

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA
ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

CATALINA JEREZ TOLEDO¹
HÉCTOR JIMÉNEZ ORELLANA¹
MIGUEL LAGOS ZUÑIGA^{1,2}
SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI¹
JOSÉ SALDÍAS AROCA³
MARCO ALICERA LEIVA³
MARIANA CONCHA MATHIESEN³

RESUMEN

La escasez de agua en Chile puede asociarse a diversos factores, tales como, aumento en la demanda de usuarios de agua y cambios en el uso del suelo. Sin embargo, la principal fuente de déficit de precipitaciones, intensificación de eventos extremos (e.g., sequías e inundaciones) y consecuentes decretos de escasez, corresponde al cambio climático. Este escenario plantea desafíos significativos para la gestión y disponibilidad del agua, ya que diversos sectores productivos (e.g., agricultura, energía y abastecimiento urbano) dependen de los recursos hídricos. En base a lo anterior, y en el marco de un proyecto de investigación desarrollado para la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO), el presente documento propone lineamientos metodológicos para estudios de disponibilidad ante escenarios de cambio climático respecto a: i) selección de Modelos Climáticos Globales (GCMs) y Regionales (RCMs), ii) escalamiento de GCMs (~ 100 a 200 km) a resoluciones espaciales acordes con modelos de cuencas (~ 5 km) mediante Métodos de Escalamiento Estadístico (SDMs) y, iii) modelación y cambio hidrológico. La metodología fue probada en dos cuencas de interés para la Corporación. Los resultados manifiestan la necesidad de mejorar y/o avanzar en: i) la aplicación de SDMs, principalmente, en cuencas de alta montaña, donde la señal de cambio del modelo escalado difiere de la señal nativa y, ii) explorar el uso de modelos hidrológicos robustos para el análisis de la criósfera, y flujos evapotransporativos y subsuperficiales dentro de la cada cuenca.

¹ Investigadores Asociados, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile.

² Tesista Doctoral, Center for Climate and Resilience Research (CR)2, Universidad de Chile.

³ Gerencia Corporativa de Aguas, Corporación Nacional del Cobre (CODELCO).

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un problema de carácter global, por ende, Chile no es una excepción y así lo corrobora la evidencia científica. Las tendencias climáticas históricas y futuras indican reducciones en las precipitaciones medias anuales en la zona central del país, mientras que la temperatura media aumenta en todo el territorio nacional (Boisier et al., 2016; Vicuña et al., 2021). Por otro lado, se prevé que los eventos hidrometeorológicos extremos —entre ellos: inundaciones, sequías, aluviones, incendios forestales—, incrementen en frecuencia y magnitud (Lagos-Zúñiga et al., 2022; Vargas et al., 2020; World Bank Group, 2021), dando paso a zonas con mayor exposición a riesgos climáticos. En consecuencia, resulta indispensable determinar cuáles son las amenazas y, por tanto, el riesgo hídrico al que se enfrentan las distintas regiones del país en términos de la disponibilidad del recurso.

En la actualidad, CODELCO satisface sus necesidades de agua mediante fuentes de agua continentales. Por lo tanto, es fundamental identificar y medir los efectos e impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico en cada una de sus operaciones. Bajo el alero de un contrato marco entre CODELCO y el Centro Avanzado de Tecnología para la Minería de la Universidad de Chile (AMTC), se desarrolló una guía metodológica para evaluar cambios en la disponibilidad hídrica futura mensual entre las regiones de Arica y Parinacota y Biobío.

Los presentes lineamientos se estrechan con los ejes prioritarios establecidos en el nuevo Código de Aguas. Asimismo, la perspectiva propuesta refuerza la reciente metodología desarrollado por el Servicio de Evaluación Ambiental, en términos de la evaluación del cambio climático e hidrológico sobre los componentes ambientales que enfrentan nuevas amenaza. Pero, se debe seguir avanzando en métodos intrínsecos de cualquier estudio de cambio climático, como la evaluación de modelos globales y métodos de escalamiento; así como la representación de procesos hidrológicos dominantes en una zona de estudio dada.

2. ZONIFICACIÓN HIDROCLIMÁTICA

El primer propósito es la construcción de una zonificación hidroclimática entre las regiones de Arica y Parinacota y Biobío (Figura 1–a). Esta clasificación busca guiar la selección y construcción de modelos hidrológicos dependiendo de los procesos dominantes identificados. El mapa se basa en una clasificación jerárquica de tercer orden definida mediante el algoritmo de AutoClass-C (Cheesman et al., 1988). Se divide el territorio en ocho macrozonas de características homogéneas en tres aspectos claves: i) susceptibilidad de los caudales frente a las precipitaciones caídas, (i.e., ¿cambia el volumen y/o magnitud del agua almacenada ante un evento de precipitación? si es así, se identifica una zona sensible a las precipitaciones, en caso contrario, la principal entrada de agua tendría otro origen), ii) dominan los procesos evapotranspirativos o de escorrentía, (i.e., del agua precipitada, ¿qué fracción se devuelve a la atmósfera o genera escorrentía?), y iii) los aportes de agua subterránea a la escorrentía superficial son altos o bajos, identificándose, además, si el dominio de estudio presenta o no características permeables. Esta categorización se realizó considerando el producto grillado CR2MET v2.0 (Boisier et al., 2018) y los resultados de la actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2018, 2019a, 2019b). Luego, se definen zonas regionales con características climáticas e hidroclimáticas conjuntas (Figura 1–c). Lo

anterior, con el propósito evaluar modelos globales en escalas espaciales similares a las nativas de los modelos globales.

