

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EVALUACIÓN DE PROYECCIONES DE CAMBIOS HIDROLÓGICO SOBRE
LAS CUENCAS DEL ALTO MATAQUITO EN CHILE CENTRAL**

FABIÁN LEMA G.¹
XIMENA VARGAS M.²

RESUMEN

En las últimas décadas, ha existido una robusta evidencia de un importante cambio en las tendencias que ha experimentado el clima y la hidrología en los valles interiores de la zona Norte y Centro de Chile. En particular, se han registrado incrementos en la temperatura media anual de 0,25 °C por década y déficits de precipitación mayores a 60 mm por década, desde el año 1970. Bajo este contexto, este trabajo tiene como objetivo estimar y evaluar proyecciones de cambio en el futuro cercano (2030 - 2060) en variables como temperatura, precipitación, evapotranspiración y escorrentía en tres cuencas del área del Alto Mataquito en Chile Central. Para este fin, se escalaron espacialmente series climáticas de cuatro diferentes Modelos de Circulación Global, mediante el método de corrección de sesgo Quantile Delta Mapping (QDM) y utilizando el producto grillado CR2MET como referencia. Las variables escaladas fueron utilizadas como forzantes del modelo hidrológico VIC, en donde se generaron simulaciones para cada cuenca y escenario estudiado. Los resultados muestran importantes cambios sobre el área de estudio, tales como descensos en la precipitación media anual entre 5% y 20% y aumentos promedios en la temperatura máxima y mínima anual entre 1°C y 2,5 °C, bajo ambos escenarios de emisión. Asimismo, también se proyectan cambios en la hidrología de las cuencas estudiadas, que incluyen descensos en el caudal medio diario de hasta 40% en el escenario más extremo, aumentos en la frecuencia de caudales bajos y significativos cambios en el régimen hidrológico, siendo el principal de ellos un adelantamiento en hasta dos meses en el período en que ocurre el *peak* de caudales de deshielos.

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - email: fabian.lemma@ug.uchile.cl

² Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: xvargas@uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

Existe una amplia evidencia de que el cambio climático ha producido incrementos en la temperatura superficial del planeta y en la frecuencia de eventos extremos como sequías, inundaciones y aluviones (Easterling *et al.*, 2000). En el caso de los valles de las zonas Norte y Centro de Chile, diversos estudios han reportado importantes cambios en las tendencias y patrones del clima en las últimas cuatro décadas (Falvey y Garreaud, 2009; Boisier *et al.*, 2016). En particular, desde 1970 se ha observado un incremento de 0,25 °C por década en la temperatura media anual y un sostenido descenso en las precipitaciones, con déficits que alcanzan los 65 mm por década. Además, estudios recientes proyectan que esta tendencia continuará en la zona a consecuencia del cambio climático, llegando a aumentos en la temperatura media anual por sobre 2,5 °C y déficits de precipitaciones entre 25% y 50% y de caudales de entre 20% y 45% hacia el año 2060, bajo el escenario de emisiones más crítico (Gómez, 2013; Cepeda, 2017; DGA, 2018).

Los recursos hídricos son especialmente vulnerables a los efectos que el cambio climático puede producir, lo cual se ve evidencia de forma clara en los recientes eventos de sequía que han ocurrido en las últimas décadas en diferentes áreas geográficas del planeta (Hao *et al.*, 2017). Algunos de estos eventos, como los ocurridos en el Este de África (2010 - 2011) y California (2012 -2015) han causado profundos impactos sobre la sociedad, agricultura y ecosistemas, afectando el suministro de agua potable y la producción de cultivos (Dutra *et al.*, 2013). En esa misma línea, desde el año 2010 la zona de Chile Central ha experimentado una de las sequías más largas e intensas desde que se tiene registro. Este evento, actualmente en curso, se ha reflejado en una reducción de la cobertura nival en la cordillera de los Andes y en una drástica reducción en los caudales de los ríos (en algunos casos, sobre el 90%), en el agua almacenada en los embalses y en los niveles de las aguas subterráneas a lo largo de todo Chile Central (Garreaud *et al.*, 2017).

Con el fin de estudiar las posibles implicancias del cambio climático sobre los sistemas hidrológicos (cambio hidrológico), en el último tiempo se ha extendido el uso de proyecciones realizadas por Modelos de Circulación Global (GCMs). Estos modelos simulan diversas variables climáticas del planeta (temperatura, precipitación, humedad relativa, etc.) mediante la resolución de ecuaciones que describen la dinámica de los procesos atmosféricos, tales como balances de masa, momentum y energía. Los GCMs pueden representar el clima pasado y presente, así como proyectar cambios hacia el futuro considerando diferentes escenarios de emisiones. La resolución temporal de estos modelos es bastante variable, abarcando un rango que va desde un nivel anual hasta escalas sub-diarias. Asimismo, la resolución espacial horizontal puede también variar desde 500 km hasta 100 km, aproximadamente.

