

PROBABLE INTENSIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE DÉFICIT HÍDRICO SOBRE LA REGIÓN DEL COMAHUE ANTE DIVERSOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Gabriela A. Raggio^{1,2,3}, Ramiro I. Saurral^{1,2,3,4}

- ¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Buenos Aires, Argentina.
²CONICET-Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.
³CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (UMI 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.
⁴Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

(Manuscrito recibido el 19 de septiembre de 2019, en su versión final el 29 de mayo de 2020)

RESUMEN

Las principales actividades socioeconómicas de la región del Comahue en el norte de la Patagonia argentina dependen directamente de la disponibilidad hídrica de los ríos Limay, Neuquén y Negro. En este trabajo, se aplicó el modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) a las cuencas de dichos ríos con el objetivo de estudiar el posible impacto que el cambio climático tendrá en la hidrología de la región durante las próximas décadas. La etapa de calibración del modelo mostró que la base de datos observacional disponible es insuficiente para llevar a cabo una adecuada calibración del modelo a nivel diario. Frente a esto, se aplicaron diversas correcciones a las temperaturas máximas y mínimas y precipitación por separado a nivel mensual, obteniéndose al disminuir las temperaturas en los Andes una calibración (1999-2009) y una validación (2011-2016) a nivel anual satisfactorias. Los cambios proyectados en precipitación y en temperaturas máximas y mínimas para lo que resta del siglo XXI y bajo los escenarios con forzante radiativo moderado y alto sugieren una disminución en la precipitación en los Andes neuquinos y un aumento en las temperaturas, lo cual daría lugar a una reducción en el caudal medio anual para los ríos de la región que tendería a acentuarse conforme aumente la concentración de gases de efecto invernadero.

Palabras clave: Comahue, cambio climático, modelo hidrológico, VIC.

LIKELY INTENSIFICATION OF WATER DEFICIT CONDITIONS OVER THE COMAHUE REGION UNDER DIFFERENT CLIMATE CHANGE SCENARIOS

ABSTRACT

The main socio-economic activities of the Comahue region in the northern Patagonia in Argentina depend directly on the water availability of the Limay, Neuquén and Negro rivers. In this work, the VIC (Variable Infiltration Capacity) hydrological model was applied to the basins of these rivers in order to study the possible impact

climate change will have on the hydrology of the region over the next few decades. It was found that the available observational database is insufficient to carry out an adequate calibration of the model on a daily basis: various corrections to the maximum and minimum temperatures and precipitation were applied separately at a monthly level, obtaining a satisfactory calibration (1999-2009) and validation (2011-2016) at an annual level when reducing the temperatures in the Andes. The projected changes in precipitation and in maximum and minimum temperatures for the remainder of the 21st century under the scenarios with moderate and high radiative forcing suggest a decrease in precipitation in the Andes of the Neuquén province and an increase in temperatures. These conditions would result in a reduction in the mean annual flow for the rivers of the region that would be enhanced by an increase in the concentration of the greenhouse gases.

Keywords: Comahue, climate change, hydrological model, VIC.

1. INTRODUCCIÓN

Los ríos Limay y Neuquén nacen en los Andes norpatagónicos argentinos y se alimentan de precipitaciones mayormente invernales (900-1300 mm anuales sobre zonas montañosas; Bianchi y otros, 2015) y del deshielo de los glaciares durante la primavera (figura 1). Confluyen hacia el este de la cordillera dando origen al río Negro, el cual desemboca en el océano Atlántico. A lo largo de su recorrido, el río Negro no recibe aporte de otros afluentes y colecta parte de la escasa precipitación (200-400 mm anuales; Bianchi y otros, 2015) de la estepa patagónica que se distribuye durante el transcurso del año. Las aguas de los ríos Limay, Neuquén y Negro son aprovechadas para el abastecimiento de los canales de riego de la región del Comahue, permitiendo que los cultivos de fruta constituyan la principal actividad económica de la provincia de Río Negro y la segunda de la provincia de Neuquén (Ministerio de Hacienda de la Nación, 2017a,b). El recurso hídrico proveniente de estos ríos es explotado a su vez para el turismo, la pesca, la navegación y el uso doméstico y para la generación de energía hidroeléctrica.

El complejo de embalses del Limay es el segundo mayor productor de energía hidroeléctrica en la Argentina (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico, 2017). En conjunto con los embalses ubicados sobre el río Negro, la región del Comahue es responsable de la

generación de entre el 15 y el 25 % de este tipo de energía en el país (González y otros, 2020).

La creciente concentración de gases de efecto invernadero (GEI) introduce cambios en el ciclo del agua tanto a nivel global como regional (IPCC, 2013; Greve y otros, 2014; Sherwood y Fu, 2014), esencialmente a través de cambios en la temperatura y la precipitación (Bronstert y otros, 2007). Cuantificar los posibles impactos que el cambio climático tendrá sobre los caudales de los ríos resulta necesario para comprender la vulnerabilidad de los recursos hídricos y para el planeamiento estratégico de políticas de adaptación y mitigación frente a eventuales cambios.

Una de las herramientas más confiables y utilizada por la comunidad científica para inferir el clima futuro son las simulaciones obtenidas a partir de los Modelos de Circulación Global (MCGs). Si bien muchos de estos modelos como los pertenecientes a la Quinta Fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados del Clima (CMIP5, por sus siglas en inglés; Taylor y otros, 2012) logran reproducir satisfactoriamente el clima global en términos generales y su respuesta al cambio en distintos forzantes (IPCC, 2013), los MCGs presentan errores sistemáticos que dificultan su utilización para la evaluación del impacto hidrológico (Maraun y otros, 2010; Teutschbein y Seibert, 2012). Numerosas técnicas

han sido implementadas en las últimas décadas con el objetivo de solucionar este problema (Chu y otros, 2010). Entre ellas, una de las más utilizadas en estudios de impacto hidrológico es la corrección de errores sistemáticos a partir de observaciones (Wood y otros, 2002; Saurral, 2010; Piani y Haerter, 2012; Montroull y otros, 2013). En tal sentido, el Proyecto de Intercomparación de Modelos de Impacto Intersectorial (ISIMIP, por sus siglas en inglés; Frieler y otros, 2017) es un esfuerzo internacional dedicado a proveer un marco operativo para el estudio de impacto del clima. ISIMIP cuenta con datos de acceso libre de simulaciones del CMIP5 en una resolución espacial de 0,5° con una corrección de errores sistemáticos ya aplicada, por lo que la utilización de estos datos resulta ventajosa y adecuada como forzantes de modelos de impacto. Las simulaciones derivadas del proyecto ISIMIP fueron empleadas en este estudio con el objetivo de cuantificar los cambios proyectados en precipitación y temperatura para el resto del siglo XXI.

A pesar de que la sociedad y los principales sectores económicos del Comahue dependen directamente de la disponibilidad hídrica de los ríos de la región, la literatura dedicada al estudio de los posibles impactos del cambio climático sobre estos ríos es escasa. Trabajos previos como los de Losano y otros (2015), Nadal y otros (2017) y Forni y otros (2018) estudiaron en parte dicha problemática mediante la utilización del modelo hidrológico WEAP, enfocándose principalmente en la demanda futura y en las diversas políticas del manejo del agua y, en menor medida, en los posibles impactos climáticos hasta mediados de siglo. Es preciso destacar que las diferencias más importantes entre los escenarios con distintas concentraciones de GEI de las proyecciones a futuro utilizadas por estos estudios comienzan a observarse luego de la década del 2040 (IPCC, 2013).

En este trabajo se calibró y validó el modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity, por sus siglas en inglés; Liang y otros, 1994, 1996) sobre la cuenca de los ríos Limay, Neuquén y

Negro con el objetivo principal de cuantificar los posibles cambios que el caudal medio anual de estos ríos tendrá en las décadas futuras.

El trabajo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se describe brevemente el modelo, los archivos y datos utilizados para realizar la calibración y validación del VIC, y las proyecciones y escenarios utilizados para el resto del siglo XXI. A su vez, se discuten las diferentes dificultades encontradas durante la calibración del modelo VIC a las cuencas de la región del Comahue y se describen las diferentes metodologías utilizadas para sobrellevar las dificultades encontradas. En la sección 3 se presentan y discuten los resultados de la calibración y validación del VIC, así como de los cambios esperados en el caudal medio futuro en función de los distintos escenarios considerados en las proyecciones del ISIMIP2b. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones del trabajo.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1 El modelo hidrológico VIC

El VIC es un modelo hidrológico distribuido de base física que divide las cuencas en una retícula de espaciado uniforme y que ha sido aplicado satisfactoriamente en numerosas cuencas alrededor del mundo (Lohmann y otros, 1998; Hamlet y Lettenmaier, 1999; Saurral, 2010; Grimson y otros, 2013). Este modelo cuenta con profundidades variables de múltiples capas de suelo y presenta heterogeneidades de la cobertura vegetal mediante una subdivisión de cada retícula en tantas categorías como sean necesarias. Asociados a cada categoría de vegetación se requieren diversos parámetros para los cálculos de los flujos de humedad y energía, tales como el índice de área foliar y la profundidad de las raíces. Además de información de la cobertura vegetal, el VIC requiere información del tipo de suelo para cada punto de retícula y datos meteorológicos con un paso temporal diario o inferior. El modelo cuenta con un parámetro de infiltración ajustable por el usuario para cada punto de retícula, y estima el balance