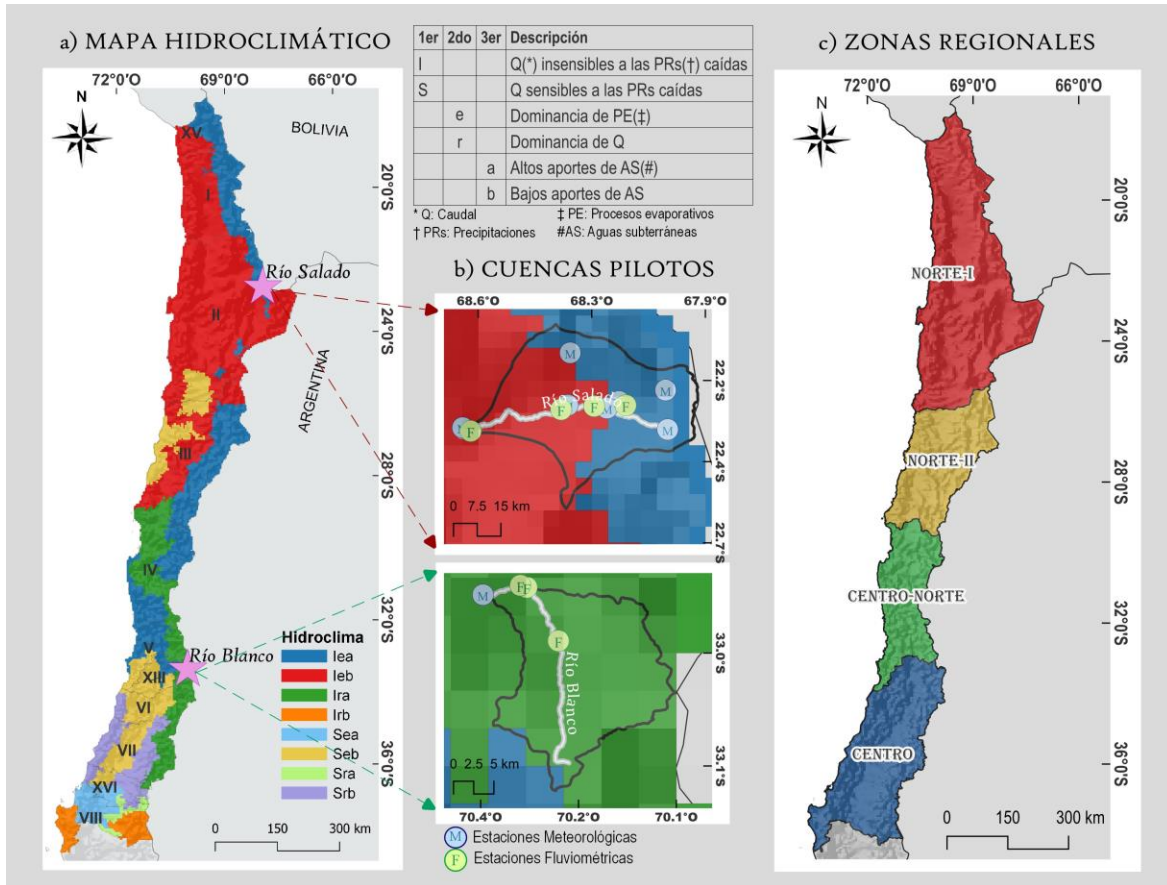


Figura 1. a) mapa hidroclimático entre las regiones administrativas de Arica y Parinacota y Biobío. Cada zona define características climáticas homogéneas de primer, segundo y tercer grado según la tabla superior, b) cuencas piloto donde fueron probadas las metodologías (estrellas en mapa hidroclimático) y c) zonas regionales definidas de cordillera a mar.

La Figura 1–b muestra las cuencas piloto seleccionadas, para probar las metodologías de escalamiento estadístico y balance hídrico. Las cuencas se seleccionan en consideración a que sus caudales tributan a faenas mineras de CODELCO. Se infiere que la evaporación, sublimación, infiltración y aporte de aguas subterráneas son procesos hidrológicos de interés a modelar en la cuenca del río Salado, debido a los hidroclimas *Iea* e *Ieb* que presenta. En tanto, río Blanco presenta en forma un único hidroclima *Ira*, por lo que su caudal no es sensible a las precipitaciones caídas y predomina el flujo de escorrentía sobre los flujos evapotranspirativos. Esto se debe principalmente a las precipitaciones sólidas acumuladas durante la temporada invernal, las que se derriten durante la temporada estival, así como a la presencia de glaciares en áreas de mayor altitud (Barcaza et al., 2017; CECs, 2017; Rohrbach et al., 2017). En consecuencia, los procesos hidrológicos característicos de la zona son aquellos asociados al derretimiento nival y glacial, la infiltración y recarga del acuífero.

3. DATOS

3.1. PRODUCTOS OBSERVACIONALES

Las principales bases observacionales utilizadas para el desarrollo del estudio corresponden al producto grillado CR2MET v2.0 (Boisier et al., 2018) y los resultados de la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018, 2019a, 2019b). También se considera la información geoespacial de glaciares mapeados en el territorio chileno⁴, series globales mensuales de temperatura superficial del mar (SST)⁵ en una grilla de 2° latitud-longitud, para el período 1985 – 2014; y los datos del Módulo Anular del Sur (SAM^{6,7}), el que describe el movimiento norte-sur del cinturón de viento del oeste que rodea la Antártica. Se extraen los datos mensuales del reanálisis NOAA-CIRES-DOE, para el período 1982 – 2011.

3.2. MODELOS REGIONALES (CMIP5)

Se evalúan siete Modelos Climáticos Regionales (RCMs, Tabla 1), forzados con la Trayectoria de Concentración Representativa (RCP) 8.5. Es una colección de modelos climáticos de la Quinta Fase de Experimentación Climática Global (CMIP5), reducidos dinámicamente a resoluciones espaciales > 30 km (Jacob et al., 2012; Taylor et al., 2012).

Tabla 1. Modelos Climáticos Regionales de la iniciativa CMIP5.

ID	Modelo Climático	Institución	Resolución Lat – Lon (°)	RCP-8.5
R1	MPI-ESM-M RegCM4.5	CR2	0,1 – 0,1	✓
R2	HadGEM2-ES RegCM4-7	Múltiples [†]	0,3 – 0,2	✓
R3	MPI-ESM-MR RegCM4-7		0,3 – 0,2	✓
R4	NorESM1-M RegCM4-7		0,3 – 0,2	✓
R5	HadGEM2-ES REMO2015	GERICS [‡]	0,3 – 0,2	✓
R6	MPI-ESM-LR REMO2015		0,3 – 0,2	✓
R7	NorESM1-M REMO2015		0,3 – 0,2	✓

[†] Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (IAP/CAS), Oak Ridge National Laboratory, Tennessee. National Center for Atmospheric Research, NCAR, The Hong Kong University of Science and Technology.

[‡] The Climate Service Center Germany.

3.3. MODELOS GLOBALES (CMIP6)

Se evalúan 31 modelos climáticos globales de la Sexta Fase de Experimentación Climática Global (CMIP6; Tabla 2). Las diferencias de mayor relevancia respecto de los modelos de

⁴ <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>

⁵ <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html>

⁶ https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/timeseries/monthly/SAM/

⁷ <http://www.bom.gov.au/climate/enso/history/In-2010-12/SAM-what.shtml>

CMIP5 radican en que los modelos CMIP6 consideran nuevas estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero y cambios en el uso de suelo, basados en las diversas Vías Socioeconómicas Compartidas (escenarios SSPs, O'Neill et al., (2016)) y escenarios RCPs.

Tabla 2. Modelos Climáticos Globales de la iniciativa CMIP6. Los tickets (✓) o cruces (X) indican si existe o no proyección climática con el Escenario Medio (SSP2) y nivel de forzamiento 4,5 Wm⁻² o con el Escenario de Desarrollo Económico Alto (SSP5) y nivel de forzamiento de 8,5 Wm⁻².

