



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

HOMOLOGACIÓN DEL CÁLCULO HIDROLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA OFERTA NATURAL DE AGUA HISTÓRICA Y FUTURA EN CHILE

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

UNIVERSIDAD DE CHILE

Departamento de Ingeniería Civil

División Recursos Hídricos y Medio Ambiente

S.I.T. 524

SANTIAGO, NOVIEMBRE DE 2022

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Arquitecto, Sr. Juan Carlos García Pérez de Arce

Director General de Aguas

Ingeniero Civil, Sr. Rodrigo Sanhueza Bravo

Subdirector General de Aguas

Ingeniero Civil, Sr. Cristian Núñez Riveros

Jefe División de Estudios y Planificación (s)

Ingeniera Civil, MSc. Andrea Osses Vargas

Inspector Fiscal

Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Carlos Flores Arenas

Inspector Fiscal (s)

Ingeniero Civil, Sr. Óscar López Arenas

Segundo Inspector Fiscal (s)

Cartógrafo, Sr. Guillermo Tapia

UNIVERSIDAD DE CHILE

JEFE DE PROYECTO

Ingeniera Civil, Sra. Ximena Vargas Mesa

Coordinador Técnico

Ingeniero Civil, M.Sc., Sr. Miguel Lagos Zúñiga

ESPECIALISTAS

Especialista en Hidrología

Ingeniero Civil, Ph.D., Sr. Pablo Mendoza Zúñiga

Especialista en Meteorología y Climatología

Físico, Ph.D., Sr. Juan Pablo Boisier Echeñique

Especialista en Glaciología

Físico, Ph.D., Sr. Marius Schaefer

Especialista en Evapotranspiración

Ingeniero en Recursos Naturales, Ph.D., Sr. Cristian Mattar

UNIVERSIDAD DE CHILE

EQUIPO DE PROFESIONALES

Ingeniero Civil, M.Sc., Eduardo Muñoz Castro

Ingeniero Civil, M.Sc., Nicolás Vásquez Placencia

Ingeniera Civil, Catalina Silva Galaz

Ingeniero Civil, Álvaro Martínez-Conde Camps

Físico, Sr. Duilio Fonseca Gallardo

Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Sr. Lucas de la Fuente Daruich

Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Sr. Sebastián Ahumada Egaña

Agradecimientos

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02)

Para citar este documento, se recomienda hacerlo de la siguiente manera:

DGA (2022). “Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile”. SIT N° 524. 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.

CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Objetivo General	2
1.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Dominio del estudio	2
2	Homologación de metodología de estimación del balance hídrico y de datos hidrometeorológicos	5
2.1	Revisión de metodologías para la estimación de balance hídrico	5
2.2	Actualización de forzantes meteorológicas en Chile continental e insular	7
2.3	Evaluación estimación de ET	10
3	Homologación de metodologías de balance hídrico	12
3.1	Validación de modelación glaciológica	12
3.2	Modelación hidrológica en cuencas en régimen natural	12
3.3	Verificación de simulaciones	18
4	Simulación de balance hídrico y oferta hídrica natural histórica y futura	21
5	Conclusiones	24
5.1	Forzantes meteorológicas y cambio climático	24
5.2	Simulación hidrológica	24
	Modelación Hidrológica	24
	Representación de ET	25
	Simulación Glacial	25
5.3	Comparación de balances	25
5.4	Proyecciones futuras	26
5.5	Recomendaciones finales	27
	Referencias	28

Índice de Figuras

Figura 2.1: Acumulación anual de precipitación promedio entre 1979 y 2020, obtenida de estaciones pluviométricas (panel de la izquierda) y del producto CR2MET v2.5 (derecha).	8
Figura 2.2: Distribución latitudinal de la precipitación anual media entre 1979 y 2020 (a), del número anual de días con precipitación (b) y de la variación estacional de la precipitación (c), calculado como la fracción de la acumulación invernal (abril-septiembre) sobre el total anual. Curvas negras y zonas sombreadas indican los promedios, mínimos y máximos sobre el territorio nacional obtenido del producto CR2MET a la latitud correspondiente. Puntos rojos indican la métrica de precipitación obtenida de observaciones locales. Paneles de la derecha comparan los valores observados y derivados del producto CR2MET en la coordenada de la estación correspondiente.	9
Figura 2.3: Gráfico de dispersión entre la precipitación registrada en las estaciones pluviométricas empleadas para ajustar los modelos de regresión lineal y la precipitación estimada. (A) Gráfico de dispersión para Vaitea, Rapa Nui; (B) Gráfico de dispersión para La Punta, Robinson Crusoe.....	10
Figura 3.1: Resumen de modelación durante el periodo de validación (1981-2020). En la imagen se puede observar parámetros individualizados para cada glaciar y distribuidos por medio de la latitud, en sentido vertical se puede encontrar: la temperatura promedio T , la radiación de onda corta promedio SW , la precipitación promedio anual pr , la tasa de cambio de altura glaciar modelada $dhdmod$, el área y el promedio anual del caudal glaciar total (nieve+hielo) Q	13
Figura 3.2: Distribución espacial de las cuencas identificadas en régimen natural. (A) Total de cuencas identificadas en régimen natural (196). (B) Cuencas con al menos 5 años completos en un 99%. (C) Cuencas con al menos 5 años completos en un 95%. (D) Cuencas con al menos 10 años completos en un 95%. En los paneles B, C y D se mantiene la capa del total de cuencas en régimen natural.	14
Figura 3.3: Componentes de la métrica KGE considerando el set de parámetros que minimiza la distancia respecto a una simulación perfecta (“Distancia Opt.”).	16
Figura 3.4: Contribución glaciar promedio en diferentes subperiodos dentro del periodo histórico (1985-2020) en cuencas calibradas con componente glaciar asociada. Se presenta el caudal anual promedio y los valores promedio en los meses de diciembre a marzo (DEFM).	17
Figura 3.5: Ejemplo de la distribución espacial de parámetros en la regionalización obtenidos en este estudio.	18
Figura 3.6: Comparación diaria entre el modelo hidrológico VIC y el modelo de balance de energía SSBEop.....	19
Figura 3.7: Comparación de la fracción de cobertura nival entre la serie obtenida mediante MODIS y el modelo hidrológico VIC. a) Comparación cuenca a cuenca. Notar que el error cuadrático medio (RMSE) se obtiene a partir de fracciones de áreas (fSCA). b), c) y d) corresponden a las series de tiempo simulada mediante VIC (en rojo) y la estimación mediante imágenes MODIS (en negro) para las cuencas río Pulido en Vertedero, río Maipo en el Manzano y río Achibueno en la Recova, respectivamente.....	20
Figura 4.1: Principales componentes del balance hídrico. (A) Precipitación, (B) evapotranspiración natural y (C) escorrentía anual promedio en el periodo 1985-2015 a nivel de píxel espacialmente distribuido en Chile continental a 0,05° latitud-longitud.	21
Figura 4.2: Balance adimensional asociado a cuencas DARH. Los montos anuales promedio de precipitación (P), evapotranspiración (ET), escorrentía total (Q), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura media (T) se estiman en el periodo 1985-2015.....	22
Figura 4.3: Proyecciones de cambio hidrológico promedio en el periodo 2030-2060 respecto al periodo 1985-2015 a nivel de cuenca DARH.....	23

1 INTRODUCCIÓN

Cuantificar la disponibilidad de los recursos hídricos en el tiempo, identificando sus flujos y procesos involucrados en el presente y prever potenciales cambios futuros en todo el territorio, resulta clave para una gestión estratégica y sustentable de los mismos, que son esenciales para el progreso socioeconómico, junto con la preservación y cuidado del medio ambiente. Lo anterior requiere entender y caracterizar los procesos que dominan los flujos de agua en régimen natural y almacenamientos tales como: humedad de suelo, equivalente en agua de nieve, precipitación, evapotranspiración y escorrentía, entre otros; que a su vez interactúan entre sí a diferentes escalas espaciales y temporales.

La necesidad de contar con estimaciones de balance hídrico, a partir del cual se pueden aproximar las complejas interacciones entre los flujos de agua, energía y almacenamientos a diferentes escalas espacio-temporales (Vásquez et al., 2021), ha motivado diferentes estudios a nivel mundial, los que se enfocan en caracterizar la partición anual de la precipitación en evapotranspiración y escorrentía, así como entender las dinámicas estacionales e incluso diarias u horarias. En Chile, los primeros esfuerzos para caracterizar la hidrología a nivel nacional provienen de la aplicación de la ecuación de balance hidrológico a la escala de cuenca (UNESCO, 1982).

Para periodos de tiempo climatológicos (e.g., 30 años), la variación de almacenamiento y la salida neta de escorrentía subterránea se pueden considerar compensados entre los flujos subterráneos afluentes o efluentes, o ya aportando a la escorrentía superficial, por lo que la ecuación de balance hídrico se puede expresar como (1.1), donde la notación $\langle \cdot \rangle$ hace referencia al promedio espacial de la variable (e.g. cuenca hidrográfica) y $\underline{(\cdot)}$ corresponde al promedio temporal de la misma.

$$\underline{\langle P \rangle} - \underline{Q} = \underline{\langle ET \rangle} + \eta \quad (1.1)$$

Tomando en cuenta los avances en las ciencias climáticas e hidrológicas, la Dirección General de Aguas (DGA) inició en el año 2017 el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional. Así, surge un proyecto interdisciplinario que ha tomado ventaja continua de las nuevas bases de datos disponibles (Álvarez-Garretón et al., 2018), los avances de la percepción remota, los últimos modelos numéricos y técnicas de estimación de parámetros para estimar los principales almacenamientos y flujos de agua a lo largo del territorio nacional, tanto para un periodo climatológico base (1985-2015) como futuro (2030-2060). La metodología de actualización propuesta consideró el uso del modelo *Variable Infiltration Capacity*, VIC, (Liang et al., 1996; Wood et al., 1992), que corresponde a un modelo hidrológico de base física y distribuido espacialmente, el cual se aplicó a una resolución de 0,05° latitud – longitud. El modelo fue forzado con series de precipitación, velocidad del viento, temperatura media y humedad relativa a escala tri-horaria, derivados de productos de reanálisis atmosféricos globales, así como de observaciones locales y remotas. La aplicación en todo Chile continental e Isla de Pascua, de la metodología planteada en DGA (2017), se desarrolló en tres etapas parciales (DGA, 2018, 2019a y 2019b) en las que se adquirieron nuevos conocimientos y aprendizajes que permitieron refinar la metodología inicialmente propuesta, mejorando, por ejemplo, la modelación del derretimiento glacial y su validación, así como las proyecciones de cambio climático. Por otro lado, las mejoras en la estimación de variables climáticas en

el período histórico, gracias a nuevos y mejores modelos de reanálisis atmosféricos permitieron el desarrollo de nuevas versiones del producto climático grillado CR2MET, del cual se obtienen las series de precipitación y temperatura utilizadas en el modelo VIC.

1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo del presente informe consiste en sintetizar los resultados para la estimación de la oferta hídrica natural, histórica y futura, en Chile continental, Rapa Nui y Juan Fernández, a partir de la homologación de la metodología de estimación de balance hídrico desarrollada en las distintas etapas del denominado estudio de Actualización del Balance Hídrico Nacional.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos que se resumen en este informe se refieren a:

- Recopilar datos climáticos e hidrometeorológicos e incorporar información complementaria disponible para homologar la metodología actual de cálculo de balance hídrico en todo el territorio nacional.
- Homologar las metodologías de cálculo aplicadas en los estudios parciales de actualización de balance hídrico nacional.
- Generar estimaciones espacialmente distribuidas de oferta hídrica natural histórica y futura en Chile, para luego estimar el balance hídrico en diferentes agregaciones espaciales (e.g., cuenca CAMELS-CL, cuenca DARH, y las que se puedan generar posteriormente).
- Identificar y analizar las brechas asociadas a la metodología utilizada en el cálculo del balance hídrico nacional.
- Elaborar un producto que agrupe los datos utilizados y los resultados obtenidos para la estimación de la oferta hídrica natural, actual y futura, y todas las componentes del balance hídrico grillados en formato NetCDF.

1.3 DOMINIO DEL ESTUDIO

Dado el objetivo del presente estudio, el cual en términos prácticos radica en la generación de información respecto a la oferta natural de agua en todo el territorio de Chile continental e Insular, para efectos de análisis se incluyen las 116 cuencas hidrográficas definidas por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH), las cuales son denominadas cuencas DARH. En la Figura 1.1 se presentan las 114 cuencas DARH ubicadas en el territorio continental chileno, a las cuales se debe agregar “Cuencas del Archipiélago Juan Fernández” y “Cuencas de Isla de Pascua”.

