos/Paginas/default.aspx](http://www.dga.cl/administracionrecursoshidricos/inventario_cuencas_lagos/Paginas/default.aspx)>.
- DGA. (2019). *Declaración de Zona de Escasez de la Provincia de Petorca*, Región de Valparaíso, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. <Accesible en URL: <http://www.dga.cl/administracionrecursoshidricos/decretosZonasEscasez/Documents/8%20Petorca.pdf>>.
- ECMWF. (2019). *ERA – Interim Dataset*, The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. <Accesible en URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>>.
- Efron, B. and Tibshirani, R. J. (1993). *An Introduction to the Bootstrap*, Chapman&Hall, New York.
- Ingendesa (2010). *Estudio Hidrológico Río Fui*, Anexo J, Proyecto Hidroeléctrico Neltume, EIA Central Neltume.
- El País. (2019). *El aguacate que llega a Europa seca Chile*, Meritxell Freitas, Ediciones El País S. L., PRISA, <Accesible en URL: [https://elpais.com/elpais/2019/03/21/planeta\\_futuro/1553160674\\_048784.html](https://elpais.com/elpais/2019/03/21/planeta_futuro/1553160674_048784.html)>.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., and Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6307-6327, <Accesible en URL: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/6307/2017/hess-21-6307-6327>>.

[2017.pdf](#)>.

- IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp <Accesible en URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5\\_Frontmatter\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Frontmatter_FINAL.pdf)>.
- Kendall, M.G. (1975). Rank Correlation Methods. 4th Edition, Charles Griffin, London.
- La Tercera. (2019). Cambio climático: el implacable aumento de la temperatura en Chile, Carlos Montes, Qué Pasa, Grupo Copesa, <Accesible en URL: <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/cambio-climatico-implacable-aumento-la-temperatura-chile/623054/>>.
- Lagos., M. and Vargas, X. (2014). Potenciales influencias del cambio climático en crecidas pluviales en una cuenca andina, Tecnología y Ciencias del Agua, vol. V, núm. 2, marzo-abril de 2014, pp. 19-38, <Accesible en URL: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n2/v5n2a2.pdf>>.
- NASA. (2008). MODIS Land Surface Temperature and Emissivity (MOD11), National Aeronautics and Space Administration <Accesible en URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php>>.
- NASA. (2011). ASTER Global Digital Elevation Map, National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. <Accesible en URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>>.
- 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), pp.282-290.
- Peel, M. C., Srikanthan, R., McMahon, T. A., and Karoly, D. J. (2015). Approximating uncertainty of annual runoff and reservoir yield using stochastic replicates of global climate model data, Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 1615-1639. <Accesible en URL: <https://doi.org/10.5194/hess-19-1615-2015>>.
- Peel, M., Finlayson, B. and McMahon, T. (2007). Updated world map of the Köppen – Geiger climate classification, Hydrology and Earth System Sciences, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union. <Accesible en URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00305098/document>>.
- QGIS Development Team. (2018). QGIS Geographic Information System, Open Source Geospatial Foundation Project. <Accesible en URL: <https://qgis.org/es/site/>>.
- R Core Team. (2018). R: A Language and Environment for Statistical Computing, Vienna, Austria, <Accesible en URL: <https://www.R-project.org/>>.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V. et al. Climatic Change (2011) 109: 33. <Accesible en URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>>.
- Sánchez, F. J. (2017). Hidrología Superficial y Subterránea. Createspace Independent Pub., 414 pp.
- Sharma, D., Das Gupta, A. and Babel, M. (2007). Spatial disaggregation of bias-corrected GCM precipitation for improved hydrologic simulation: Ping River Basin, Thailand, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1373-1390. <Accesible en URL: <https://www.hydrol-earth-syst>>.

[sci.net/11/1373/2007/hess-11-1373-2007.html](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1)>.

- Taylor, K., Stouffer, R., and Meehl, G. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, PCMDI, Lawrence Livermore National Laboratory, American Meteorological Society. <Accesible en URL: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>>.
- Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J. et al. Climatic Change (2011) 109: 77. <Accesible en URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>>.
- U. de Chile. (2019). Laguna de Aculeo es una de las primeras víctimas del cambio climático y megasequía según estudio de la U. de Chile, Roxana Alvarado, U. de Chile, <Accesible en URL: <http://www.uchile.cl/noticias/154875/laguna-de-aculeo-es-una-de-las-primeras-victimas-del-cambio-climatico>>.
- U. de Los Lagos. (2016). Central Hidroeléctrica Neltume y Línea de alta tension Neltume – Pullinque, Proyecto Conflictos, U. de Los Lagos, U. de Chile, <Accesible en URL: <http://proyectoconflictos.ulagos.cl/wp-content/uploads/2016/07/Central-Hidroeléctrica-Neltume-y-Línea-de-alta-tensión-Neltume-Pullinque.pdf>>.
- WCRP. (2013). Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, 2013, World Climate Research Programme, WMO, UNESCO, ISC. <Accesible en URL: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5>>.
- Wilks, D. (2011). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Academic Press, 627 pp.
- Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V. et al. Climatic Change (2004) 62: 189. <Accesible en URL: <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013685.99609.9e>>.
- Zambrano – Bigiarini, M. (2017). Goodness – of – Fit Functions for Comparison of Simulated and Observed Hydrological Time Series, Package hydroGOF, CRAN Repository, The R Project for Statistical Computing. <Accesible en URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/hydroGOF/index.html>>.