



**Dirección
General de
Aguas**

Ministerio de Obras
Públicas

Gobierno de Chile

GOBIERNO DE CHILE

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO NACIONAL EN LAS CUENCAS DE LAS MACROZONAS NORTE Y CENTRO

**INFORME FINAL
RESUMEN EJECUTIVO**

REALIZADO POR:

FUNDACIÓN PARA LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

S.I.T N° 435

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2018

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Comercial, Sr. Juan Andrés Fontaine Talavera

Director General de Aguas

Ingeniero Comercial, Sr. Óscar Cristi Marfil

Jefe División de Estudios y Planificación (s)

Ingeniero Civil, M.Sc. Sra. Andrea Osses Vargas

Inspector Fiscal

Ingeniera Agrícola, M.Sc. Sra. Pamela García Serrano

Inspector Fiscal (s)

Cartógrafo, Sr. Guillermo Tapia Molina

FUNDACIÓN PARA LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Jefa de Proyecto

Ingeniera Civil, Sra. Ximena Vargas Mesa. (UNTEC)

Coordinador

Ingeniero Agrónomo, Ph.D. Nicolás Bambach O. (PUC)

ESPECIALISTAS

Especialista en Hidrología

Ingeniero Civil Ambiental, Ph.D. Sebastián Vicuña Díaz (PUC)

Especialista en Hidrogeología

Ingeniero Civil Hidráulico, Ph.D. Francisco Suárez (PUC)

Especialista en Variabilidad Climática

Ph.D. Juan Pablo Boisier Echeñique (UNTEC)

Especialista en SIG

Ingeniero Agrónomo, M.Sc. David Morales (PUC)

ASESORES

Asesor en Meteorología

Ingeniero Civil Químico, Ph.D. Sr. Roberto Rondanelli Rojas (UNTEC)

Asesor en Hidrogeología

Geóloga, Ph.D. Sra. Dolorinda Daniele (UNTEC)

Asesor en Evapotranspiración

Ingeniero Agrónomo, Ph.D. Sr. Francisco Meza (PUC)

Asesores en Hidrología

Ingeniero Civil, M.Sc. Sr. Miguel Lagos Zúñiga (UNTEC)

Ingeniero Civil, Ph.D. Sr. Pablo Mendoza Zúñiga (UNTEC)

Ingeniera Civil, Ph.D. Camila Álvarez Garretón (UNTEC)

EQUIPO DE PROFESIONALES

Ingeniero Civil, M.Sc. Javier Cepeda Abad (UNTEC)

Ingeniero Civil, M.Sc. Nicolás Vásquez Placencia (UNTEC)

Ingeniero Civil, Tomás Gómez Zavala (UNTEC)

Ingeniero Civil, M. Sc. Gonzalo Yáñez (PUC)

Ingeniero Agrónomo, M.Sc. Eduardo Bustos (PUC)

Agradecimientos

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

Para citar bibliográficamente este estudio, se recomienda hacerlo según el siguiente formato:

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.

Notas:

- Se presentan las definiciones metodológicas finales y los resultados del balance hídrico a escala de cuencas hidrográficas DARH (Departamento de Administración de Recursos Hídricos) para el período 1985-2015.
- Es importante considerar que, pese a que se realizan comparaciones entre el Balance de 1987 y el presente estudio, existen elementos metodológicos en la obtención de valores medios anuales en cada una de las cuencas analizadas que cambian entre ambos estudios, lo que dificulta la interpretación de los resultados, pues la diferencia puede deberse tanto a modificaciones metodológicas como a variaciones reales en el balance.

CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	8
2.	ASPECTOS METODOLÓGICOS	9
2.1.	Cambios en Modelación Hidrológica	9
2.2.	Cambios en las forzantes meteorológicas	10
2.3.	Cambios en la Evaluación de Potenciales Impactos del Cambio Climático	13
3.	BALANCE HÍDRICO EN PERÍODO HISTÓRICO.....	16
3.1.	Calibración de cuencas en régimen natural.....	17
3.2.	Regionalización de parámetros.....	20
3.3.	Balance Hídrico en período 1985-2015 para cuencas DARH	21
3.4.	Comparación con Balance 1987.....	23
4.	BALANCE HÍDRICO FUTURO EN PERÍODO 2030-2060	26
5.	PROYECTO SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO	31
6.	CONCLUSIONES.....	32
5.	REFERENCIAS.....	33

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objetivo general el aplicar la metodología desarrollada en el proyecto de actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2017) en las cuencas de las macrozonas Norte y Centro. Dicha metodología contempla una modelación hidrológica usando el modelo de base física Variable Infiltration Capacity (VIC) como herramienta de base para la estimación de flujos y variables de estados fundamentales del sistema hidrológico (caudales, evapotranspiración, infiltración y recarga, entre otras) a partir de forzantes meteorológicas (temperatura del aire, precipitación, radiación, velocidad del viento, y humedad relativa).

Producto de una revisión de resultados y atendiendo las necesidades de implementar la metodología propuesta en DGA (2017) en un número mayor de cuencas, se realizaron en este proyecto una serie de modificaciones en los métodos utilizados en distintos componentes de la metodología del balance hídrico. Respecto a los componentes que se derivan a través del modelo hidrológico pese a que se probó en las primeras fases del proyecto un nuevo modelo hidrológico (NOAH-MP) se concluyó que no había mejoras importantes en la representación de los procesos hidrológicos por lo que se mantuvo el uso del modelo VIC. Se desarrollaron, adicionalmente, los métodos de calibración del modelo en cuencas en régimen natural y el método de regionalización de los parámetros del modelo para todos los pixeles que se encuentran en la zona en estudio, en particular en las cuencas identificadas por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH). La metodología desarrollada considera la caracterización de componentes del balance no incluidos en el modelo hidrológico VIC para incluir las demandas de riego en las zonas agrícolas y el aporte de recursos de glaciares.

El estudio también consideró una revisión e introducción de mejoras a la base de información de forzantes meteorológicas para el período histórico 1985-2015 y desarrolló la metodología para la obtención de las proyecciones futuras de las forzantes meteorológicas en el período 2030-2060, utilizando el escenario de cambio climático RCP8.5. La información meteorológica base utilizada es el producto CR2MET, obtenido de DGA (2017). A esta base de datos se le aplicaron múltiples correcciones y actualizaciones que han permitido obtener mejores indicadores de validación. En la práctica, la mejora en la calidad de las forzantes meteorológicas se traduce en mejor información de entrada para los modelos hidrológicos, y, por lo tanto, una mayor fidelidad de las simulaciones hidrológicas.

En este estudio, para cuantificar los impactos del cambio climático en procesos hidrológicos, se utilizaron cuatro modelos de circulación global (GCM, *General Circulation Model*, por sus siglas en inglés) en conjunto con el producto meteorológico base y la técnica de escalamiento estadístico Quantile Delta Mapping (Cannon et al., 2015) obteniéndose sets de datos meteorológicos que incorporan el efecto del cambio climático. La utilización de estos sets de datos, sobre los modelos hidrológicos ya calibrados, permitió estimar los impactos del cambio climático, proyectado por los modelos usados, sobre el balance hídrico nacional.

Se presenta en este informe una síntesis de los principales aspectos metodológicos incluyendo resultados intermedios asociados al ejercicio de calibración y regionalización y de los resultados del balance hídrico, a escala de cuencas hidrográficas reconocidas en el DARH, para el período 1985-2015.

Se incluye la comparación entre los Balances de 1987 y el Balance actual y se presentan, además, los potenciales impactos del cambio climático evaluados en el escenario RCP8.5 para cuatro modelos de circulación general, en el periodo 2030 a 2060. Finalmente se muestran las principales conclusiones y recomendaciones originadas en este estudio.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

La Figura 1 permite visualizar la metodología planteada para llevar a cabo la actualización del balance hídrico en Chile (DGA, 2017). Esta metodología se compone de los siguientes componentes:

- Caracterización de las cuencas: incluye atributos geomorfológicos, geológicos, hidrológicos y de cobertura vegetal
- Generación de los forzantes meteorológicos: incluye series de tiempo tri-horarias de precipitación, temperaturas extremas, velocidad del viento y radiación
- Modelación hidrológica con modelo VIC en cuencas sin intervención y posteriormente regionalización a todas las cuencas del área de estudio. Incluye también la estimación de extracción para riego y aporte de derretimiento de glaciación.
- Validación de procesos hidrológicos a través de métodos complementarios: incluye validación de ET, SWE y recarga de acuíferos.
- Análisis de impactos del cambio climático incluyendo 4 modelos de circulación general.

A partir del análisis de los resultados obtenidos en las cuencas piloto (DGA, 2017) se realizaron mejoras en la modelación hidrológica, en las forzantes meteorológicas y en aspectos relativos al impacto del cambio climático, los que se resumen a continuación.

2.1. CAMBIOS EN MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Los ajustes planteados en lo que a modelación hidrológica se refiere fueron los siguientes:

- Se cambia el método de optimización global basado en estadística diaria a través del algoritmo SCE-UA (Duan *et al.*, 1994) mejorándose el rendimiento respecto a modelación del estudio DGA (2017).
- Se efectúan pruebas con el modelo hidrológico NOAH-MP, para intentar resolver problemas de flujos subterráneos detectados principalmente en la zona norte, desestimándose su uso para el presente proyecto pues no se observan mejoras sustanciales.
- Se obtiene el aporte de cada glaciar individual, obteniendo su flujo en el centroide de éste.
- Se revisan técnicas de estimación de parámetros en cuencas no controladas mediante estimación a priori (según valores de la literatura) o a través de técnicas de transferencia de parámetros (proximidad espacial, similitud física y/o climática y clasificación de píxeles).

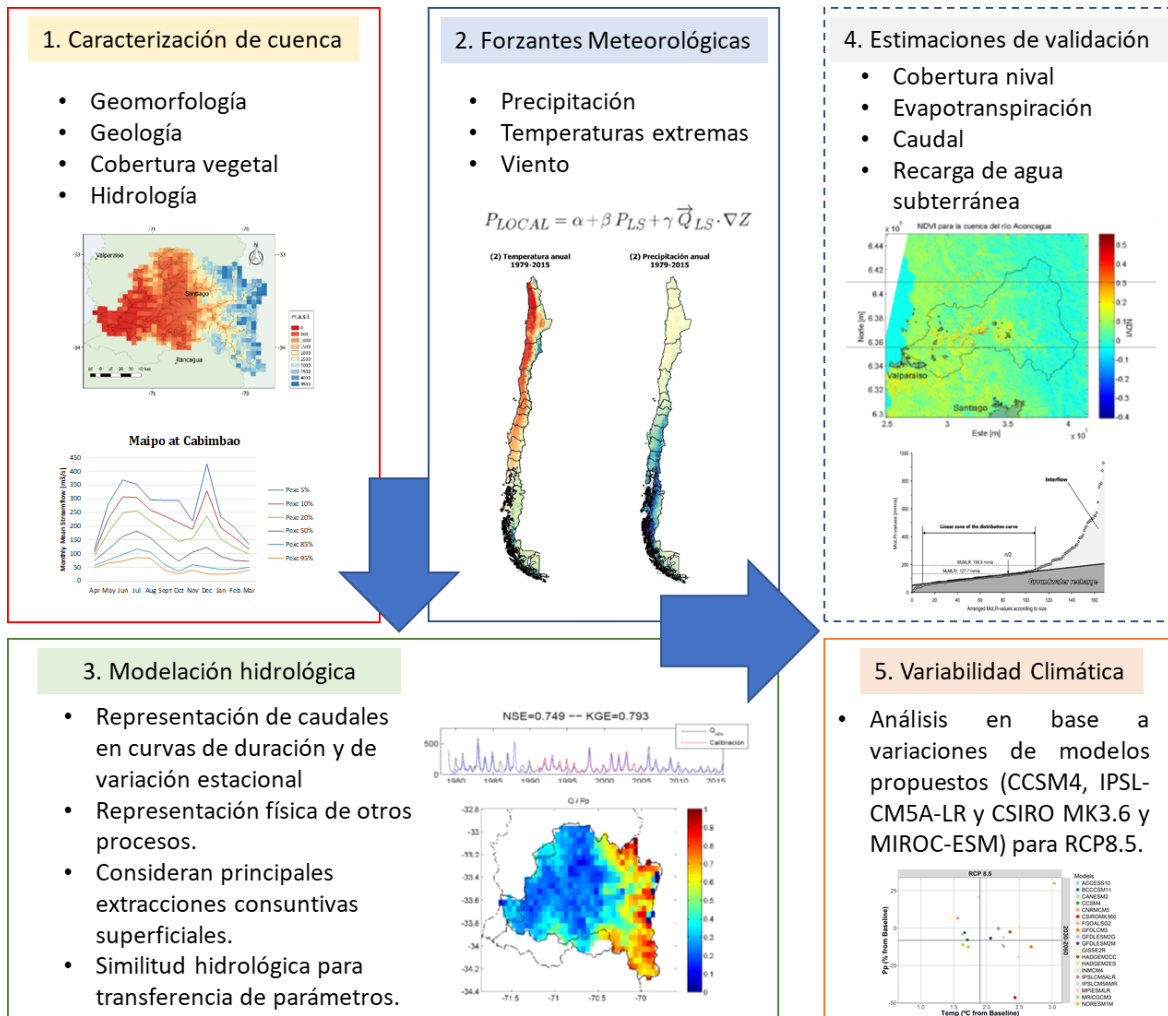


Figura 1: Diagrama conceptual del resumen metodológico para el Balance Hídrico. Fuente: DGA (2017).