En una escala global, hemisférica o continental, los GCMs son capaces de generar simulaciones bastante precisas y confiables. Sin embargo, a un nivel más detallado de representación, como lo pueden ser una escala regional o de cuenca, sus resultados tienden a ser erróneos y/o poco representativos del área de estudio, en especial si se aplican a áreas como la hidrología (Hewitson *et al.*, 2006). Esto último es acentuado si existe presencia de accidentes geográficos como cordilleras o grandes cuerpos de agua. Es en base a estas imprecisiones que se han desarrollado diversos métodos para refinar la información

entregada por los GCMs. Este proceso recibe el nombre de escalamiento o *downscaling* y su objetivo es llevar las series de tiempo resultantes de los modelos a una escala que sirva en la modelación hidrológica de cuencas.

Existen dos tipos de escalamiento: dinámicos y estadísticos. El escalamiento dinámico se basa en la construcción de modelos climáticos regionales (RCMs), donde se utilizan como condición de borde las simulaciones de los GCMs. Estos modelos tienen la ventaja de modelar de forma completa la dinámica de la atmósfera, sin embargo, tienen un costo computacional elevado. Por otra parte, el escalamiento estadístico permite adecuar la información proveniente de los GCM utilizando como base a las observaciones de una red de estaciones hidrometeorológicas o un producto observacional grillado, ajustando completamente las distribuciones estadísticas de éstas (Hamlet et al., 2010). A diferencia del *downscaling* dinámico, este último método resulta ser de una implementación mucho más sencilla y práctica.

Existen diferentes enfoques para enfrentar el problema de escalamiento estadístico, entre los cuales se pueden encontrar métodos basados en generadores de clima o *weather generators* (ej. cadenas de Markov, modelos estocásticos, etc.) y otros basados en relaciones tipo regresión utilizando a variables atmosféricas como predictor (ej. redes neuronales, análisis de correlación, Quantile Mapping, etc.) (Wilby et al., 2004).

Finalmente, se destaca que dentro de las cuencas hidrográficas del país que más se han visto más afectadas por la reciente mega-sequía y que, además, podrían verse afectadas por el cambio climático, se encuentra la del Río Mataquito y sus afluentes. En esta área los resultados del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) indican drásticos descensos en los valores de precipitación anual promedio y escorrentía, a la vez que se proyecta un incremento en temperatura media anual y en la evapotranspiración. Estos cambios podrían impactar a un gran número de comunidades, ecosistemas y sectores de la economía que dependen fuertemente del agua, como es el caso de la agricultura, la cual tiene un importante desarrollo en la región del Maule.

2. ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a las subcuencas Río Claro en los Queñes (Cód. BNA 7103001), Río Colorado en junta con Palos (Cód. BNA 7112001) y Río Palos en junta con Colorado (Cód. BNA 7115001), las cuales son contiguas entre sí y se localizan entre las latitudes 35°00'S – 35°40'S y las longitudes 70°20'O – 71°00'O. Su ubicación corresponde a un sector de carácter precordillerano y de alta montaña en la Región del Maule, a aproximadamente 40 km al sureste de la ciudad de Curicó (Figura 2.1). Estas cuencas se caracterizan por presentar una baja intervención humana, no existiendo en ellas embalses de ningún tipo, por lo que es posible considerarlas como cuencas en régimen natural. Adicionalmente, en todas ellas los glaciares representan una cobertura superficial inferior al 2% y sus cursos de agua son tributarios a los ríos Teno y Lontué, los cuales son los principales afluentes del río Mataquito.

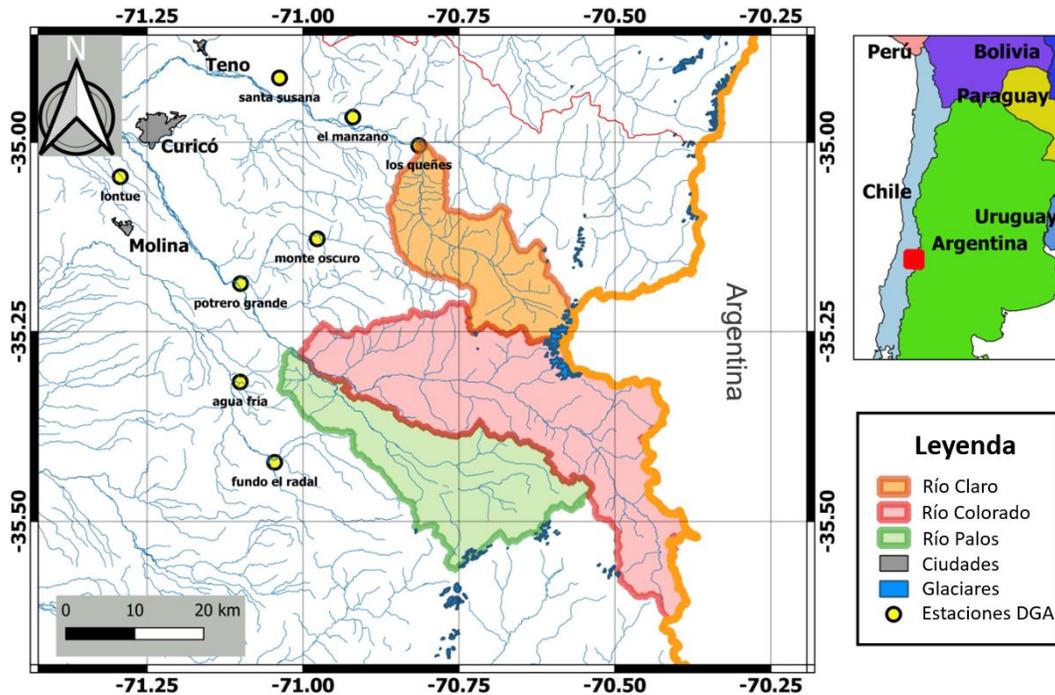


Figura 2.1: Ubicación de las tres cuencas estudiadas y las estaciones meteorológicas presentes en la zona.