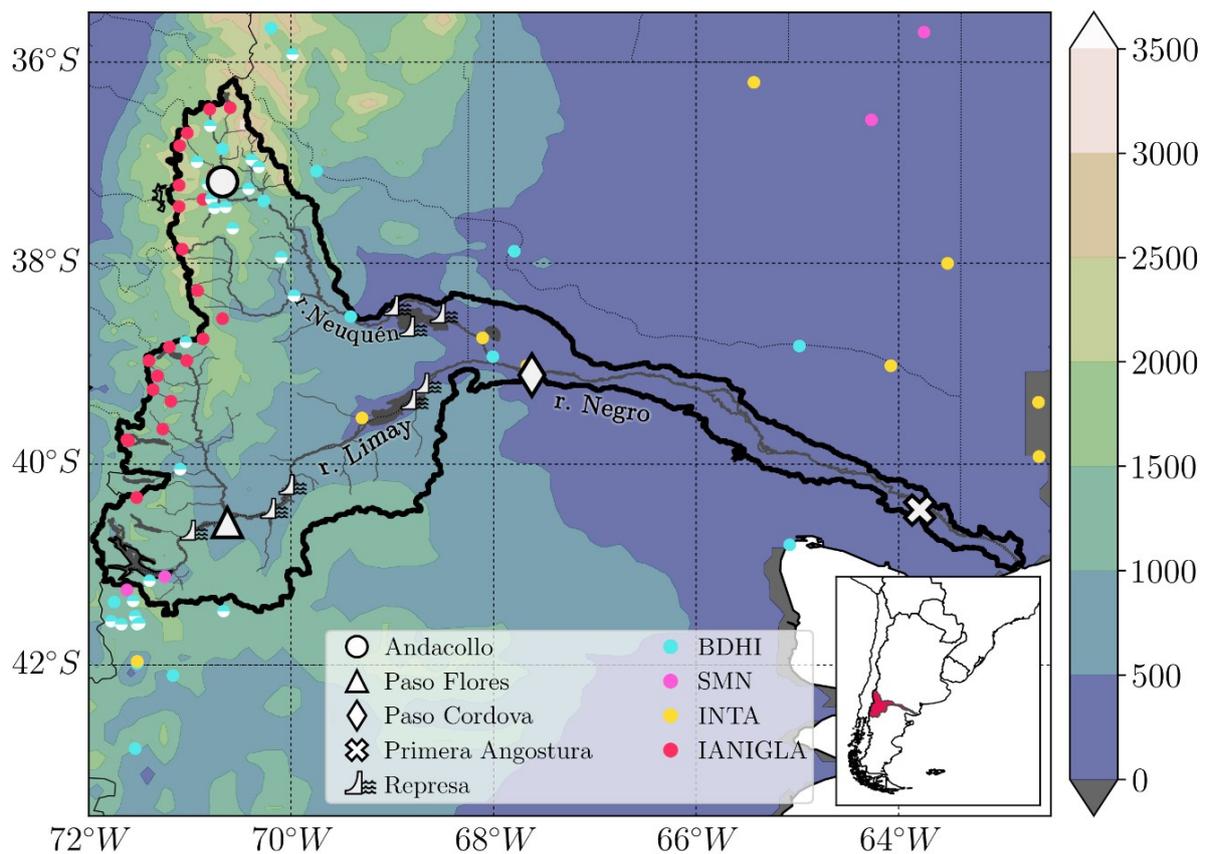


Figure 1: Ubicación geográfica y límites de la cuenca de los ríos Limay, Neuquén y Negro. La estación Andacollo se encuentra sobre el río Neuquén, Paso Flores sobre el Limay, y Paso Córdoba y Primera Angostura sobre el río Negro. Se indican a su vez la ubicación de las represas y embalses y las estaciones utilizadas, con datos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas diarias de la BDHI (en celeste, círculo lleno), del SMN (magenta) y del INTA (amarillo); precipitación diaria del BDHI (en celeste, semicírculo lleno); y temperaturas medias mensuales del IANIGLA (en rojo). En sombreado se muestra la topografía en metros (datos del Centro Nacional de Datos Geofísicos de Estados Unidos).

de agua de manera independiente para cada punto. El caudal es posteriormente calculado para distintos puntos de cierre mediante un modelo de flujo, para lo cual comúnmente se utiliza el desarrollado por Lohmann y otros (1996, 1998).

El modelo VIC cuenta a su vez con un modo de balance de energía, el cual además de simular los flujos de agua calcula el balance energético en superficie y entre capas de suelo; y un modo suelo congelado, el cual además tiene en cuenta la presencia de hielo y nieve en los cálculos del balance energético. Si bien los

modos de balance de energía y suelo congelado resuelven y representan procesos fundamentales en cuencas frías, es importante destacar que su aplicabilidad requiere de disponibilidad de datos meteorológicos en paso temporal menor a 24 horas. Es importante aclarar a su vez que si bien el modo de balance de agua no calcula los flujos de energía, el mismo sí considera la acumulación de nieve y posterior derretimiento mediante parámetros que pueden ser ajustados por el usuario.

2.2 Archivos de entrada del modelo y datos utilizados

El archivo de vegetación utilizado fue interpolado con la técnica de “vecino más cercano” a partir de los datos generados originalmente por Nijssen y otros (2001) y adaptados posteriormente a una mayor resolución (0,5°) por Jennifer Adam de la Universidad Estatal de Washington. Por su parte, el archivo de suelo fue generado con datos del mapa mundial de suelos de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) y la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, por sus siglas en inglés) en una resolución de 5 minutos, cuyos datos son de acceso libre y gratuito.

La delimitación de la cuenca fue realizada a partir de datos del Instituto Geográfico Nacional de Argentina, mientras que el mapa de flujo fue generado con información de elevación de terreno en 5 minutos de arco del Centro Nacional de Datos Geofísicos de Estados Unidos.

Los forzantes meteorológicos fueron interpolados a una retícula uniforme mediante el método de kriging (Chilès y Delfiner, 2012) a partir de datos de precipitación y temperatura máxima y mínima diaria de la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI) de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de Argentina y del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN). Se contó con un total de 58 estaciones con menos de 20 % de datos faltantes en precipitación y 21 estaciones de temperaturas máximas y mínimas con menos de 20 % de datos faltantes en el período 1998-2016. Debido a que los últimos años del período utilizado contaron con una menor cantidad de observaciones de otras fuentes, se emplearon a su vez datos de temperaturas máximas, mínimas y precipitación de 9 estaciones pertenecientes al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en el período 2011-2016 con menos del 20 % de datos faltantes. Las estaciones utilizadas se muestran en la figura 1.

Los caudales observados utilizados para la etapa

de calibración fueron obtenidos de la BDHI.

2.3 El problema de la regulación artificial

Sobre los ríos Limay y Neuquén existen desde la década de 1970 represas hidroeléctricas que operan controlando crecidas y acumulando el caudal y liberándolo conforme sea necesario para satisfacer la demanda de agua y energía. La regulación artificial de las represas modifica considerablemente la forma del ciclo anual del caudal aguas abajo de los embalses, tal como surge de analizar las hidroclimatologías de períodos previos y posteriores a la construcción de las represas de la región (figura 2). Durante los años anteriores a la existencia de los embalses, los registros de caudal presentaban un ciclo anual con un máximo relativo en invierno asociado al pasaje de los sistemas sinópticos y un máximo absoluto en primavera asociado al deshielo. En 1972, luego de la construcción del embalse El Chocón, ubicado sobre el río Limay, y luego de la puesta en operación del complejo Cerros Colorados sobre el río Neuquén (Organismo Regulador de Seguridad de Presas de Argentina), el ciclo anual de las estaciones corriente abajo de dichas presas comenzó a mostrar un único máximo en invierno y una curva mucho más amortiguada hacia el resto del año con un mínimo marcadamente más alto hacia fines del verano y comienzos del otoño.

Si bien existe la posibilidad de adaptar el modelo VIC para representar regulaciones artificiales de los recursos hídricos (Haddeland y otros, 2006; 2007), implementar este tipo de módulos requiere de información adicional con la que no se contó al momento de la realización de este trabajo.

Debido a que el VIC simula el cauce natural de los ríos, y que las observaciones de los caudales aguas abajo no se encuentran desregularizados, la calibración en escala diaria o mensual no resulta posible. Por tal motivo, se optó en este trabajo por calibrar el modelo haciendo foco en representar adecuadamente el caudal medio anual. A su vez, se buscó en la calibración representar la onda anual natural que tendrían

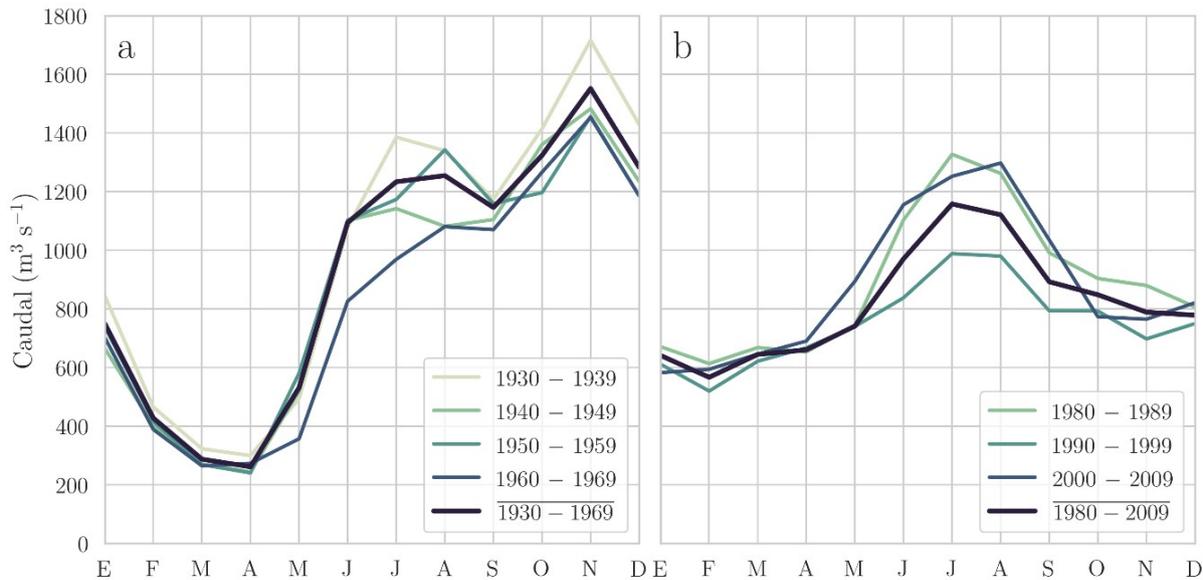


Figure 2: Medias mensuales (por décadas) y promedios de 30 años de caudal observado para la estación Primera Angostura para a) las décadas previas a la construcción de la represa El Chocón sobre el río Limay y del complejo hidroeléctrico Cerros Colorados sobre el río Neuquén y b) las décadas posteriores. Los promedios de cada período se indican en líneas gruesas.

las estaciones si no tuvieran una regulación artificial aguas arriba. Es decir, las simulaciones obtenidas fueron comparadas con una curva observada desregularizada con la media anual correspondiente al período de simulación. Dichas curvas fueron obtenidas a partir de multiplicar las medias mensuales del caudal observado de 30 años del período pre-represas por la proporción $\overline{Q_{actual}/Q_{pre-represas}}$, donde Q_{actual} representa el caudal del período de simulación en cuestión y las barras horizontales indican la media anual.