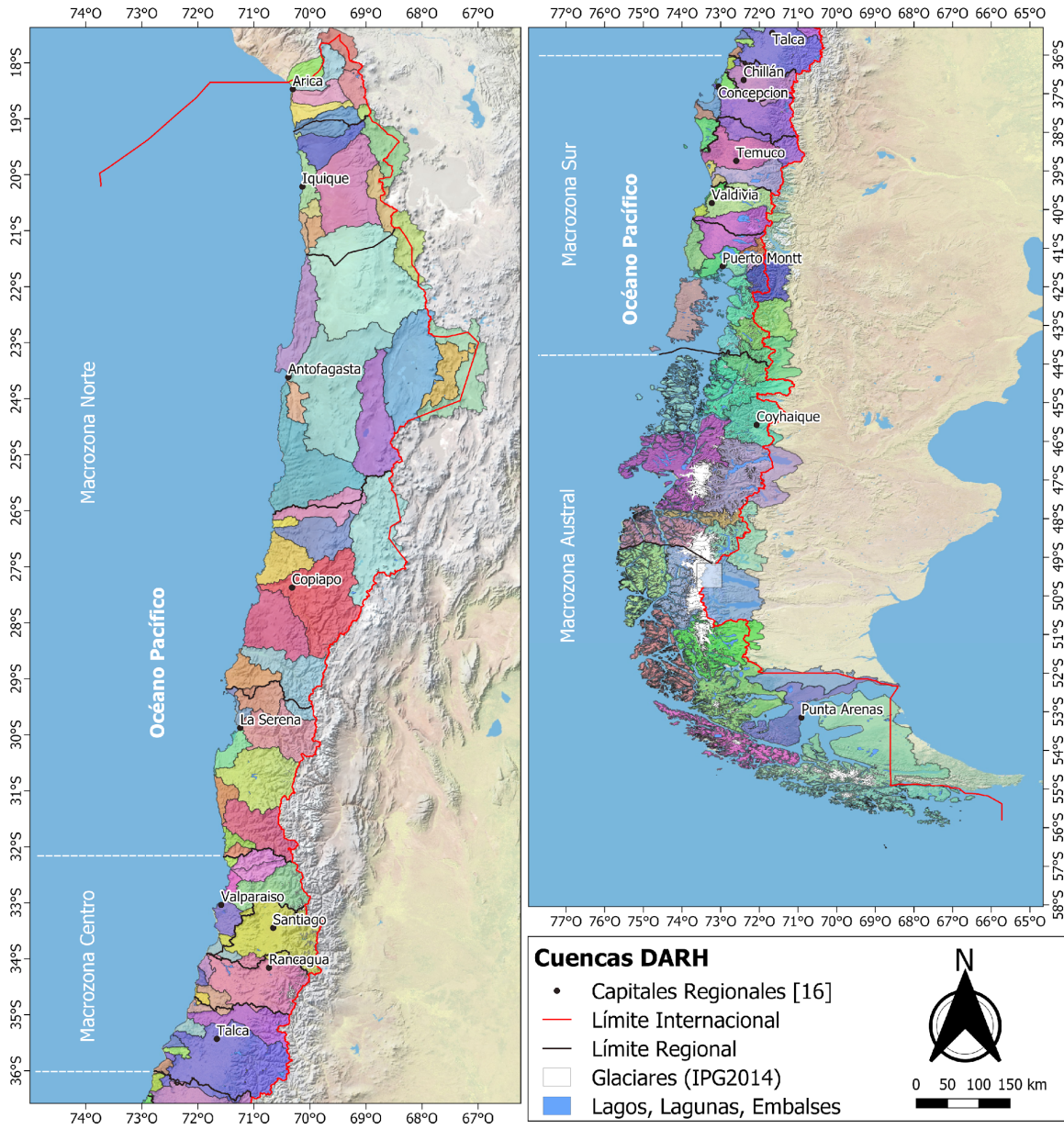


Figura 1.1: Identificación de cuencas de la zona de estudio en territorio continental.

Consideración N°1: La separación decimal está denotada por el símbolo “,” y el separador de miles en “.”. Sin embargo, algunas de las figuras son obtenidas en base a lenguajes de programación donde el significado de estos signos se invierte.

Consideración N°2: Las figuras que muestran variables espacialmente distribuidas corresponden a esquemas representativos de unidades espaciales y/o procesos hidrológicos asociados a la zona de estudio, por lo que se debe precisar que en ningún caso corresponden a cartografías y no incluyen necesariamente el trazado de los límites y fronteras oficiales de Chile.

2 HOMOLOGACIÓN DE METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO Y DE DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

En este capítulo se resume la metodología considerada para la estimación del balance hídrico en todo Chile continental e insular y la actualización de forzantes meteorológicas que se utilizan como información de entrada del modelo hidrológico VIC en el período histórico y futuro. Se resumen, también, las metodologías para la estimación de las contribuciones glaciales en cada cuenca y las simulaciones de ET propuestas para comparar con aquellas obtenidas con la modelación hidrológica.

2.1 REVISIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE BALANCE HÍDRICO

La estimación del balance hídrico para una cuenca hidrográfica está descrita para cada paso temporal en estudio según la ecuación (2.1). En ésta, se establece que la variación del almacenamiento interno (ΔS) de una cuenca en un intervalo de tiempo (Δt), se puede expresar como la diferencia entre la precipitación total que ingresa al sistema (P), el caudal de entrada a la cuenca (Q_{in}) y las pérdidas evapotranspirativas (ET), restando la escorrentía de salida de forma superficial en régimen natural (Q_{out}). Adicionalmente, existen términos que representan la escorrentía subterránea de entrada (G_{in}) y de salida (G_{out}) al volumen de control. No obstante, el balance neto y la magnitud de éstos respecto a otros flujos se puede suponer despreciable.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P + Q_{in} - ET - Q_{out} + G_{in} - G_{out} \quad (2.1)$$

La aplicación de la ecuación (2.1) supone conocer los diferentes flujos y estados que en ella se incluyen. La metodología propuesta desde el estudio DGA (2017) planteó la calibración, a nivel diario, del modelo hidrológico VIC, operado a nivel tri-horario, en las cuencas que se encuentren en régimen natural y que tengan control fluviométrico, considerando tanto la representación de caudales a nivel mensual mediante curvas de variación estacional y curvas de duración a nivel diario. Además, se estimaron, a escala diaria, las series temporales de cobertura de nieve y de evapotranspiración que sirven de base para validar la representación de los procesos físicos asociados a la acumulación y derretimiento de nieve. La modelación en el período 1985-2015 de cada una de las cuencas hidrográficas de una macrozona, se realizó asignando los parámetros en cada URH de acuerdo a las características de éstas y a los valores calibrados en URHs hidrológicamente similares.

El producto CR2MET, elaborado en el marco del estudio para la representación espacial (0,05º latitud-0,05º longitud) de las variables meteorológicas, se ha actualizado hasta la versión 2.5 que se usa en el proceso de homologación y que se sintetiza en el acápite 2.2.

La recalibración del modelo hidrológico en las cuencas con régimen cercano al natural considera algunas actualizaciones en la configuración del modelo VIC, que provienen del trabajo realizado en el proyecto Fondecyt N°11200142, denominado “*Robust estimates of current and future water resources across a hydroclimatic gradient in Chile*”, liderado por el profesor Pablo A. Mendoza (Departamento de Ingeniería Civil, U. de Chile). Los cambios propuestos consideran: (i) la inclusión de bandas de elevación para distribuir verticalmente la temperatura y la precipitación, (ii) incorporación del balance de energía,

(iii) actualización del uso de suelos, (iv) estimación del índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés), (v) incorporación de información de suelo desde productos satelitales y (vi) inclusión del rastreo.

En lo que se refiere a la calibración del modelo VIC en las cuencas en que existen glaciares se decide modelar separadamente los glaciares por cuenca. Para ello, se actualiza y sistematiza el cálculo de balance de energía para todos los glaciares en Chile implementando dos parametrizaciones diferentes del balance de energía superficial de glaciares para cuantificar la ablación según zona glaciológica: al norte de la latitud 36°S se propone una parametrización del tipo índice de Radiación-Temperatura (*e.g.* Schaefer et al., 2013, 2015) mientras que al sur de dicha latitud (Andes húmedos), dado que el balance de energía superficial en estos glaciares depende, principalmente, de la temperatura del ambiente (Schaefer et al., 2020), se propone una parametrización del tipo Grado-Día (*e.g.* Hock, 2003) similar a la implementada en DGA (2019b). Para la validación, se utilizaron balances geodésicos por glaciar recuperados de estudios previos de libre acceso (*e.g.* Braun et al., 2019; Dussaillant et al., 2019; Hugonnet et al., 2021), donde a partir de modelos de elevación digital (*e.g.* SRTM, NASA, TanDEM-X y DLR) se obtienen los cambios de elevación que permiten estimar los cambios en el espesor de hielo en el periodo de tiempo que se evalúan las diferencias ($\Delta h/\Delta t$).

Para la calibración del modelo hidrológico VIC se utiliza el método de optimización global basado en estadística diaria a través del algoritmo SCE-UA (Duan et al., 1994). Para la regionalización se analizaron distintos procedimientos usando índices de disimilitud y se escogió la mejor configuración mediante validación cruzada en las cuencas ya calibradas. El método seleccionado para la homologación define como posibles cuencas donadoras de sus parámetros a los píxeles de cuencas cercanas considerando solo aquellas que presentan una buena representación de los caudales medios mensuales ($KGE > 0,4$) en el período de calibración-validación y de validación cruzada.

Para la incorporación de escenarios de cambio climático se extrajeron (DGA, 2017) variaciones de precipitación y temperatura de cuatro Modelos de Circulación General (GCMs, por sus siglas en inglés) del proyecto *Coupled Model Intercomparison Project* en su fase 5 (CMIP5), seleccionados por presentar una correlación razonable con el fenómeno de El Niño (ENOS) y el Módulo Anular del Sur (SAM) y por sus diferentes sensibilidades climáticas. Estos modelos corresponden a los denominados CCSM4, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM y CSIRO-MK3-6-0 y las series futuras proyectadas para el período 2030 a 2060, han sido utilizadas en todas las etapas futuras del proyecto, lo que se mantiene para la homologación. Las variables meteorológicas de los GCM poseen una gruesa resolución espacial por lo que se debieron escalar a la resolución espacial del modelo hidrológico definiéndose para la homologación el método denominado *Multivariate quantile bias correction*, MBC_n (Cannon, 2018) que, basado en funciones de transformación de funciones de probabilidad, permite que la corrección de sesgo aplicada a los GCMs mantenga, dentro de lo posible, la covarianza entre variables climáticas. Por último, la desagregación temporal de los valores diarios de las variables escaladas se realiza mediante símiles climáticos.

2.2 ACTUALIZACIÓN DE FORZANTES METEOROLÓGICAS EN CHILE CONTINENTAL E INSULAR

La información meteorológica espacialmente distribuida del producto CR2MET se obtiene a partir de modelos estadísticos multivariados de precipitación y temperatura diaria, calibrados mediante observaciones locales. Estos modelos, forzados luego con variables dependientes (predictores), disponibles sobre todo el territorio nacional, se utilizan para generar los datos de P , T_N y T_X sobre una grilla regular de $0,05^\circ$ longitud-latitud (~ 5 km). En el caso de la precipitación se combinan modelos de ocurrencia (binarios) y de intensidad diaria, en base a regresiones logísticas y convencionales, respectivamente.

Los esquemas generales para el cálculo de precipitación y temperatura no han tenido mayores modificaciones respecto de las versiones que le anteceden (DGA, 2019b). Los cambios introducidos recaen principalmente en las fuentes de información y en un conjunto de subprocesos referidos al sesgo en los registros de precipitación en presencia de nieve.

La Figura 2.1 sintetiza la distribución regional de los valores anuales medios de precipitación y su comparación con las climatologías derivadas de observaciones locales. Se observa una concordancia general entre los datos distribuidos de la versión 2.5 del producto CR2MET y las observaciones de precipitación, apreciándose el carácter heterogéneo de las condiciones climáticas en Chile, con diferencias muy importantes en la acumulación anual de precipitación debido, principalmente, a los gradientes latitudinales y de elevación dentro del territorio nacional.

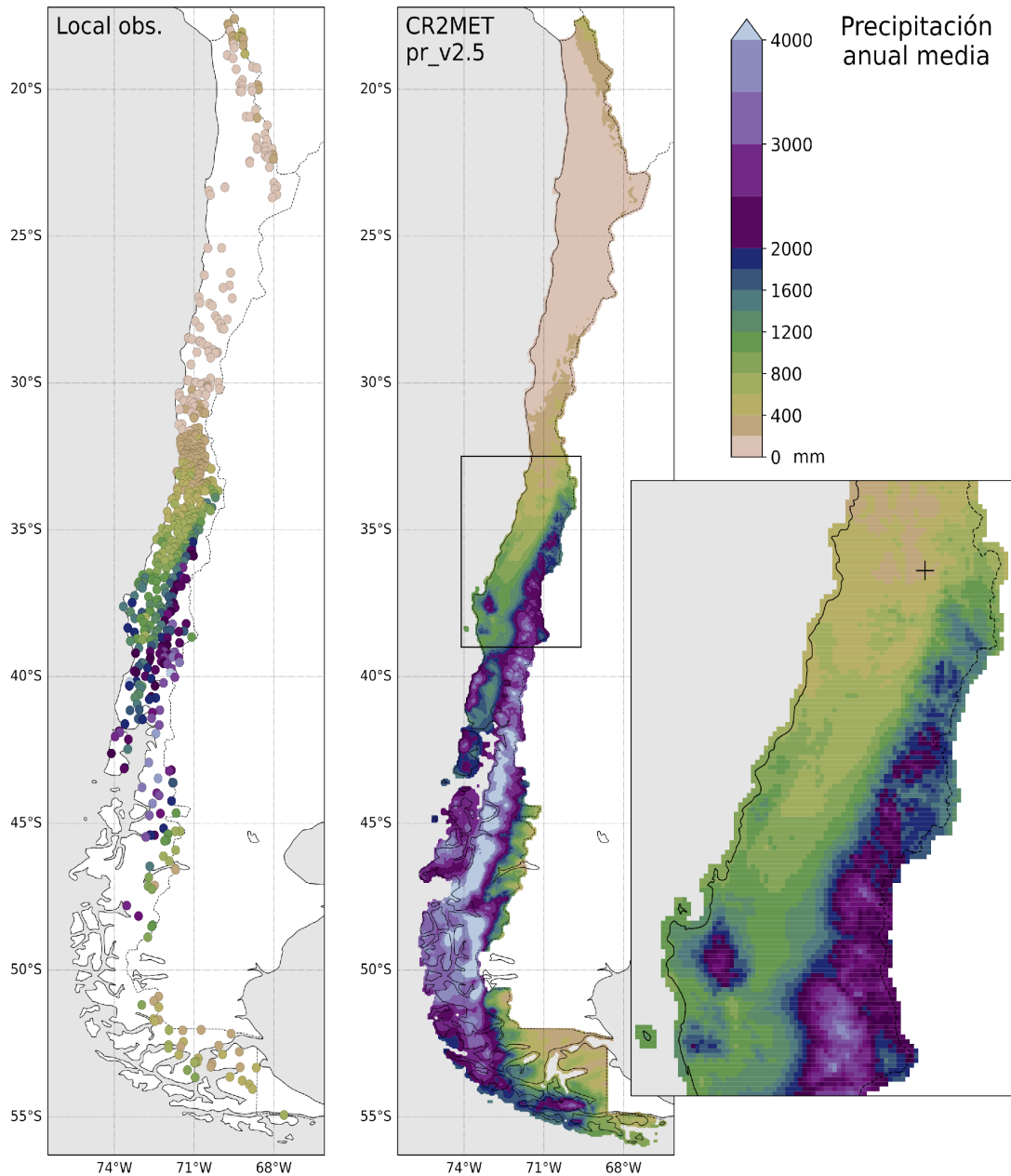


Figura 2.1: Acumulación anual de precipitación promedio entre 1979 y 2020, obtenida de estaciones pluviométricas (panel de la izquierda) y del producto CR2MET v2.5 (derecha).