En la Tabla 2.1 se presentan algunos de los principales atributos geomorfológicos e hidrológicos de las cuencas estudiadas, la mayoría de los cuales fueron obtenidos desde la base de datos de la plataforma CAMELS-CL (Alvarez-Garretón et al., 2018). Destaca el hecho de que todas ellas se ubican a altas elevaciones (600 – 4000 m.s.n.m.) y a altas pendientes medias (> 19%).

Tabla 2.1: Atributos Geomorfológicos e Hidrológicos de las cuencas estudiadas.

Atributo de la cuenca	Unidad	Río Claro en los Queñes	Río Colorado en junta con Palos	Río Palos en junta con Colorado
Área	km ²	354,4	877,9	490
Elevación (Máx/Mín)	m.s.n.m.	666 - 4077	616 - 4074	616 - 3284
Elevación media	m.s.n.m.	1857	2288	1973
Pendiente media	%	25	19	19
Precipitación media anual	mm	1704	1796	1886
Escorrentía media anual	m ³ /s	16,99	41,51	26,95
Temperatura media anual	°C	8,36	7,39	7,51

El clima de la zona de estudio es mediterráneo, con una prolongada estación seca y una concentración precipitaciones en los meses de invierno (abril a septiembre). La temperatura media alcanza valores máximos en torno a los 15 °C en enero y valores mínimos bajo 4 °C en julio. El régimen hidrológico de todas las cuencas es nivo-pluvial, registrando los mayores

valores de caudal durante los meses de primavera y verano, debido a los deshielos, y una importante contribución pluvial durante los meses de invierno (Figura 2.2).

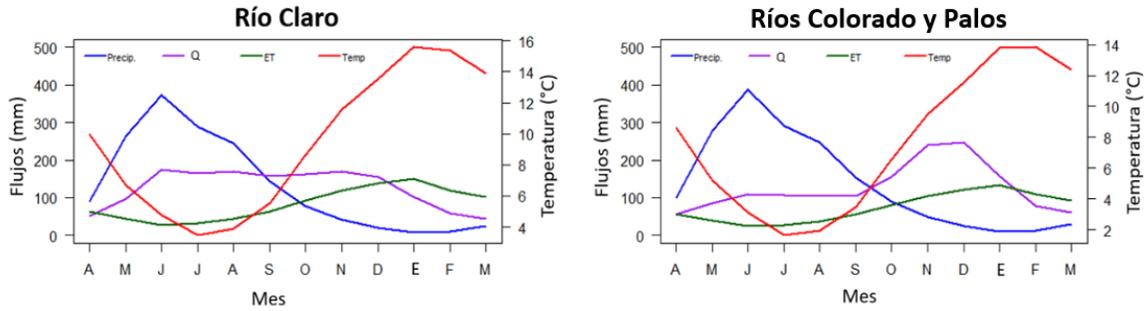


Figura 2.2: Variación mensual de los flujos hidrológicos (Precipitación, Escorrentía y Evapotranspiración) y la temperatura media en las tres cuencas estudiadas. Período 1985-2015.

3. DATOS Y METODOLOGÍA

La metodología empleada en el trabajo puede agruparse en las siguientes cinco etapas:

1. Se descargaron series de precipitación y temperaturas extremas, tanto en un período histórico (1985 - 2005) como en uno de proyección futura (2005 – 2060), bajo los escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5. Para cada caso, se consideró un total de cuatro GCMs: CCSM4, CSIRO-MK3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM. Estos GCMs fueron seleccionados debido a su desempeño al reproducir patrones de variabilidad climática como El Niño (ENSO), que afectan significativamente al clima e hidrología de Chile Central (DGA, 2017). Asimismo, también se descargó información desde los productos grillados de precipitación CR2MET v.1.4.2 y de temperaturas extremas CR2MET v.1.3, los cuales poseen una resolución horizontal de $0,05^\circ$ (~ 5 km) y fueron construidos con datos de estaciones meteorológicas, productos satelitales y el reanálisis atmosférico ERA-Interim.

2. Chequeo de consistencia y validación de la información provista por CR2MET. Esto se efectuó contrastando los datos de este producto con series de precipitación y temperatura registradas en cinco estaciones meteorológicas de la DGA en las cercanías de las cuencas estudiadas.