2.2. CAMBIOS EN LAS FORZANTES METEOROLÓGICAS

Constatando dificultades o falta de representatividad de procesos hidrológicos en algunas de las cuencas ubicadas en las macrozonas norte y centro, se reevalúan las forzantes de precipitación y temperatura, lo que da origen a un nuevo producto para ambas variables. Además, se genera un producto de humedad relativa. En la Figura 2 se visualizan, a modo de ejemplo, las estaciones pluviométricas utilizadas para desarrollar el producto en la zona de interés y el número de años con información que éstas poseen.

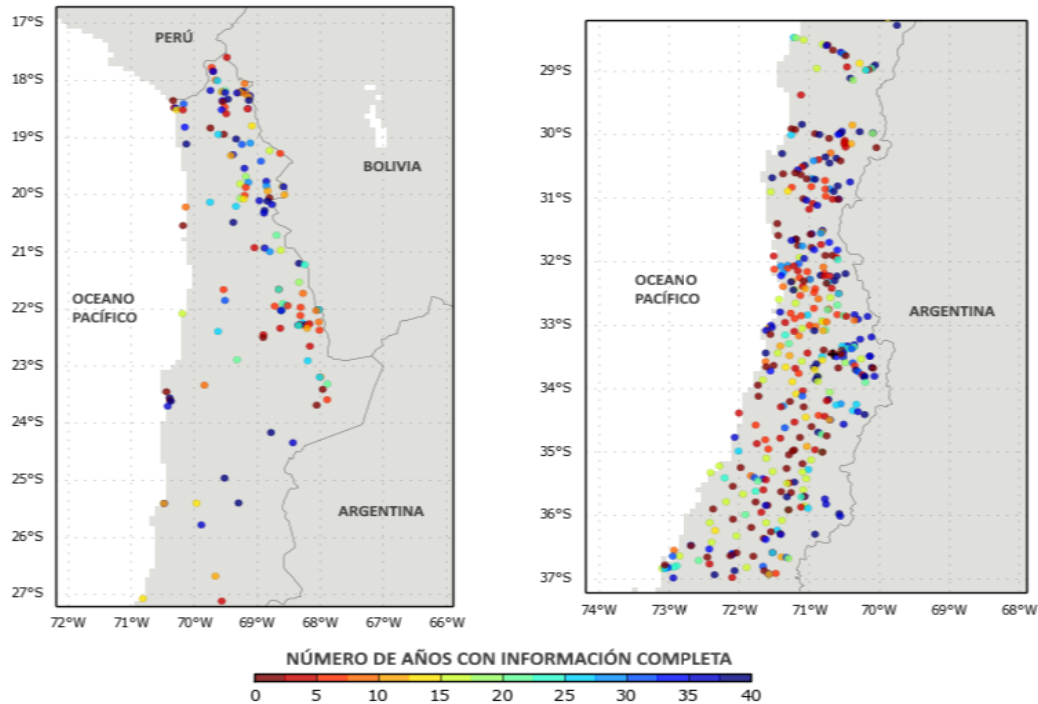


Figura 2: Ubicación espacial de las estaciones con registro pluviométrico relevantes para la zona de estudio. Se señala número de años con información completa. Fuente: Adaptado de DGA (2017).

Además de las observaciones se utilizan productos satelitales que permiten mejorar la comprensión de procesos biofísicos de las superficies continentales, los océanos y la atmósfera, y reanálisis atmosféricos que permitieron generar del producto meteorológico grillado CR2MET. En particular, en la fase anterior se utilizó el reanálisis atmosférico ERA Interim (Dee *et al.*, 2011), desarrollado por el ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*)¹. Este reanálisis se desarrolla en una grilla nativa de aproximadamente 80 Km que cubre todo el globo, y con 60 niveles verticales diferentes. ERA-Interim abarca el periodo 1979 hasta el presente, a una escala temporal tri-horaria.

En la actualidad se encuentra parcialmente disponible un nuevo producto desarrollado por ECMWF, denominado ERA5, la quinta generación de reanálisis producido por la ECMWF, que considera una grilla nativa de aproximadamente 30 kilómetros. Además del incremento en resolución espacial, ERA5 presenta otros avances respecto de ERA Interim, tanto en la conceptualización de procesos físicos atmosféricos como en la integración de nuevas observaciones. Al momento de desarrollo del presente proyecto, ERA5 se encontraba en proceso de cálculo, estando disponible datos solo para el periodo 2010-2016. Sin embargo, dadas las mejoras significativas encontradas en análisis preliminares, se estimó conveniente evaluar la incorporación de esta información lo que dio origen a la creación del producto ERAblend.

En la Figura 3 se visualiza la mejor resolución del nuevo producto para la variable temperatura media anual en el período 1979 a 2016, en relación al presentado en la etapa anterior del estudio (DGA, 2017).

¹ <https://www.ecmwf.int/>

En la precipitación, de manera similar a la variable temperatura, se incorporó el nuevo producto ERAblend. Además, se agregaron predictores adicionales (precipitación convectiva y precipitación de gran escala) se incluyó información de meses anterior y posterior a la base de datos para el cálculo de modelos de cada unidad latitudinal y se incorporó un parámetro de filtro de adaptación con el objetivo de mejorar la representatividad de ocurrencia. Todas estas medidas permitieron obtener el nuevo producto grillado a escala trihoraria de esta variable, cuyo promedio anual en el período 1979 a 2016, se presenta en la Figura 4, donde se compara con los datos observados.

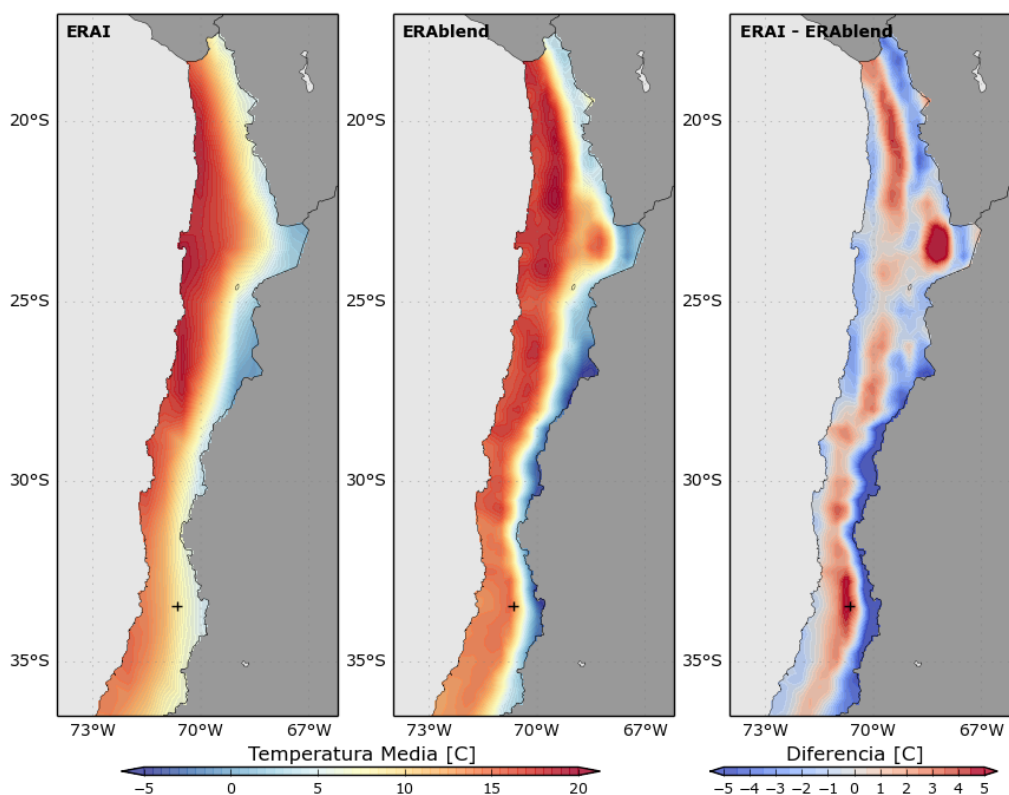


Figura 3: Temperaturas medias anuales estimadas por cada producto de reanálisis en el periodo 1979-2016. El panel izquierdo muestra los valores estimados por el producto de reanálisis ERAI; el central, las temperaturas estimadas por el nuevo producto generado ERAblend; el panel derecho muestra las diferencias entre los valores estimados por cada producto, donde se observan claras modificaciones en algunos sectores.

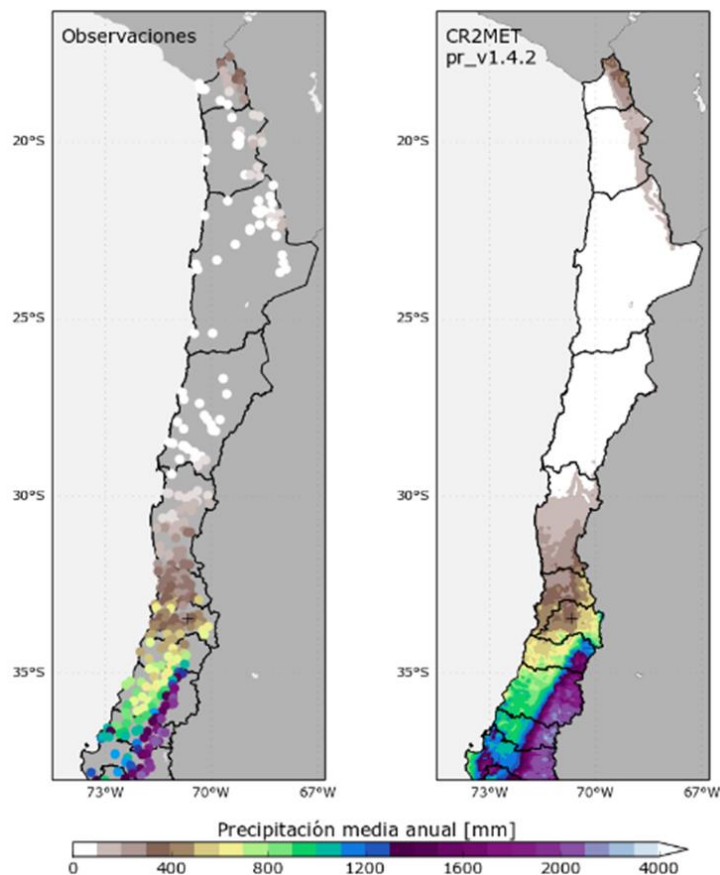


Figura 4: Precipitación anual media para el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA (panel izquierdo) y del producto CR2MET (derecha). Notar que la escala de colores no es lineal.

2.3. CAMBIOS EN LA EVALUACIÓN DE POTENCIALES IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Las simulaciones hidrológicas futuras realizadas en este estudio consideran el escenario RCP8.5 y un subconjunto de cuatro GCM de entre varios de modelos evaluados en CMIP-5. La elección del escenario RCP8.5, considerando una trayectoria de emisiones de gases de efecto invernadero con tasas similares a las actuales, busca establecer un límite superior en los efectos de cambio climático. Para la selección de los cuatro GCM se aplicaron una serie de criterios, descritos con detalle en DGA (2017). De forma resumida, estos criterios consideran: respuesta regional a modos globales de variabilidad climática (ENSO y SAM); sensibilidad climática y cambios regionales. Se evaluaron los cambios de temperatura y precipitación en Chile entre el periodo 2030-2060 y el período histórico 1985-2015, según el escenario RCP8.5. En la Tabla 1 se presentan los modelos seleccionados para el análisis de los impactos del cambio climático.

Tabla 1: Modelos globales de clima seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en el presente estudio.