ID	Modelo Climático	Institución	Resolución Lat – Lon (°)	SSP	
				2-4.5	5-8.5
G1	ACCESS-CM2	CSIRO & ARCCSS	1,3 – 1,9	✓	✓
G2	ACCESS-ESM1-5	CSIRO	1,3 – 1,9	✓	✓
G3	AWI-ESM-1-1-LR	AWI	1,3 – 1,9	✓	✓
G4	BCC-ESM1	BCC	2,8 – 2,8	X	X
G5	CanESM2	CCCMA	2,8 – 2,8	✓	✓
G6	CMCC-ESM2	CMCC	0,9 – 1,3	✓	✓
G7	E3SM-1-0	E3SM-Project	1,0 – 1,0	X	✓
G8	EC-Earth3	EC-Earth consortium	0,7 – 0,7	✓	✓
G9	EC-Earth3-AerChem		0,7 – 0,7	X	X
G10	EC-Earth-CC		0,7 – 0,7	✓	✓
G11	EC-Earth-Veg		0,7 – 0,7	✓	✓
G12	EC-Earth-Veg-LR		1,1 – 1,1	✓	✓
G13	FGOALS-f3-L	CAS	1,0 – 1,3	X	X
G14	FGOALS-g3		2,0 – 2,0	✓	✓
G15	GFDL-ESM4	NOAA-GFDL	1,0 – 1,3	✓	✓
G16	GISS-E2-2-G	NASA-GISS	2,0 – 2,5	X	X
G17	IITM-ESM	CCCR-IITM	1,9 – 1,9	✓	X
G18	INM-CM4-8	INM	1,5 – 2,0	✓	✓
G19	INM-CM5-0		1,5 – 2,0	✓	✓
G20	IPSL-CM6A-LR	IPSL	1,3 – 2,0	✓	✓
G21	KIOST-ESM	KIOST	1,9 – 1,9	✓	✓
G22	MIROC6	MIROC6 JAMSTEC	1,4 – 1,4	✓	✓
G23	MPI-ESM-1-2-HAM	HAMMOZ-ETH	1,9 – 1,9	X	X
G24	MPI-ESM1-2-HR	MPI-M	0,9 – 0,9	✓	✓
G25	MPI-ESM1-2-LR		1,9 – 1,9	✓	✓
G26	MRI-ESM2-0	MRI	1,1 – 1,1	✓	✓
G27	NESM3	NUIST	1,9 – 1,9	✓	✓
G28	NorCPM1	NCC	1,9 – 2,5	X	X
G29	NorESM2-MM		0,9 – 1,3	✓	✓
G30	SAM0-UNICON	SNU	0,9 – 1,3	X	X

ID	Modelo Climático	Institución	Resolución Lat – Lon (°)	SSP	
				2-4.5	5-8.5
G31	TaiESM1	AS-RCEC	0,9 – 1,3	✓	✓

4. METODOLOGÍA

La metodología se basa en la selección de modelos climáticos mediante la evaluación de su desempeño climatológico y en la representación de fenómenos de gran escala, seguida de una corrección de sesgo de las variables climáticas mediante la aplicación de un escalamiento estadístico. Luego, se estima el balance hídrico y son evaluadas las proyecciones climáticas e hidrológicas considerando señales de cambio y la incertidumbre de los modelos climáticos.

4.1. SELECCIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS

La metodología se centra en evaluar el desempeño histórico de los modelos climáticos en la representación de los fenómenos de gran escala ENSO y SAM, los cuales tienen influencias significativas en el territorio nacional (Aceituno et al., 2021; Dätwyler et al., 2020; DGA, 2017). Además, se lleva a cabo una evaluación de la representación climatológica espacial, estacional y anual de estos modelos. Enfoque similar a Gateño et al., (2023). La hipótesis nula de la metodología plantea que no existe diferencia significativa entre los desempeños de los modelos climáticos en la representación de las oscilaciones climáticas, considerando las influencias en el territorio nacional. Asimismo, se establece que no hay diferencia significativa en términos de la representación climatológica entre los modelos evaluados.

Es importante destacar que los RCMs se evalúan únicamente en términos climatológicos debido a que no simulan explícitamente la temperatura superficial del mar (SST) y la presión a nivel del mar (PNM). Por lo tanto, el enfoque de la evaluación se centra en la representación de los fenómenos de gran escala mencionados y en la climatología general. Así también, previo a determinar los criterios de fenómenos de gran escala y climatología histórica, se realiza una interpolación bilineal sobre los modelos climáticos, con el objetivo de comparar las simulaciones a una escala acorde al producto observacional (i.e, 0,05° latitud-longitud).

4.1.1. CRITERIO I: FENÓMENOS DE GRAN ESCALA

El fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, Ec.1) se distribuye en diversas zonas geográficas del océano pacífico, siendo de interés para este estudio las zonas del Niño₁₊₂ y Niño_{3,4} (Figura 2). La primera se relaciona con la variabilidad climática del norte del país (regiones de Arica y Parinacota hasta Atacama) (Gateño et al., 2023), mientras que la zona Niño_{3,4} influye en la climatología del centro y sur del país (Aceituno et al., 2021; DGA, 2017).

El Módulo Anular del Sur (SAM) es el principal modo de variabilidad climática extratropical en el hemisferio sur. SAM describe los vientos procedentes de Australia, influyendo en frentes de aire fríos y la variabilidad de precipitación en el centro-sur de Chile (Aceituno et al., 2021; DGA, 2017). Tiene dos fases: positiva, que disminuye la precipitación en Chile debido a la contracción de los vientos hacia la Antártica, y negativa, que promueve condiciones favorables para aumentar la precipitación en Chile al expandirse los vientos

hacia el Ecuador. Aunque el fenómeno hace referencia a los vientos de Australia, su cálculo depende de la PNM en dos bandas latitudinales debido a la relación con el gradiente atmosférico o barométrico (Ecs. 2 y 3)⁸.