3. Se realizó una interpolación lineal por el inverso a la distancia (IDW), entre cada píxel de CR2MET y cada grilla de los GCMs, de acuerdo con las ecuaciones (3.1) y (3.2).

$$X_n = \sum_{j=1}^4 \omega_j \cdot X_{j,n} \quad (3.1)$$

$$\omega_j = \frac{\frac{1}{d_j}}{\sum_{j=1}^4 \frac{1}{d_j}} \quad (3.2)$$

Donde X_n representa a las series de tiempo de precipitación/temperatura de los GCM interpoladas, $X_{j,n}$ corresponde a las series originales de cada GCM y d_j es la distancia entre el centroide de cada píxel de CR2MET y cada celda j del GCM respectivo. Luego de realizar este preprocesamiento a los datos, se implementó el método de escalamiento espacial Quantile Delta Mapping (QDM) (Cannon *et al.*, 2015), con el objetivo de corregir el sesgo existente entre las series de cada GCM y las variables regionales de CR2MET. La aplicación de esta metodología fue realizada de forma separada para las precipitaciones y las temperaturas extremas, considerando en cada caso las funciones de distribución acumulada de cada mes del año, durante el período histórico 1985 - 2015.

4. Para cada una de las tres cuencas estudiadas, se implementó el modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC), el cual es un modelo de macro-escala, semi-distribuido y de base física. Este modelo resuelve ecuaciones de balance de agua y energía en celdas independientes, considerando únicamente flujos en la dirección vertical (unidimensional) y un paso de tiempo que puede ser diario o sub-diario (Liang *et al.*, 1996). Los datos ingresados al modelo como forzantes de entrada fueron series de precipitación, temperatura media, humedad relativa y velocidad del viento. Las primeras dos variables fueron obtenidas tras el escalamiento realizado en la etapa previa, mientras que para las otras dos se utilizaron los resultados de DGA (2018) en donde se escalan estas variables en el escenario RCP 8.5.

En la implementación de este modelo se consideró una resolución espacial de 5 km y se utilizaron los valores de los parámetros calibrados en DGA (2017) para las mismas cuencas estudiadas, los cuales se relacionan a la generación de escorrentía y a propiedades del suelo y nieve. Por otro lado, para evaluar la calibración de dicha calibración, se estimaron dos métricas: la eficiencia de Nash-Sutcliffe y la eficiencia de Kling-Gupta, ambos ampliamente utilizados en estudios de modelación hidrológica (Wouter *et al.*, 2019). Adicionalmente, y debido a requerimientos en los datos de entrada del balance de energía del modelo VIC, se realizó una desagregación temporal de forzantes, con la finalidad de llevarlas desde una escala diaria hacia una tri-horaria. En el caso de las temperaturas, esto se efectuó mediante aproximaciones lineales, donde se consideró que para cada día el valor mínimo ocurre a las 6:00 am y el máximo a las 03:00 pm. En el caso de la precipitación, se consideraron, de forma aleatoria, distribuciones horarias de precipitación acumulada en 24 hrs, utilizando como base registros obtenidos desde el reanálisis ERA-Interim.

5. Se corrieron simulaciones para los dos escenarios de emisión considerados, considerando un período histórico (1985 - 2015) y otro de proyección futura (2030 - 2060). Posteriormente, se evaluaron los principales cambios producidos en variables hidrológicas como precipitación, escorrentía, evapotranspiración y humedad del suelo, entre ambos períodos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se comenzó realizando una comparación entre la información provista por el producto CR2MET y datos de precipitación y temperaturas extremas registrados en las estaciones Agua Fría, El Manzano, Monte Oscuro, Fundo el Radal y Potrero Grande (Figura 2.1), en los últimos 20 años. En cada estación, se contrastó el ajuste estadístico de las series anuales y las curvas de variación estacional. Se verificó que en todos los casos el valor del coeficiente de

correlación de Pearson en (r) el ajuste de precipitación fue superior a 0,95, a pesar de que existen sesgos negativos de hasta 300 mm en dos estaciones. Los resultados obtenidos en temperatura fueron similares, con valores de r entre 0,89 y 0,98. Sin embargo, en dos estaciones se evidenció un sesgo positivo de hasta 1,5 °C en algunos años. Por otro lado, la comparación de los promedios mensuales de ambas variables mostró diferencias menores al 10% en cada mes y correcto ajuste temporal.

Una vez implementada la metodología de *downscaling* estadístico QDM, se comparó y analizó la distribución de series anuales de las variables en el período histórico. La Figura 4.1 muestra una de estas comparaciones en la cuenca del Río Colorado, mediante gráficos de boxplots. Se constató que los GCMs sobreestiman los valores medios de precipitación, aunque con un valor menor al 10%, y que presentan una menor dispersión en relación a CR2MET. Por otro lado, la evaluación de las temperaturas extremas de los GCMs mostró diferencias menores a 0,5 °C y, a diferencia de la precipitación, una mayor dispersión.