Modelo	Institución	Sensibilidad climática
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia.	Baja Extrema
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, USA.	Baja moderada
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan.	Alta moderada
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France.	Alta extrema

Las proyecciones de cambio climático se basan en simulaciones numéricas con GCM que abarcan todo el globo, en grillas generalmente gruesas (mayores a 100 Km). Una evaluación de cambio climático a escala regional, así como el impacto en la hidrología continental, necesita de un método que traduzca información de GCM en efectos regionales. Estos métodos de regionalización se clasifican típicamente en dos familias: dinámicas y estadísticas. Considerando el costo resultados intermedios asociados al ejercicio de calibración y regionalización computacional asociado a la regionalización dinámica, se utilizaron en este estudio métodos estadísticos. Se seleccionó el denominado QDM (*Quantile Delta Mapping*) (Cannon *et al.*, 2016) que preserva los cambios absolutos (utilizados típicamente para temperatura) o relativos (e.g., precipitación) en los cuantiles, corrigiendo al mismo tiempo los sesgos en la distribución de frecuencia de la variable simulada, respecto de la referencia. Esto permite escalar las temperaturas diurnas máxima y mínimas de los GCM seleccionados, así como también escalar la precipitación, tomando como referencia la base de datos utilizada en el proceso de calibración. En la Figura 5 se comparan cambios respecto al período base 1985-2015 de las proyecciones para el período futuro 2030 a 2060 en la media anual de temperatura diurnas máximas y mínimas.

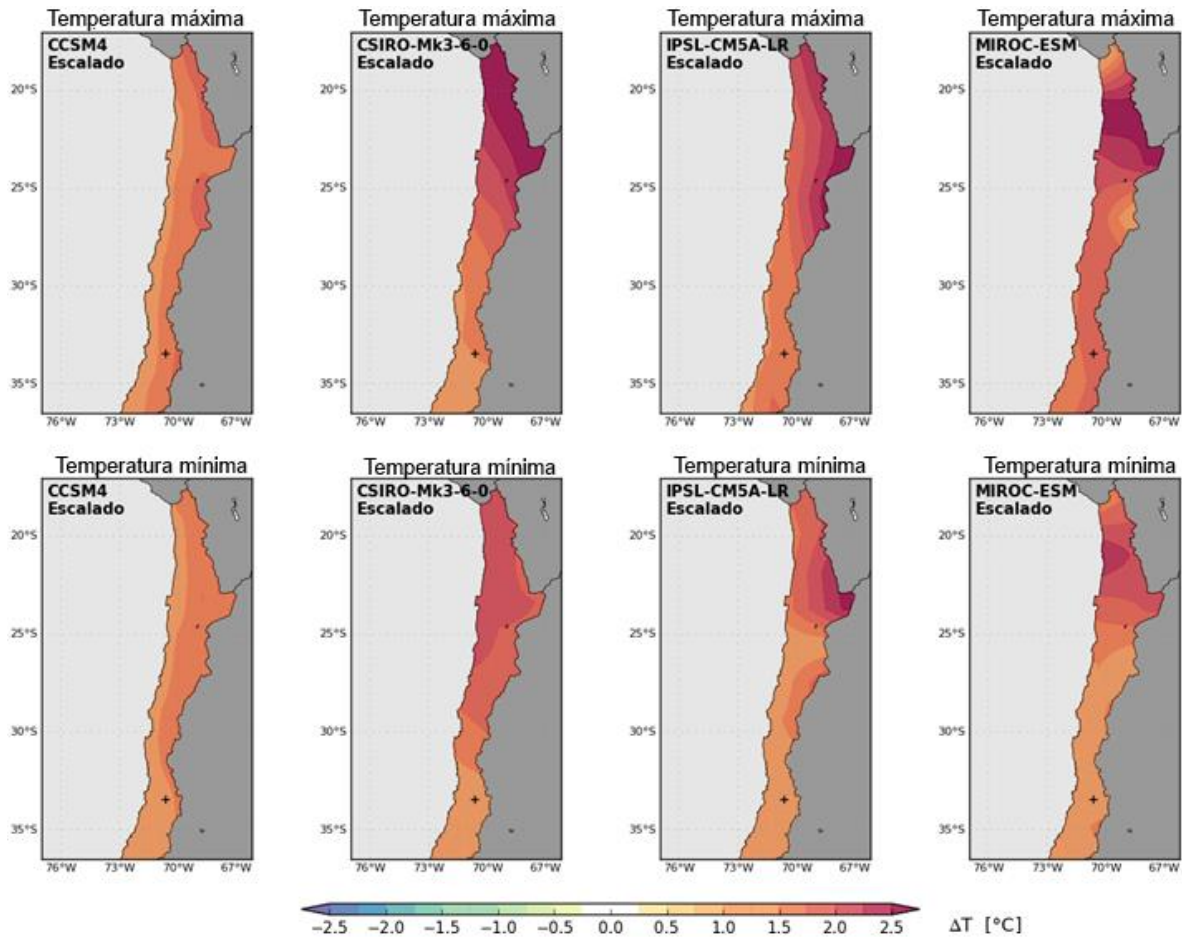


Figura 5: Cambios proyectados por los 4 GCM evaluados en la media anual de temperatura diurnas máximas (paneles superiores) y mínimas (paneles inferiores) hacia 2030-2060, respecto al periodo 1985-2015.

Coherente con los diagnósticos de cambio climático a escala global, según el escenario RCP8.5, en la Figura 5 todos los modelos muestran un aumento de temperatura en la zona de estudio hacia 2030-2060, en torno a 1°C y 2,5°C. El aumento de temperatura máxima es levemente superior que el de temperatura mínima. Se pueden constatar, también, cambios de mayor magnitud en la zona norte respecto del centro del país. A pesar de la baja resolución de los GCM, se distingue en algunos modelos (sobre todo en CCSM4) un aumento mayor en la zona cordillerana, respecto de las zonas costeras, coherente con la amplificación de cambios de temperatura en los continentes observado en otras regiones del globo. Las proyecciones muestran, también, algunas diferencias significativas entre modelos. En particular, el modelo CCSM4 prevé cambios de temperatura de menor magnitud respecto de los otros tres GCM evaluados.

En la Figura 6 se visualizan los cambios absolutos proyectados en la precipitación anual promedio respecto del período 1985-2015 una vez realizado el escalamiento estadístico. En este caso, la metodología de regionalización aplicando variaciones por cuantil, conserva los cambios relativos en cada percentil donde efectivamente se registra precipitación. Esto se traduce en que no se conserven los cambios proyectados en la media. Los cambios proyectados son heterogéneos entre los modelos

evaluados. En los sectores del Norte Grande y Norte Chico no se observa una coherencia entre los modelos, con aumentos o disminuciones de precipitación, dependiendo del modelo; en cambio, desde la Región Metropolitana hacia el sur dominan las tendencias negativas. En la parte central de Chile, se prevé una disminución de precipitaciones para el periodo 2030-2060, con magnitudes que van desde 5-10% (CSIRO-Mk3.6) hasta 20-25% (IPSL-CM5A-LR). Algunos modelos muestran cambios relativos de mayor magnitud en las zonas semiáridas y áridas del norte del país. Sin embargo, la significancia de estos cambios debe interpretarse con cautela dado los valores climatológicos cercanos a cero en esas zonas.

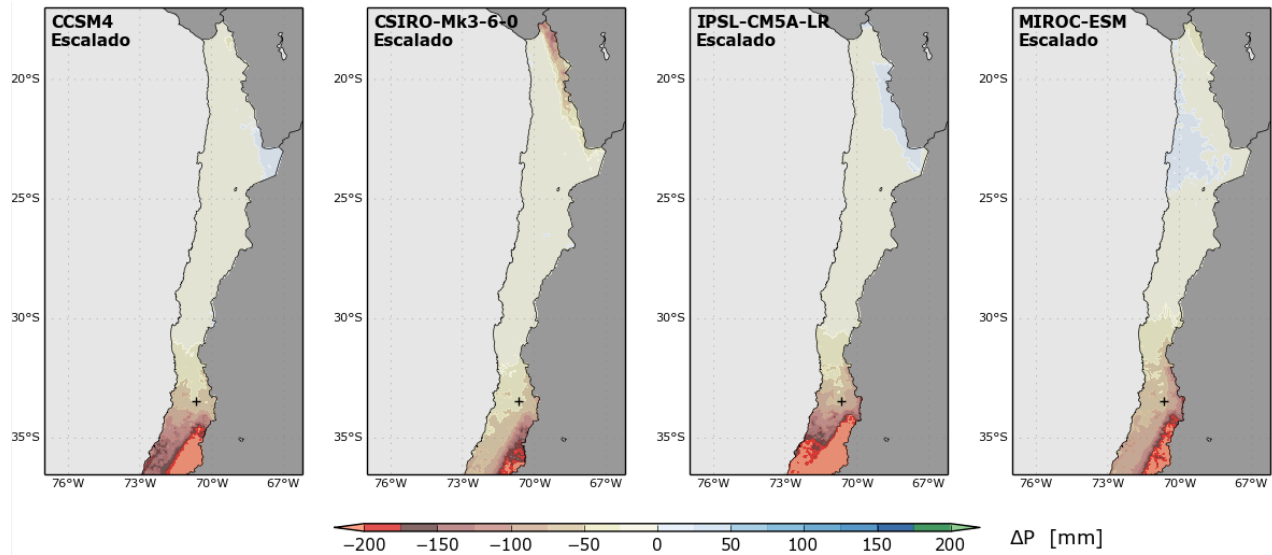


Figura 6: Cambios en la precipitación anual promedio proyectado hacia 2030-2060 con respecto al periodo 1985-2015.

Los cambios de precipitación absolutos ilustran el impacto de las proyecciones simuladas ajustadas a la climatología de referencia. Así, la disminución de precipitación en Chile central se traduce en montos sustantivos en zonas cordilleranas, con pérdidas anuales mayores a 200 mm en algunos casos. En el norte se aprecia, en algunos casos, aumentos de 0 a 25 mm en la precipitación media anual. Estos cambios, si bien moderados en magnitud, pueden producir cambios importantes en la hidrología de la zona.

3. BALANCE HÍDRICO EN PERÍODO HISTÓRICO

Para realizar el balance hídrico en las cuencas de las macrozonas en estudio se consideraron dos etapas. En la primera, se calibró el modelo hidrológico VIC en cuencas en régimen natural o con poca intervención usando la base de datos de cuencas CAMELS-CL (Álvarez-Garretón *et al.*, 2018). La segunda etapa contempló la modelación de las macrozonas de interés regionalizando los parámetros del modelo VIC. Posteriormente se obtuvo el balance hídrico en las cuencas DGA-CIREN definidas por alguna estación fluviométrica.

3.1. CALIBRACIÓN DE CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL

En el presente trabajo, se consideran cuencas en régimen natural aquellas que cumplen con las siguientes características:

- No poseen embalses ni trasvases de caudal.
- La suma del caudal asociado a derechos de agua consuntivos superficiales existentes en la cuenca debe ser menor al 5% del caudal medio anual.
- En el caso de existir derechos de agua no consuntivos al interior de la cuenca, estos deben restituirse aguas arriba de la estación fluviométrica.
- Adicionalmente, para calibrar los parámetros se analiza la disponibilidad de observaciones de caudales dentro del período de estudio, requiriendo que sean al menos cuatro años de registro.

En la zona en estudio se detectaron las 43 cuencas mostradas en la Figura 7, que satisfacían los criterios especificados. Se evidencia la baja superficie que cubren las cuencas calibradas respecto a la zona de estudio, así como también que existen pocas estaciones fluviométricas sin intervención en la macrozona norte. Esto impacta en los resultados al momento de regionalizar, pues se debe abarcar una zona muy extensa y compleja en términos hidrológicos. Los índices de eficiencia KGE y el índice NSE asociado se muestran en la Figura 8, donde se aprecia la distribución espacial de los resultados. En general, el índice KGE es satisfactorio en la zona centro, salvo para la estación fluviométrica ubicada en el Estero Chimbarongo. Adicionalmente, se constata que cerca del 50% de las cuencas tienen índices de NSE superior a 0,5, mientras que cerca del 80% tiene un índice KGE mayor a 0,5.

Los resultados del modelo VIC fueron validados respecto un componente claves en el balance hidrológico cual es la recarga de aguas subterráneas. Para esto, se estimó la recarga según los métodos MoMRLr y RORA (Rorabaugh, 1964), los que se contrastaron con la estimación de recarga del modelo VIC, el cual se basa en un balance de masa en el tercer estrato de suelo.