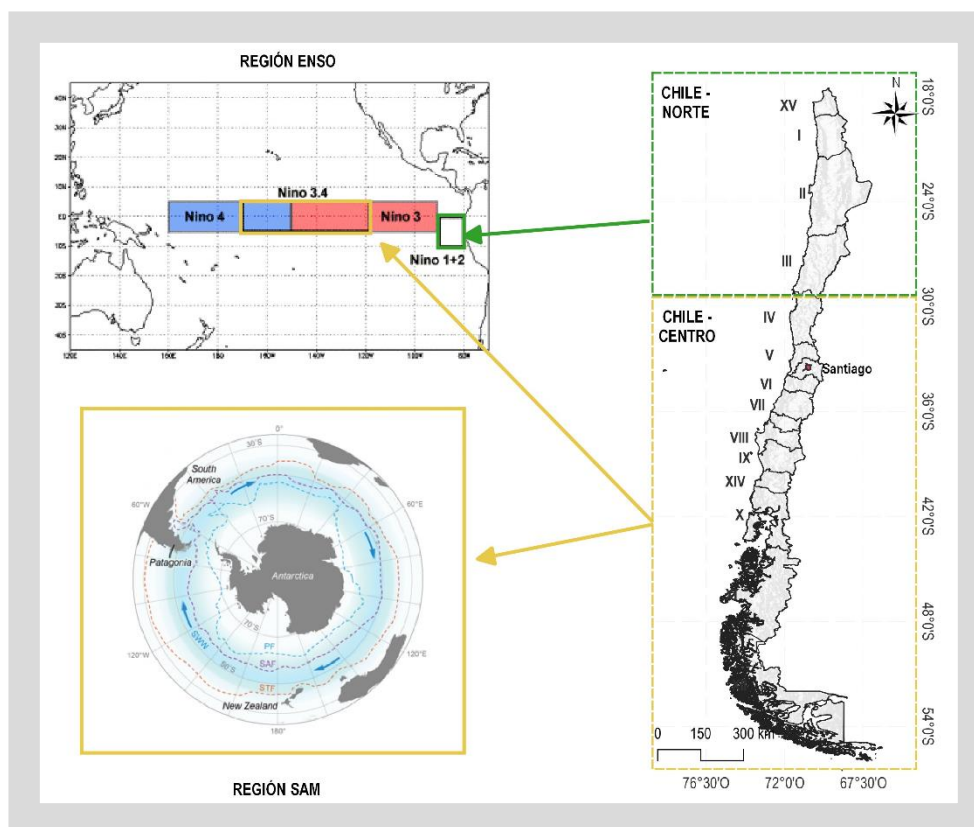


Figura 2. Regiones geográficas de oscilaciones de fenómenos de gran escala ENSO y SAM. Adaptada de (Sánchez, 2013)

$$\text{Niño}_{X,i} = \frac{\text{SST}_{X,i} - \overline{\text{SST}}_X}{\sigma_{\text{SST}_X}} \quad 1$$

$$\text{SAM} = \text{PNM}_{40^\circ\text{S}}^* - \text{PNM}_{65^\circ\text{S}}^* \quad 2$$

$$\text{PNM}_{X^\circ\text{S}}^* = \frac{\text{PNM}_{X^\circ\text{S}} - \overline{\text{PNM}}_X}{\sigma_{\text{PNM}_X}} \quad 3$$

donde X es la región geográfica 1+2 o 3.4, i el mes de análisis, \bar{Y} el valor promedio y σ_Y la desviación estándar de SST o PNM según corresponda el índice. $\text{PNM}_{40^\circ\text{S}}^*$ y $\text{PNM}_{65^\circ\text{S}}^*$ son valores mensuales normalizados de PNM en las bandas latitudinales 40°S y 65°S, respectivamente.

El criterio de selección consiste en determinar los índices de ENSO y SAM para el territorio de Chile – Norte y Chile – Centro de la Figura 2. La metodología se resume en tres pasos.

⁸ <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/marshall-southern-annular-mode-sam-index-station-based>

- I. **Correlación ENSO – SAM con precipitación media anual (PMA) observada.** Se determina la correlación de Pearson de la región ENSO – Niño1+2 con la PMA de Chile – Norte y, la correlación de ENSO – Niño3.4 con la PMA de Chile – Centro.
- II. **Correlación ENSO – SAM con precipitación media anual (PMA) simulada.** Paso análogo a (I), pero utilizando la precipitación simulada por los GCMs.
- III. **Selección en base a correlación observada.** Se calculan las correlaciones de ENSO y SAM con el producto observacional CR2MET v2.0. La confianza de cada región se determina en base a DGA (2017), donde Niño1+2 – Chile Norte: $0,40 \pm 0,25$; Niño3,4– Chile Centro: $0,59 \pm 0,25$; y SAM – Chile Centro: $-0,49 \pm 0,25$.

4.1.2. CRITERIO II: CLIMATOLOGÍA

Para las series de precipitación (PR) y temperatura media (T_M , obtenida como el promedio de las simulaciones de temperaturas mínimas y máximas), se calculan tres métricas. El objetivo es identificar si los modelos climáticos representan la variabilidad interanual (E_{CV} , Ec. 4, fluctuaciones naturales de VC (variables climáticas) de un año a otro), variabilidad intraanual (R_M , Ec. 5, análisis agregado de la curva de variación estacional) y los patrones espaciales (R_E , Ec. 6, distribución espacial de VC) del producto observacional.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad \rightarrow E_{CV} = \frac{CV_{OBS}}{CV_{XGM}} \quad 4$$

$$\rho_{pix} = \frac{\sum(OM_i - \overline{OM})(SM_i - \overline{SM})}{\sqrt{\sum(OM_i - \overline{OM})^2(SM_i - \overline{SM})^2}} \quad \rightarrow R_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i \quad 5$$

$$\rightarrow R_E = \frac{\sum(OC_i - \overline{OC})(SC_i - \overline{SC})}{\sqrt{\sum(OC_i - \overline{OC})^2(SC_i - \overline{SC})^2}} \quad 6$$

en (4), μ y σ son la media y desviación estándar de los valores anuales medios de PR y T_M , y CV es el coeficiente de variación, mientras que E_{CV} es el error del modelo climático (XGM, con X = G: global o R: regional) respecto del producto observacional (OBS). En (5), ρ_{pix} el Coeficiente de Correlación de Pearson de cada elemento de la grilla, OM (SM) y \overline{OM} (\overline{SM}) los valores mensuales del producto observacional (simulaciones de modelos climáticos) y promedio de este, respectivamente. Luego, R_M es la variabilidad intraanual, n el número de elementos de la grilla y ρ_i la Correlación de Pearson de cada elemento. En (6), se determina la Correlación de Pearson, pero de los vectores climatológicos⁹ observados (OC) y simulados (SC).

En busca de una métrica para analizar la representación climatológica de los modelos, se construye una distancia de las métricas E_{CV} , R_M y R_E respecto a su valor óptimo ($DE_{XCM,Y}$,

⁹ El vector climatológico se determina mediante la media climatológica (MC) de cada punto de la grilla, reordenada posteriormente en forma de vector. La MC corresponde al promedio de una variable climática para un período de tiempo de a lo menos 30 años.

Ec. 7), donde $E_{CV} = R_M = R_E = 1,0$ (óptimo). Un modelo climático ideal entregaría una $DE_{XCM,Y} = 0$, acercándose a la climatología histórica. Luego, para evaluar el desempeño general del modelo climático (PR y T_M), se construye una métrica única (DE_{XCM}^{RC} , Ec. 8), la que permite obtener el ranking de selección. Se seleccionan los modelos climáticos en el mejor tercio del ranking (33%) y también aquellos que estén hasta un 20% alejados del último modelo seleccionado.

$$DE_{XCM,Y} = \sqrt{(1 - E_{CV,XCM})^2 + (1 - R_{M,XCM})^2 + (1 - R_{E,XCM})^2} \quad 7$$

$$DE_{XCM}^{RC} = \sqrt{DE_{XCM,PR}^2 + DE_{XCM,T_M}^2} \quad 8$$

4.2. ESCALAMIENTO ESTADÍSTICO MBCn

El método MBCn permite corregir los sesgos de precipitación sólida, manteniendo la covariabilidad existente entre la temperatura simulada por los modelos climáticos para la ocurrencia de estos eventos (Cannon, 2018; Dionizis et al., 2021; Meyer et al., 2019). Así también, aplica transformaciones matriciales y ortogonales para mantener la correlación entre los datos mensuales observados y simulados (Dionizis et al., 2021). El método es de código libre, compilado en el paquete MBC¹⁰ (Cannon, 2018) y disponible en el lenguaje de programación R (*R Core Team*)¹¹.