2.4 Primera simulación y utilización de precipitación de TRMM

Una primera simulación realizada únicamente con datos de estación observados mostró una importante subestimación del caudal medio anual (figura 3). Inicialmente se consideró que dicha subestimación podría estar asociada a una escasez en la precipitación media anual observada. Para estudiar en más detalle este problema, se realizó un estudio de la climatología comparando la red de observaciones disponible en este trabajo en el período 1998-2016 con datos provistos por el hidroestimador TRMM

versión 7 (TRMMv7, Misión de Medición de Lluvias Tropicales, por sus siglas en inglés; Hoffman y Bolvin, 2015), misión conjunta entre la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA) y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial. TRMMv7 es uno de los hidroestimadores con mejor desempeño sobre la región del Comahue en términos del error cuadrático medio y del sesgo (Salio y otros, 2015), y sus datos de acceso libre están disponibles en escala diaria con una resolución espacial de $0,25^\circ$.

Debido a que TRMMv7 subestima la precipitación media anual en casi toda la zona cordillerana de la provincia de Neuquén frente a la red de observaciones BDHI-SMN-INTA, excepto en el extremo sur de la misma, y la sobreestima en la meseta patagónica (figura no mostrada), no resultó razonable tomar únicamente la precipitación de TRMMv7 como forzante. Se realizaron entonces tres tipos de simulaciones de prueba durante el período 1999-2009 empleando los mismos datos de temperatura máxima y mínima

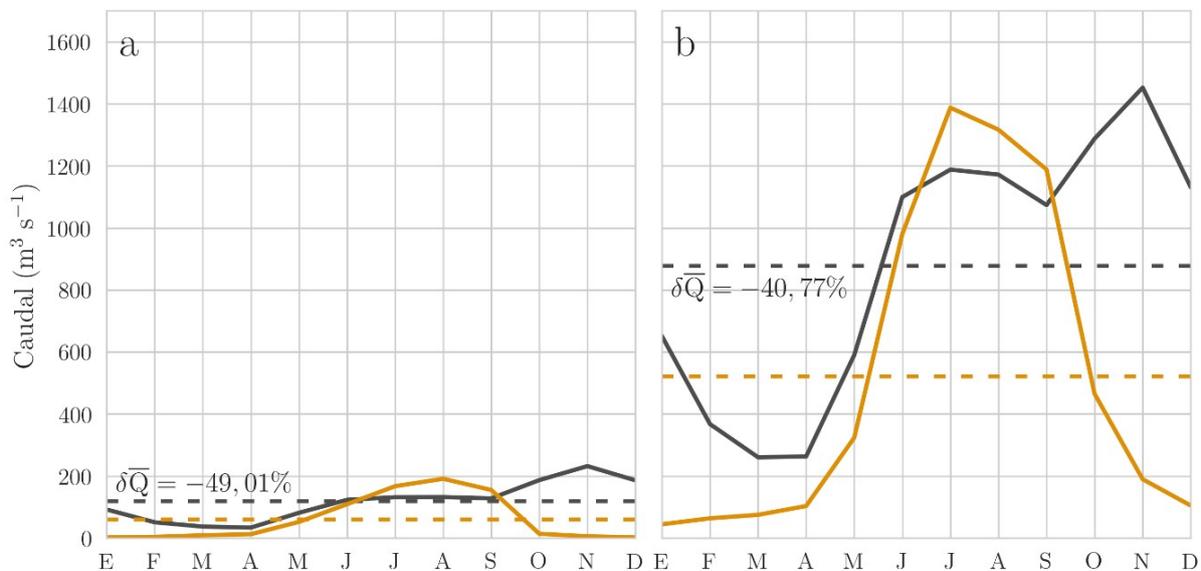


Figure 3: Caudal observado (negro) para la estación a) Andacollo y observado desregularizado para b) Paso Córdoba y primera simulación realizada con el modelo hidrológico VIC utilizando únicamente datos observados (BDHI-SMN-INTA, naranja) en el período 1999-2009. El caudal medio anual se indica para cada caso en el color respectivo en líneas punteadas. Para cada punto de cierre se indica el valor porcentual de la subestimación o sobreestimación del caudal medio anual de la simulación frente a las observaciones para dicho período.

BDHI-SMN-INTA pero modificando los datos de precipitación en base al TRMMv7. Las pruebas consistieron en: 1) utilizar únicamente los datos de TRMMv7 como forzantes de precipitación, 2) emplear TRMMv7 en las regiones cordilleranas y los datos observados BDHI-SMN-INTA en el resto de la cuenca, y 3) utilizar, para cada punto de retícula, la base de datos con la mayor precipitación media anual.

2.5 Correcciones a la temperatura

La primera simulación realizada (figura 3) muestra un ciclo anual típico de una cuenca con un máximo de precipitaciones invernales y no se observa un segundo máximo asociado al deshielo en la primavera. Esto sugirió que, además del inconveniente de la subestimación del caudal medio, existía un problema en la representatividad de la temperatura en las regiones más elevadas.

Como toda cuenca fría, el proceso de acumulación y derretimiento de nieve y los cambios asociados

al escurrimiento dependen estrechamente de la temperatura del aire, sobre todo en latitudes medias y en regiones de elevaciones intermedias donde las temperaturas se encuentran cercanas al punto de fusión.

Tal vez el mayor inconveniente encontrado a la hora de realizar este trabajo fue la falta de datos de temperatura de estaciones de altura, ya que la gran mayoría de las estaciones se encuentran por debajo de los 1000 m. Al interpolar los datos de temperaturas medidas en estaciones situadas en la región pre-andina o de meseta (es decir, no en montaña), el modelo no recibe información de la temperatura a la cual se encuentran las nacientes de los ríos, que en el caso del Limay y el Neuquén resultan ser a su vez las regiones donde se reciben la mayor cantidad de precipitaciones (Bianchi y otros, 2015).

Se realizaron diversos tipos de correcciones a la temperatura con el objetivo de compensar la falta de representatividad de la temperatura real en

altura debido a la escasez de datos en estaciones de montaña. Se propusieron 3 metodologías para llevar a cabo dicha corrección, las cuales se detallan a continuación.

a. Correcciones empleando información de la estación Cerro Catedral

Se emplearon los datos históricos disponibles de la estación Cerro Catedral, ubicada a 1955 m en la zona cordillerana del sudoeste de la provincia de Río Negro, la cual registró información de temperatura entre los años 1958 y 1989. Dicha estación se localizaba en las cercanías de la estación San Carlos de Bariloche, la cual se ubica a 840 m y cuyos registros comienzan en el año 1956.

La corrección a los forzantes meteorológicos a partir de las observaciones históricas de Cerro Catedral se hizo teniendo en cuenta la diferencia de temperatura media anual entre dicha estación y la estación San Carlos de Bariloche, de manera tal que los puntos ubicados a alturas cercanas a los 1400, 1600, 1800 y 2000 m mantuviesen una proporción de días al año con ocurrencia de nieve equivalente a la de la estación Cerro Catedral. Los días de ocurrencia de nieve fueron definidos siguiendo los parámetros del modelo VIC de temperatura máxima de ocurrencia de nieve y temperatura mínima de ocurrencia de lluvia, los cuales son parámetros ajustables durante la etapa de calibración. Una segunda instancia de enfriamiento se realizó sobre los puntos ubicados por encima de los umbrales de altura mencionados considerando un gradiente térmico promedio ($-6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$).

b. Corrección con datos mensuales IANIGLA

Se dispuso a su vez de datos mensuales de temperatura media de 23 estaciones de altura (elevaciones mayores a 900 m) proporcionadas por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) con menos de 10% de datos faltantes en el período 2001-2010. A estos datos se les realizó un control de

calidad, y debido a que algunas estaciones tenían la mayor parte de los meses faltantes durante el invierno, se optó por reconstruir la onda anual de dicha estación manteniendo la temperatura media observada por la estación pero siguiendo la curva de la onda anual de la estación de BDHI más cercana. Si bien estos datos presentan una frecuencia temporal mensual, 13 de dichas estaciones proporcionan información de elevaciones por encima de los 1500 m, datos con los que no se cuenta en las bases de datos BDHI, SMN e INTA y que resultan sumamente valiosos para representar más adecuadamente las temperaturas de altura.

Los datos del IANIGLA fueron llevados mediante el método de kriging a la retícula uniforme del VIC, obteniéndose un campo de temperatura media por mes. La corrección aplicada a cada punto de retícula consistió en restar a la temperatura máxima y mínima de los forzantes diarios la diferencia con la temperatura media mensual de la base IANIGLA si el punto en cuestión correspondía a una elevación superior a distintos umbrales considerados (1400, 1600, 1800, 2000, 2200 y 2400 m). De esta manera se obtuvieron forzantes diarios de temperaturas máximas y mínimas pero con una media mensual equivalente a las estaciones observadas por IANIGLA para puntos horizontalmente cercanos si superaban dicho umbral.

c. Corrección de temperaturas en las nacientes mediante un algoritmo

Partiendo de las correcciones a la temperatura que surgieron de las observaciones mensuales del IANIGLA para los puntos de retícula más elevados de la cuenca, se realizó una segunda corrección en las nacientes de los ríos a partir de un algoritmo. El mismo consistió en generar más de 400 simulaciones en las cuales se ajustaron las temperaturas medias mensuales para distintos umbrales de altura de manera equivalente a lo explicado en el punto 2.5.b. En otras

palabras, las simulaciones realizadas mediante este método contienen la suma de las correcciones de temperatura de la base de datos del IANIGLA y las correcciones por el algoritmo.

2.6 Calibración y validación del VIC

La calibración del modelo VIC (versión 4.2.d) se llevó a cabo considerando el modo balance de agua en una resolución de $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ (correspondiente aproximadamente a 13,87 km de latitud y 10,81 km de longitud en 39°S) y paso temporal diario a partir de las correcciones realizadas separadamente sobre la precipitación y la temperatura en el período 1999-2009 en 4 puntos de cierre (figura 1): Andacollo sobre el río Neuquén, Paso Flores sobre el Limay, y Paso Córdova y Primera Angostura sobre el Negro. La elección de dichos puntos de cierre se basó en la disponibilidad de datos de caudal observado y en la rapidez de la aplicación del algoritmo de corrección a la temperatura para cada subcuenca. Por otro lado, se realizaron pruebas de calibración en modo balance energético y suelo congelado empleando la precipitación del TRMMv7 disponible en un paso temporal de 3 hs (2002-2017) y la temperatura en paso subdiario mediante un algoritmo de desagregación disponible en el VIC basado en el trabajo de Thornton y Running (1999). Un resumen de las distintas técnicas empleadas para la calibración del modelo VIC y la lista completa de las simulaciones discutidas en este trabajo se encuentran en las tablas I y II.