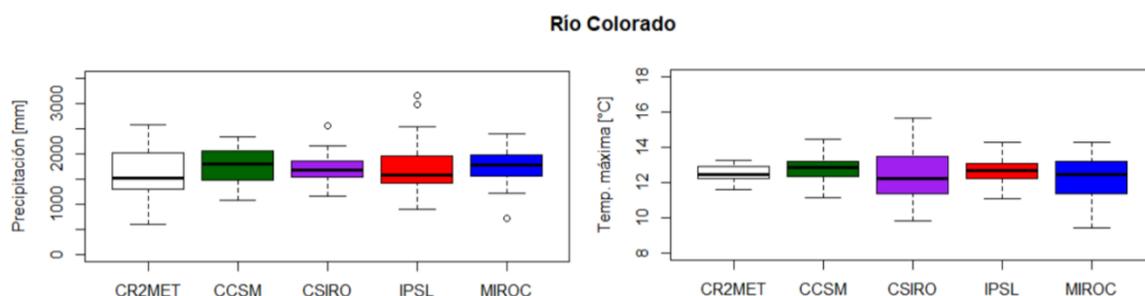


Figura 4.1: Comparación de boxplots entre las series anuales de precipitación y temperatura máxima de CR2MET con las obtenidas en los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 - 2015.

Adicionalmente, se realizó un análisis espacial que permitió evaluar diferencias en las variables climáticas a escala de píxel. A modo de ejemplo, en la Figura 4.2 se muestran las diferencias obtenidas en el número promedio de días al año con precipitación superior a 0,5 mm entre CR2MET y los GCMs IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM, en la cuenca del Río Claro. Se observa que en todos los píxeles las diferencias son menores a 5 días, tanto positivas como negativas. De la misma forma, los resultados obtenidos en las otras dos cuencas también muestran diferencias absolutas menores a 5 días. En el caso de las temperaturas extremas, se constató que todos los píxeles del área de estudio presentan diferencias menores a 0,5 °C respecto a CR2MET, independiente del GCM escalado considerado.

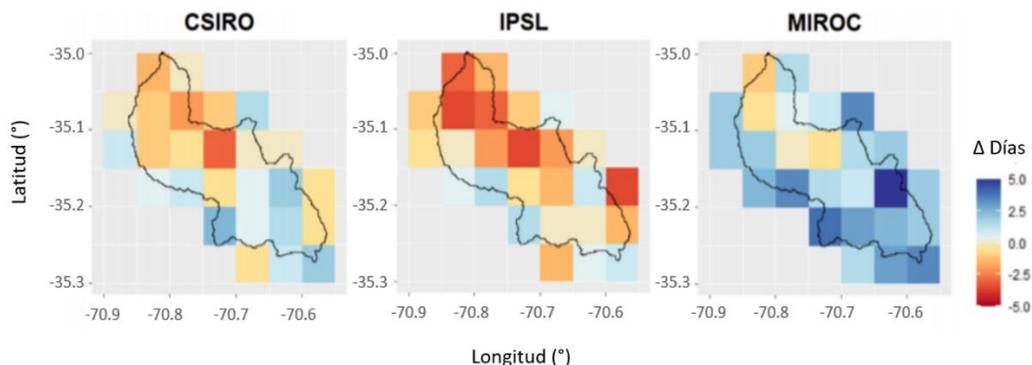


Figura 4.2: Diferencia en el número promedio de días al año con precipitación mayor a 0,5 mm entre CR2MET y dos GCMs. Los resultados corresponden a la cuenca del Río Claro.

En cuanto a los resultados obtenidos en la evaluación de la modelación hidrológica en el período histórico, la Tabla 4.1 muestra el valor de algunas métricas de evaluación obtenidas al simular caudales diarios en el modelo VIC, utilizando como forzante datos de CR2MET y los parámetros calibrados. Puede verificarse que el valor de KGE en todas las cuencas es mayor a 0,7, lo cual indica un buen desempeño del modelo al reproducir la correlación temporal y variabilidad. Sin embargo, los valores de NSE son menores, estando en un rango entre 0,43 y 0,62. Esto indica un menor desempeño al reproducir los valores medios, y por tanto una regular capacidad predictiva de caudales, en especial en la cuenca del Río Palos.

Tabla 4.1: Valor de métricas obtenidas al simular caudales diarios en el período histórico en VIC.

Cuenca	R ²	RMSE	% BIAS	NSE	KGE
Río Claro	0,60	12,65	-9,13	0,57	0,75
Río Colorado	0,58	25,43	-4,14	0,62	0,83
Río Palos	0,53	15,53	-15,33	0,43	0,70

Con el fin de evaluar el desempeño de las simulaciones realizadas utilizando datos de cada GCM escalado, en la Figura 4.3 se muestran boxplots de la escorrentía media anual en cada cuenca y durante el período histórico. De todos ellos, los que muestran un mejor desempeño al reproducir los caudales medios son IPSL-CM5A-LR y CSIRO-MK3-6-0. Sin embargo, todos los GCMs presentan una sobreestimación en el promedio y cuantiles más bajos, y una menor dispersión al compararlos con los caudales registrados en cada una de las estaciones.