Dado que el modelo VIC no tiene incorporada la modelación de glaciares, se implementó una metodología cuyo objetivo fue estimar series de caudales glaciar, en base a las forzantes meteorológicas disponibles. En este estudio se optó por una aproximación simple al balance radiativo, debido a las limitaciones existentes en la recolección de los datos necesarios para la implementación total del método. Dicha modelación se validó a base de información de evolución del área glaciar usando dos inventarios glaciares proporcionados por la DGA (1984 y 2017), en donde los valores de área glaciar fueron obtenidos en base a imágenes satelitales que proveen una idea de la evolución glaciar, aunque gran parte de las imágenes limitada a la disponibilidad de éstas para el período de estudio. En base al estudio DGA (2011) se pudieron establecer distintas tasas de retroceso ($\text{Km}^2/\text{año}$) para distintos glaciares de Chile, intentando cuantificar una reducción promedio por región. Se ocuparon las tasas de retroceso lineal como valores de contraste para la calibración del comportamiento glaciar, aproximando a cada glaciar la tasa de retroceso glaciar registrada más próxima a su ubicación, u ocupando una tasa de retroceso promedio regional, especialmente en el Norte Grande, donde existen menos glaciares. La

tasa de retroceso se basa en los registros de áreas glaciares para los cuerpos glaciares más documentados. Las tasas de retroceso ocupadas en la metodología son concordantes con las mencionadas en Barcaza et al. (2017).

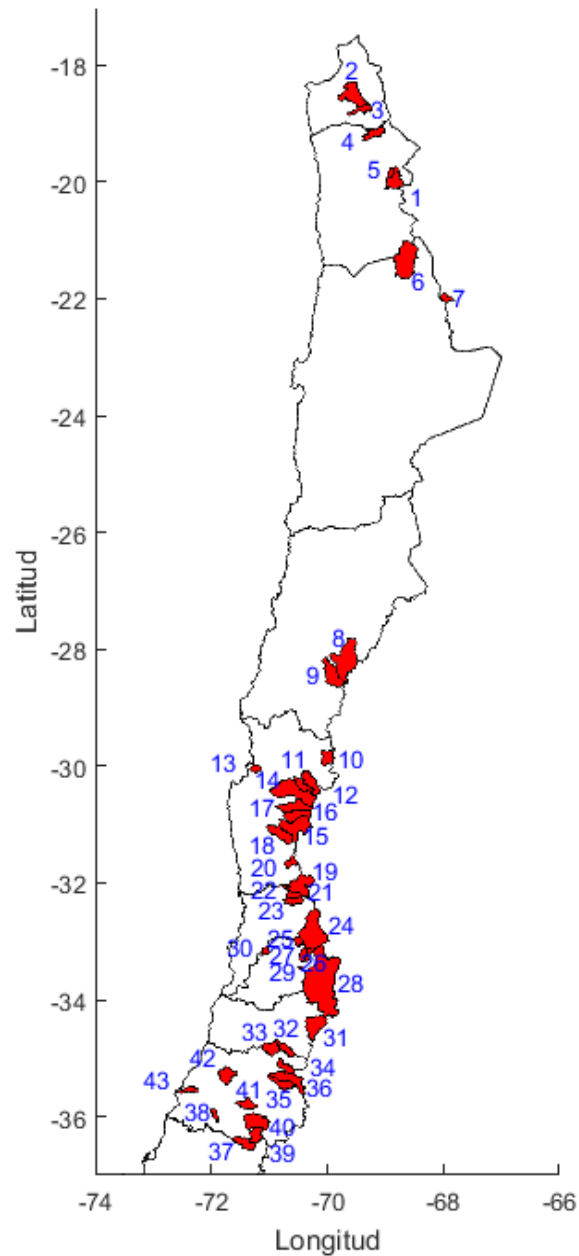


Figura 7: Cuencas en régimen Natural (o poco intervenidas) consideradas en el proceso de calibración. Los números permiten individualizar la cuenca considerada.

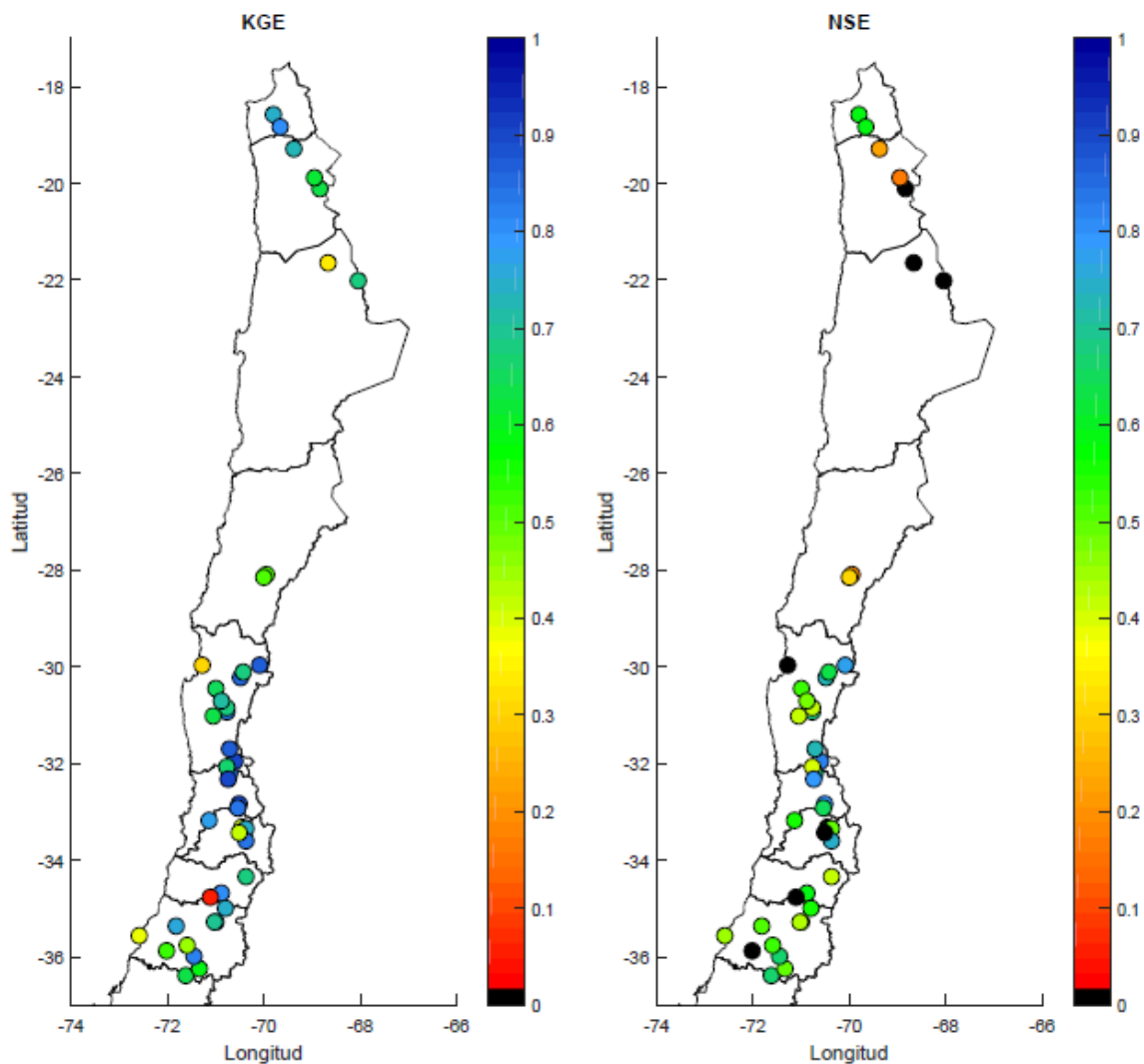


Figura 8: Índices KGE y NSE para el caudal según el set de parámetros calibrado, según KGE, en cada cuenca.

En cuencas que no se encuentran en régimen natural, debido a las extracciones de aguas superficiales con fines agrícolas, se implementó una metodología que considera la estimación de las demandas evapotranspirativas de los cultivos (Evapotranspiración potencial, E_p) así como la estimación de la evapotranspiración real (E_T), ambas calculadas por VIC. La diferencia entre estas dos variables representa el agua que debe ser suministrada al cultivo para que crezca sin estrés hídrico. Para obtener los pixeles que poseen cultivos se utilizó el análisis de imágenes Landsat realizado por Zhao et al. (2016), donde se estima el uso de suelo para todo Chile con resolución espacial de 30 metros.

Para cuantificar el uso consuntivo de agua con un origen distinto al agrícola, se utilizó la información recopilada en el estudio DGA (2017), donde se estiman las demandas asociadas a Minería, Agua Potable y Agua Potable Rural. Debido a que no se cuenta con series temporales de dicha información, en el presente estudio solo se utilizó como referencia para complementar los resultados obtenidos.

3.2. REGIONALIZACIÓN DE PARÁMETROS

La regionalización de parámetros entre cuencas calibradas y pixeles se lleva a cabo de acuerdo a los siguientes pasos

- Paso 1: Clasificación de píxeles según atributos físicos o meteorológicos.
- Paso 2: Asignación de cuencas en régimen natural a una clase de píxeles.
- Paso 3: Asignación de cuencas a cada pixel según clima, atributos físicos o cercanía espacial.

Para la regionalización, se desestimaron los parámetros de cuatro cuencas: la cuenca río Siloli antes B.T. Fcab. (BNA_{CAMELS} 2103014) debido a que los registros fluviométricos no son consistentes en el tiempo; las cuencas río Toro antes junta río La Laguna (4302001) y estero Arrayán en la Montosa (BNA_{CAMELS} 5722001), pues el modelo no fue capaz de reproducir el caudal observado en esas estaciones; y la cuenca Estero Chimbarongo en Convento Viejo (BNA_{CAMELS} 6033001), cuya información histórica se considera dudosa pues entrega valores de caudales específico muy altos respecto al resto de las cuencas en la región. Una vez realizada la transferencia de parámetros del modelo VIC, se corroboró la estimación de caudales medios observados versus los simulados en algunas cuencas específicas de la base de datos CAMELS-CL² (Álvarez *et al.*, 2018) donde el grado de intervención se reporta inferior al 10% y que no poseen embalses. En la Figura 9 se muestra la comparación entre caudales medios diarios modelados y registrados en el período concurrente en 91 estaciones fluviométricas de las macrozonas Norte y Centro, donde se muestra los códigos BNA de algunas cuencas en desembocadura.

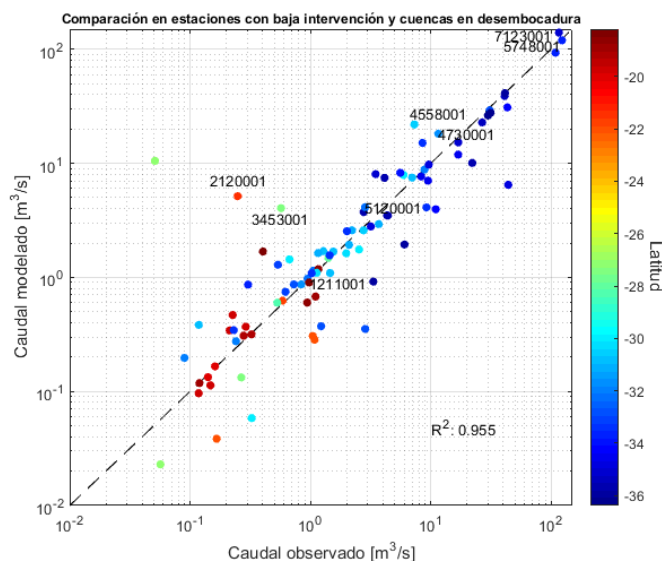


Figura 9: Comparación entre el caudal medio observado y el modelado por VIC (incorpora demanda de riego) en cuencas con bajo índice de intervención según CAMELS-CL.

Los resultados para las cuencas en desembocadura muestran que existe una sobreestimación en los caudales en algunas de las cuencas de la zona norte del país (norte del Aconcagua). Lo anterior puede

² <http://www.cr2.cl/camels-cl/>

atribuirse a: limitaciones del modelo VIC para representar algunos de los componentes del balance hídrico más relevantes en las zonas bajas de las cuencas; limitaciones en el proceso de regionalización y la generación de forzantes meteorológicas que es mayor en estas cuencas dado la mayor ausencia de observaciones tanto meteorológicas como fluviométricas; las estaciones fluviométricas no incluyen los caudales de base que fluyen subterráneamente y que de acuerdo a la metodología usada se suman a los caudales generados por escorrentía superficial o , por último, no se han considerado extracciones de agua no asociadas a agricultura que pueden tener valores importantes respecto de la disponibilidad de recursos en estas mismas cuencas.