Una comparación más directa entre observaciones y el producto distribuido para los regímenes anuales de precipitación se presenta en la Figura 2.2. Se incluyen la distribución latitudinal de la precipitación anual media, de la frecuencia de días con precipitación y de la fracción invernal de precipitación (abril a septiembre) sobre la acumulación anual. Para cada métrica, se incluye también la comparación punto a punto de los valores climatológicos derivados de observaciones y de los productos (valores interpolados a las coordenadas de la estación correspondiente). Se distingue claramente la diferencia de regímenes de precipitación entre el extremo norte y el centro-sur de Chile. En general, el régimen de precipitación estimado mediante CR2MET muestra una buena coherencia con las

observaciones. Las diferencias pueden responder tanto a sesgos en el producto, como a diferencias reales de escala entre los valores puntuales y aquellos representativos de un área. En particular, y asociado principalmente a las diferencias de escala, el producto grillado muestra sistemáticamente una mayor frecuencia de días con precipitación en todas las regiones.

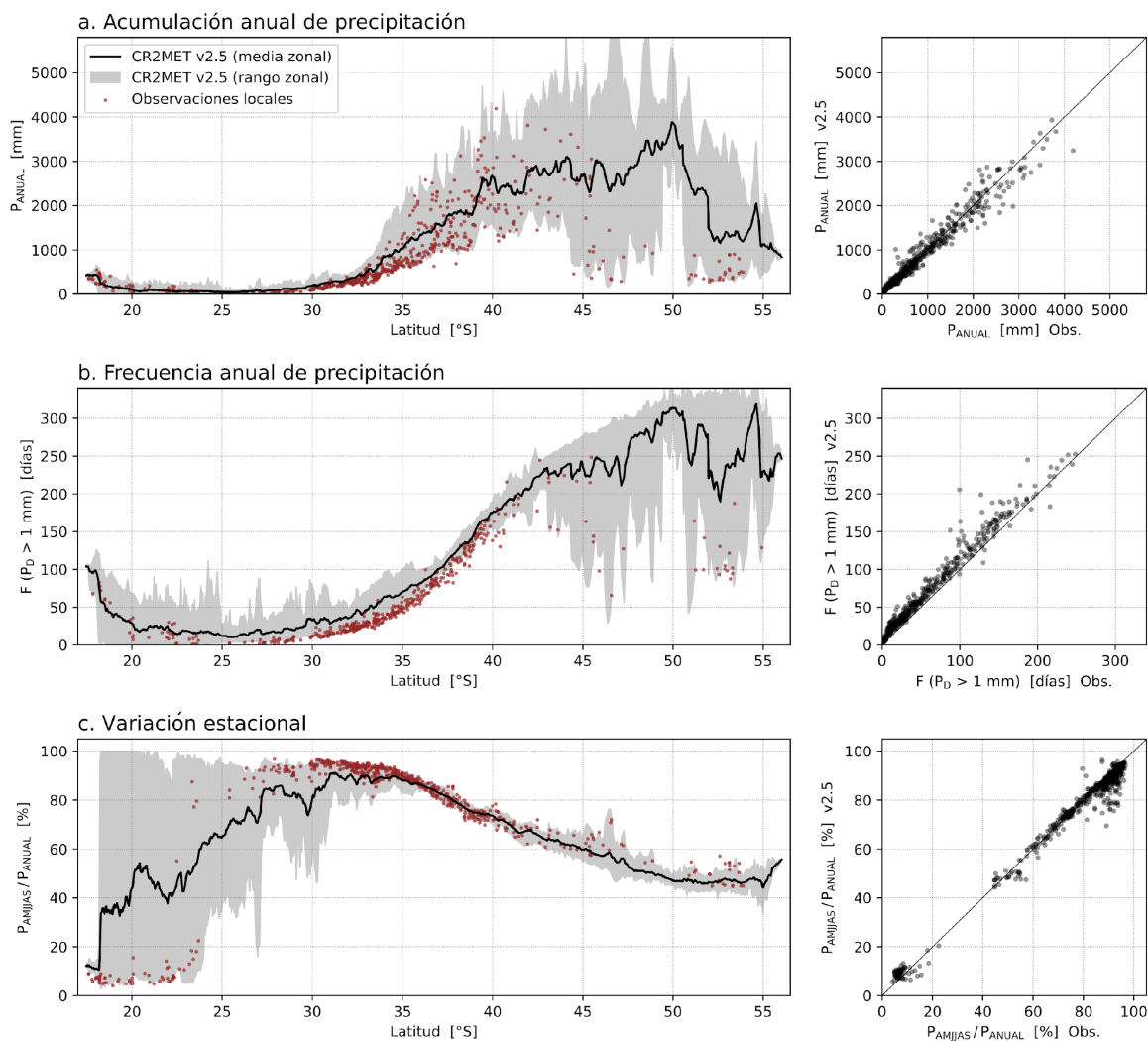


Figura 2.2: Distribución latitudinal de la precipitación anual media entre 1979 y 2020 (a), del número anual de días con precipitación (b) y de la variación estacional de la precipitación (c), calculado como la fracción de la acumulación invernal (abril-septiembre) sobre el total anual. Curvas negras y zonas sombreadas indican los promedios, mínimos y máximos sobre el territorio nacional obtenido del producto CR2MET a la latitud correspondiente. Puntos rojos indican la métrica de precipitación obtenida de observaciones locales. Paneles de la derecha comparan los valores observados y derivados del producto CR2MET en la coordenada de la estación correspondiente.

La estimación del balance hídrico sobre territorio insular chileno tiene como desafíos la estimación de flujos y almacenamientos en base a una información hidroclimática limitada, así como la escala pequeña de las islas, que dificultan la utilización de reanálisis atmosféricos por la gruesa resolución espacial que estos presentan (e.g., 0,25° lat-lon en ERA5). Tomando en cuenta la escala espacial asociada a las islas de Rapa Nui y Robinson Crusoe, al igual que en DGA (2019), se propone generar series

meteorológicas a una resolución de 0,01° latitud-longitud para forzar la modelación hidrológica. Para ello, se utilizan los registros locales de precipitación, temperaturas extremas, humedad relativa y velocidad del viento a nivel diario derivados de las estaciones Mataveri (Rapa Nui) y Juan Fernández (Robinson Crusoe), en adelante “Estaciones de Referencia”, para combinarlos con productos grillados (e.g., satelitales, reanálisis, entre otros) que permitan distribuir espacialmente las variables antes mencionadas. Para distribuir espacialmente la precipitación, se utiliza el producto satelital IMERG (G. Huffman et al., 2013) interpolado bilinealmente a una resolución de 0,01° latitud-longitud. Los sesgos, que se acarrean del proceso de interpolación, se ajustan a una regresión lineal entre el patrón espacial derivado de IMERG, la precipitación mensual medida en la estación de referencia y la estación de verificación disponible. La Figura 2.3 muestra la dispersión entre los registros de precipitación observados y simulados para Rapa Nui y Robinson Crusoe, en ellos es posible apreciar un desempeño discreto en ambas islas en la distribución temporal, y sesgos importantes, lo que se ve reflejada en la gran dispersión de los datos respecto a la línea roja segmentada y valores de r y RMSE.

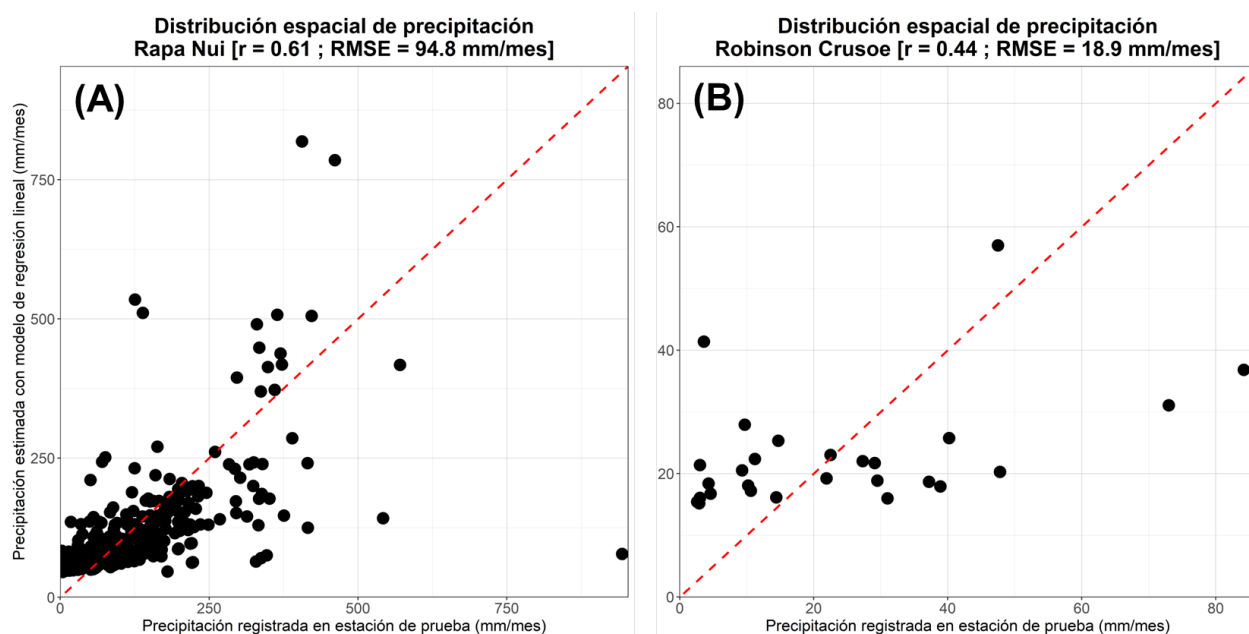


Figura 2.3: Gráfico de dispersión entre la precipitación registrada en las estaciones pluviométricas empleadas para ajustar los modelos de regresión lineal y la precipitación estimada. (A) Gráfico de dispersión para Vaitea, Rapa Nui; (B) Gráfico de dispersión para La Punta, Robinson Crusoe.

2.3 EVALUACIÓN ESTIMACIÓN DE ET

La evapotranspiración real (E_{Tr}) es uno de los componentes clave del ciclo hidrológico, dado que representa una importante salida natural de agua en las cuencas hidrográficas, que no queda disponible como escorrentía para aprovechamiento humano y ecosistemas en general.

Debido a la existencia de diversos métodos para estimar E_{Tr}, se desarrolló una base de datos independientes basadas en teledetección, que permite evaluar el desempeño del modelo VIC sin depender de mediciones puntuales. Dichas estimaciones remotas permiten estudiar las superficies con un potencial de evapotranspiración con un mayor detalle espacial y temporal (Saadi et al., 2018). En

particular, las metodologías basadas en el balance energético (SEB) permiten estimar ETr a través de la relación de radiación neta, calor sensible y calor latente en la superficie de la Tierra, esta última variable está directamente relacionada a la ETr (Liou & Kar, 2014). Estos modelos han demostrado tener un buen desempeño en la estimación de ETr en cultivos y ecosistemas terrestres, y pueden ser de una, dos y de múltiples capas. Las de una capa son ampliamente utilizadas, como por ejemplo el *Surface Energy Balance System* (SEBS) y la versión más reciente de SEBS, el *Simplified Surface Energy Balance Operational* (SSEBop) desarrollado por Senay et al. (2013). En cuanto al desempeño de este modelo en Chile, un estudio realizado por Moletto-Lobos et al. (2020) compara diferentes modelos de balance de energía, concluyendo finalmente que el modelo SSEBop es el método de estimación que mejor se ajusta a las características climatológicas en la zona centro sur de Chile.

Tanto la información meteorológica, como los datos satelitales fueron obtenidos en la base de datos disponible en *Google Earth Engine* (GEE). En el caso de la ET de referencia (ETo) se utilizó como fuente la información de las estaciones y ERA5, de acuerdo con la ecuación de Penman-Monteith. Se utilizó el producto de reanálisis ERA5-*Land Hourly*, donde se extrajo la información a nivel horaria de la temperatura del aire (T_a), radiación superficial neta de onda corta y onda larga.

Para obtener información sobre la elevación de la Tierra se consultó la información del satélite de *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Para tener valores de temperatura de la superficie de la Tierra (T_s , y LST en sus siglas en inglés) se utilizó uno de los productos grillados del *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* MODIS: MOD11A1 con resolución de 1 km. El producto grillado MOD16A2 de MODIS permitió estimar valores de ETr acumulados en 8 días a nivel global con una resolución espacial de 500 m y 1 km; se utilizó específicamente la versión MOD16A2.006 disponible en GEE desde enero del año 2001 con una resolución de 500 m. El producto grillado *Penman-Monteith-Leuning Evapotranspiration V2* (PML_V2) se utilizó para estimar valores de ETr y productividad primaria en valores promedios en 8 días a nivel global con una resolución espacial de 500 m. Con el fin de enmascarar las superficies que no presentan un potencial de evapotranspiración, se utilizó una máscara creada a partir del *Land Cover 2014* (Zhao et al., 2016) eliminando los píxeles con cobertura de cuerpos de agua, superficies impermeables, suelo desnudo, nieve, hielo y nubes. Para esto, se llevó a cabo un remuestreo utilizando la cobertura que más se repite dentro de cada píxel de 500 metros.

Para obtener información de ET in situ a escala diaria se utilizó la información meteorológica obtenida desde estaciones LAB-net que se sitúan entre las regiones de Atacama y Los Lagos, estando asociadas principalmente a cobertura agrícola y praderas. Para obtener valores de la ETr in situ, se procesaron los datos disponibles en la estación Eddy Covariance de Ñirehuao, cuenca río Aysén, Patagonia desde el 25 de diciembre de 2019 al 29 de febrero de 2020. Esta mide flujos turbulentos de calor directamente desde su sensor IRGASON que combina analizador de gas infrarrojo (IRGA) y un anemómetro sónico 3D (SON) entregando registros de mejor calidad.