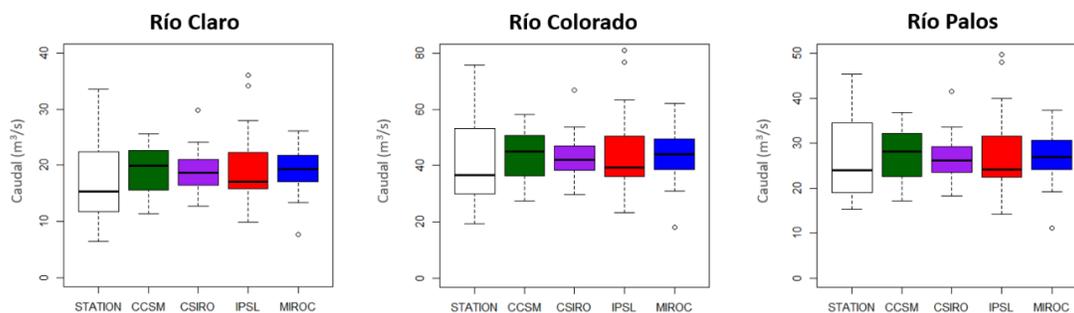


Figura 4.3: Boxplots de las series de caudales anuales observados en la estación y caudales simulados por el modelo VIC, forzado por cada uno de los GCM.

Por otro lado, también se analizaron las curvas de duración y variación estacional de caudales reproducidas por cada simulación (Figura 4.4). Las primeras mostraron una buena reproducción en el tramo central (probabilidad de excedencia entre 5% y 95%) en todos los GCMs, observándose solo sesgos positivos menores a 5 m³/s en los caudales extremos más bajos. Sin embargo, al analizar las curvas de variación estacional se constata que el modelo VIC tiene falencias al reproducir la escorrentía asociada al período de deshielo, lo cual se manifiesta al existir un desfase temporal entre 1 y 2 meses en la ocurrencia de los *peaks* y al sobreestimar estos últimos. Esto trae importantes implicancias en cuanto a la incertidumbre asociada a la modelación hidrológica y proyecciones realizadas, la cual no necesariamente es un problema estructural del modelo, sino que también podría estar asociada al proceso de escalamiento y al uso del producto grillado CR2MET, el cual no pudo ser validado en

estaciones de alta montaña en la zona de estudio. A pesar de esto último, se destaca que los caudales del período pluvial se reproducen adecuadamente en las tres cuencas.

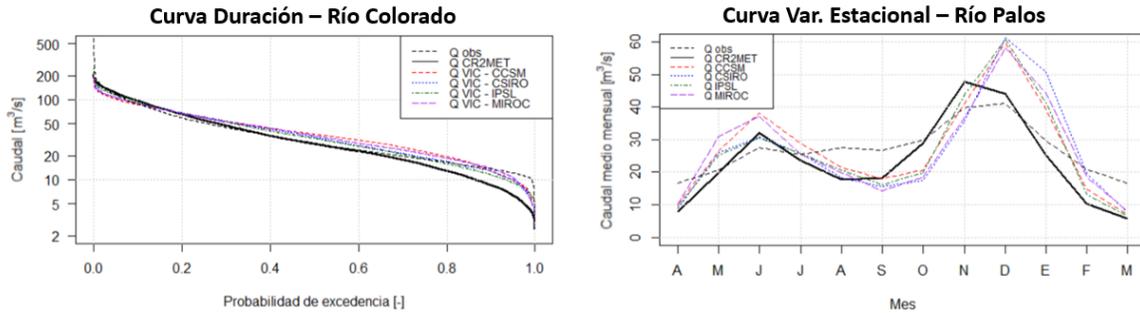


Figura 4.4: Comparación entre las Curvas de Duración en Río Colorado y Curvas de Variación Estacional en Río Palos durante el período histórico.

Para cuantificar y evaluar los cambios futuros proyectados en los principales flujos hidrológicos, se construyeron gráficos que presentan la partición de precipitación (línea diagonal), evapotranspiración (ET) y escorrentía (Q) en cada uno de los escenarios evaluados (histórico, RCP 4.5 y RCP 8.5), los cuales se muestran en la Figura 4.5. Se destaca que en ninguno de los escenarios futuros existen diferencias relevantes en cuanto a las proporciones en los flujos del balance hidrológico ($P = ET + Q$), lo cual puede ser evidenciado en el hecho de que en todos los casos la escorrentía representa aproximadamente un 80% del valor de la precipitación. Sin embargo, a pesar de que en ambos escenarios de emisión existe un descenso en la precipitación y escorrentía, esta variación es significativamente distinta en cada escenario. Mientras en RCP 4.5 la precipitación desciende entre 100 y 150 mm/año y la escorrentía entre 200 y 250 mm/año, bajo RCP 8.5 los descensos alcanzan valores de hasta 400 mm/año en precipitación y 500 mm/año en escorrentía. En términos porcentuales, los cambios negativos proyectados en precipitación se encuentran entre 5 y 10% en RCP 4.5 y entre 15 y 20% en el escenario RCP 8.5, según el GCM y cuenca considerada. Los mayores cambios se observan en escorrentía, donde en el escenario más extremo se proyectan descensos de hasta 40% en Río Claro. Por otro lado, todos los GCMs indican aumentos entre 1,1 °C y 2,5 °C en las temperaturas extremas, mientras que proyectan cambios menores al 10% en la ET y humedad del suelo, independientemente del escenario considerado.