La validación de la mejor calibración encontrada fue realizada en el período independiente 2011-2016. En todas las simulaciones realizadas se descartó del análisis el primer año del período debido al tiempo de estabilización del modelo hidrológico (spin-up).

2.7 Cambios a futuro con ISIMIP2b

Con el objetivo de cuantificar los posibles cambios que pueden esperarse en décadas futuras en la precipitación y la temperatura

y determinar cómo dichos cambios podrían afectar a la disponibilidad hídrica en la región de interés, se emplearon simulaciones de los cuatro MCGs disponibles en el conjunto ISIMIP2b (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR y MIROC5). En este trabajo, se consideraron los años 1980-2005 como período histórico de dichas simulaciones. Los escenarios futuros considerados correspondieron a las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) 4.5 y 8.5, las cuales describen dos climas futuros en función de la posible evolución de la concentración de los GEI (IPCC, 2013), siendo el RCP 4.5 (8.5) un escenario de cambio en el forzante radiativo moderado (alto) con respecto a los valores de la época preindustrial. Las proyecciones de ISIMIP2b empleadas pertenecen al horizonte temporal 2021-2099.

Se estudiaron los campos de cambios proyectados para cada una de las variables a nivel anual. Para cada escenario, el cambio de la temperatura máxima (mínima) fue calculado como la diferencia entre la temperatura máxima (mínima) media de cada década futura y la máxima (mínima) media del período histórico de ISIMIP2b. Los cambios en la precipitación, por su parte, fueron obtenidos como la proporción entre la precipitación acumulada media anual de las décadas a futuro y la correspondiente al período histórico. Para ambos casos y para cada punto de retícula, a su vez, se calculó la robustez del cambio. Siguiendo lo propuesto por el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Meehl y otros, 2007), se consideró que el cambio obtenido era robusto si el valor absoluto de la media del ensamble del cambio es mayor al desvío estándar multi-modelo del cambio.

Una vez calibrado el modelo VIC, ambos escenarios de ISIMIP2b fueron utilizados para cuantificar el cambio esperado para el resto del siglo XXI en los forzantes meteorológicos a nivel decadal y para mediados (2021-2059) y fines (2061-2099) de siglo, obtenidos a partir de los promedios de las décadas correspondientes

Nombre Corto	Período	Descripción	Sección	Fig.
BDHI-SMN-INTA	1999-2009	BDHI-SMN-INTA	2.2, 2.4	3
Catedral	1999-2009	Corrección en Tx, Tn	2.5.a	4
IANIGLA	1999-2009	Corrección en Tx, Tn	2.5.b	
Nac_Algoritmo	1999-2009	Calibración y validación con corrección	2.5.c	4
	2011-2016	en Tx, Tn.	2.7	5
	RCP 4.5/8.5 1980-2005 2021-2009	Simulaciones a futuro aplicando cambio proyectado por ISIMIP2b.		8 9-10
Bosque de Coníferas Matorral abierto	RCP 4.5/8.5 1980-2005 2021-2009	Pruebas de sensibilidad a la vegetación en Nac_Algoritmo	2.8	8

Table I: Simulaciones realizadas en modo Balance de Agua para la calibración y validación del modelo VIC en base a las observaciones (BDHI-SMN-INTA) y correcciones a la temperatura, así como para las proyecciones a futuro obtenidas con ISIMIP2b luego de la etapa de calibración. Se indica el nombre corto asignado y el número de sección donde se describe en detalle la construcción de cada simulación. Las simulaciones cuyos resultados se muestran en figuras se indican en la columna Fig.

Nombre Corto	Precipitación	Tx, Tn
TRMM_BA	TRMM	BDHI-SMN-INTA
TRMM_BA-cord	TRMM en cordillera únicamente, BDHI-SMN-INTA en el resto.	BDHI-SMN-INTA
TRMM_BA-max	P construida para cada punto de retícula con el máximo de P media anual entre BDHI-SMN-INTA y TRMM	BDHI-SMN-INTA
TRMM_BE	TRMM subsidiarios	BDHI-SMN-INTA llevados a escala subsidiaria con algoritmo VIC.
TRMM_BE-Nac	Ídem TRMM_BE	Ídem TRMM_BE pero con corrección a la temperatura de Nac_Algoritmo.
TRMM_SC	Ídem TRMM_BE	Ídem TRMM_BE
TRMM_SC-Nac	Ídem TRMM_BE	Ídem TRMM_BE-Nac

Table II: Simulaciones durante la etapa de calibración (ver secciones 2.4 y 2.6) con datos del TRMM. Las abreviaturas BA, BE y SC en los nombres cortos de las simulaciones indican el modo VIC en que fueron corridas (balance de agua, balance de energía y suelo congelado, respectivamente). Se indica el nombre corto asignado. Figuras no mostradas.

y descartando los años asociados al spin-up del modelo hidrológico. Más específicamente, se llevaron los datos de ISIMIP2b a la retícula del VIC mediante una interpolación bilineal y, para cada punto de retícula, se calculó el delta esperado por ISIMIP2b para cada una de las variables, en promedio para cada década. Para las temperaturas máximas, el delta fue calculado como la diferencia entre las temperaturas máximas medias proyectadas para un mes y década dados y las temperaturas máximas medias para dicho mes en el período histórico, obteniéndose de esta manera 12 valores de cambio por década y para cada RCP. Los deltas en las temperaturas mínimas fueron calculados de manera análoga, mientras que los cambios en precipitación fueron calculados de manera similar pero utilizando la proporción entre la precipitación acumulada media para las décadas a futuro y la precipitación en el período histórico. Finalmente, se sumaron para la temperatura (multiplicaron para la precipitación) los forzantes meteorológicos del período 1998-2009 previamente calibrados con los deltas obtenidos para cada uno de los modelos del ISIMIP2b y para cada RCP y década.

2.8 Sensibilidad al cambio de cobertura vegetal

La información de cobertura vegetal utilizada en este trabajo para alimentar el modelo hidrológico es en base a datos globales de relativamente baja resolución espacial, lo cual podría introducir errores principalmente en la cantidad de agua que es evapotranspirada en el balance de agua. A su vez, es posible que cambios en el clima futuro impacten en la vegetación de la región, modificando la cobertura vegetal actual y, por lo tanto, el rol que la misma tendría sobre el balance de agua. Debido a que el foco de este trabajo en los cambios futuros es a nivel decadal y multidecadal, se realizaron simulaciones de prueba (experimentos de sensibilidad) al cambio de cobertura vegetal. Dichas simulaciones consistieron en tomar escenarios extremos de cambio de cobertura con el objetivo de cuantificar el rango posible en el

cual podrían encontrarse los cambios futuros de los caudales estudiados. Para esto, se realizaron las simulaciones de clima futuro explicadas en la sección 2.7, pero reemplazando todos los puntos de entrada del modelo por una cobertura vegetal de 1) bosque de coníferas, y 2) matorral abierto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Calibración y validación del modelo hidrológico VIC

En esta sección se discuten los resultados de la calibración del modelo VIC a través de las distintas simulaciones presentadas en las tablas I y II, y se analiza la validación de la mejor calibración encontrada.

Como se discutió en las secciones 2.4 y 2.5, la primera simulación que se realizó utilizando únicamente datos de estación (BDHI-SMN-INTA) mostró un caudal medio anual fuertemente subestimado, del orden del 40 al 50 % de subestimación para cada punto de cierre (figura 3). Si bien la estimación del caudal medio anual mejoró al orden del -10 al -2% para las distintas estaciones en la simulación TRMM_BA, la forma del ciclo anual del caudal en dicha simulación continuó mostrando un único máximo en invierno (figuras no mostradas). Resultados similares se obtuvieron en las simulaciones TRMM_BA-max y TRMM_BA-cord (figuras no mostradas). Estos resultados sugirieron que la mayor parte de la precipitación ocurría en forma líquida y escurría de manera inmediata, y que los errores encontrados en la forma del ciclo anual no estaban asociados a la base de precipitación utilizada.

Las pruebas realizadas en modo balance energético y suelo congelado (TRMM_BE, TRMM_SC) realizadas con datos subsidiarios de TRMMv7 a las cuales no se les aplicó ninguna corrección a la temperatura no mostraron diferencias importantes frente a las realizadas en modo balance de agua con datos de TRMM diarios (TRMM_BA, TRMM_BA-max, TRMM_BA-cord) y continuaron sin mostrar

el máximo de caudal de primavera esperado en una cuenca fría (figuras no mostradas). Las pruebas realizadas posteriormente con el enfriamiento en las temperaturas en las nacientes de los ríos en las simulaciones con los modos de balance energético y suelo congelado (TRMM_BE-Nac, TRMM_SC-Nac, figuras no mostradas) modificaron la onda anual del caudal, las cuales comenzaron a mostrar un segundo máximo en primavera y a reducir la subestimación del caudal medio anual. Esto sugirió que la incorrecta representación de la temperatura en altura era el principal causante de los errores en el ciclo anual del caudal simulado. Debido a que realizar las simulaciones en modo balance energético y suelo congelado es más costoso computacionalmente, y a que no se observaron diferencias importantes entre las simulaciones TRMM_BA y TRMM_BE y TRMM_SC sin correcciones a la temperatura, en este trabajo se optó por enfocarse en calibrar el VIC utilizando el modo balance de agua.

La mejor calibración obtenida al simular con la corrección de temperatura de Catedral se muestra en la figura 4 en color violeta. Los resultados sugieren que disminuir la temperatura media anual en las nacientes de los ríos Limay y Neuquén (simulación Nac_Algoritmo, figuras no mostradas) permitió al modelo aumentar la ocurrencia de nevadas y, por lo tanto, la acumulación de caudal durante el invierno y posterior liberación durante la primavera y verano, permitiendo una onda anual del caudal más similar a la observable en una cuenca fría. A su vez, las simulaciones con corrección Catedral mostraron un mejor desempeño en el caudal medio anual que la simulación BDHI-SMN-INTA (figura 3).