3 HOMOLOGACIÓN DE METODOLOGÍAS DE BALANCE HÍDRICO

En este capítulo se sintetiza las estimaciones del aporte glacial, la modelación de cuencas en régimen natural, la regionalización efectuada para estimar el balance en zonas del país no consideradas en la calibración y la corroboración de los resultados con otras fuentes de información, tales como evapotranspiración y cobertura nival.

3.1 VALIDACIÓN DE MODELACIÓN GLACIOLÓGICA

Para las simulaciones del periodo completo se usaron los parámetros del modelo obtenidos por el proceso de calibración descrito en la sección anterior. Con el fin de llegar al área glacial correcta en el año de su observación del inventario, en estas simulaciones se variaron las áreas iniciales (desconocidas) en el año 1980 y se eligió el área inicial que mejor representase el área del inventario de glaciares vigente. En la Figura 3.1 se resume la variación de los datos de entrada del modelo de balance de masa (temperatura, radiación onda corta, precipitación y área glacial) junto con los datos de salida (cambio de elevación y caudales glaciales modelados) con la latitud de todos los glaciares de Chile.

El balance de masa específico modelado muestra más variabilidad en la zona Sur-Austral, donde se obtuvieron valores negativos y positivos con un promedio de 0,09 m w.eq. En la zona Norte – Central la variabilidad es menor y la gran mayoría muestra balances de masa negativos. El promedio del balance de masa específico modelado en la zona norte es de -0,32 m w.eq. La distribución del caudal glacial promedio modelado con la latitud sigue bastante la distribución del área glacial. Los glaciares grandes de la Patagonia generan claramente más caudal glacial que los glaciares del Norte. Sin embargo, también en la zona Norte – Central los caudales anuales promedios llegan a valores de hasta 1 m³/s.

3.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL

Dado que el modelo VIC simula la hidrología natural (i.e., no incluye intervención, ni usos del agua), sólo se consideran cuencas en régimen natural para efectos del proceso de calibración y transferencia de parámetros. Para estos efectos se considera una cuenca en régimen natural cuando no existen derechos consuntivos superficiales asignados al interior de la cuenca o la suma de estos es menor al 5% del caudal medio anual registrado en la estación fluviométrica; la restitución de derechos no consuntivos existentes ocurren aguas arriba del control fluviométrico y no existen embalses al interior de la cuenca. Del análisis realizado, que se muestra en la Figura 3.2, se desprende que existen 196 cuencas que califican en régimen natural según la definición propuesta anteriormente. Tomando como base los registros fluviométricos, se analiza la completitud y disponibilidad de datos a nivel anual (i.e., número de días con registro) en el periodo 1979-2020 asociado a cada una de las 196 cuencas identificadas en régimen natural. Se seleccionan aquellas cuencas con “buen” registro (i.e., completo y continuo) en el periodo 2005-2018 y se priorizan aquellas cuencas con un buen registro en el periodo 1995-2005 a modo de contar con un periodo de evaluación que capture diferentes condiciones hidrometeorológicas. Así, se obtiene un conjunto de 135 cuencas distribuidas a lo largo de Chile continental con los que se obtienen los resultados de calibración ilustrados en la Figura 3.3.

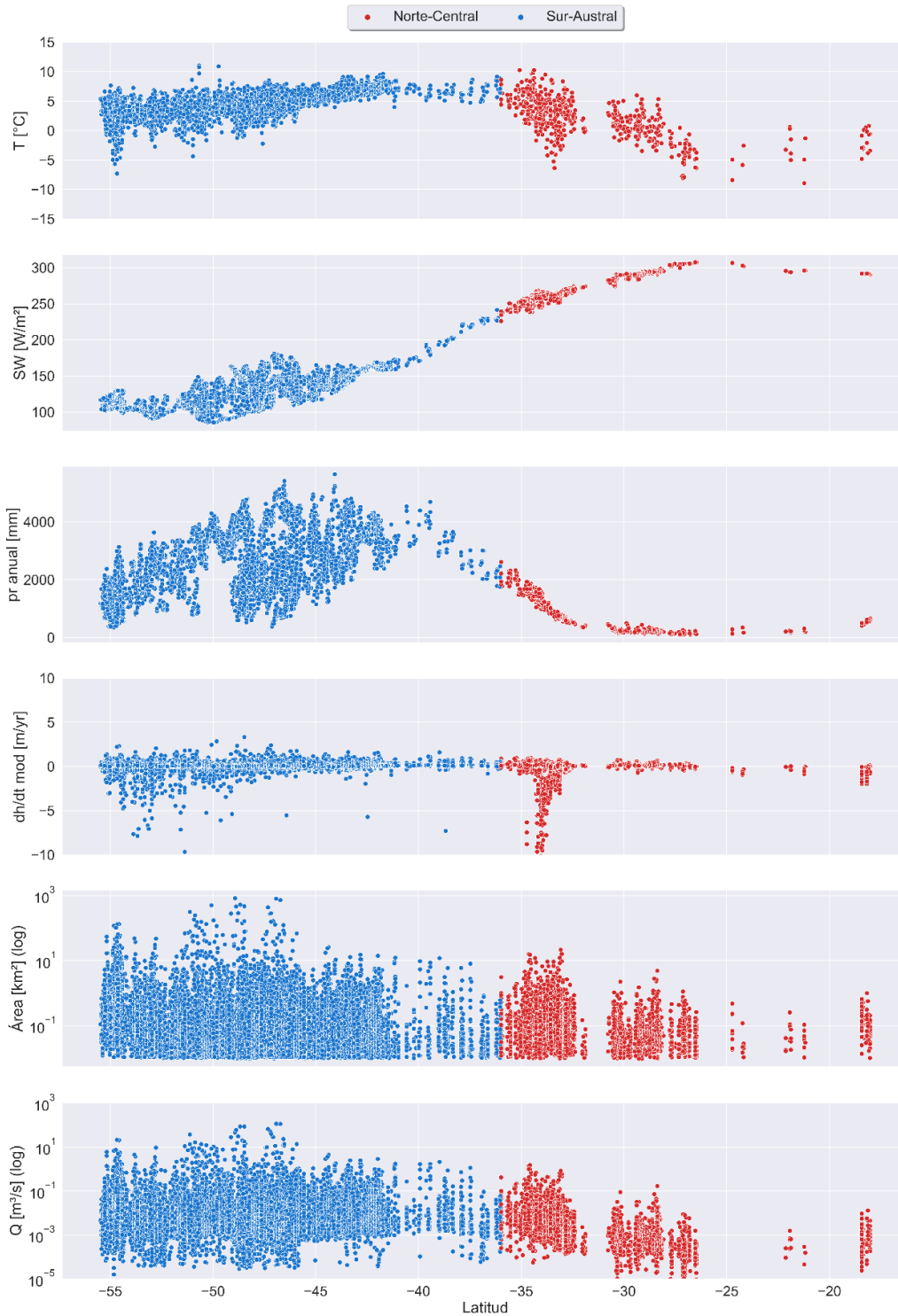


Figura 3.1: Resumen de modelación durante el periodo de validación (1981-2020). En la imagen se puede observar parámetros individualizados para cada glaciar y distribuidos por medio de la latitud, en sentido vertical se puede encontrar: la temperatura promedio (T), la radiación de onda corta promedio (SW), la precipitación promedio anual pr , la tasa de cambio de altura glaciar modelada ($\frac{dh}{dt} mod$), el área y el promedio anual del caudal glaciar total (nieve+hielo)(Q).

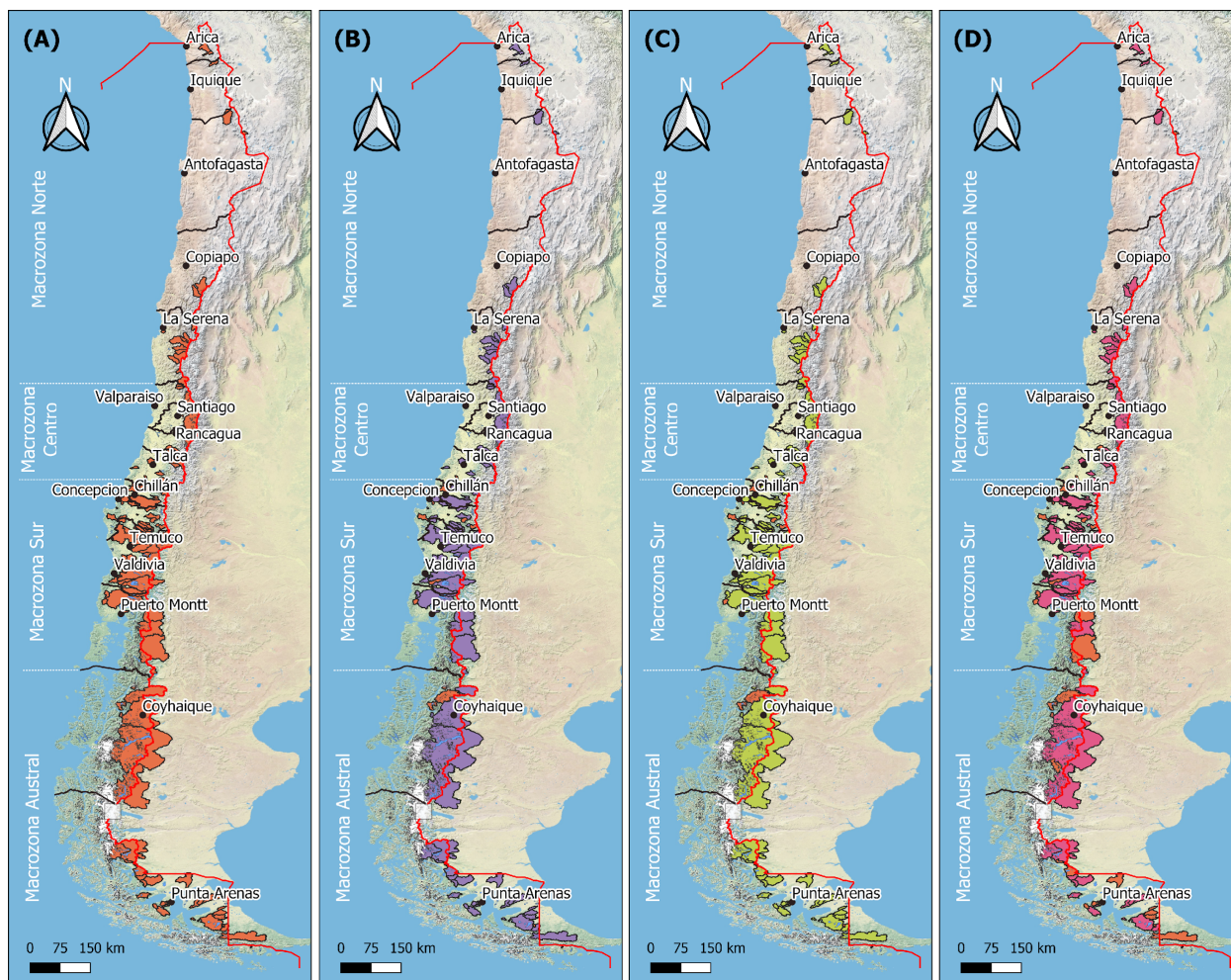


Figura 3.2: Distribución espacial de las cuencas identificadas en régimen natural. (A) Total de cuencas identificadas en régimen natural (196). (B) Cuencas con al menos 5 años completos en un 99%. (C) Cuencas con al menos 5 años completos en un 95%. (D) Cuencas con al menos 10 años completos en un 95%. En los paneles B, C y D se mantiene la capa del total de cuencas en régimen natural.

La descomposición de cada una de las submétricas r , β y γ que componen el índice de calibración KGE se muestra en la Figura 3.3, la cual considera el set de parámetro óptimo según la mínima distancia euclidiana respecto a una simulación perfecta. En el caso del coeficiente de correlación de Pearson (panel a), el rango plausible va desde -1 (para variables correlacionadas de manera inversa) hasta 1 (correlación en el mismo sentido). Se aprecia que la temporalidad de los caudales medios diarios es razonablemente bien simulada, pues todos los valores de r son positivos y cercanos a 1. Considerando los valores de β (panel b), se aprecia una subestimación del caudal medio anual tanto para el período de calibración como de evaluación. De igual modo, existe una leve subestimación de la varianza en los caudales simulados (γ , panel c). Debido a que las tres componentes pesan exactamente lo mismo, los resultados sugieren que el factor que más afecta el KGE sea la subestimación del caudal medio anual (β).

En términos espaciales, la Figura 3.4 ilustra sobre un mapa de Chile continental la contribución glacial por cuenca y la magnitud asociada al caudal total a nivel anual promedio en el periodo 1985-2020

(panel A). De allí se desprende que la mayor contribución se reporta en la macrozona austral, principalmente entre los $\sim 44^{\circ}\text{S}$ y 50°S , donde 12 de las 18 cuencas reportan una contribución glacial media anual que excede el 10% (6 cuencas reportan valores $>25\%$), alcanzando incluso el 83% de aporte relativo. A su vez, en la macrozona norte-centro también se reporta una contribución glacial importante ($>10\%$) en diferentes cuencas (10/23). En la macrozona sur y parte norte de la macrozona austral la contribución glacial media anual excede el 10% sólo en 2 cuencas de 21 pertenecientes a dicho dominio.

La estimación de parámetros en cuencas no calibradas y que fueron determinados en el proceso de regionalización usando el criterio de proximidad espacial se visualiza en la Figura 3.5; en ella se observa el patrón espacial del parámetro D_s , la conductividad hidráulica (kh) y profundidad total de modelación (*Depth*).