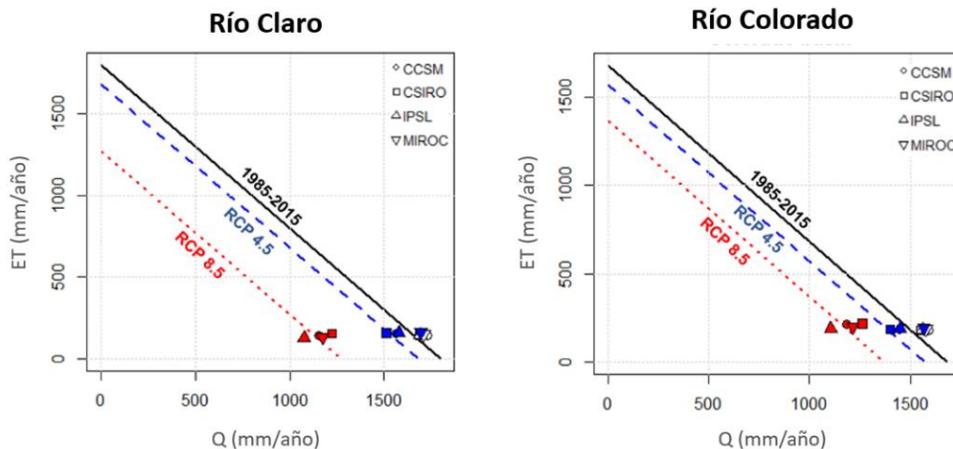


Figura 4.5: Comparación en la partición de flujos del balance hidrológico entre el período histórico y los escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5 evaluados en el período 2030 - 2060.

Adicionalmente, también se desarrolló un análisis de la variación en la estacionalidad de la escorrentía en cada una de las cuencas. En la Figura 4.6 se muestra la comparación de los valores mensuales de esta variable, estimada como el promedio simple entre los cuatro GCMs considerados, para el período histórico (gris) y los escenarios de emisión RCP 4.5 (azul) y RCP 8.5 (rojo), en la cuenca del Río Palos. Se evidencian diferencias importantes entre ambos escenarios, respecto a las simulaciones históricas. Por un lado, en RCP 4.5 existen diferencias menores a $20 \text{ m}^3/\text{s}$ en todos los meses del año, aunque se observan incrementos de hasta 30% en la escorrentía del período pluvial (abril a septiembre) y un notable descenso de hasta 50% en la escorrentía del período nival (diciembre a marzo). Por otro lado, los valores mensuales de escorrentía proyectados en RCP 8.5 alcanzan descensos de hasta $70 \text{ m}^3/\text{s}$ y $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en el período nival de las cuencas de Río Colorado y Río Palos, respectivamente. Además, en este último escenario también se evidencia un cambio en el régimen hidrológico de las tres cuencas, principalmente relacionado con el adelantamiento en hasta dos meses (de diciembre a octubre) en la ocurrencia del *peak* de caudal en el período nival y una menor duración de este último. Esto se ve reflejado en el hecho de que durante los meses de enero, febrero y marzo, el caudal alcanza valores inusualmente bajos (menores a $10 \text{ m}^3/\text{s}$) en todas las cuencas.

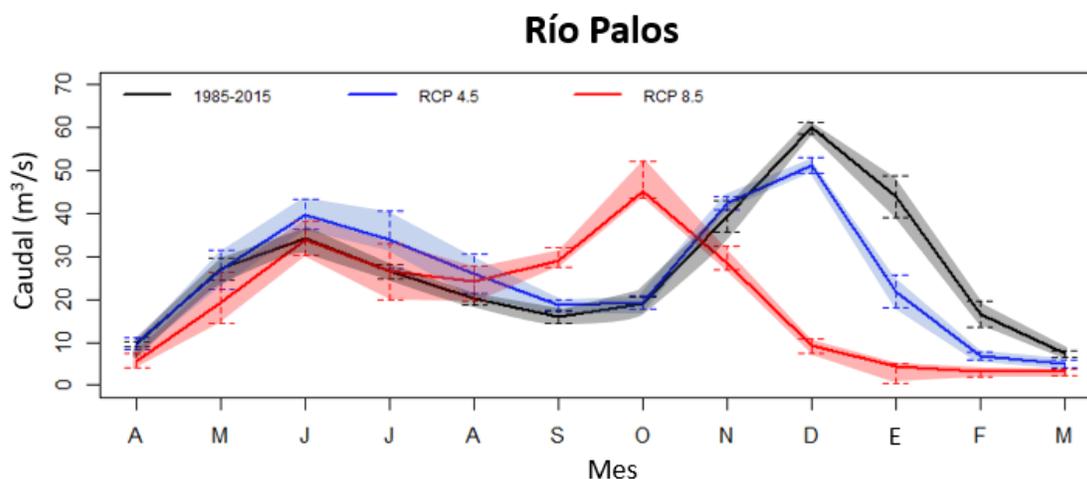


Figura 4.6: Comparación de las curvas de variación estacional de caudales entre el período histórico y los escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5. Cada curva representa el valor agregado de los cuatro GCMs.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se implementó el método de escalamiento estadístico Quantile Delta Mapping con el fin de corregir el sesgo espacial presente en las series de precipitación y temperatura simuladas por cuatro GCMs, y utilizando como referencia el producto grillado CR2MET. Las variables climáticas resultantes de este proceso fueron utilizadas como *input* en el modelo hidrológico VIC, obteniendo series históricas y futuras de los principales flujos hidrológicos en tres cuencas de alta montaña ubicadas en la región del Maule, en el período 1979 – 2060 y bajo dos escenarios distintos de emisiones (RCP 4.5 y 8.5).