Los resultados alentadores obtenidos con las simulaciones de Catedral motivaron la realización de las simulaciones con la corrección de IANIGLA (figuras no mostradas), que mostraron una leve mejoría frente a las simulaciones de Catedral, y, posteriormente, las correcciones en altura mediante el algoritmo (Nac_Algoritmo, figura 4). Las simulaciones

Nac_Algoritmo mostraron un excelente desempeño en las estaciones Andacollo y Paso Córdoba, y un desempeño relativamente bueno en Primera Angostura en términos de la forma del ciclo anual. Es notorio que la corrección de temperaturas permitió no solamente ajustar los picos máximos en ambas estaciones sino a su vez simular más adecuadamente el mínimo durante los meses de febrero a mayo. La serie mensual simulada por Nac_Algoritmo en Andacollo (única estación utilizada en este trabajo sin embalses aguas arriba) tuvo un coeficiente NSE (Nash y Sutcliffe, 1970) de 0,57, lo que sugiere una buena calibración en dicha estación. En cuanto al caudal medio anual -el cual resulta ser un foco de este trabajo para estimar los cambios a futuro-, el mismo no mostró desvíos mayores al 7% con respecto al observado en el mismo período excepto en la estación Paso Flores. Al ser una simulación donde se disminuyeron las temperaturas en la altura, es posible que la mejoría de la representación del caudal medio anual frente a la simulación BDHI-SMN-INTA se deba a una menor evaporación por parte del modelo.

En la figura 5 se muestra la validación correspondiente a la simulación Nac_Algoritmo de la figura 4 en el período independiente 2011-2016. Si bien la forma del caudal no se ajustó a la observada con la misma precisión con que lo hizo en el período de calibración (particularmente para las estaciones Andacollo y Paso Córdoba), la misma continuó mostrando el máximo de primavera y un mínimo hacia fines del verano y comienzos del otoño que sugieren al menos algo de aporte del deshielo. Es posible que las diferencias con el período de calibración se deban a que una de las correcciones aplicadas a la temperatura en Nac_Algoritmo fue a partir de las observaciones del IANIGLA en el 2001-2010, con lo cual dicha corrección no necesariamente sea la más adecuada para el período de validación. Por otro lado, a pesar de ser el período de validación relativamente más seco que el de calibración, los caudales medios anuales resultaron ser correctamente representados en los cuatro puntos de cierre.

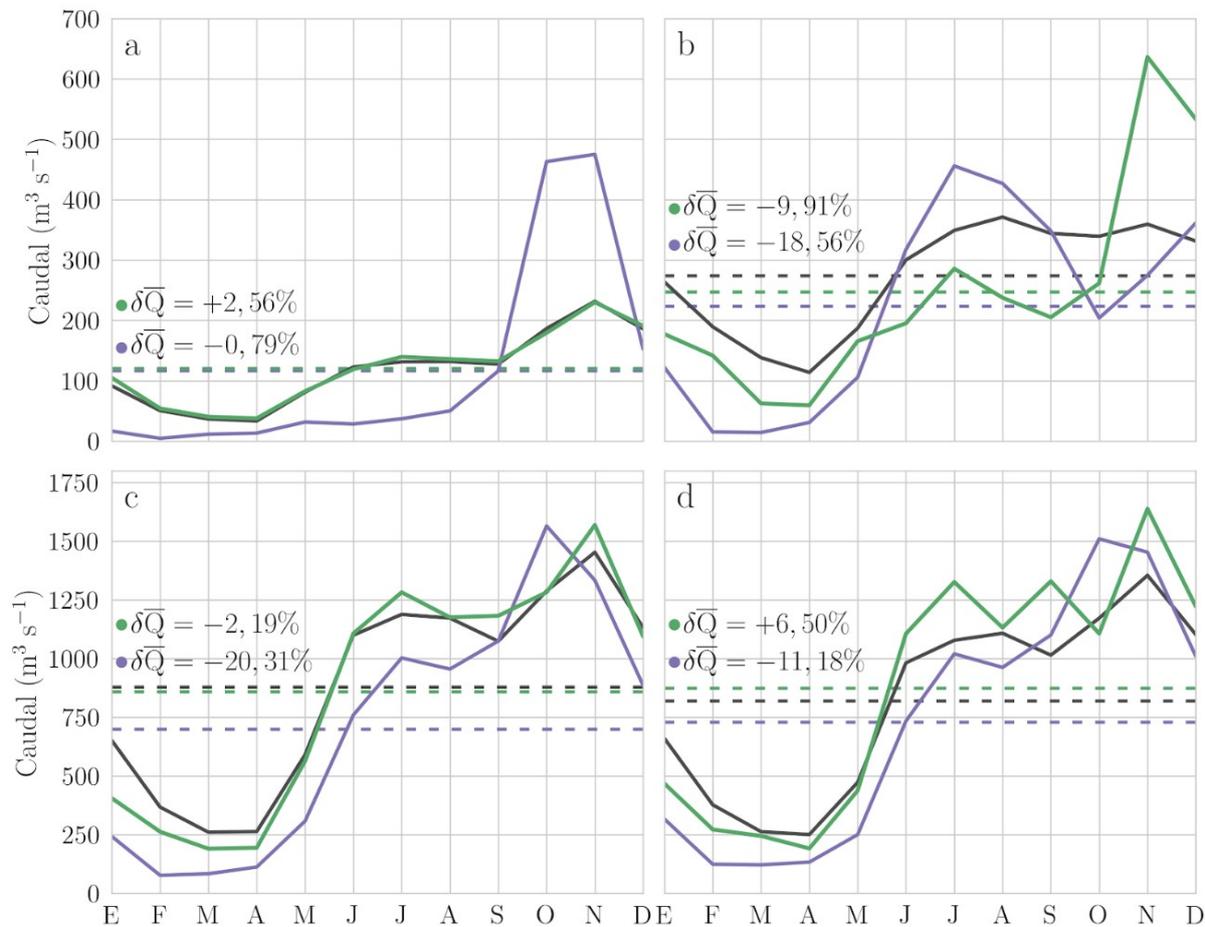


Figure 4: Ídem figura 3 pero para los puntos de cierre a) Andacollo, b) Paso Flores, c) Paso Córdoba y d) Primera Angostura; y para el caudal observado desregularizado (negro), y resultados de las simulaciones empleando el modelo hidrológico VIC para la mejor calibración obtenida con Catedral (violeta) y con Nac_Algoritmo (verde) en el período 1999-2009.

Por lo discutido anteriormente, dadas las grandes dificultades que presenta esta cuenca en cuanto a la escasez de datos, y considerando que el principal objetivo de este trabajo es estimar los cambios a futuro en el caudal medio de los ríos de la región, se consideraron válidas la calibración y validación obtenidas con Nac_Algoritmo mostrados en las figuras 4 y 5.

3.2 Cambios proyectados para el resto del siglo XXI

Una vez calibrado el modelo hidrológico VIC, en esta sección se presentan y discuten los cambios esperados a futuro por las proyecciones de ISIMIP2b y los resultados de las simulaciones

en el VIC si se dieran dichos cambios en los forzantes meteorológicos.

La media del ensamble de los cambios proyectados por ISIMIP2b para lo que resta del siglo XXI (figuras 6a,d y 7a,d) indican una disminución en la precipitación acumulada media anual al oeste de la cuenca que se intensifica en la segunda mitad de siglo y bajo el escenario con mayor concentración de GEI, con valores que alcanzan una reducción del 30% sobre gran parte de las nacientes de los ríos (figura 7d). La disminución en la precipitación media anual resulta ser robusta para ambos horizontes temporales y escenarios sobre casi la totalidad de las cuencas del Limay y Neuquén, excepto para

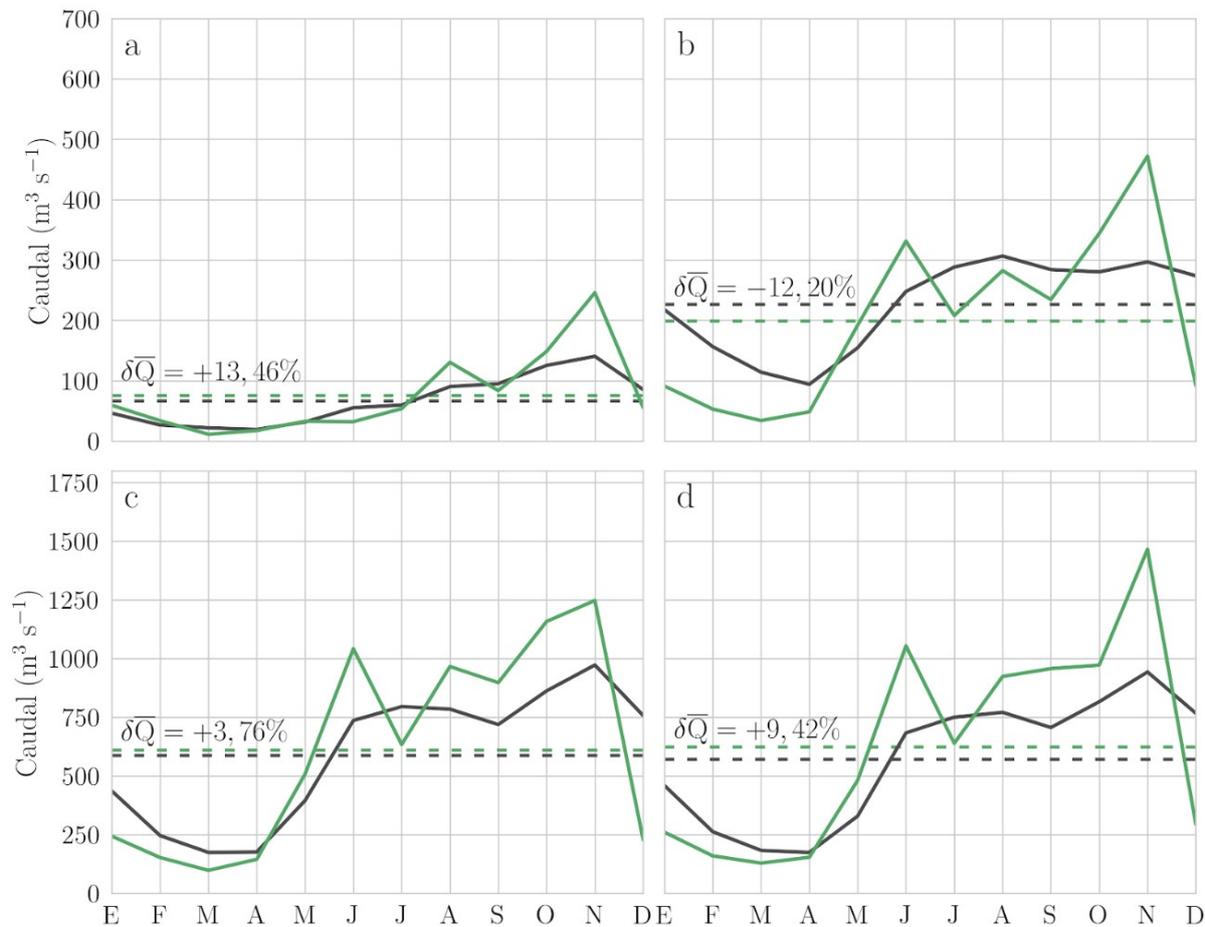


Figure 5: Ídem Figura 4 pero únicamente para la simulación Nac_Algoritmo de la Figura 4, y para el período de validación (2011-2016).