3.3. BALANCE HÍDRICO EN PERÍODO 1985-2015 PARA CUENCAS DARH

Considerando la transferencia de parámetros del modelo VIC desde las cuencas calibradas en base a los criterios de clasificación de pixeles según atributos físicos y una asignación cuenca-píxel por similitud hidrológica se ejecutó el modelo VIC en las macrozonas norte y centro y se agrupó la información en las 67 cuencas denominadas DARH (DGA-CIREN, 2014) de la zona de estudio, agregando de manera apropiada los flujos de ingresos y egresos de agua de distintos pixeles. Adicionalmente a los resultados del modelo VIC se modifica el flujo de ET y la escorrentía final de la cuenca al considerar los componentes adicionales asociados al riego y aporte de caudal por derretimiento de glaciares.

En la Figura 10 se muestra el análisis adimensional del balance hídrico usando la escorrentía neta de cada cuenca, que equivale a la escorrentía modelada según VIC, agregando las estimaciones de caudal por derretimiento de glaciares y restando las de riego. Lo mismo se muestra para la evapotranspiración, donde la evapotranspiración neta corresponde a lo modelado por VIC más la influencia producto del riego. Se aprecia que algunas cuencas de la zona costera del extremo norte del país tienen mayor escorrentía que lo que corresponde lo que se atribuye a que tanto la precipitación media en estos polígonos es muy baja (entre 2 y 8 mm/año) y a las condiciones de borde de las humedades subterráneas, explicando en gran parte el error de cierre del balance. En el panel inferior de la Figura 10, se muestra el análisis de Budyko, que indica que todas esas cuencas son altamente áridas (valores de ETP/Pp muy altos) con patrones de comportamiento similar en cuencas ubicadas en latitudes similares.

En la Tabla 3 se aprecian los valores de todas las componentes del balance para las cuencas principales de la zona de estudio, para el denominado período histórico 1985-2015. Se aprecia que existe una relación latitudinal entre el factor de escorrentía y la precipitación media anual. Adicionalmente, el error de cierre es cercano a cero en casi todas las cuencas, salvo en algunas cuencas pertenecientes a la macrozona Norte en las que la precipitación es muy baja (menor a 5 mm) donde las condiciones inicial y final de la humedad del suelo provocan grandes cambios en el almacenamiento.

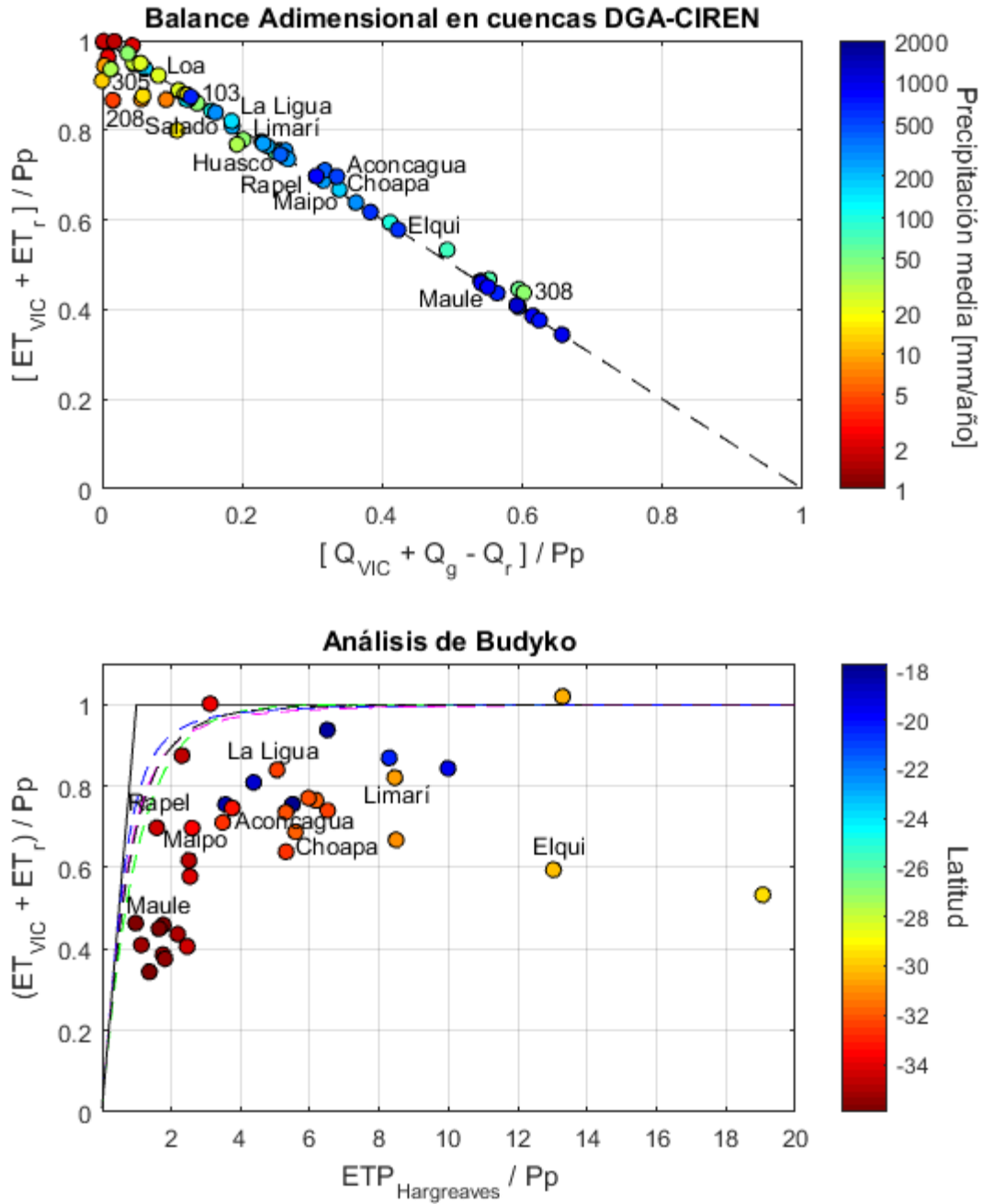


Figura 10: Panel superior: Balance adimensional para las cuencas DARH (DGA-CIREN, 2014). Los números corresponden al código DARH de algunas cuencas. Panel Inferior: Análisis de Budyko. Q_r corresponde al caudal de riego, Q_{VIC} corresponde al caudal generado por el modelo VIC, mientras que Q_g corresponde a la estimación de aporte glacial. Para la evapotranspiración (ET), los subíndices representan los flujos equivalentes. ETP corresponde a la evapotranspiración potencial según Hargreaves.

Tabla 2: Flujos estimados por VIC (Q y ET) y de manera externa (Riego, Glaciar y EP) para las principales cuencas DARH (DGA-CIREN, 2014). Pp: Precipitación, Q: Escorrentía, ET: Evapotranspiración, ETP: Evapotranspiración potencial, T: Temperatura. Promedios obtenidos entre 01/04/1985 y 31/03/2015. El error de cierre se calcula como (Pp-Q-ET)/Pp.

ID DARH	Nombre	Pp	Q (VIC)	ET (VIC)	ET (Riego)	Q (Glaciar)	Recarga (VIC)	ETP (VIC)	ETP Hargreaves	T	Error
1501	Río Lluta	174,2	14,0	159,9	3,4	0,0	13,5	1625	1133	6,8	0%
1504	Río San José	43,4	11,9	31,6	2,0	0,0	11,7	1807	1268	11,5	0%
1507	Río Camarones	40,9	5,6	35,1	0,0	0,0	5,2	1837	1321	11,2	0%
201	Río Loa	23,3	2,3	21,0	0,4	0,0	2,1	2002	1490	11,8	0%
305	Río Copiapó	34,3	7,9	24,7	7,5	0,0	7,5	1918	1439	12,5	5%
307	Río Huasco	65,3	23,5	41,7	7,3	0,0	21,4	1816	1429	12,9	0%
403	Río Elqui	99,8	57,2	43,1	16,2	0,0	54,3	1717	1300	11,3	-1%
405	Río Limarí	160,9	87,7	74,1	57,9	0,0	83,5	1614	1360	12,8	-1%
407	Río Choapa	243,6	93,4	151,0	16,5	0,0	91,9	1640	1361	12,5	0%
501	Río Ligua	283,0	78,9	204,5	33,1	0,0	77,0	1513	1431	13,7	0%
599	Río Petorca	265,5	76,3	189,3	6,0	0,0	74,3	1593	1409	13,5	0%
503	Río Aconcagua	380,2	227,7	153,2	116,8	9,9	223,5	1453	1327	11,9	0%
1300	Río Maipo	498,4	308,7	190,6	156,5	14,9	283,5	1370	1300	11,9	0%
600	Río Rapel	825,1	515,6	311,8	263,6	0,3	493,2	1283	1307	12,1	0%
701	Río Mataquito y afluentes	1126,4	856,9	271,5	190,1	0,0	824,8	1304	1287	11,3	0%
703	Río Maule	1332,4	911,8	425,1	192,4	0,1	886,9	1276	1305	11,5	0%

3.4. COMPARACIÓN CON BALANCE 1987

En las Figura 11 y Figura 12 se comparan los productos para la precipitación media anual y temperatura media anual promedio, respectivamente. Se observan diferencias importantes en la precipitación de sectores cordilleranos y el análisis estadístico de cada capa ráster indica una diferencia promedio de 115 [mm/año] menos en el periodo climatológico más reciente respecto del estudio DGA (1987). Esta disminución puede atribuirse a un cambio climático incipiente (Boisier *et al.* 2018; Carrasco, 2005; Pellicciotti *et al.*, 2007; Falvey y Garreaud, 2009; Quintana y Aceituno, 2012) y a cambios en la metodología utilizada en ambos casos. En cuanto a la temperatura, se aprecia mayoritariamente un incremento de éstas, aunque, en las zonas costeras y especialmente en el desierto de Atacama, las temperaturas son más frías que hace 30 años. Este calentamiento general y enfriamiento en las zonas costeras es consistente con las tendencias descritas por Falvey y Garreaud (2009). Estadísticamente, se tiene temperaturas medias más cálidas en la actualización del balance, mientras que la temperatura mínima modelada es considerablemente más fría, lo que puede también atribuirse a las diferencias en metodología.

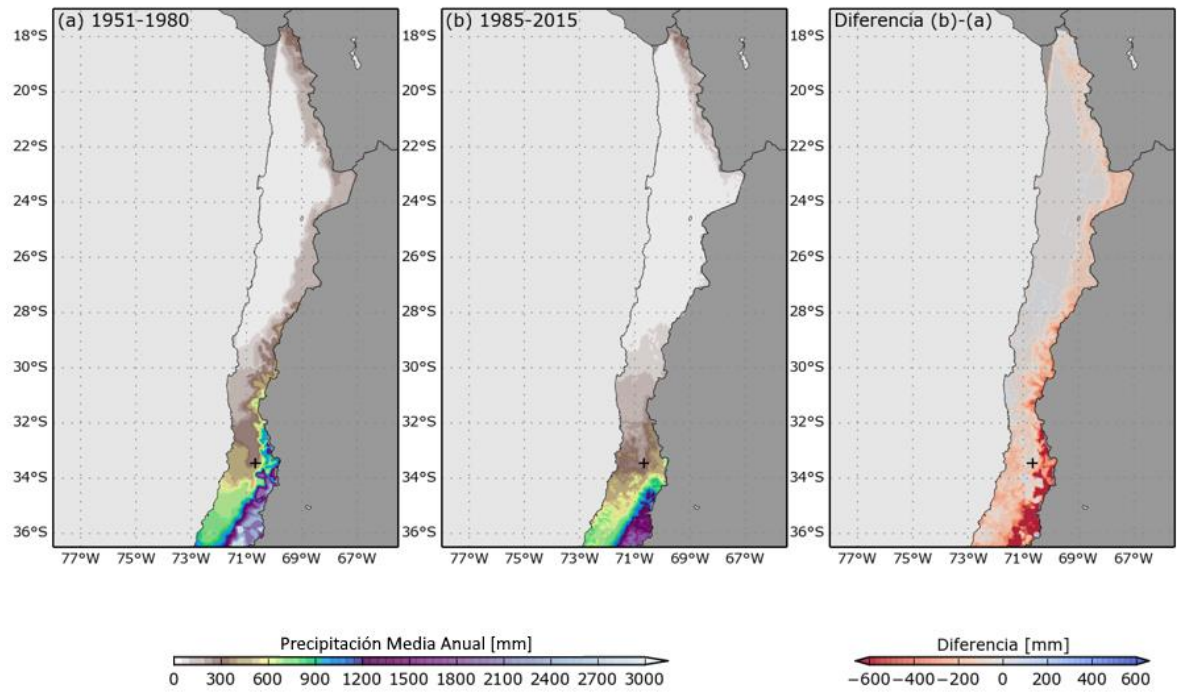


Figura 11: Comparación entre la precipitación media anual estimada en el balance hídrico 1987 y la versión 1.4.2 del producto desarrollado en la presente consultoría. Fuente: DGA (2017).