Los resultados de las proyecciones realizadas indican significativos cambios en todas las variables hidroclimáticas analizadas, obteniendo incrementos en la temperatura media anual por sobre los 2,5 °C y descensos en la precipitación media anual y escorrentía media diaria de hasta 20% y 40%, respectivamente, dependiendo del modelo climático considerado. Adicionalmente, las proyecciones evidencian un notable cambio en el régimen hidrológico de las cuencas estudiadas, caracterizado por un adelantamiento en el *peak* de caudales de deshielos de hasta dos meses. Por el contrario, cambios de menor magnitud (menores al 10%) fueron obtenidos en la evapotranspiración y en el contenido de humedad del suelo de las cuencas.

Como trabajo futuro, se destaca que hoy en día resulta relevante evaluar la ocurrencia de futuros eventos extremos, como sequías. Estos eventos no solo se relacionan con déficits en las precipitaciones, sino que también pueden estar asociados a déficits en el contenido de humedad del suelo (sequía agrícola), para lo cual resulta esencial que futuros estudios consideren a esta variable, idealmente en una alta resolución espacial y temporal. Asimismo, también se propone extender la metodología empleada en este trabajo a estudios de cambio climático en cuencas con un mayor grado de intervención antrópica.

Finalmente, debe reconocerse la importancia que poseen las proyecciones de cambio hidrológico, como las realizadas en este trabajo, en un contexto en que muchas áreas del país son potencialmente vulnerables a los efectos que el cambio climático y extensos períodos de sequía puedan generar. Estas últimas cobran una gran relevancia para la sociedad y entes reguladores en la planificación y gestión de los recursos hídricos cada vez más escasos, contribuyendo así a las metas 6.5, 12.2 y 13.2 de los Objetivos de Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas. Esto se puede ver reflejado en acciones como evitar el sobre otorgamiento de derechos de agua, creación de planes de gestión integrada de cuencas y en la generación de políticas públicas que apunten a un manejo sustentable del recurso. Asimismo, en la aplicación práctica de la ingeniería civil resulta fundamental contar con proyecciones en un clima cambiante, considerando que muchas de las grandes obras hidráulicas, como los embalses, han sido diseñadas bajo condiciones de estacionariedad, lo cual no necesariamente seguirá siendo válido en las próximas décadas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el constante apoyo y cada uno de los valiosos comentarios, sugerencias y recomendaciones brindados por Miguel Lagos, Nicolás Vásquez, Pablo Mendoza, Ana Prieto y Eduardo Muñoz en la elaboración y redacción del presente trabajo.

REFERENCIAS

Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817-5846.

Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413-421.

Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.

Cepeda Abad, J. A. (2017). Análisis de los caudales nivo-glaciares históricos y proyectados en la cuenca del Río Olivares: comparación entre el modelo DHSVM y WEAP. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Dirección General de Aguas (DGA, 2017). Actualización Balance Hídrico Nacional. Realizado por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N°417. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA, 2018). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro. Informe Final. Santiago, Chile.

Dutra, E., Magnusson, L., Wetterhall, F., Cloke, H. L., Balsamo, G., Bousssetta, S., & Pappenberger, F. (2013). The 2010–2011 drought in the Horn of Africa in ECMWF reanalysis and seasonal forecast products. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1720-1729.

Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R., & Mearns, L. O. (2000). Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *science*, 289(5487), 2068-2074.

Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979– 2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4).

Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12), 6307-6327.

Gómez Zavala, T. I. (2013). Evaluación del impacto del cambio climático en centrales hidroeléctricas de la cuenca del Alto Cachapoal. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Hamlet, A. F., E.P. Salathé & P. Carrasco (2010). Statistical downscaling techniques for global climate model simulations of temperature and precipitation with application to water resources planning studies. The Columbia Basin Climate Change Scenarios Project (CBCCS) report.

Hao, Z., Hao, F., Singh, V. P., & Ouyang, W. (2017). Quantitative risk assessment of the effects of drought on extreme temperature in eastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(17), 9050-9059.

Hewitson, B. C., & Crane, R. G. (2006). Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: precipitation downscaling over South Africa. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26(10), 1315-1337.

Liang, X., Wood, E. F., & Lettenmaier, D. P. (1996). Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. *Global and Planetary Change*, 13(1-4), 195-206.

Wilby, R. L., Charles, S. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., & Mearns, L. O. (2004). Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, available from the DDC of IPCC TG CIA, 27.