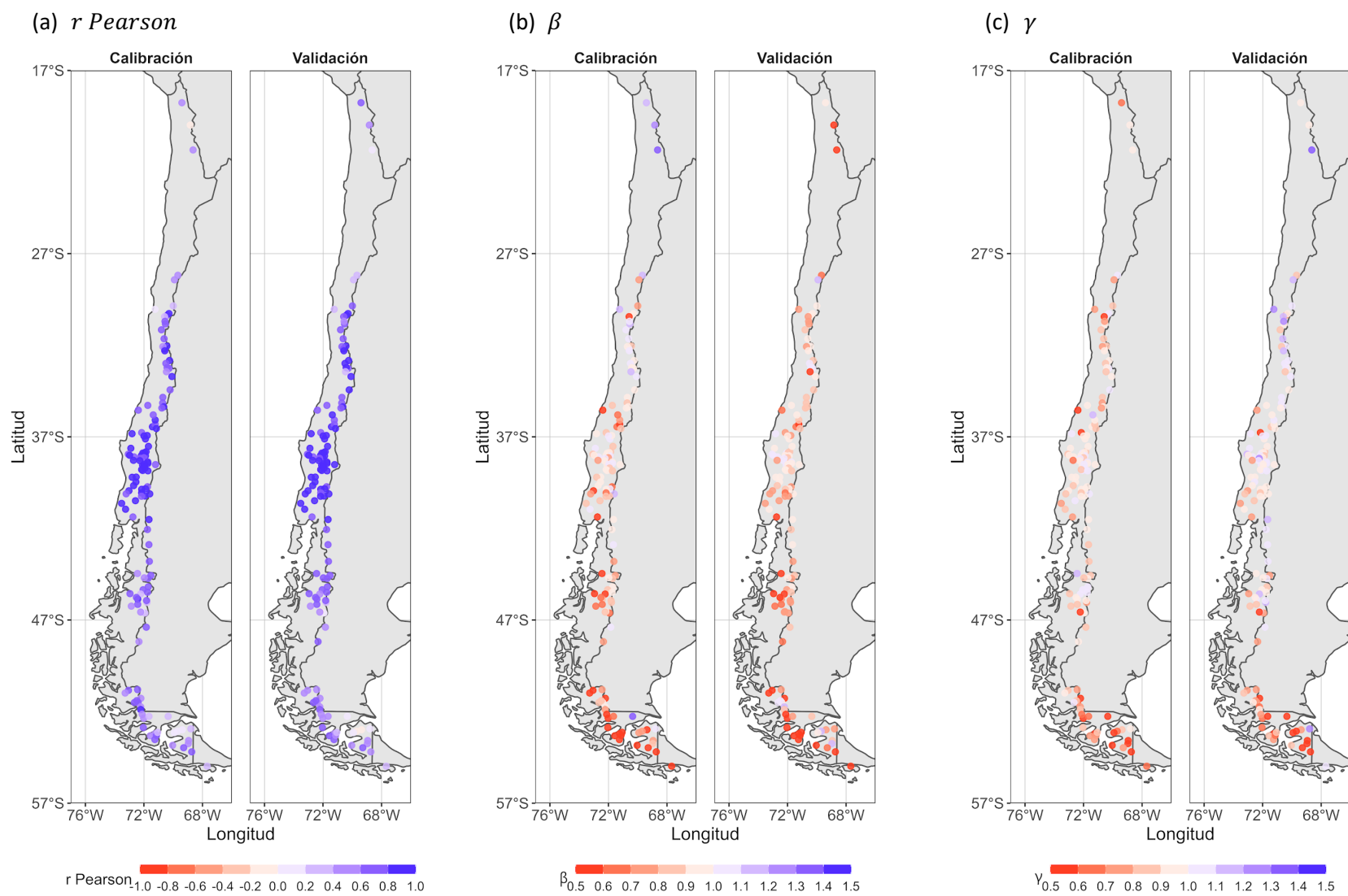


Figura 3.3: Componentes de la métrica KGE considerando el set de parámetros que minimiza la distancia respecto a una simulación perfecta ("Distancia Opt.").

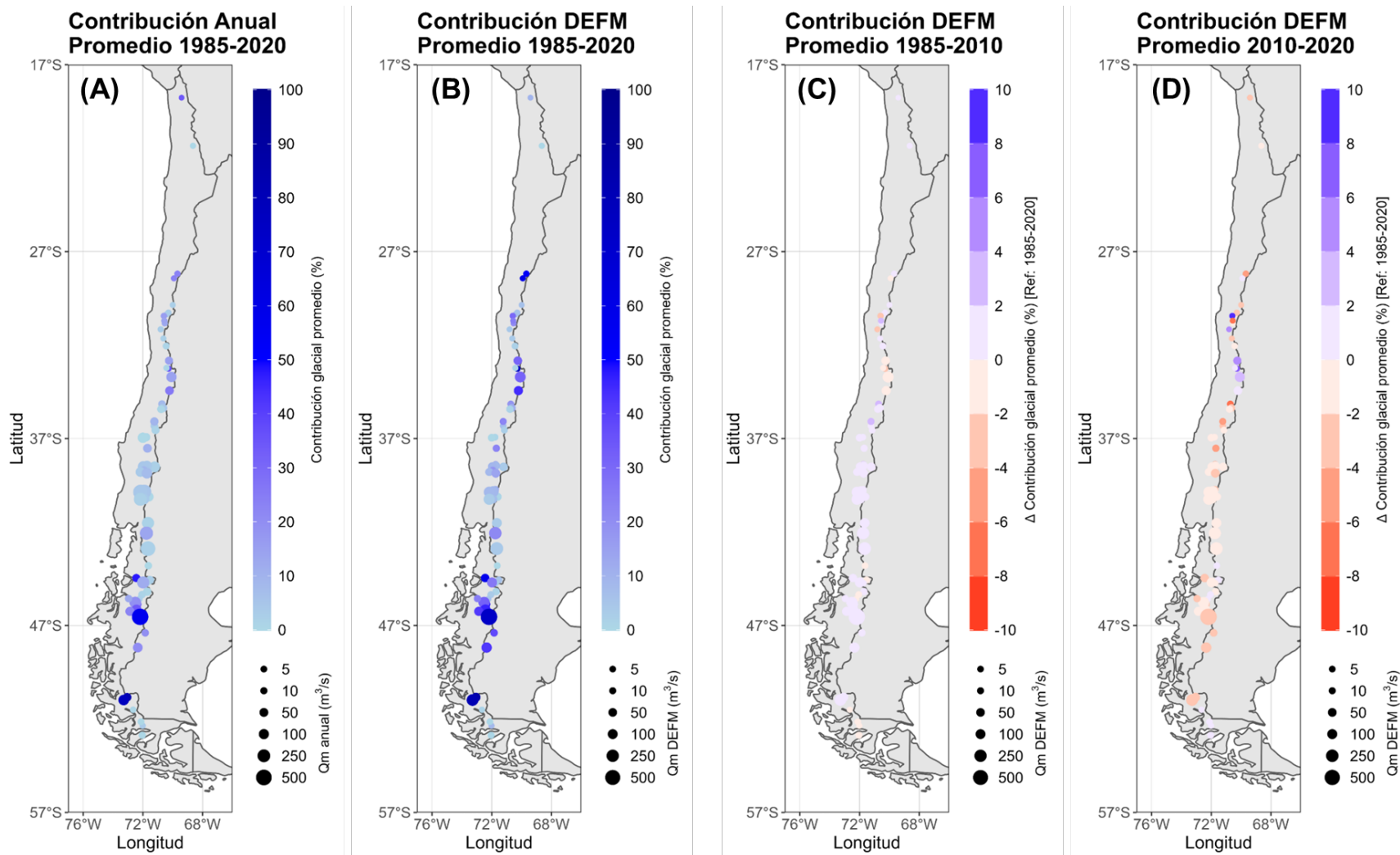


Figura 3.4: Contribución glacial promedio en diferentes subperiodos dentro del periodo histórico (1985-2020) en cuencas calibradas con componente glacial asociada. Se presenta el caudal anual promedio y los valores promedio en los meses de diciembre a marzo (DEFM).

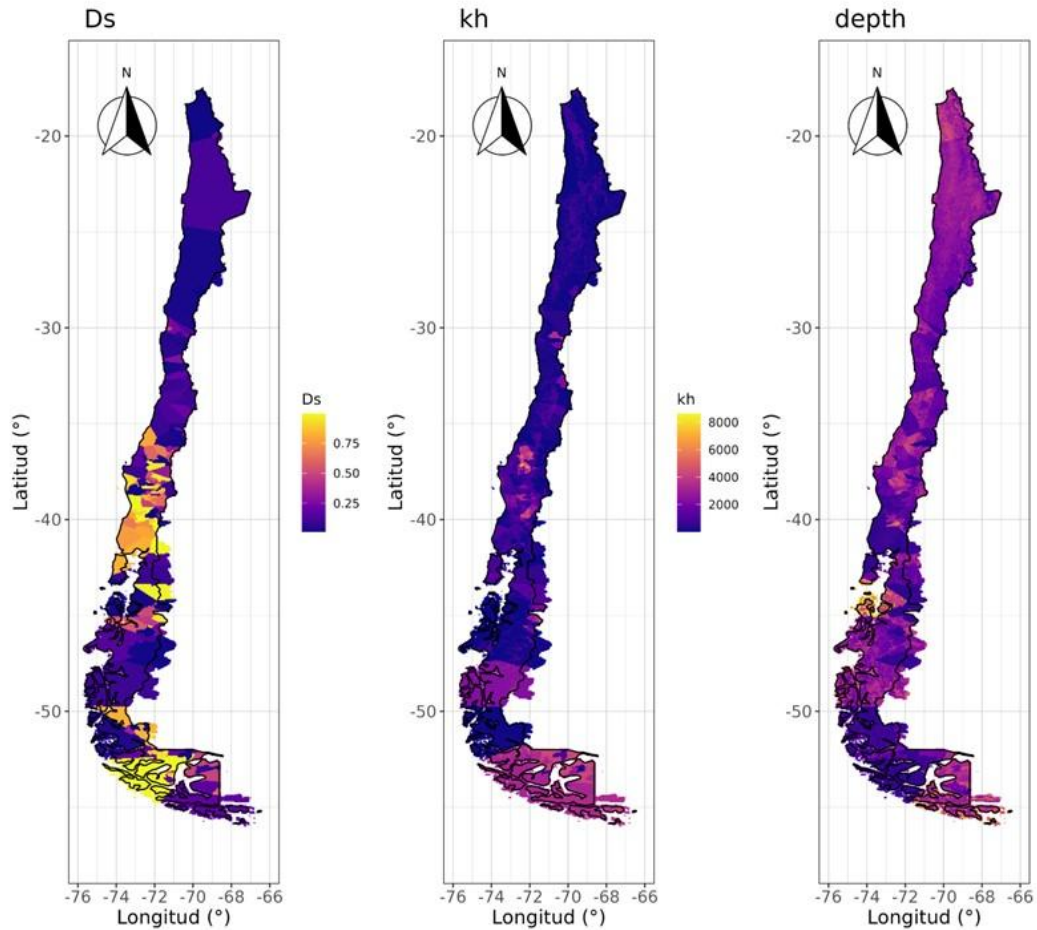


Figura 3.5: Ejemplo de la distribución espacial de parámetros en la regionalización obtenidos en este estudio. Las unidades de cada parámetro son Ds [-], kh [mm/día] y depth [m].

3.3 VERIFICACIÓN DE SIMULACIONES

En la Figura 3.6 se visualiza la correlación de Pearson (r) y el error medio (EMS) entre la evapotranspiración real simulada por el modelo VIC y el producto SSBEop. Se observa una correlación negativa en la costa y en el valle central del centro sur del país, debido al desfase de la evapotranspiración de los modelos, lo cual es consecuencia de la intervención humana.

Para visualizar el ajuste de la modelación de la nieve, se recurre a la estimación de la fracción de área cubierta por nieve en cada cuenca (fSCA, por sus siglas en inglés). La estimación de fSCA considera el uso de imágenes a nivel diario de los satélites Aqua y Terra, ambos de la misión MODIS. En la Figura 3.7 se muestra el error cuadrático medio de la variable fSCA para las cuencas calibradas. Adicionalmente, en los paneles b), c) y d) se muestran las series de tiempo simuladas mediante VIC (en rojo) y estimada mediante MODIS (en negro) para tres cuencas, del norte (río Pulido en Vertedero), centro (río Maipo en el Manzano) y centro-sur (río Achibueno en la Recova) del país. En general, el error de la estimación de las cuencas cordilleranas es menor al 20% del área de la cuenca.

Analisis diario de datos de evapotranspiración

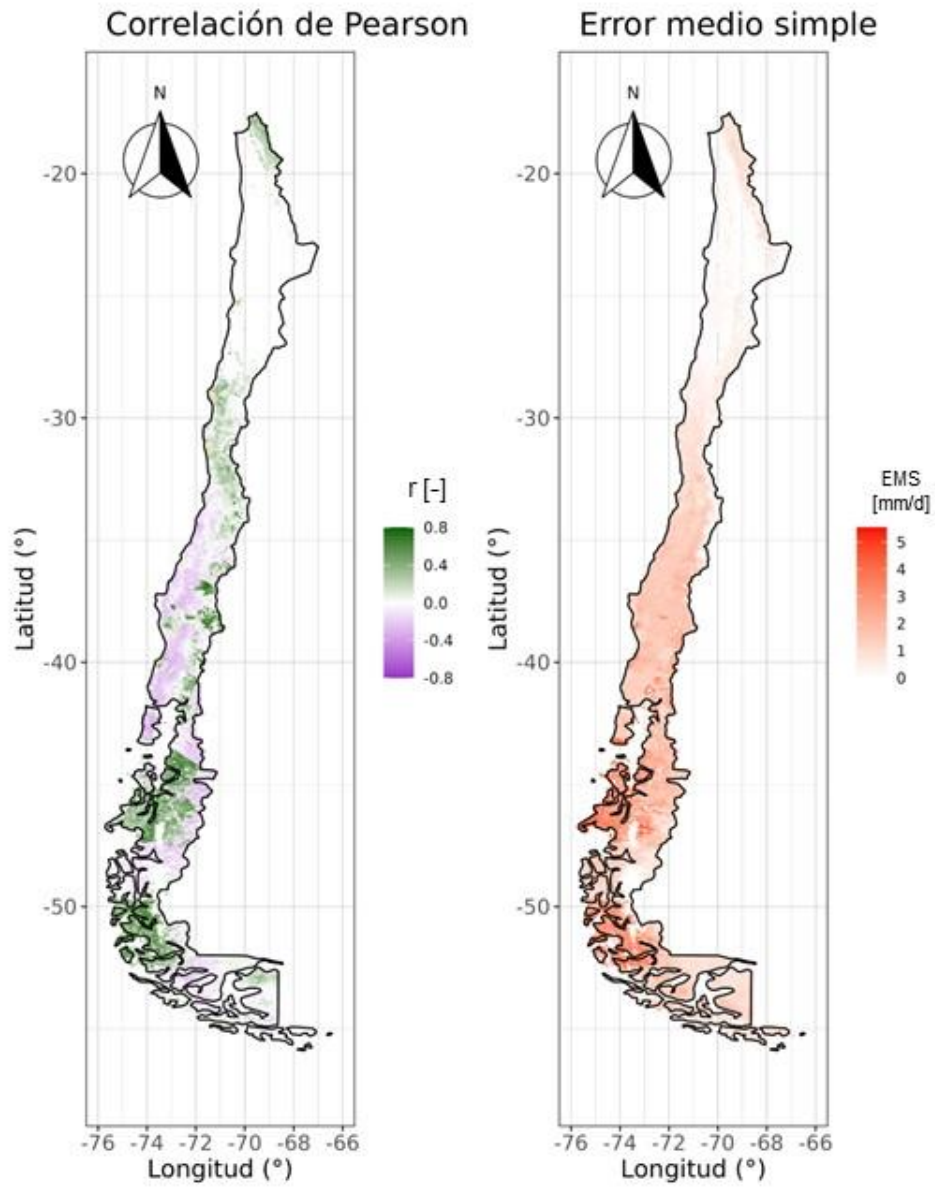
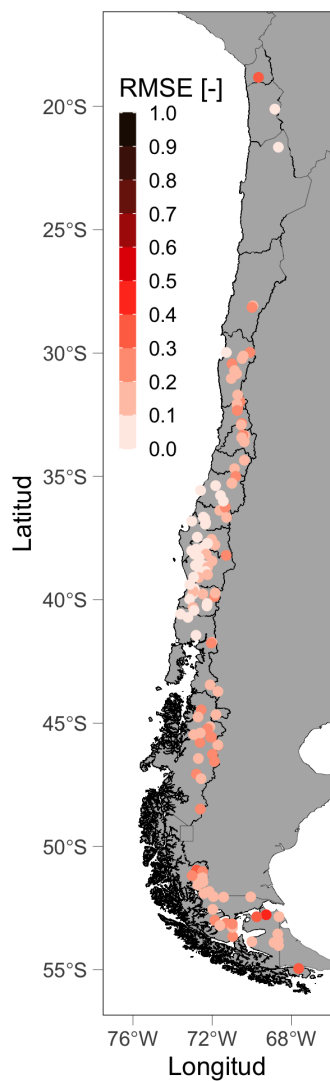