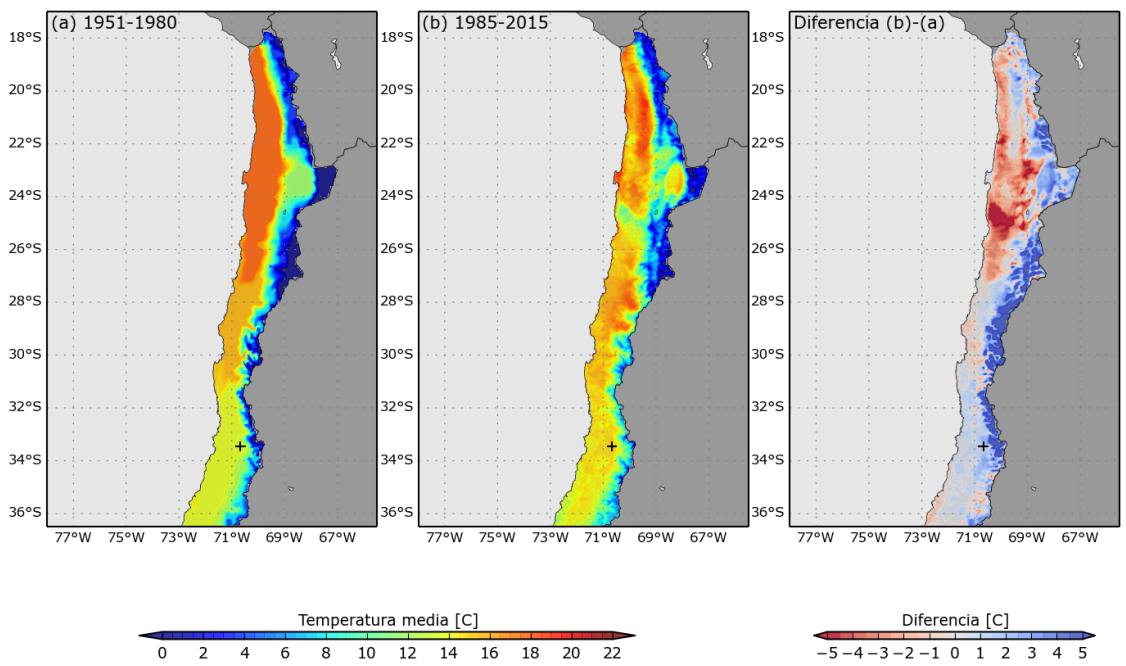


Figura 12: Comparación entre la temperatura media anual estimada en el balance hídrico 1987 y la versión 1.4.2 del producto desarrollado en la presente consultoría.

Desde el punto de vista del Balance Hídrico, en la Figura 13 se visualizan los distintos componentes del balance hídrico a nivel de cuencas, entre los periodos temporales (1950-1980) y (1985-2015). Se constata principalmente variaciones negativas de precipitación y una significativa disminución de la escorrentía junto a un aumento de la evapotranspiración desde Aconcagua hasta el Maule.

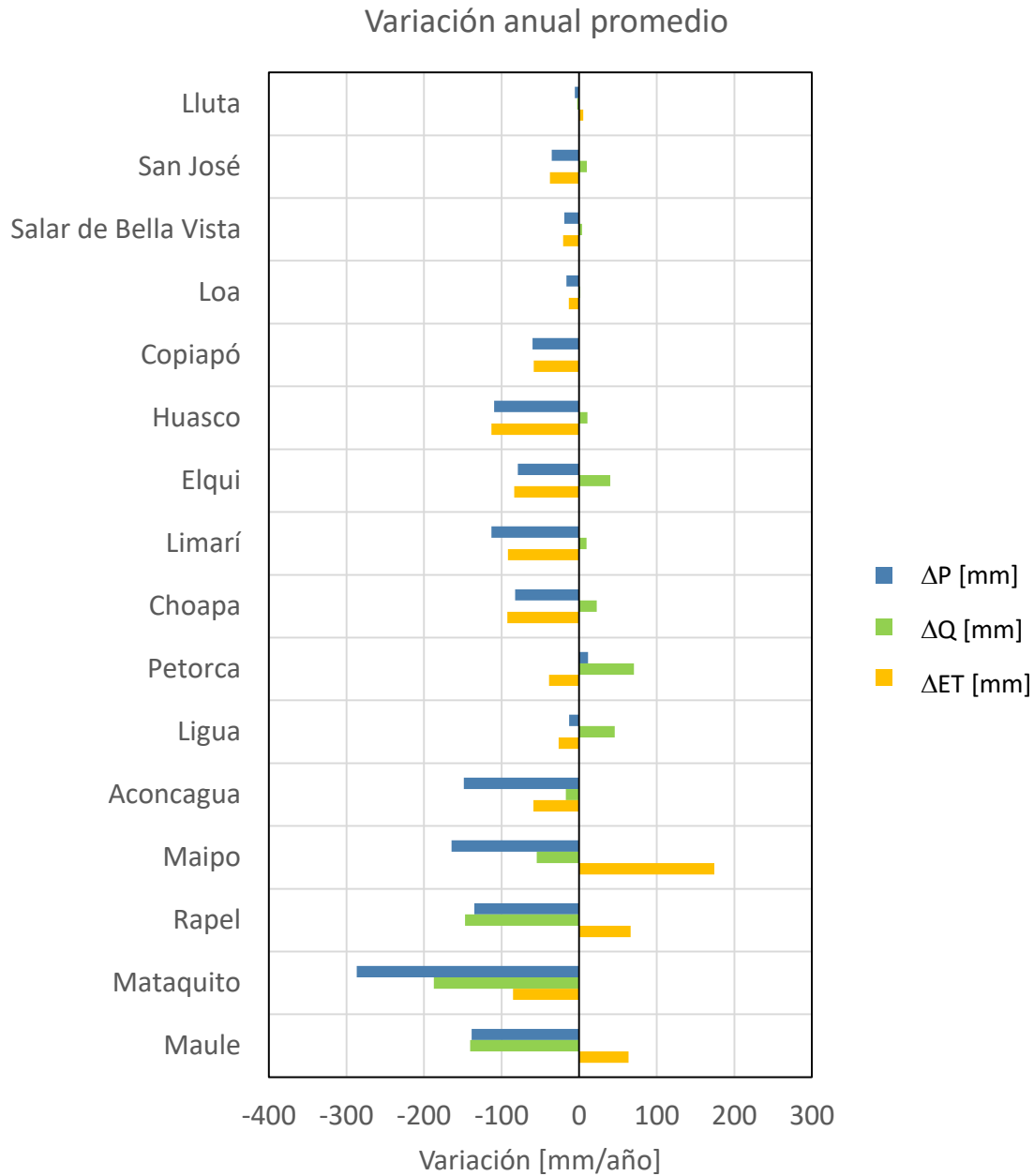


Figura 13: Comparación de los distintos componentes del balance hídrico entre los períodos temporales (1950-1980) y (1985-2015). Valores negativos indican menor flujo en el periodo temporal más reciente (1985-2015) y valores positivos indican incremento.

En el caso de algunas cuencas (eg. Ligua y Petorca) en DGA (1987) se establecía que el escurrimiento era nulo, ajustándose las isoyetas de precipitación anual promedio de manera de cerrar el balance hídrico; lo anterior subestimaba el recurso disponible pues se incorporaban extracciones y usos de agua de antemano.

Se hace notar que las metodologías de cálculo de ET entre ambos estudios (DGA, 1987 y el actual) son significativas pues mientras en el caso del Balance de 1987 se utiliza el método de Turc que es netamente climatológico pues no considera el uso de suelo, en el Balance actual el modelo VIC utiliza el método de Penmann Monteith que considera el uso y tipo de suelo, este último factor determinado a través del índice de área foliar (LAI). En consecuencia, puede existir una sobreestimación de ET al usar el método de Turc. Es importante también reconocer que puede haber diferencias respecto de cómo se considera el uso del suelo ya que no existe información con el adecuado detalle temporal de esta variable.

De acuerdo a lo expuesto, los resultados del presente estudio han de ser interpretados como la oferta natural que deberían tener los ríos a distintas escalas temporales (presentadas a nivel promedio anual) de modo que, si en el balance DGA (1987) no se descontaron los usos de agua, la comparación directa no puede realizarse debido a estas importantes diferencias metodológicas, que afectan, también, a la estimación de las forzantes meteorológicas en zonas sin información.

4. BALANCE HÍDRICO FUTURO EN PERÍODO 2030-2060

Los modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) seleccionados para analizar el Balance Hídrico son: CSIRO-MK3-6-0, CCSM4, MIROC-ESM e IPSL-CM5A-LR (ver Tabla 1). Para simplificar la nomenclatura, en este capítulo, se hace referencia a estos modelos como CSIRO, CCSM, MIROC e IPSL.

En la Figura 14 se muestra el balance adimensional para todos los polígonos definidos en el estudio DGA-CIREN (2014) que se encuentren dentro de la zona de estudio. El período para el cual se muestra el balance adimensional corresponde al 2030-2060, mientras que los colores corresponden a la variación de escorrentía (ΔQ) del período 30-60 respecto del período 85-15 (ambos con 30 años de modelación). La escorrentía (Q) se obtiene como la escorrentía en régimen natural menos la demanda evapotranspirativa de los cultivos; la evapotranspiración total considera la evapotranspiración en régimen natural más la demanda de agua por cultivos. Se aprecia que la modelación considerando como forzantes los GCM CCSM, IPSL y MIROC proyecta resultados similares pues prácticamente en toda la zona de estudio la escorrentía disminuye, mientras que con el modelo CSIRO existen zonas donde la escorrentía aumenta. No obstante, la escorrentía nunca es mayor al 60% de la precipitación en todos los modelos, mientras que la evapotranspiración va desde 40% hasta prácticamente la totalidad de la precipitación.

La variación porcentual en los flujos principales del balance se muestra en la

Figura 15, donde se aprecia que existen diferencias entre los resultados de las modelaciones en cuanto a la distribución de la precipitación. Por ejemplo, en el caso del modelo IPSL se observa que las cuencas

con proyecciones de aumento de precipitación aumentarán su evapotranspiración, mientras que el caudal puede sufrir un aumento o disminución. Además, al igual que en la Figura 14, el GCM CSIRO es el que muestra cuencas con un mayor aumento en la escorrentía (pese a las disminuciones en la precipitación) lo que escapa a las importantes disminuciones en la escorrentía de la gran mayoría de las cuencas y modelos seleccionados, las que pueden ser mayores al 50%. En consecuencia, en parte importante de la zona de estudio se proyecta una fuerte reducción en la disponibilidad de agua futura.