Se destaca la capacidad del método MBCn para representar la acumulación de nieve y otros procesos climáticos debido a su habilidad para corregir sesgos en la precipitación, mientras mantiene la covariabilidad con la temperatura simulada. Este enfoque garantiza una mejor captura de las interacciones climáticas que influyen en la formación y distribución de la nieve en diversas altitudes. A través de su metodología, MBCn supera las limitaciones de métodos convencionales como el Quantile Delta Mapping (Meyer et al., 2019), lo que resulta especialmente valioso en áreas geográficas donde la nieve juega un papel crítico en procesos hidrológicos.

4.3. ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

La Figura 3 esquematiza la metodología para estimar el balance hídrico en un contexto de cambio climático. Se inicia por el estudio de las forzantes meteorológicas desde los modelos climáticos seleccionados y escalados estadísticamente (Secciones 4.1 y 4.2). Si bien las características que definen a una cuenca pueden cambiar en el tiempo, para los objetivos del estudio éstas se mantienen invariables. En la dirección vertical de la Figura 3, tanto para período histórico como futuro, se identifica el flujo de trabajo para la estimación del balance hídrico; mientras que la dirección horizontal de la figura refleja cómo se llevan a cabo o producen los cambios entre los períodos de análisis.

De forma matemática, el balance hídrico se identifica según la Ec. 9, donde el flujo de entrada es la precipitación total (PR) y los flujos de salida se componen por las pérdidas atmosféricas

¹⁰ <https://cran.r-project.org/web/packages/MBC/index.html>

¹¹ <https://cran.r-project.org/>

(PAT = ET: evapotranspiración + S: sublimación de nieve y glaciares) y el caudal de salida (Q). La variación temporal de almacenamientos internos (ΔS) indica si el dominio de estudio almacena (ΔS positivo) o pierde agua (ΔS negativo), además contiene los errores del ajuste del modelo hidrológico. En el largo plazo, el balance hídrico debería ser nulo, pero diferencias pueden surgir por fuentes o sumideros persistentes.

En relación con la modelación hidrológica, ésta inicia por la identificación de los procesos hidrológicos relevantes desde la zonificación hidroclimática (Figura 1). Se selecciona el modelo RAVEN (Craig et al., 2020) debido a su estructura flexible y plataforma de modelación mixta¹².

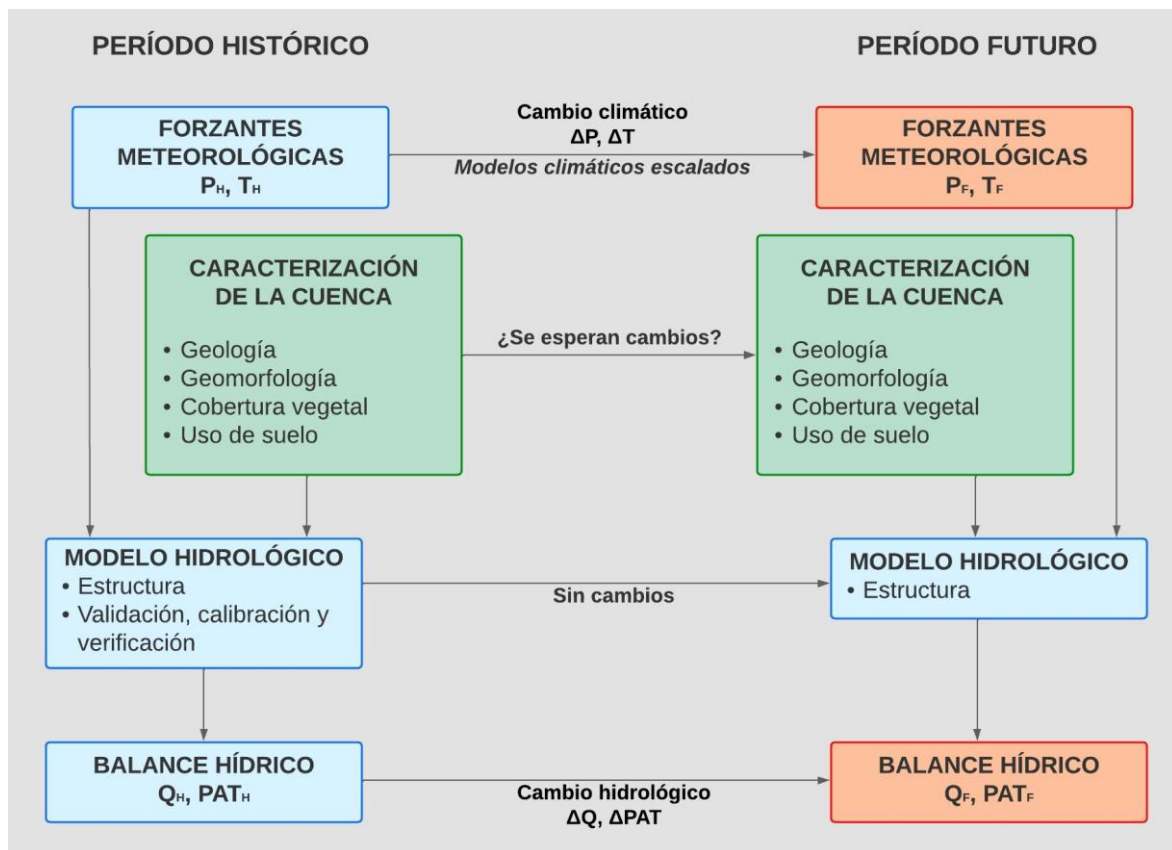


Figura 3. Enfoque metodológico para estimación de balance hídrico ante escenarios de cambio climático. Los insumos de la modelación hidrológica se presentan en celeste, los posibles cambios en la caracterización de la cuenca en color verde, mientras que las series de cambio climático e hídrico se muestran en color naranja.

$$\Delta S = PR - Q - PAT \quad 9$$

$$\Delta X (\%) = 100 \frac{\overline{X}_{FUT} - \overline{X}_{HIST}}{\overline{X}_{HIST}} \quad 10$$

¹² En consideración con cada modelo perceptual de la cuenca, RAVEN integra las ecuaciones de los diversos flujos, según las elecciones de cada modelador. Además, puede representar los flujos mediante modelos conceptuales o de base física semi-distribuidos.

$$f_{\text{Agree}} = \begin{cases} 1,0 & \text{si } \Delta X > 0 \\ -1,0 & \sim \end{cases} \quad 11$$

$$IA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{\text{Agree}_i} \quad 12$$

donde ΔS es la variación temporal de almacenamientos internos, PR la precipitación, Q el caudal y PAT las pérdidas atmosféricas. Luego, ΔX es el cambio de una variable (PR, Q y PAT) medido en términos porcentuales, $\overline{X_{\text{FUT}}}$ y $\overline{X_{\text{HIST}}}$ el valor promedio histórico y futuro, respectivamente. f_{Agree} es el factor de acuerdo, i el modelo climático evaluado en el IA, siendo este el índice de acuerdo.