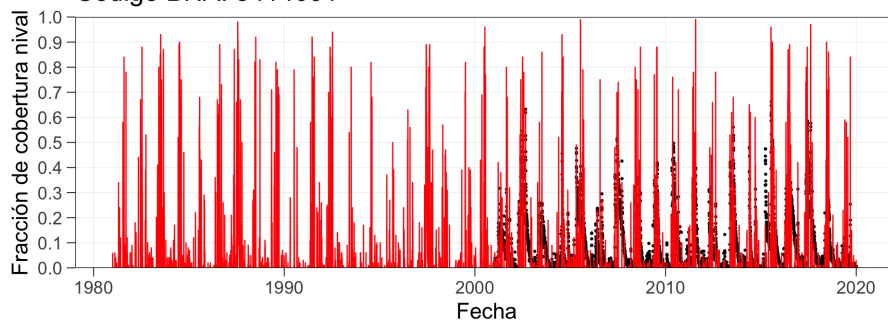
Figura 3.6: Comparación diaria entre el modelo hidrológico VIC y el modelo de balance de energía SSBEop.

a) RMSE



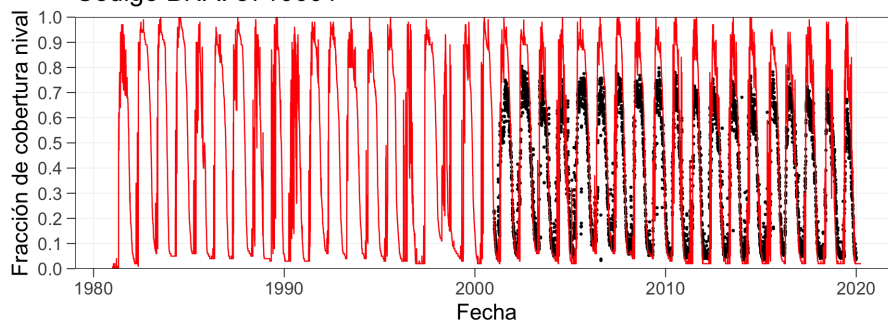
b) Río Pulido en Vertedero

Código BNA: 3414001



c) Río Maipo en el Manzano

Código BNA: 5710001



d) Río Achibueno en la Recova

Código BNA: 7354002

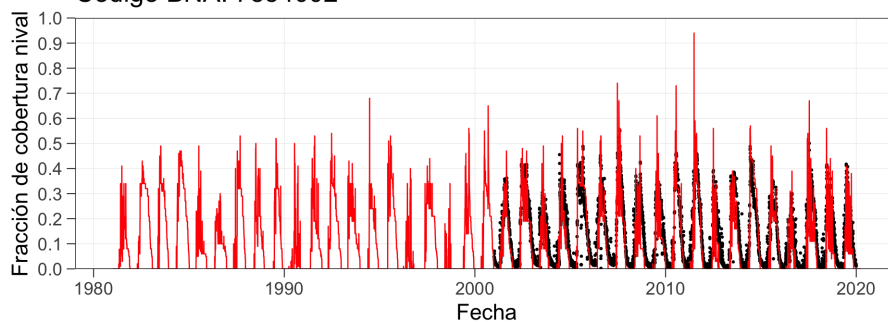


Figura 3.7: Comparación de la fracción de cobertura nival entre la serie obtenida mediante MODIS y el modelo hidrológico VIC. a) Comparación cuenca a cuenca. Notar que el error cuadrático medio (RMSE) se obtiene a partir de fracciones de áreas (fSCA). b), c) y d) corresponden a las series de tiempo simulada mediante VIC (en rojo) y la estimación mediante imágenes MODIS (en negro) para las cuencas río Pulido en Vertedero, río Maipo en el Manzano y río Achibueno en la Recova, respectivamente.

4 SIMULACIÓN DE BALANCE HÍDRICO Y OFERTA HÍDRICA NATURAL HISTÓRICA Y FUTURA

En este capítulo se presentan los resultados de la calibración de las cuencas en régimen natural, así como los principales flujos (precipitación, evapotranspiración y escorrentía) para las cuencas DARH. Posteriormente, se presentan los cambios proyectados considerando cambio climático para precipitación y temperatura, y la estimación del impacto en el cambio hidrológico.

A partir de la regionalización de los parámetros calibrados y la transferencia de estos a las zonas no controladas de Chile continental, en la Figura 4.1 se muestran las principales componentes requeridas para la estimación del balance hídrico anual. Cabe precisar que allí, tanto evapotranspiración (ET; panel B) como escorrentía (Q; panel C) son estimadas a través de simulaciones realizadas con el modelo hidrológico VIC. La figura muestra un patrón similar entre la precipitación y la escorrentía, siendo ET la única variable que, si bien reporta valores de menor magnitud, exhibe un patrón diferente.

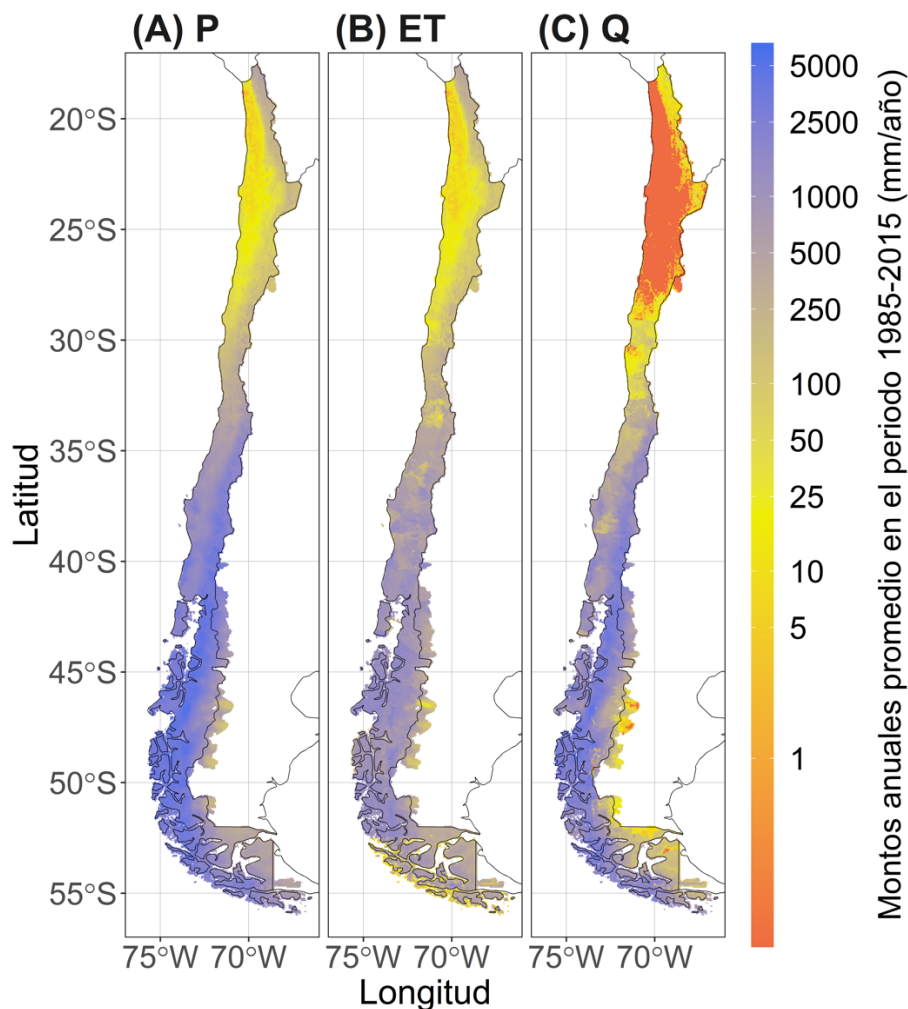


Figura 4.1: Principales componentes del balance hídrico. (A) Precipitación, (B) evapotranspiración natural y (C) escorrentía anual promedio en el periodo 1985-2015 a nivel de píxel espacialmente distribuido en Chile continental a 0,05° latitud-longitud.

En la Figura 4.2 se presenta el balance de masa adimensional para cada una de las cuencas DARH. Allí, se observan puntos ubicados por sobre (bajo) la línea segmentada lo que representa el caso de cuencas donde el balance no cierra, es decir, en términos prácticos el almacenamiento en el sistema es negativo (positivo).

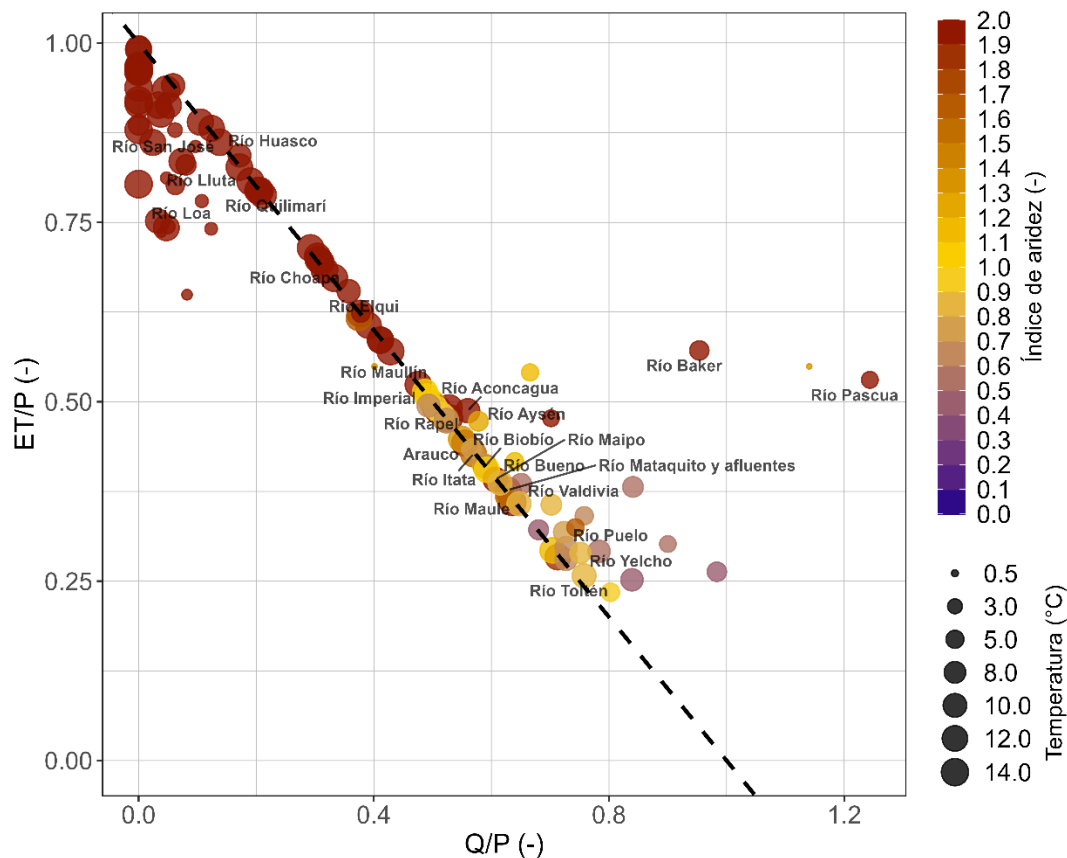


Figura 4.2: Balance adimensional asociado a cuencas DARH. Los montos anuales promedio de precipitación (P), evapotranspiración (ET), escorrentía total (Q), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura media (T) se estiman en el periodo 1985-2015.

La comparación del balance propuesto en este trabajo y la del año 1987 indica, en general disminuciones de la precipitación media anual y aumentos de la temperatura media anual, con excepción de las zonas costeras en el norte.

Para proyectar los comportamientos en el período futuro se analiza separadamente cada modelo GCM en el período histórico y futuro. En la Figura 4.3 se presentan los cambios porcentuales asociados a las tres variables principales de la ecuación de balance hídrico según los cuatro GCMs considerados. Allí es posible apreciar que, en general, se proyecta una disminución en la evapotranspiración anual promedio en el periodo 2030-2060 respecto al periodo 1985-2015, lo cual, en línea con la reducción generalizada en los montos de precipitación, podría estar condicionado por la menor disponibilidad de agua. Asimismo, se aprecia que muchas de las cuencas reportan una reducción en la escorrentía anual promedio en el

periodo futuro en comparación al caso histórico de referencia, lo cual da cuenta de una condición futura con una menor disponibilidad del recurso hídrico.