la primera mitad de siglo y para el escenario RCP 4.5, donde la robustez en los cambios de precipitación se limita a las cuencas media y superior de dichos ríos. Por su parte, sobre el este del río Negro las perspectivas indican en términos generales un aumento en la proporción de la precipitación acumulada media anual que también tiende a incrementarse hacia fines de siglo, y cuyos cambios resultan ser robustos bajo el escenario RCP 8.5 para fines de siglo. Debido a que las mayores precipitaciones anuales de la región se encuentran en las zonas montañosas, es de esperar que los cambios en el caudal a futuro estén gobernados por la disminución en la precipitación al oeste de la cuenca.

En concordancia con lo encontrado en numerosos trabajos previos (por ejemplo, Stocker y otros,

2013), los ensambles multi-modelo de cambios en las temperaturas máximas y mínimas de ISIMIP2b (figuras 6 y 7) también muestran un aumento sobre toda la región para lo que resta del corriente siglo y que se acentúa conforme aumenta la concentración de GEI en el período 2061-2099 y en el escenario RCP 8.5. Los cambios encontrados en las temperaturas resultaron ser robustos en toda la región de interés, y la perspectiva de aumento de varios grados hacia fines de siglo para ambos escenarios sobre las zonas montañosas (más intenso en RCP 8.5) sugiere que es posible que se vea afectada la ocurrencia de nevadas y, por lo tanto, la acumulación de caudal durante la época invernal.

Como era de esperarse, la media del ensamble multi-modelo de las simulaciones realizadas

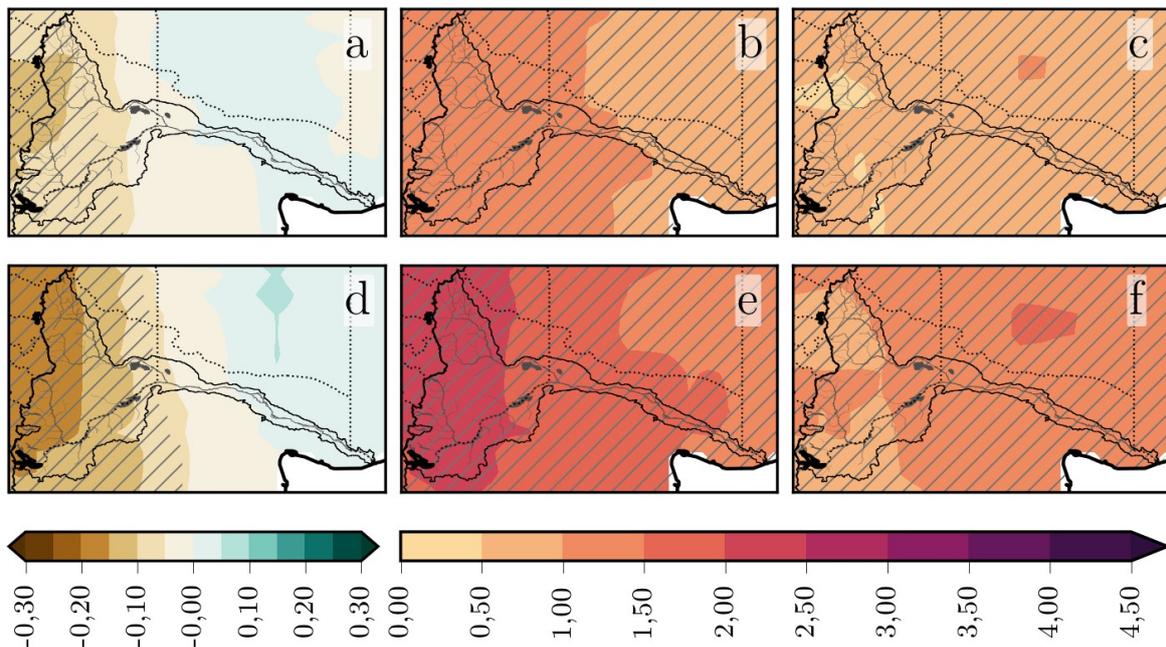


Figure 6: Cambios proyectados (ensamble multi-modelo) por el conjunto de modelos climáticos globales contenidos en ISIMIP2b bajo el escenario RCP 4.5 con respecto al período histórico (1980-2005) para a, b y c) 2021-2059; y para d, e y f) 2061-2099. Se muestran los cambios para: a y d) la precipitación acumulada media anual (cambio proporcional, sin unidades), donde los valores positivos (negativos) indican una perspectiva de aumento (disminución); b y e) temperaturas máximas medias anuales (diferencias en °C), donde los valores positivos indican un aumento en las temperaturas máximas medias anuales en las proyecciones; c y f) ídem paneles b y e) pero para las temperaturas mínimas medias anuales. Las regiones con rayado diagonal indican que el cambio proyectado fue robusto.

en el período 1999-2009 a las cuales se les aplicó el cambio proyectado a futuro en los forzantes meteorológicos (figura 8) muestran una reducción en el caudal medio anual que acompaña los cambios proyectados en la precipitación. Dicha reducción fue encontrada en la media del ensamble en todas las estaciones, escenarios y horizontes temporales, con una clara intensificación en la reducción del caudal medio a medida que se incrementan los GEI con el cambio de RCP y hacia fines de siglo.

La reducción en el caudal medio anual proyectado para la estación Andacollo en términos de la media del ensamble (figura 8a, cobertura vegetal realista) no superaría el 11 % para la primera mitad de siglo sin importar el escenario de forzante radiativo, mientras que

para el período 2061-2099 estos valores resultan ser del 16 % para un RCP 4.5 y del 35 % para el RCP 8.5. Por su parte, las estaciones Paso Flores y Paso Córdova (figura 8b, c) muestran una marcada reducción, con valores de entre el 20 y 30 % para el período 2021-2059, y reducciones que superan el 35 % (50 %) del caudal medio anual para fines de siglo y RCP 4.5 (8.5). En cuanto a Primera Angostura (figura 8d), la reducción del caudal medio anual en la media del ensamble resulta ser del 12 % (21 %) para la primera mitad de siglo y forzante radiativo moderado (alto), mientras que dicho valor se incrementa al 29 % (50 %) para fines de siglo.

La dispersión entre los miembros del ensamble en la figura 8 resultó ser mayor en Andacollo que en las demás estaciones, posiblemente debido a

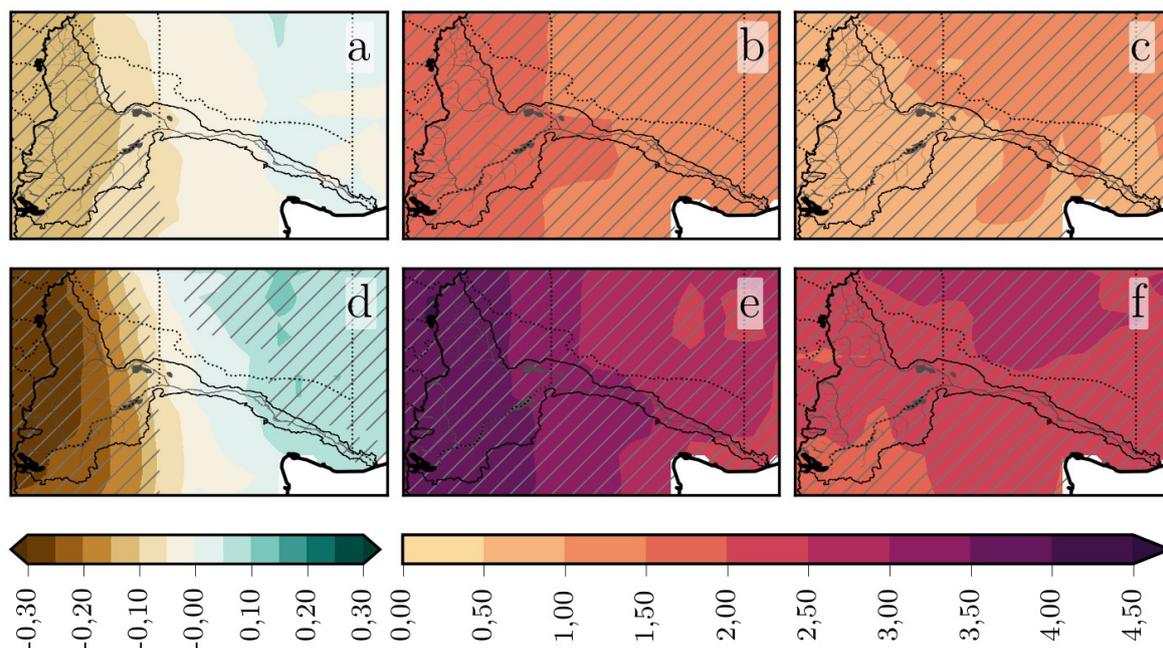


Figure 7: Ídem Figura 6 pero bajo el escenario RCP 8.5.

que la subcuenca asociada es de una topografía brusca y con grandes elevaciones montañosas, lo que podría explicar las mayores dispersiones encontradas en los campos de precipitación de los miembros individuales (figuras no mostradas). A su vez, se encontró para las estaciones Paso Córdova y Primera Angostura una mayor dispersión para el RCP 4.5 y primera mitad de siglo que para la estación Paso Flores. Es posible que esto se deba a que las áreas de las cuencas asociadas a Paso Córdova y Primera Angostura son más grandes que la asociada a Paso Flores, con lo cual es de esperarse que haya más puntos en los cuales los modelos difieran. Salvo por la estación Andacollo en el RCP 8.5 para fines de siglo, la dispersión en el resto de las estaciones tiende a disminuir conforme se incrementa la señal de secamiento en la precipitación con el paso del tiempo y con el incremento de los GEI. Se encontró que el incremento en la dispersión de Andacollo para dicho escenario y horizonte está asociado a una fuerte reducción en la precipitación en la región noroeste de los miembros IPSL-CM5A-LR y GFDL-ESM2M frente a las perspectivas de reducción en la precipitación del HadGEM2-ES y del

MIROC5 (figuras no mostradas). Nuevamente, es posible que esta diferencia esté asociada a la problemática de la región montañosa.