4.4. EVALUACIÓN DE PROYECCIONES CLIMÁTICAS E HIDROLÓGICAS

La evaluación de cambio climático e hidrológico se basa en determinación de las señales de cambio de cada variable hidroclimática de la Ec. 9¹³. La señal de cambio (Ec. 10) representa la tendencia promedio esperada para una variable entre un período histórico y uno futuro. Para evaluar un cambio estadísticamente significativo, se recomienda que los períodos elegidos incluyan al menos 30 años. En consideración con lo descrito de forma previa, se define: período histórico → 1985 – 2014; período futuro → 2015 – 2040 (corto plazo), 2041 – 2070 (mediano plazo) y 2071 – 2100 (largo plazo).

Cabe señalar que el análisis de proyecciones climáticas considera los valores del factor de acuerdo (Ec. 11) y el índice de acuerdo (Ec. 12). El primero determina qué fracción total de los modelos climáticos indican la misma señal de cambio. Puede tomar valores entre -1 (señal negativa) a +1 (señal positiva), donde su interpretación se distingue entre valores intermedios (acuerdo parcial) y absolutos (acuerdo completo). En tanto, el segundo responde al promedio de los n factores de acuerdo, cuyo valor es una medida de la incertidumbre de las proyecciones.

5. RESULTADOS

La aplicación de la metodología de selección de modelos climáticos (Figura 4-a) determina que cuatro GCMs cumplen con ambos criterios de selección en el Norte-I, Centro-Norte y Centro (modelos disímiles entre zonas), mientras que seis modelos quedan seleccionados en el Norte-II. Son de relevancia los modelos MRI-ESM2-0 y NorESM2-MM por su buen desempeño en cada zona regional, permitiendo realizar un análisis climatológico e hídrico desde Arica y Parinacota hasta Biobío. En relación con los RCMs, todos quedan contenidos dentro de la distancia euclidiana del 33% mejor de los GCMs, por ende, son seleccionados.

¹³ De forma usual, se estudia la señal de cambio de las temperaturas medias (ΔT (°C) = $\overline{T_{\text{FUT}}} - \overline{T_{\text{HIST}}}$). En consideración a que PAT considera esta variable de forma intrínseca, los resultados ΔT no se presentan en estas páginas.

La aplicación del método estadístico MBCn, en las cuencas piloto, resuelve el sesgo de los modelos climáticos¹⁴. No obstante, el análisis de las señales de cambio permite inferir que determinados modelos alteran su señal de cambio –en términos de magnitud y signo de cambio–, en comparación con el modelo crudo (i.e., sin escalar, ver Figura 4-b.1). En relación con la señal de cambio de PR, indistinto del período de análisis y escenario SSP, la cuenca del río Salado no muestra acuerdo de cambio, mostrando variaciones entre $\pm 25\%$. En contraposición, la cuenca del río Blanco muestra bajas $\sim 20\%$ para el mediano y largo plazo, mientras que el corto plazo refleja aumentos de la variable. De forma particular, la Figura 4-b.2 muestra el IA para el mediano plazo con el escenario SSP5-8.5 en la cuenca del Blanco. Se selecciona a modo ejemplo, con objeto de identificar el nulo acuerdo de los modelos (color blanco) y la disminución parcial (color naranja) y absoluta (color rojo) de los GCMs. En cuanto a la temperatura media, tanto en río Salado como río Blanco e indistinto del período de análisis y escenario, se presenta un acuerdo cálido de $0,5^{\circ}\text{C}$ y $2,5^{\circ}\text{C}$, según la cuenca.

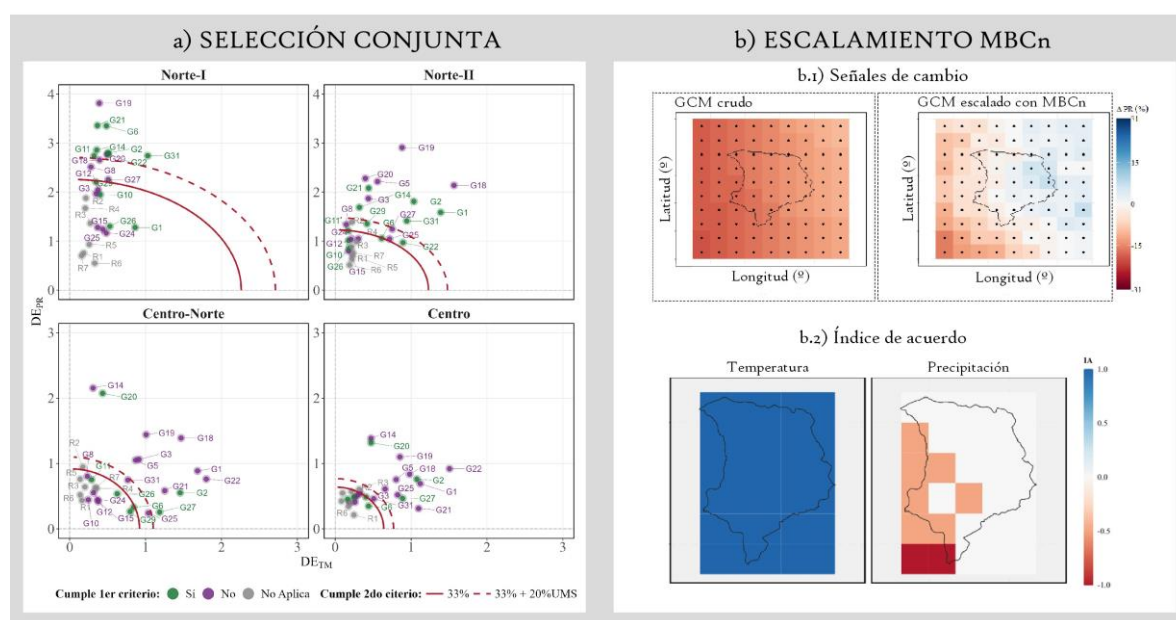


Figura 4. a) selección conjunta de modelos climáticos según zona regional. El primer criterio corresponde a la selección según ENSO-SAM, mientras que el segundo criterio responde a la climatología. La línea continua delimita el 33% mejor de DE_{GCM}^{RC} y, la línea discontinua el 33% mejor más el 20% de la DE del último modelo seleccionado (UMS). Los GCMs G_i y RCMs R_i se identifican en la Tabla 3. b) Escalamiento MBCn en la cuenca del río Blanco bajo escenario SSP5-8.5 durante período 2015 – 2040. b.1) señal de cambio de precipitación cruda (panel izquierdo) y escalada (panel derecho) del modelo EC-Earth-Veg. b.2) índice de acuerdo de GCMs seleccionados según zona regional Centro.