Balance Adimensional

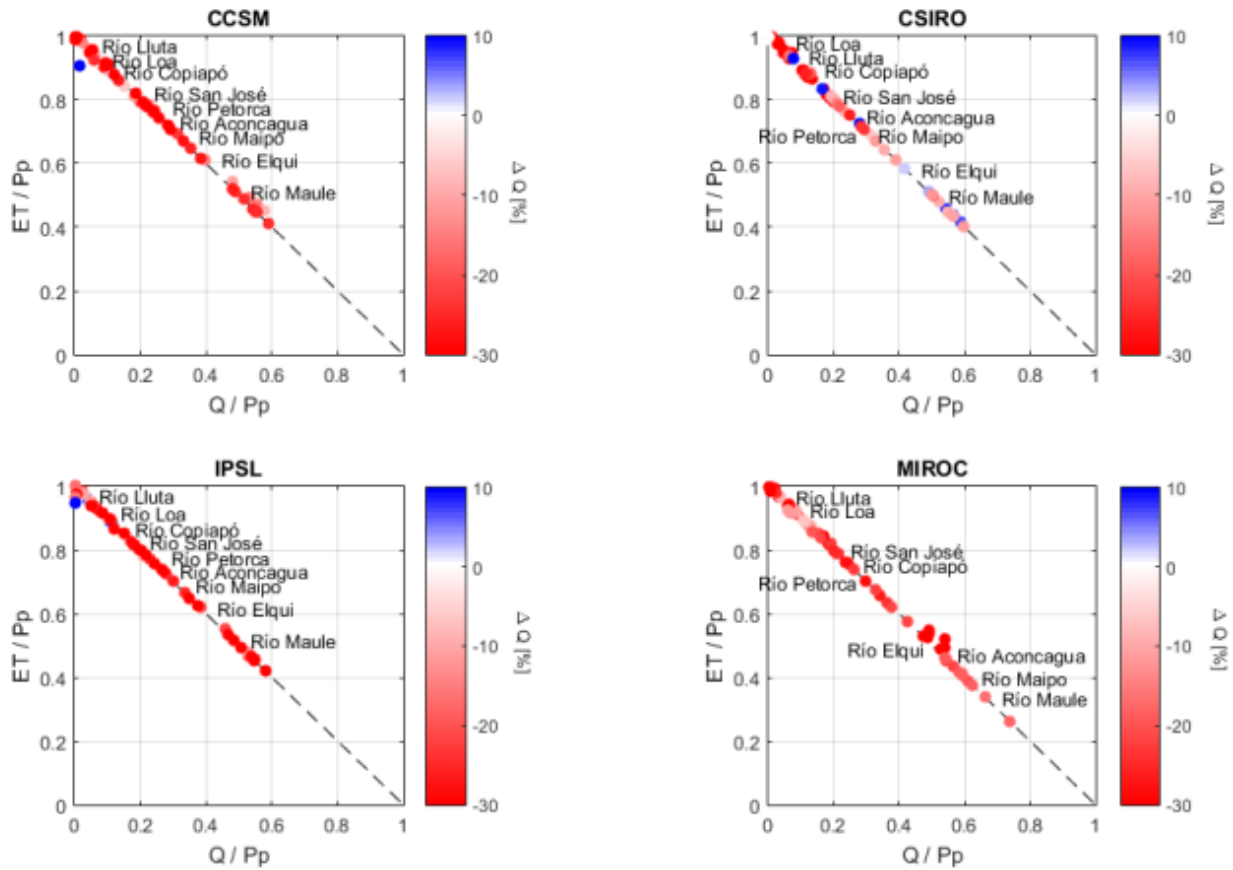


Figura 14: Balance adimensional para todos los polígonos definidos en el estudio DGA-CIREN (2014) que se encuentra dentro del área de estudio. El balance considera el período 2030-2060, mientras que la variación porcentual de escorrentía (ΔQ) compara dicho período con el período 1985-2015.

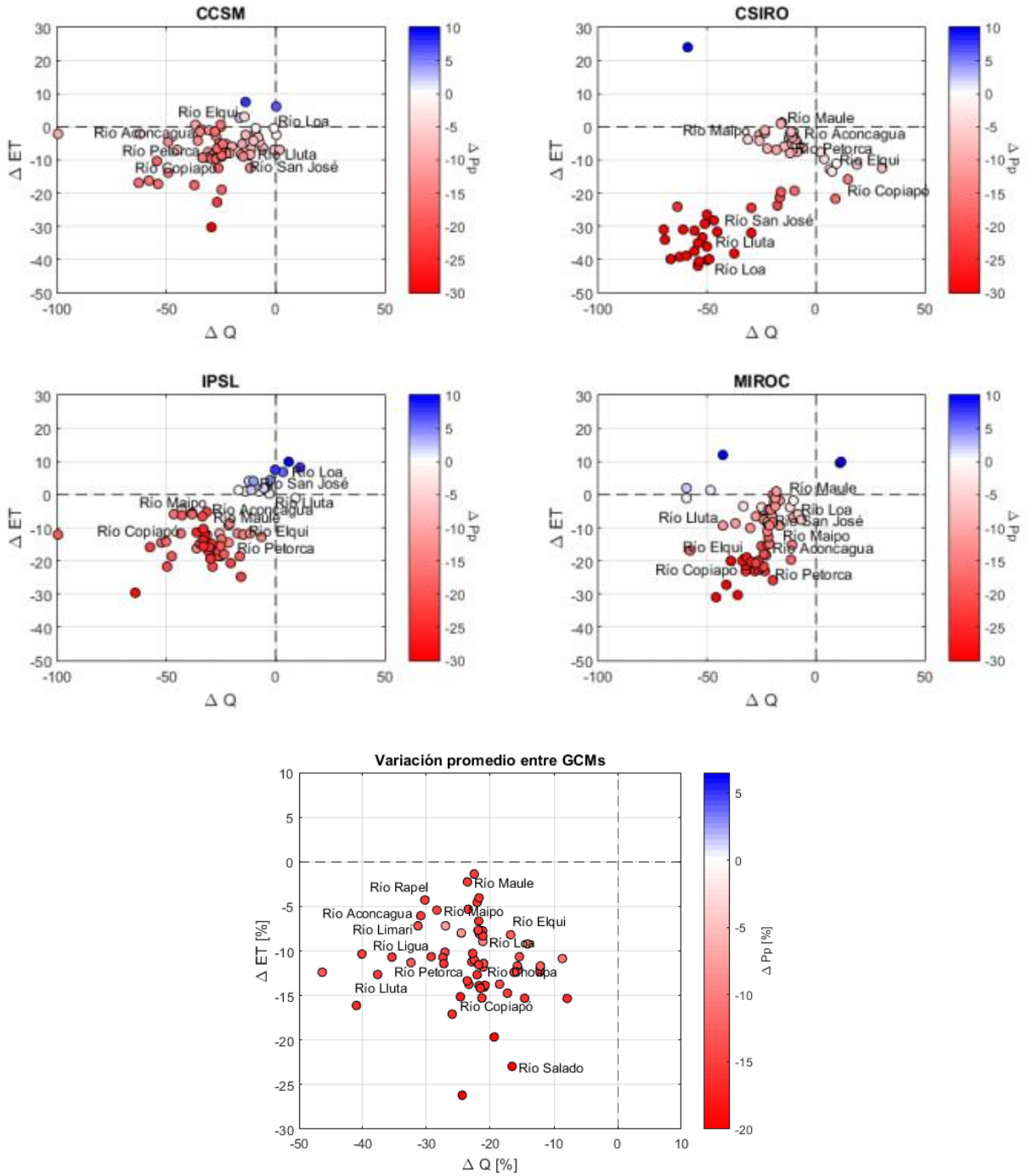


Figura 15: Variación porcentual de la precipitación (Pp), escorrentía (Q) y evapotranspiración (ET) (estos dos últimos flujos corregidos por la demanda de riego) entre los períodos 1985-2015 y 2030-2060, según cada modelo climático. Cada punto corresponde a un polígono definido en el estudio DGA-CIREN (2014). Se incluye, además, la variación promedio de las componentes.

La variación promedio de la precipitación y escorrentía natural (sin considerar riego) obtenida a base de los cuatro GCMs entre los períodos 2030-2060 y 1985-2015 se muestra en las Figuras 16 y 17,

apreciándose que, en promedio, hay una disminución de ambas variables en toda la zona de estudio, siendo la zona posiblemente más afectada la cordillera de la región del Maule. Igualmente, en la Figura 18 se observa la variación promedio de la evapotranspiración natural que señala para la zona cordillerana del Maule un aumento de las pérdidas de este flujo aunque, en general, se esperan disminuciones atribuibles a la disminución en la precipitación.

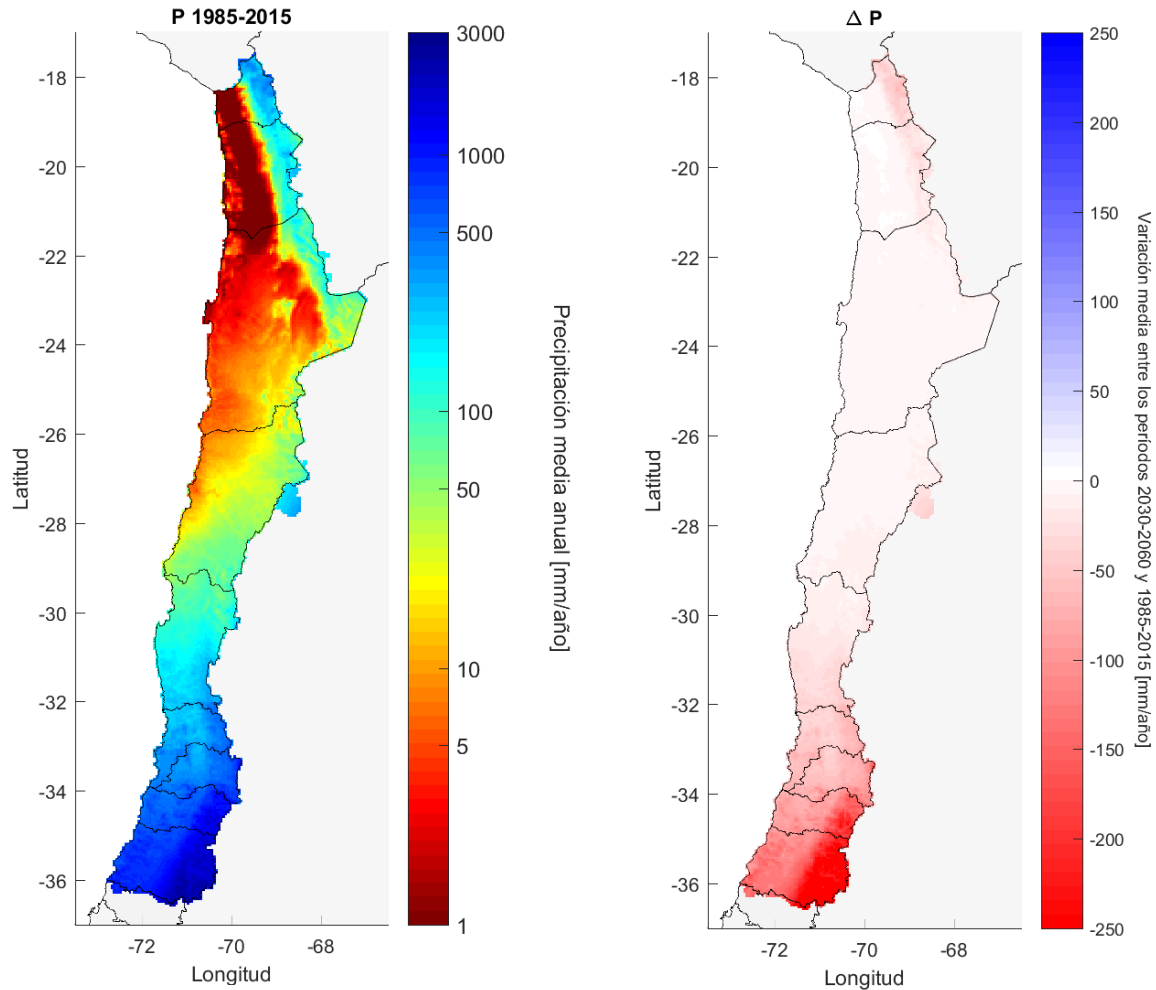


Figura 16: Promedio entre los cuatro modelos de cambio climático considerados (GCMs) de la variación de la precipitación media anual entre los periodos 2030-2060 y 1985-2015.