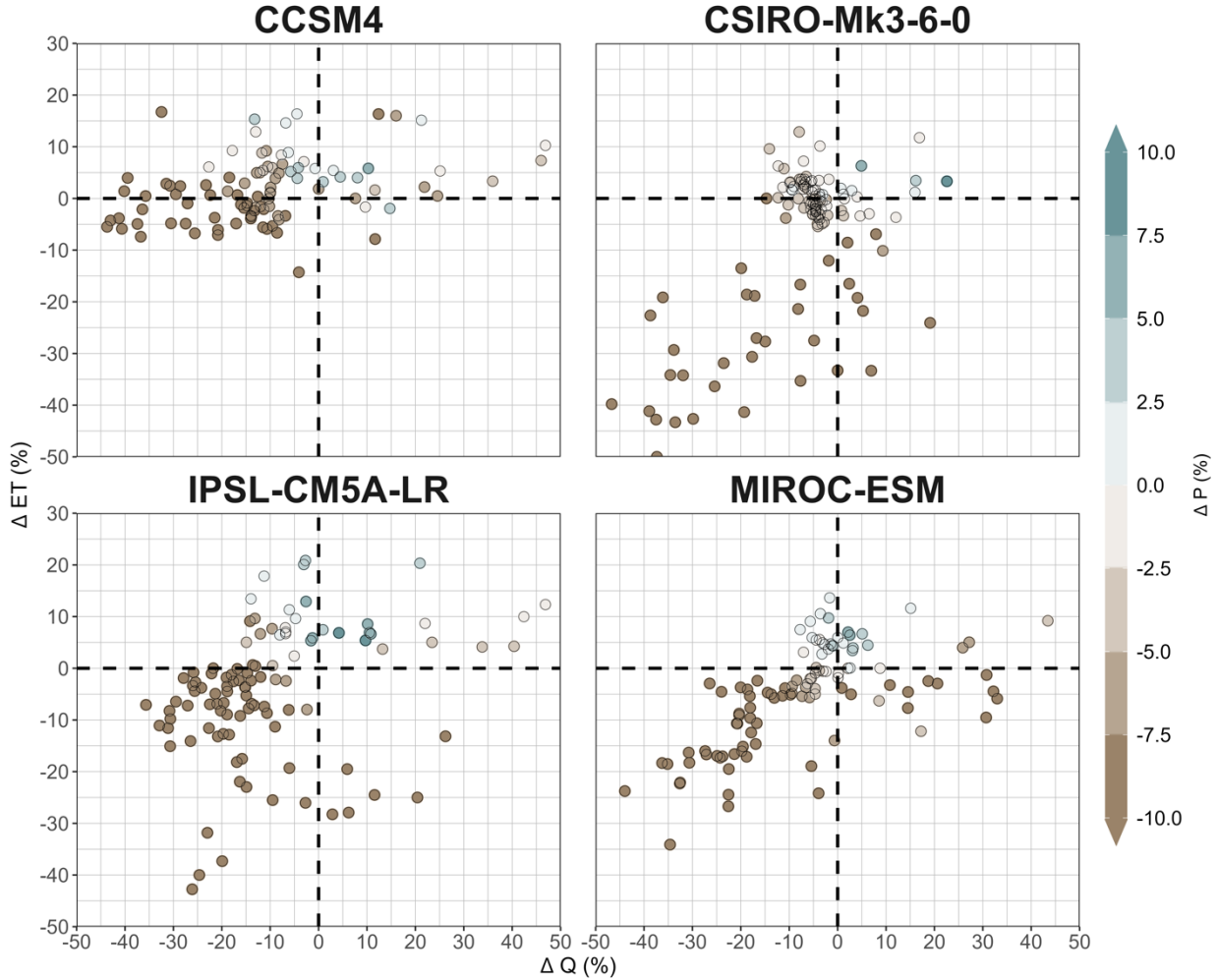


Figura 4.3: Proyecciones de cambio hidrológico promedio en el periodo 2030-2060 respecto al periodo 1985-2015 a nivel de cuenca DARH.

5 CONCLUSIONES

5.1 FORZANTES METEOROLÓGICAS Y CAMBIO CLIMÁTICO

En el presente proyecto se introduce una nueva versión de conjunto de datos de precipitación y temperatura (mínima y máxima diaria) distribuidos en el espacio, correspondiente al producto CR2MET (v2.5). En esta nueva versión se destacan los cambios en los valores climatológicos de precipitación y temperatura, caracterizados por un aumento generalizado de la acumulación anual de precipitación en Chile, en particular en las zonas cordilleranas del país y en los sectores más oceánicos de las regiones de Aysén y Magallanes. Respecto de versiones anteriores, este aumento de precipitación, comparado con los caudales observados en distintas cuencas del país, se traduce en una relación precipitación-escorrentía más coherente con lo esperado. Los valores medios de temperatura muestran, también, cambios sustantivos respecto de versiones anteriores, incluidos un aumento en la media y el ciclo diario de temperatura en las zonas áridas del norte, así como un aumento en las temperaturas mínimas y disminución del ciclo diario en las zonas cordilleranas del centro-sur y en la macrozona austral del país.

En relación con Chile insular, se desarrollan productos espacialmente distribuidos en una grilla regular de 0,01° latitud-longitud, a resolución diaria en el producto 1981-2020, coherente con las observaciones in-situ de las variables meteorológicas requeridas para la modelación hidrológica con VIC, las cuales en el caso de Chile insular corresponden a: precipitación, magnitud de la velocidad del viento, temperatura mínima, temperatura máxima y humedad relativa. Para ello se utilizaron los productos IMERG V0B a nivel mensual en el periodo 2001-2020 para el caso de precipitación y mediante el producto MXD11A2 en el periodo 2001-2020 para el caso de temperaturas extremas. En el caso del viento se utilizó el explorador Eólico para la Isla Rapa Nui. Del mismo modo, ante la falta de datos de humedad relativa se supone una distribución homogénea en ambas islas, igual a la estación de referencia respectiva.

5.2 SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

En este proyecto, se incorporan varias mejoras metodológicas gracias al trabajo realizado en el proyecto Fondecyt N°11200142. Entre los principales cambios con respecto a etapas previas del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional se encuentran: (i) distinto uso de suelos, (ii) estimación del índice de área foliar, (iii) la incorporación de bandas de elevación, (iv) incorporación del balance de energía y (v) la inclusión explícita del proceso de rastreo. Todos estos aspectos implican mejoras metodológicas.

Respecto a la calibración del modelo hidrológico VIC, se obtienen valores de KGE > 0.6 para varias cuencas a nivel nacional, en particular en la zona Centro y Sur de Chile. No obstante, existen desafíos en las zonas extremas del país. En particular, la simulación hidrológica en las regiones de Aysén y Magallanes resulta compleja debido, principalmente, a los altos coeficientes de escorrentía anual que el modelo VIC debe replicar. Lo anterior se deduce de la subestimación del caudal medio anual simulado por el modelo VIC y los altos coeficientes de escorrentía los que, en algunos casos, son iguales y superiores a 1.

REPRESENTACIÓN DE ET

En general, el modelo SSEBop construido para este estudio simula consistentemente la estacionalidad y magnitud de la evapotranspiración real captando el efecto del riego y de los regímenes naturales de lluvia en los puntos donde se encontraban las estaciones LAB-net, esto se pudo ver reflejado en las series de tiempo y en los análisis de error. En cuanto a la validación, las estimaciones de SSEBop mantuvieron un bajo error respecto a las mediciones de la estación Ñirehuao, aunque teniendo una baja correspondencia lineal. Por otra parte, debido al periodo de tiempo disponible para validar, no es posible validar, ni concluir la calidad del modelo en otro periodo del año que no sea de diciembre de 2019 a febrero de 2020.

Finalmente, el modelo SSEBop generado para Chile a escala diaria, evaluado y validado, resulta ser un producto consistente y preciso en comparación con otros modelos grillados de ETR, de modo que es potencialmente útil para calibrar las estimaciones del modelo VIC, tanto como en su estacionalidad como en su magnitud. De la evaluación realizada con balances previos, sin embargo, se detectó un desfase en la temporalidad de ET y buena coherencia con las magnitudes anuales para píxeles con probabilidad mayor al 30% de tener estimación disponible de SSEBop.

SIMULACIÓN GLACIAL

En este trabajo se actualizó la manera de calcular los aportes de los glaciares a los caudales. Se usaron diferentes maneras de calcular el derretimiento glacial para las zonas Norte-Central y Sur-Austral del país. En la zona Sur-Austral solamente se usó la temperatura como forzante de derretimiento mientras que en la zona Norte y Centro se usaron la temperatura y la radiación onda corta entrante. Esto está justificado por el aumento de la radiación onda corta entrante y la disminución de la temperatura como fuente de energía para el derretimiento a mayores latitudes (ver Figura 4.4, Sección 4.1.2). Para los glaciares más grandes de la zona Sur-Austral se consideraron las tasas de ablación frontal observados en los últimos 20 años (Minowa et al. 2021, sección 3.3).

Para el proceso de calibración y la validación del balance de masa modelado se usó un nuevo set de datos de cambio de elevación de los glaciares del mundo que tiene mejor cobertura de datos (espacial y temporal) y menos dispersión de datos (*outliers*) que el set de datos usado anteriormente (Figura 3.10). Los datos observados se podrían reproducir de manera satisfactoria con un bias de 0,03 m w.eq. y un RMSE de 0,27 m w.eq para la zona Sur-Austral y un bias de -0,09 m w.eq. y RMSE de 0,23 m w.eq. para la zona Norte-Centro. El promedio del balance de masa específico modelado en la zona Sur-Austral es de 0,09 m w.eq. y el de la zona Norte-Central de -0,36 m w.eq. Los caudales modelados están fuertemente relacionados con el área glacial con valores máximos de 100 m³/s como promedio anual entre las latitudes -52° y -46°, región en la cual están ubicados los Campos de Hielo Patagónicos Norte y Sur.

5.3 COMPARACIÓN DE BALANCES

La comparación de los balances hídricos de 1987 (BH 1987) y el propuesto en este informe no puede ser comparados directamente debido a las diferencias metodológicas consideradas en cada caso y a las

fuentes de datos y registros con los que se dispone ahora versus el BH 1987. En consecuencia, cualquier comparación requiere extrema precaución.

Al contrastar los valores para cada uno de los pixeles se aprecian mayores montos de precipitación media anual en la zona norte de Chile en el presente estudio (BH 2022) que respecto al BH1987, en particular en la zona desértica con bajas o nulas precipitaciones. En dicha zona, la diferencia se explica, en general, por una decena de milímetros de agua a nivel anual, lo que al compararse con bajos montos de precipitación, resulta en grandes variaciones porcentuales. En la zona centro y sur se aprecian diferencias que, en general, indican una menor cantidad de precipitación media anual para el BH 2022. En la zona Austral, se aprecian mayores montos en la zona desértica, y disminuciones en la zona lluviosa cercana al océano Pacífico.

En el caso de la temperatura media anual se aprecian, en general, mayores montos en el BH 2022 que en el BH 1987. En zonas cercanas a la costa, y particularmente en el norte de Chile, existen montos más fríos que en BH 1987.

5.4 PROYECCIONES FUTURAS

Respecto a la señal de cambio climático, los modelos concuerdan en un aumento generalizado de la temperatura para todo Chile y en particular las mayores magnitudes de cambio se producen en el altiplano. Si bien, todos los modelos proyectan aumentos de temperaturas, la intensidad de estos discrepa entre modelos y van entre los 0,5 a 3 °C, con una señal de cambio más fuerte para el modelo IPSL-CM5A-LR. En relación con las precipitaciones, los modelos coinciden en disminución en la zona sur y aumento en la Patagonia, con rangos de cambio entre los -550 y 350 mm/año. El modelo que presenta una señal de cambio más atenuada es CSIRO-Mk3-6-0, lo cual es concordante con las sensibilidades climáticas de los modelos, donde CSIRO-Mk3-6-0 tiene la sensibilidad más baja mientras que IPSL-CM5A-LR la más alta.

Los aportes glaciares por su parte se verían fuertemente mermados, produciéndose prácticamente una desaparición de estos en el periodo 2030-2060 hacia el norte de 35°S, salvo algunas singularidades que deben ser miradas con cautela en donde se proyectan incrementos de área glaciar. Para el futuro lejano (2070-2100), el límite de desaparición de glaciares descendería hasta ~47°S. Estas proyecciones resultan particularmente severas en cuencas cuyos ecosistemas dependen fuertemente de los efectos reguladores de estos sistemas en años secos.

En relación con las proyecciones de cambio hidrológico, se esperan condiciones en general más secas para todo Chile, salvo la zona Austral, donde se proyectan incrementos cercanos a 200 mm. Del mismo modo, las condiciones más cálidas proyectadas con total acuerdo entre los GCMs se traducirían conjuntamente en disminuciones de escorrentía de hasta en un 50% para algunos modelos; así como disminuciones de ET de hasta un 40%.

5.5 RECOMENDACIONES FINALES

Como recomendaciones generales para mejorar la estimación del balance hídrico nacional, es indispensable crecer además en la inclusión de la demanda y “naturalización” de diversas cuencas con alto grado de intervención, lo que permitiría contar con un significativamente mayor número de cuencas calibradas, y, por ende, menor incertidumbre en las estimaciones del balance. En números gruesos, aproximadamente el 80% de las estaciones fluviométricas DGA están afectadas por derechos de agua permanentes, o embalses aguas arriba, de modo que, el reconstruir el caudal natural las estaciones ya existentes generaría mejores líneas de base para estudios hidrológicos, como por ejemplo, el río Maule en Armerillo que ya tiene una regla conocida de restitución al restitución. Del mismo modo, la inclusión de nuevas estaciones en cuencas en régimen natural, particularmente en las Macrozonas Norte y Austral, permitirá mejorar el nivel de conocimiento de nuestras hoyas hidrográficas en estudios futuros. Complementariamente, los esfuerzos de incrementar la red observacional en Chile en las regiones extremas y en altura (> 2000 m.s.n.m.), con la tecnología para medir precipitación sólida, permitirán tener mejores estimaciones de forzantes meteorológicas en zonas no controladas.