La cuenca del río Blanco tiene un régimen nivo-pluvial (Figura 5–a), con máximo almacenamiento de agua durante las lluvias mayo a julio, mientras que la liberación de agua

¹⁴ Análisis no presentados en este documento (más detalles en CODELCO – AMTC (2023)), respaldan una reducción promedio de 32 mm y $2,4^{\circ}\text{C}$ en las curvas de variación estacional, desde las simulaciones crudas de los GCMs a las simulaciones escalas con MBCn.

se presenta en la temporada estival. Cabe señalar que el diagrama es consistente con el mapa hidroclimático de la Figura 1-a. Por otro lado, la cuenca del río Salado tiene flujos evaporativos y precipitación del tipo altiplánica. Para el período del mediano plazo 2040–2070 en la cuenca del Blanco, el promedio de los GCMs (indistinto de la inclusión del módulo glaciario en el modelo RAVEN) muestra una señal de secamiento ~20% en términos de PR, sin cambios significativos en Q, pero con una disminución del 25% en PAT (Figura 5-b). Aunque los caudales no varían debido a la capacidad de almacenamiento de nieve y hielo, especialmente glaciares (ver Figura 5-c), se advierte que el derretimiento glaciario por el calentamiento global podría afectar negativamente los caudales en el futuro.

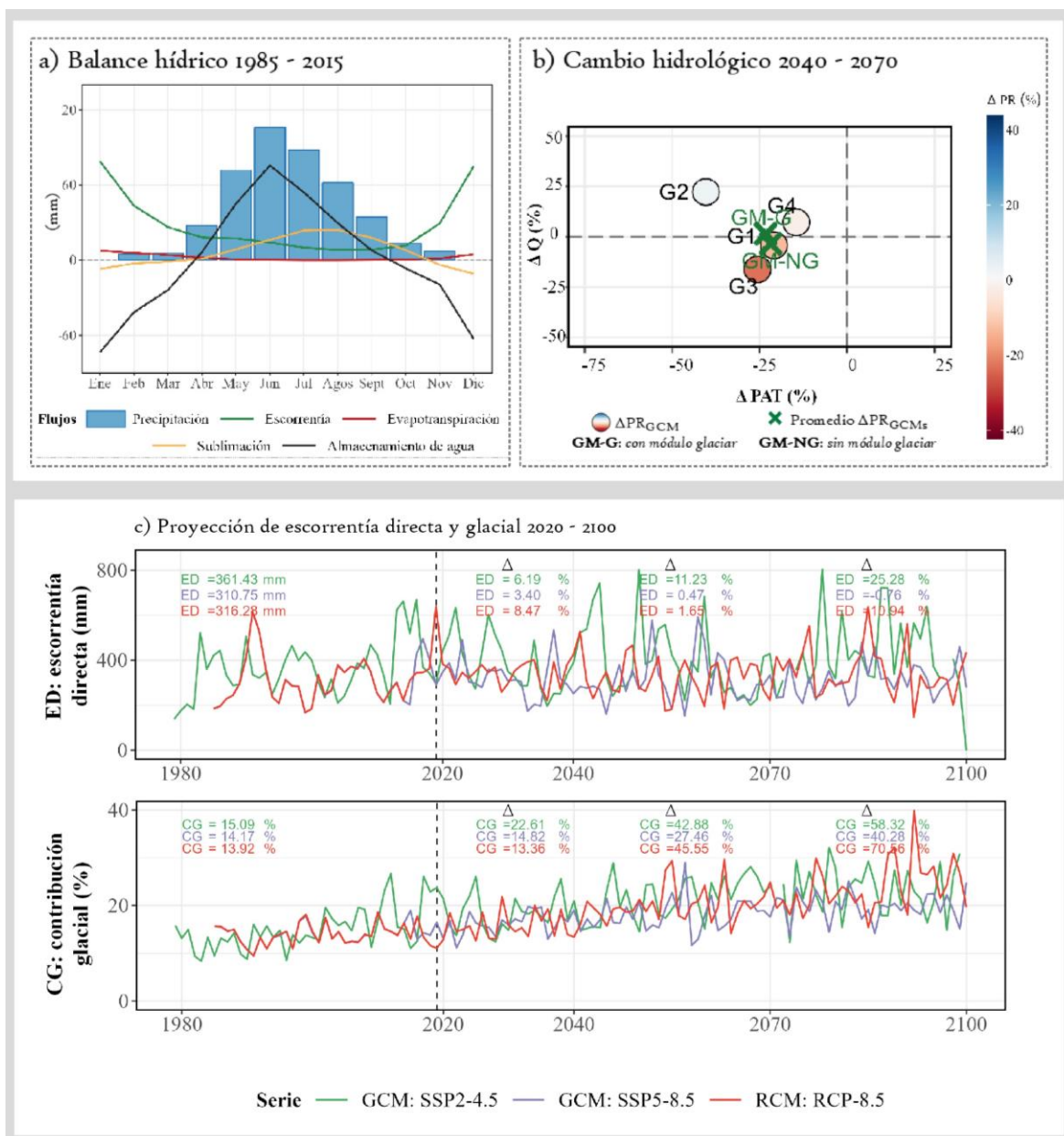


Figura 5. a) balance hídrico, b) cambio hidrológico para SSP5-8.5. Se muestran los GCMs (G1 a G4) seleccionados y, c) proyección de escorrentía directa y contribución glacial en cuenca del río Blanco.

La limitación de la configuración del modelo RAVEN en la cuenca del río Blanco se evidencia en la Figura 5–c, ya que no considera el cambio en el volumen y masa de los glaciares a lo largo del tiempo. Sin embargo, DGA advierte que se espera una reducción del 30% en el área glaciar para mediados del siglo debido al calentamiento global¹⁵, lo que afectará el recurso hídrico y las pérdidas atmosféricas. Por lo tanto, se recomienda incluir un módulo glaciar que considere la dinámica de la masa glaciar según el año hidrológico o un período específico, para evitar interpretaciones inadecuadas.