Si bien la dispersión entre miembros en algunos casos resultó ser elevada, es notorio que, en términos generales, los miembros individuales coinciden en el signo del cambio del caudal medio anual, excepto por la estación Andacollo durante la primera mitad de siglo, en cuyo caso se encontró un único miembro (HadGEM2-ES) con una perspectiva de aumento del caudal medio anual. Este aumento esperado en el caudal medio anual resultó estar asociado con un aumento en la precipitación en la región de Andacollo para el HadGEM2-ES, para ambos RCP y para el período 2021-2059 (figuras no mostradas). Sin embargo, es importante recordar que la reducción esperada en la precipitación de la media del ensamble para ambos escenarios y para la región mencionada resultó ser robusta (figuras 6 y 7).

En cuanto a la sensibilidad en el cambio de cobertura vegetal, se encontró que reemplazar la vegetación realista por un bosque de coníferas en todos los puntos del modelo

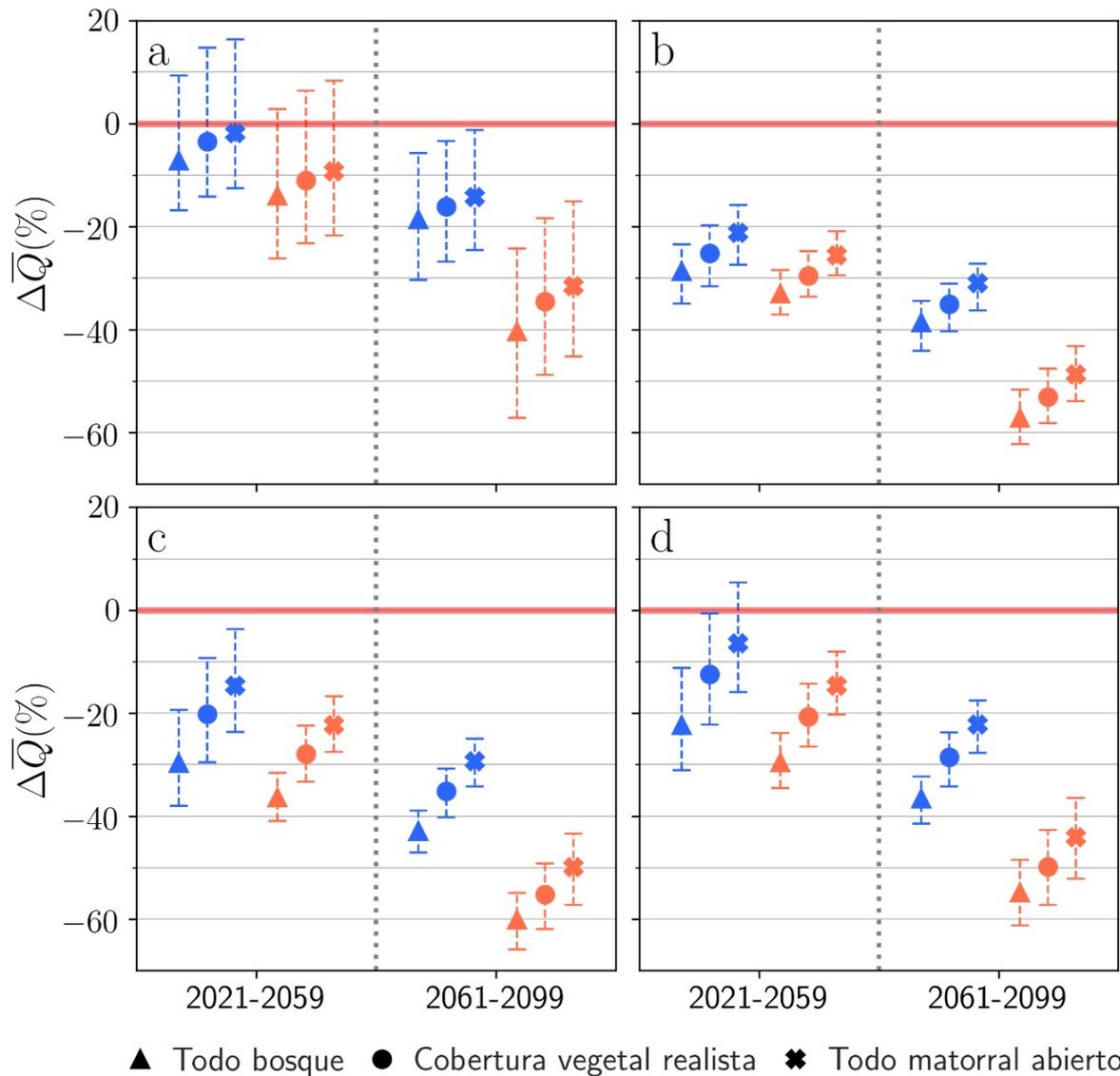


Figure 8: Cambios porcentuales simulados en el caudal medio anual para la primera y segunda mitad de siglo y para los escenarios RCP 4.5 (celeste) y RCP 8.5 (naranja) en a) Andacollo, b) Paso Flores, c) Paso Córdova y d) Primera Angostura, para las simulaciones realizadas con cobertura vegetal realista y para las pruebas de sensibilidad de cambio de cobertura vegetal. En marcadores llenos se indican la media del ensamble multi modelo. Las barras superiores e inferiores indican la máxima dispersión de los miembros del ensamble.

(figura 8) intensificaría la señal de reducción de caudal medio anual para todas las estaciones, escenarios y horizontes temporales, tanto para la media del ensamble como para los miembros individuales. Este comportamiento es coherente con un aumento en la evapotranspiración de la vegetación. Por su parte, la utilización de

cobertura vegetal de matorral abierto para la totalidad de la cuenca mostró una señal opuesta: para todos los casos, el caudal medio anual mostró una señal de reducción de caudal medio anual debilitada frente al caso de cobertura vegetal realista. Lo encontrado en este último caso es a su vez consistente con un escenario en

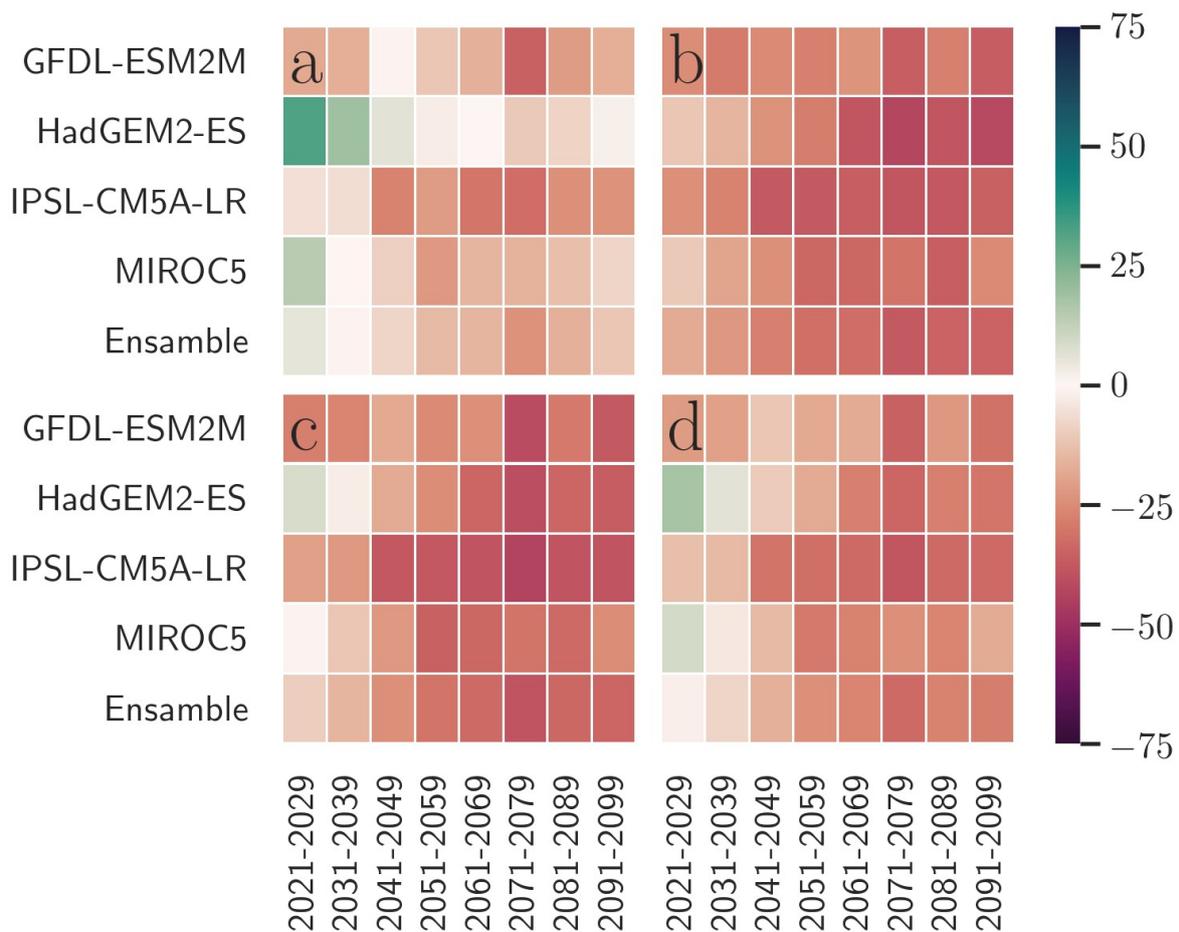


Figure 9: Cambios porcentuales simulados en el caudal medio anual para a) Andacollo, b) Paso Flores, c) Paso Córdoba y d) Primera Angostura al aplicarles el delta de cambios proyectados por los distintos modelos climáticos globales incluidos en el conjunto ISIMIP2b por década, para cada modelo y para la media del ensamble bajo el escenario RCP 4.5.

el cual se reduce la evapotranspiración.