Debido al sustancial salto tecnológico, y el uso intensivo de literatura para generar productos de validación de ET, verificación de tasas de derretimiento glaciario, modelación hidrológica y técnicas de regionalización, es recomendable actualizar el balance hídrico nacional, en periodos inferiores a 30 años, a modo de tener un diagnóstico más temprano y general del estado de los recursos hídricos superficiales, con el fin de poder sustentar la toma de decisiones y la gestión integrada de cuencas. Del mismo modo, la inclusión de nuevos GCMs del proyecto CMIP6, podría dar nuevas luces respecto a la fragilidad de los sistemas hídricos de Chile, incluyendo no solo rasgos del escenario más desfavorable, sino que también evaluando escenarios intermedios bajo el supuesto de medidas de mitigación para limitar el calentamiento global a 1,5-2°C a finales de siglo.

REFERENCIAS

- Aceituno, P., Boisier, J. P., Garreaud, R. D., Rondanelli, R., & Rutllant, J. A. (2021). Chapter 2: Climate and Weather in Chile. In C. Springer (Ed.), *Water Resources of Chile* (pp. 7–29).
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, Martin. (2005). Evapotranspiración del cultivo . In *Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO de Riego y Drenaje.
- 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., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-23>
- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & 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. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., de Roo, A., Miralles, D. G., McVicar, T. R., Schellekens, J., & Bruijnzeel, L. A. (2016a). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 52(5), 3599–3622. <https://doi.org/10.1002/2015WR018247>
- Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., de Roo, A., Miralles, D. G., McVicar, T. R., Schellekens, J., & Bruijnzeel, L. A. (2016b). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2015WR018247>
- Braun, M. H., Malz, P., Sommer, C., Farías-Barahona, D., Sauter, T., Casassa, G., Soruco, A., Skvarca, P., & Seehaus, T. C. (2019). Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nature Climate Change*, 9(2), 130–136. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0375-7>
- Buckley, T. N. (2005). The control of stomata by water balance. *New Phytologist*, 168(2), 275–292. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01543.x>
- C3S, & Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*. C3S. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Cannon, A. J. (2016a). Multivariate Bias Correction of Climate Model Output: Matching Marginal Distributions and Intervariable Dependence Structure. *Journal of Climate*, 29(19), 7045–7064. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0679.1>
- Cannon, A. J. (2016b). Multivariate Bias Correction of Climate Model Output: Matching Marginal Distributions and Intervariable Dependence Structure. *Journal of Climate*, 29(19), 7045–7064. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0679.1>
- 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*. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015a). 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. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015b). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>

- Clark, M. P., Wilby, R. L., Gutmann, E. D., Vano, J. A., Gangopadhyay, S., Wood, A. W., Fowler, H. J., Prudhomme, C., Arnold, J. R., & Brekke, L. D. (2016). Characterizing Uncertainty of the Hydrologic Impacts of Climate Change. In *Current Climate Change Reports*. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0034-x>
- Cortés-Salazar, N., Vásquez, N., Mizukami, N., Mendoza, P. A., & Vargas, X. (2022). *To what extent does river routing matter in hydrological modeling?*
- DGA. (1987). *Balance hídrico de Chile*.
- DGA. (2017a). *Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417*.
- DGA. (2017b). *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*.
- DGA. (2018a). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional a las macrozonas Norte y Centro, SIT N° 435. In *Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por UNTEC en UTP con la P.U. Católica de Chile*.
- DGA. (2018b). *Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las Macrozonas Norte y Centro, SIT N° 435*.
- DGA. (2019a). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en la macrozona sur y parte norte de la macrozona Austral, SIT N° 441*.
- DGA. (2019b). *Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en la Macrozonas Sur y parte Norte de la Macrozona Austral, SIT N° 441*.
- DGA. (2019c). *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*.
- Dionizis, D., Ojeda, P., Quezada, S., Lagos, M., & Montserrat, S. (2021). Implicancias de la elección del método de escalamiento estadístico de modelos de circulación general en proyecciones de cambio hidrológico. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*.
- Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., Entin, J. K., Goodman, S. D., Jackson, T. J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J. R., Koster, R. D., Martin, N., McDonald, K. C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J. C., ... Van Zyl, J. (2010). The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704–716. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043918>
- Esquivel, J., Pauchard, A., & Saldaña, A. (2019). Efecto de la diversidad funcional sobre la tasa de evapotranspiración: un análisis anual de tres bosques templados chilenos. *Gayana. Botánica*, 76(2), 156–167. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432019000200156>
- Gulke, N., & Tausz, M. (2014). *The Future of Trees in a Changing Climate: Synopsis* (pp. 265–279). https://doi.org/10.1007/978-94-017-9100-7_11
- Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (2006). *MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500 m. Version 5, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, Boulder, Colorado USA*.
- Hartmann, J., & Moosdorf, N. (2012). The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the Earth surface. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(12). <https://doi.org/10.1029/2012GC004370>

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hock, R. (2003). Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, *282*(1–4), 104–115. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00257-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00257-9)
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2021). *Manual de evaluación de la huella hídrica* (AENOR).
- Hrachowitz, M., & Clark, M. P. (2017). HESS : The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*, 3953–3973. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3953-2017>
- Huffman, G., Bolvin, D., Braithwaite, D., Hsu, K., & Joyce, R. (2013). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG). *Nasa*, December, 29.
- Huffman, G. J., Stocker, E. F., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., & Tan, J. (2019). *GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)*. <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06>
- Jacques-Coper, M., Brönnimann, S., Martius, O., Vera, C., & Cerne, B. (2016). Summer heat waves in southeastern Patagonia: an analysis of the intraseasonal timescale. *International Journal of Climatology*, *36*(3), 1359–1374. <https://doi.org/10.1002/joc.4430>
- Jia, L. (2004). *Modeling heat exchanges at the land-atmosphere interface using multi-angular thermal infrared measurements*.
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J., Defries, R., Roy, D., Hall, D. K., Salomonson, V. v, Privette, J. L., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Running, S. W., Nemani, R., Wan, Z. M., Huete, A., van Leeuwen, W., Wolfe, R., & Barnsley, M. J. (1997). The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE T Geosci Remote*, *36*, 1228–1249.
- Katul, G. G., Oren, R., Manzoni, S., Higgins, C., & Parlange, M. B. (2012). Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system. *Reviews of Geophysics*, *50*(3). <https://doi.org/10.1029/2011RG000366>
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, *424–425*, 264–277. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.01.011>
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. W., & Schmid, H. P. (2015). A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, *8*(11), 3695–3713. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3695-2015>
- Leuning, R., Zhang, Y., Rajaud, A., Cleugh, H., & Tu, K. (2009). A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation (vol 45, W10419, 2008). *Water Resources Research - WATER RESOUR RES*, *45*. <https://doi.org/10.1029/2008WR007631>

- 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. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00046-1)
- Liou, Y.-A., & Kar, S. (2014). Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms—A Review. *Energies*, 7(5), 2821–2849. <https://doi.org/10.3390/en7052821>
- Liuzzo, L., Viola, F., & Noto, L. v. (2016). Wind speed and temperature trends impacts on reference evapotranspiration in Southern Italy. *Theoretical and Applied Climatology*, 123(1–2), 43–62. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1342-5>
- Mendoza, P. A., Clark, M. P., Mizukami, N., Gutmann, E. D., Arnold, J. R., Brekke, L. D., & Rajagopalan, B. (2016). How do hydrologic modeling decisions affect the portrayal of climate change impacts? *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.10684>
- Mizukami, N., Clark, M. P., Sampson, K., Nijssen, B., Mao, Y., McMillan, H., Viger, R. J., Markstrom, S. L., Hay, L. E., Woods, R., Arnold, J. R., & Brekke, L. D. (2016). MizuRoute version 1: A river network routing tool for a continental domain water resources applications. *Geoscientific Model Development*, 9(6), 2223–2228. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2223-2016>
- Moletto-Lobos, I., Mattar, C., & Barichivich, J. (2020). Performance of Satellite-Based Evapotranspiration Models in Temperate Pastures of Southern Chile. *Water*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/w12123587>
- Monin, A. S., & Obukhov, A. M. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. In *Originally published in Tr. Akad. Nauk SSSR Geophys. Inst* (Vol. 24, Issue 151).
- Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2013). *MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) Collection 5. NASA Headquarters MOD16A2/A3) Collection 5. NASA Headquarters*. https://scholarworks.umt.edu/ntsg_pubs/268
- Muñoz-Castro, E., & Vargas, X. (2021a, November). Explorando la habilidad de los modelos climáticos para reproducir simulaciones de flujos y estados hidrológicos. *XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Mexico*.
- Muñoz-Castro, E., & Vargas, X. (2021b, November). Explorando la habilidad de los modelos climáticos para reproducir simulaciones de flujos y estados hidrológicos. *XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Mexico*.
- Murillo, O., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Mizukami, N., & Ayala, Á. (2022). Impacts of subgrid elevation bands on hydrological portrayals: insights from a suite of hydroclimatically diverse mountainous catchments. *Earth and Space Science Open Archive, Submitted to Water Resources Research*, 31. <https://doi.org/10.1002/essoar.10510847.1>
- Niu, G., Yang, Z. L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E., Tewari, M., Xia, Y., Niu, G., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., Longuevergne, L., Manning, K., ... Xia, Y. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. *Evaluation over Global River Basins, Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116, 12.

- Palutikof, J. P., Goodess, C. M., & Guo, X. (1994). Climate change, potential evapotranspiration and moisture availability in the mediterranean basin. *International Journal of Climatology*, *14*(8), 853–869. <https://doi.org/10.1002/joc.3370140804>
- Pieruschka, R., Huber, G., & Berry, J. A. (2010). Control of transpiration by radiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *107*(30), 13372–13377. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913177107>
- Pitie, F., Kokaram, A. C., & Dahyot, R. (2005). N-dimensional probability density function transfer and its application to color transfer. *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1*, 1434-1439 Vol. 2. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2005.166>
- Pitié, F., Kokaram, A. C., & Dahyot, R. (2007). Automated colour grading using colour distribution transfer. *Computer Vision and Image Understanding*, *107*(1–2), 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2006.11.011>
- Poggio, L., de Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *SOIL*, *7*(1), 217–240. <https://doi.org/10.5194/SOIL-7-217-2021>
- Ranga Mynemi, K., Taejin Park, Y., Boston University, & MODAPS SIPS - NASA. (2015). *MOD15A2 MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 1km SIN Grid*. NASA LP DAAC.
- Saadi, S., Boulet, G., Bahir, M., Brut, A., Delogu, É., Fanise, P., Mougenot, B., Simonneaux, V., & Lili Chabaane, Z. (2018). Assessment of actual evapotranspiration over a semiarid heterogeneous land surface by means of coupled low-resolution remote sensing data with an energy balance model: comparison to extra-large aperture scintillometer measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(4), 2187–2209. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2187-2018>
- Schaefer, M., Fonseca-Gallardo, D., Fariás-Barahona, D., & Casassa, G. (2020). Surface energy fluxes on Chilean glaciers: Measurements and models. *Cryosphere*, *14*(8), 2545–2565. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2545-2020>
- Schaefer, M., Machguth, H., Falvey, M., & Casassa, G. (2013). Modeling past and future surface mass balance of the Northern Patagonia Icefield. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *118*(2), 571–588. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20038>
- Schaefer, M., Machguth, H., Falvey, M., Casassa, G., & Rignot, E. (2015). Quantifying mass balance processes on the Southern Patagonia Icefield. *Cryosphere*, *9*(1), 25–35. <https://doi.org/10.5194/tc-9-25-2015>
- Senay, G. B., Bohms, S., Singh, R. K., Gowda, P. H., Velpuri, N. M., Alemu, H., & Verdin, J. P. (2013). Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *49*(3), 577–591. <https://doi.org/10.1111/jawr.12057>
- Senay, G. B., Friedrichs, M., Singh, R. K., & Velpuri, N. M. (2016). Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment*, *185*, 171–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.043>
- Sepúlveda, U. M., Mendoza, P. A., Mizukami, N., & Newman, A. J. (2022). Revisiting parameter sensitivities in the variable infiltration capacity model across a hydroclimatic gradient. *Hydrology and Earth System Sciences*, *26*(13), 3419–3445. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3419-2022>
- Siebert, J. (2006, July). WEAP Water Evaluation and Planning System. *3rd International Congress on Environmental Modelling and Software*.

- Slater, J. A., Garvey, G., Johnston, C., Haase, J., Heady, B., Kroenung, G., & Little, J. (2006). The SRTM Data “Finishing” Process and Products. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 237–247. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.3.237>
- Smith, T., & Smith Robert. (2015). *Elements of Ecology* (9th ed.). Pearso Education.
- Stoner, A. M. K., Hayhoe, K., Yang, X., & Wuebbles, D. J. (2013). An asynchronous regional regression model for statistical downscaling of daily climate variables. *International Journal of Climatology*, 33(11), 2473–2494. <https://doi.org/10.1002/joc.3603>
- Sulla-Menashe, D., & Friedl, M. A. (2018). *User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product*. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1>
- UNESCO. (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Estudios e informes en hidrología, UNESCOI ROSTLAC, Montevideo, 130 p.*
- Vásquez, N., Cepeda, J., Gómez, T., Mendoza, P. A., Lagos, M., Boisier, J. P., Álvarez-Garretón, C., & Vargas, X. (2021). Catchment-Scale Natural Water Balance in Chile. In *Water Resources of Chile* (pp. 189–208). https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_9
- Vasquez, N., Cepeda, J., Gomez, T., Mendoza, P., Alvarez, C., Lagos, M., & Vargas, X. (2019). Exploring the relation between meteorological, physiographic and hydrological similarities through catchment classification. *Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2019*.
- Wan, Z. (2013). *Collection-6 MODIS Land Surface Temperature Products Users’ Guide*.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.
- Wood, E. F., Lettenmaier, D. P., & Zartarian, V. G. (1992). A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 97(D3), 2717–2728. <https://doi.org/10.1029/91JD01786>
- Zhang, K., Kimball, J. S., & Running, S. W. (2016). A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *WIREs Water*, 3(6), 834–853. <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G. S., Radke, J. D., & Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>