6. CONCLUSIONES

Como base de selección de modelos climáticos se debe cumplir un criterio climatológico (PR y T_M). Sin embargo, también se sugiere evaluar la capacidad de los modelos para representar fenómenos hidrometeorológicos que sean de interés para el estudio (e.g., sequías, olas de calor, inundaciones, aluviones). En relación con el criterio de fenómenos de gran escala ENSO-SAM, su aplicación resulta en una selección conservadora que elimina GCMs con buenas métricas según el criterio climatológico, posiblemente por la escala de las zonas regionales. Se sugiere eliminar como criterio de selección para futuros análisis en el período histórico debido a que no agregó valor a este proceso. Respecto a proyecciones en el corto plazo (2030 – 2040), la variabilidad natural y derivada de ENSO-SAM podrían prevalecer sobre la señal de cambio climático. En consecuencia, se recomienda evaluar el beneficio de utilizar el resultado más desfavorable entre un análisis no estacionario en el período histórico y lo obtenido de proyecciones climáticas desde modelos climáticos.

En términos del escalamiento estadístico, el estudio corrobora la reducción de sesgo por parte del método MBCn. Sin embargo, los resultados sugieren mayor análisis en zonas de alta cordillera, donde el método tiende a modificar la señal de cambio climático nativa de algunos GCMs. En consecuencia, para mejorar la precisión de proyecciones climáticas, es necesario investigar y mejorar la aplicación de nuevas técnicas de escalamiento estadístico, por ejemplo, redes neuronales, modelos análogos o lineales generalizados.

Finalmente, es fundamental que los modelos hidrológicos se estructuren mediante una base física (i.e., no empírica) y (semi) distribuidos, para reducir la incertidumbre asociada con los cambios en el ciclo del agua. Esto permitirá extrapolar los mecanismos que modelan los procesos hidrológicos relevantes a períodos posteriores y mejorar la respuesta hidrológica de la cuenca. Además, es crucial tener en cuenta la no-linealidad entre los procesos de precipitación y escorrentía, ya que lugares áridos y/o con altas temperaturas pueden alterar la intensidad y la duración de los flujos del ciclo del agua, como la evaporación y evapotranspiración, la sublimación y la acumulación de hielo y nieve.

AGRADECIMIENTOS

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento).

¹⁵ Consulta en línea, enero 2022: <https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=852>

REFERENCIAS

- Aceituno, P., Boisier, J. P., Garreaud, R., Rondanelli, R., & Rutllant, J. A. (2021). Climate and Weather in Chile. In B. Fernández & J. Gironás (Eds.), *Water Resources of Chile* (pp. 7–29). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_2
- Barcaza, G., Nussbaumer, S. U., Tapia, G., Valdés, J., García, J. L., Videla, Y., Albornoz, A., & Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58(75), 166–180. <https://doi.org/10.1017/aog.2017.28>
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 19739.
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R., & 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. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50(1–2), 31–49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- CECs. (2017). Estudio de glaciares descubiertos (Blancos). In *Adecuación Obras Mineras de Andina para Continuidad Operacional Actual* (Issue CECs). CODELCO.
- Cheesman, P., Kelly, J., Self, M., Stutz, J., Taylor, W., & Freeman, D. (1988). AutoClass: A Bayesian Classification System. In *Machine Learning Proceedings 1988* (pp. 54–64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-934613-64-4.50011-6>
- Craig, J. R., Brown, G., Chlumsky, R., Jenkinson, R. W., Jost, G., Lee, K., Mai, J., Serrer, M., Sgro, N., Shafii, M., Snowden, A. P., & Tolson, B. A. (2020). Flexible watershed simulation with the Raven hydrological modelling framework. *Environmental Modelling and Software*, 129(April), 104728. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104728>
- Dätwyler, C., Grosjean, M., Steiger, N. J., & Neukom, R. (2020). Teleconnections and relationship between the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the Southern Annular Mode (SAM) in reconstructions and models over the past millennium. *Climate of the Past*, 16(2), 743–756. <https://doi.org/10.5194/cp-16-743-2020>
- DGA. (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional. *SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado Por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile*, 378.
- DGA. (2018). Aplicación De La Metodología De Actualización Del Balance Hídrico Nacional En Las Cuencas De Las Macrozonas Norte Y Centro. *SIT N° 435, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile. Realizado Por Fundación Para La Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile*, 1–160.
- DGA. (2019a). Aplicación De La Metodología De Actualización Del Balance Hídrico Nacional En Las Cuencas De La Macrozona Sur Y Parte Norte De La Macrozona Austral. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado Por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, 1–164.
- DGA. (2019b). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional En Las Cuencas de la parte Sur de la macrozona Austral e Isla de Pascua. *SIT N° 444, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado Por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, 1–185.
- Dionizis, D., Ojeda, P., Quezada, S., Lagos, M., & Monserrat, S. (2021). Implicancias de la elección del método de escalamiento estadístico de modelos de circulación general en proyecciones de cambio climático. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*.
- Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Jimenez, H., Jerez, C., Lagos-Zúñiga, M., Vargas, X., Eduardo, R.-Á., & Monserrat, S. (2023). Evaluating CMIP6 Models for climate impact assessments in Chile. *Submitted to Earth's Future*.
- Jacob, D., Elizalde, A., Haensler, A., Hagemann, S., Kumar, P., Podzun, R., Rechid, D., Remedio, A. R., Saeed, F., Sieck, K., Teichmann, C., & Wilhelm, C. (2012). Assessing the transferability of the regional climate model REMO to different coordinated regional climate downscaling experiment (CORDEX) regions. *Atmosphere*, 3(1), 181–199. <https://doi.org/10.3390/atmos3010181>
- Lagos-Zúñiga, M., Balmaceda-Huarte, R., Regoto, P., Torrez, L., Olmo, M., Lyra, A., Pareja-Quispe, D., &

- Bettolli, M. L. (2022). Extreme indices of temperature and precipitation in South America: trends and intercomparison of regional climate models. *Climate Dynamics*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06598-2>
- Meyer, J., Kohn, I., Stahl, K., Hakala, K., Seibert, J., & Cannon, A. J. (2019). Effects of univariate and multivariate bias correction on hydrological impact projections in alpine catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), 1339–1354. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1339-2019>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Rohrbach, L., Lohse, P., Fischer, L., Lorenz, U., Schauss, A., & Rüegg, F. (2017). Estudio de Glaciares de Roca en el Área de Influencia de Andina. In GEOTEST (Ed.), *Adecuación Obras Mineras de Andina para Continuidad Operacional Actual* (Issue Geotest). CODELCO.
- Sánchez, E. (2013). Variación interanual en la estructura vertical de las ondas Kelvin ecuatoriales y su impacto en las ondas atrapadas en la costa frente a Perú y Chile. *Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Concepción.*, 1–67.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Vargas, X., Mendoza, P., Ricchetti, F., & Jerez, C. (2020). Informe Proyecto Arclim: Hidrología. In *Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zu* (p. 51).
- Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J. P., Mendoza, P. A., Gómez, T., Vásquez, N., & Cepeda, J. (2021). *Impacts of Climate Change on Water Resources in Chile* (pp. 347–363). https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_19
- World Bank Group. (2021). Climate Risk Country Profile: Chile. *The World Bank Group*, 36. www.worldbank.org