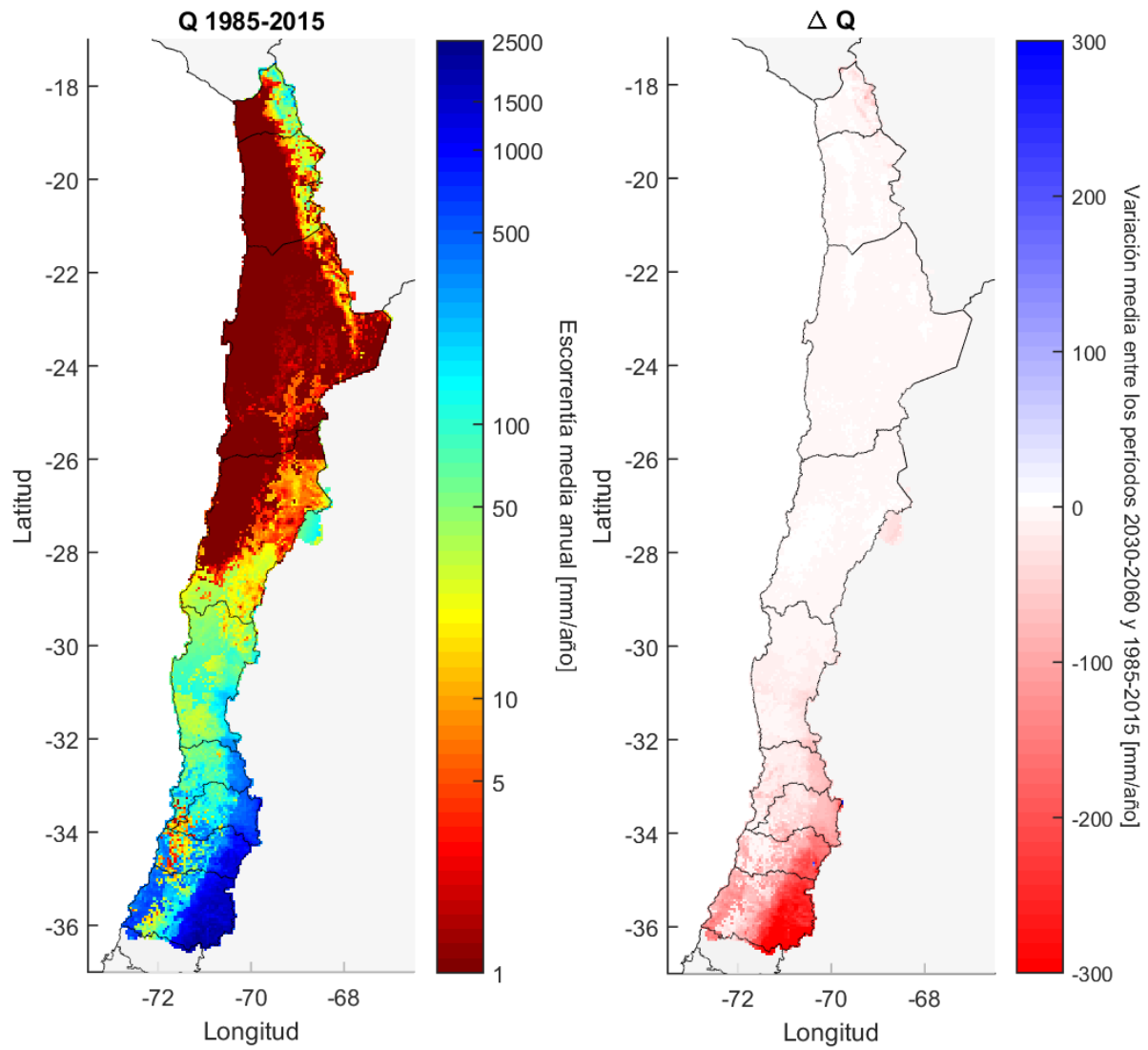


Figura 17: Promedio entre los cuatro modelos de cambio climático considerados (GCMs) de la variación de la escorrentía natural según VIC entre los periodos 2030-2060 y 1985-2015.

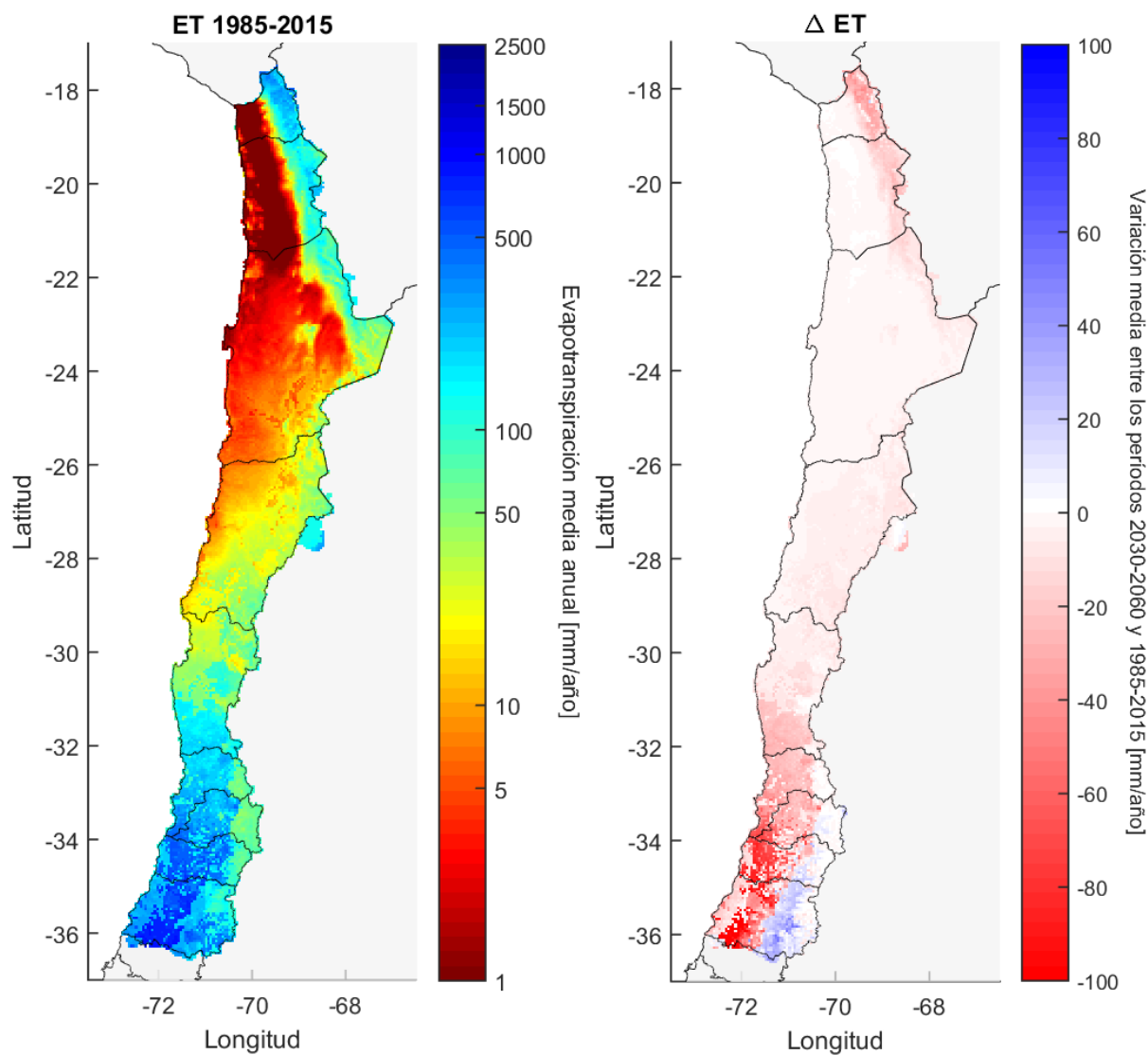


Figura 18: Promedio entre los cuatro modelos de cambio climático considerados (GCMs) de la variación de la evapotranspiración natural según VIC (no considera el efecto del riego) entre los períodos 2030-2060 y 1985-2015.

5. PROYECTO SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO

El proyecto SIG contiene los resultados de la aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas Norte y Centro. Como propósito fundamental se busca que la información sea de rápida manipulación e interpretación por parte del usuario, de modo que se encuentra organizado de forma que permita conseguirlo.

Para ello, el proyecto consideró un árbol de directorios el cual muestra cómo se organiza la información de forma que se pueda acceder a todos los contenidos. El proyecto está estructurado para ser

compatible con ArcGIS v10.2 y permitir generación de Geodatabases. Es posible crear cartas, mapas y figuras en formatos mxd (de almacenaje de información), jpg, png y pdf (de salida y visualización). Además, el sistema permite la presentación de resultados en formato digital (en dispositivo de almacenamiento) y formato papel (para imprimir). Además, se considera la creación de una serie de herramientas/funciones almacenadas en pequeños paquetes que en el software ArcGIS se denominan *toolboxes*. Estas permiten realizar cálculos, operaciones espaciales y selección de información de acuerdo con las necesidades del usuario, en los formatos y unidades correspondientes.

6. CONCLUSIONES

Los resultados del proceso de modelación de las cuencas en régimen natural son satisfactorios de acuerdo al análisis crítico que se hace de múltiples criterios de eficiencia. Con respecto a la modelación hidrológica, el índice de eficiencia KGE para las cuencas calibradas es satisfactorio (superior a 0,6) en prácticamente todas las cuencas. Además, los valores asociados a los procesos de acumulación y derretimiento de nieve (equivalente en agua promedio y fracción de área cubierta por nieve) presentan un comportamiento modelado similar al observado mediante imágenes y productos satelitales.

De Aconcagua al norte, donde la aridez es una característica importante, la regionalización de parámetros presenta un peor desempeño, resultado consistente con diversos trabajos realizados a nivel mundial. Sin embargo, estos resultados podrían ser perfeccionados a futuro si se mejora la información disponible respecto a: extracciones de aguas superficiales y subterráneas; flujos de agua subterránea; radiación, velocidad del viento y humedad relativa; precipitación en zonas de montaña y la caracterización de los usos de suelo históricos que en la actualidad está limitado por ejemplo en términos de la frecuencia de censos que permite caracterizar cultivos en el país.

Entre los resultados destacan los coeficientes de escorrentía, así como las fracciones de evapotranspiración respecto de la precipitación, la que se puede realizar para cualquier cuenca del país gracias a que los resultados de VIC se encuentran grillados. Otro punto importante es la variación mensual de la precipitación, escorrentía, evapotranspiración y cobertura de nieve, pues permiten identificar rápidamente cuencas con regímenes similares y entregan mayor información sobre la cuenca y cómo ésta se comporta en un año promedio.

Los resultados de la comparación entre los Balances de 1987 y el Balance actual muestran algunos cambios sistemáticos en los componentes principales del balance hídrico. En general se aprecia una disminución en las precipitaciones, una disminución mayor en los niveles de evapotranspiración y un aumento en los niveles de escorrentía. Dada los cambios metodológicos y la escasa información disponible en las desembocaduras de cuencas es complejo determinar de manera fehaciente cual es el balance integrado en las cuencas analizadas. Por otra parte, es complejo distinguir cual es la contribución de los cambios observados en términos de cambios en la metodología utilizada versus cambios en los componentes del balance hídrico propiamente tal.

Las proyecciones futuras muestran cambios importantes en la escorrentía, las que se reflejan en disminuciones que pueden ser mayores al 50%. En consecuencia, en parte importante de la zona de estudio se proyecta una fuerte reducción en la disponibilidad de agua en el período 2030 a 2060.

Se destaca la generación del sistema de información geográfico para la presentación de los resultados de este proyecto. El proyecto SIG incluye toda la información espacial generada, más capas de base que ayudan a comprender el entorno de información en el cual los datos se enmarcan. El proyecto considera la realización de un modelo de datos que englobe en Geodatabases, almacenadas en un árbol de directorios junto con un glosario, que permitan al usuario visualizar la información y hacer consultas sobre ellas.

5. REFERENCIAS

- 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. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–40. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-23>
- Barcaza, G., Nussbaumer, S. U., Tapia, G., Valdés, J., García, J. L., Videla, Y., ... & Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58(75pt2), 166-180.
- Boisier, J.P., Alvarez-garreton, C., Damiani, A., Lambert, F., Ramallo, C., Rojas, M., 2018. Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long- term observations and climate model simulations. *Elem. Sci. Antropocene*.
- Boisier, J.P., Rondanelli, R., Garreaud, R.D., Muñoz, F., 2016. Anthropogenic and natural contribution to the Southeast Pacific Precipitation Decline and Recent Mega-Drought in Chile. *Geophys. Res. Lett.* 43, 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>.
- Cannon, A.J., 2016. Multivariate bias correction of climate model output: Matching marginal distributions and intervariable dependence structure. *J. Clim.* 29, 7045–7064. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0679.1>
- Carrasco, J. F., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0 C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century/Changements de l'isotherme 0 C et de la ligne d'équilibre des neiges dans le Chili central durant le dernier quart du 20ème siècle. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6).
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J.,

- Park, B.K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137, 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- DGA, 1987. Balance Hídrico de Chile. Santiago, Chile.
- DGA, 2011. Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile central. Santiago, Chile.
- DGA, 2017. Actualización Balance Hídrico. Informe Final. S.I.T. 417 Desarrollado para la Dirección General de Aguas, MOP, por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile
- DGA-CIREN, 2014. Redefinición de la clasificación de la clasificación red hidrográfica a nivel Nacional. Santiago, Chile.
- Duan, Q.Y., Gupta, V.K., Sorooshian, S., 1993. Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization. *J. Optimization Theory Appl.* 76, 501–521. <https://doi.org/10.1007/BF00939380>
- Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4).
- Pellicciotti F., Burlando P. & Van Vliet, K., (2007). Recent trends in precipitation and streamflow in the Aconcagua River basin, central Chile. *Glacier mass balance changes and meltwater discharge*, (318), 17.
- Quintana, J.M. y Aceituno, P., 2012. Changes in the rainfall regime along the extratropical West coast of South America (Chile): 30-43°S. *Atmosfera* 25, 1–22.
- Rorabaugh, M.I., 1964. Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow. *Int. Assoc. Hydrol. Sci.* 63, 432–441.
- 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 Sens. Environ.* 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>