Los resultados encontrados con las simulaciones realizadas utilizando los cambios extremos en la cobertura vegetal sugieren que el signo y la magnitud de los cambios en caudal medio anual a futuro están fuertemente controlados por los cambios en la precipitación y temperatura, mientras que los cambios en la cobertura vegetal podrían llegar a tener un papel secundario.

Un estudio de los cambios proyectados para el caudal medio anual por década sugiere que, en términos generales, se espera una reducción del mismo que aumenta conforme pasa el tiempo

(figuras 9 y 10), excepto por las décadas del 2070 en el RCP 4.5 y la del 2050 en el RCP 8.5, durante las cuales la media del ensamble muestra una reducción de caudal medio anual más intensa con respecto a la década que preceden.

En cuanto a los miembros individuales bajo el escenario RCP 4.5 (figura 9), la mayoría de los modelos, para todas las estaciones y para casi todas las décadas analizadas coinciden en el signo del cambio del caudal medio anual: las perspectivas indican una reducción. La excepción más clara es el modelo HadGEM2-ES, el cual durante las primeras 3 décadas presenta perspectivas de aumentos del caudal medio

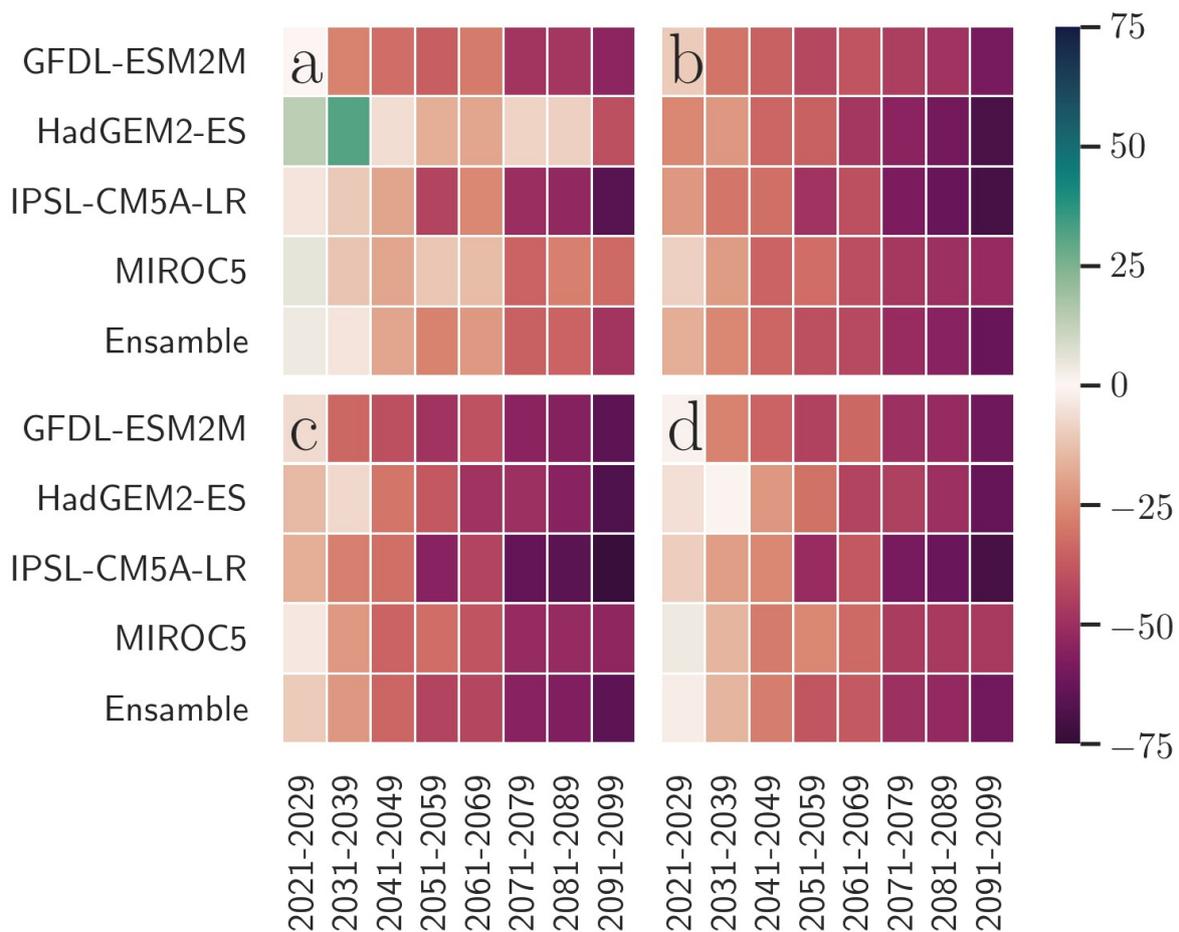


Figure 10: Ídem figura 9 pero para el escenario RCP 8.5

anual en la estación Andacollo de hasta el 32% (2021-2029), y aumentos de menor magnitud durante las primeras dos décadas para Primera Angostura y durante 2021-2029 en Paso Córdoba. Por su parte, el MIROC5 es el único otro modelo que indica perspectivas de aumento de caudal medio anual, y ocurre únicamente durante 2021-2029 para Andacollo, Paso Córdoba y Primera Angostura, con magnitudes inferiores a las encontradas en HadGEM2-ES.

Para el escenario con forzante radiativo alto (figura 10), la estación Andacollo es la única que muestra incrementos del caudal medio anual mayores al 5% en los modelos HadGEM2-ES y MIROC5, y ocurre durante las próximas dos décadas.

Los campos de precipitación del HadGEM2-ES y del MIROC5 sugieren que los posibles incrementos encontrados en ambos escenarios en el caudal medio anual de las estaciones Andacollo, Paso Córdoba y Primera Angostura parecieran estar asociados principalmente a aumentos en la precipitación media anual en las cuencas de los ríos Neuquén y Negro (figuras no mostradas). Sin embargo, es importante notar que los aumentos sobre el Neuquén no se observan en la media del ensamble (análisis por décadas, figuras no mostradas), y si bien sí se observan aumentos en la precipitación del ensamble sobre el río Negro, los mismos resultaron ser no robustos.

Finalmente, bajo ambos escenarios, el modelo que resultó ser más pesimista en cuanto a la reducción del caudal medio anual para todas

las estaciones y casi todas las décadas fue el IPSL-CM5A-LR. Es posible que esto se asocie a una disminución en la precipitación media anual y aumentos en las temperaturas máximas y mínimas más marcados que el resto de los modelos (figuras no mostradas).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se aplicó el modelo hidrológico VIC a las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro con el objetivo principal de estimar los posibles cambios que el caudal medio anual de dichos ríos tendrá en el contexto del cambio climático.

Las cuencas en cuestión presentaron numerosas dificultades a la hora de la calibración del modelo. Una de ellas surgió de la falta de información para adaptar los caudales naturales a la regulación artificial, por lo que fue necesario comparar las ondas anuales de los caudales de las estaciones ubicadas aguas abajo de las represas con las ondas anuales desregularizadas, es decir con el ciclo anual del período previo a la construcción de las represas, pero con la media del período actual. Una de las suposiciones al aplicar esta metodología es que la forma de la onda anual de la estación no sufrió cambios producto de otros efectos como podría ser el calentamiento global. Sería interesante contar con datos que permitan incorporar la presencia de las represas al caudal simulado, permitiendo de esta manera calibrar el modelo con sus valores mensuales.

Tal vez la dificultad más importante encontrada en este trabajo fue la escasez de datos meteorológicos principalmente de estaciones de altura, información que resulta vital para determinar si la precipitación ocurre de manera líquida, escurriendo al cauce directamente, o si lo hace en estado sólido, acumulándose durante el invierno y liberándose conforme aumentan las temperaturas. En este trabajo, solo se contó con datos de altura a nivel mensual, lo cual mostró ser de gran ayuda para corregir las temperaturas de altura, pero fue necesario continuar corrigiendo las temperaturas de las nacientes mediante

un algoritmo para obtener una calibración satisfactoria. La enorme mejoría encontrada con las simulaciones realizadas únicamente con correcciones en la temperatura en las nacientes de los ríos parece confirmar la gran necesidad de contar con datos de temperatura de altura para calibrar un modelo hidrológico como el VIC en la región.

A pesar de haber realizado la calibración del modelo a partir de correcciones a las temperaturas con datos mensuales de altura del período 2001-2010, la simulación realizada en el período de validación 2011-2016 resultó ser satisfactoria principalmente en términos del caudal medio anual.

Con respecto a las perspectivas a futuro, se estudió cómo cambiaría el caudal medio anual del período utilizado para la calibración (1999-2009) si se dieran los cambios en la precipitación y en las temperaturas máxima y mínima que proyectan los distintos modelos climáticos globales contenidos en el conjunto ISIMIP2b para dos escenarios de concentraciones de GEI distintos (RCP 4.5 -o escenario de aumento de concentración de GEI moderado- y RCP 8.5 -escenario de aumento alto) para las décadas del 2020 al 2090, y para la primera mitad (2021-2059) y segunda mitad (2061-2099) del siglo XXI. Es decir, se calcularon los cambios proyectados por los modelos climáticos para cada una de las variables mencionadas, para cada escenario y horizonte temporal futuro frente al presente histórico (1980-2005), y se aplicaron dichos cambios a los forzantes meteorológicos con los que se realizaron las simulaciones del VIC ya calibradas. Dichos forzantes representan, por lo tanto, cómo variaría el clima del período 1999-2009 si se dieran los cambios en el clima que proyectan los diversos miembros, escenarios y horizontes temporales del ISIMIP2b.

La media del ensamble multi-modelo de las simulaciones al aplicar los cambios proyectados por ISIMIP2b mostró una reducción del caudal medio anual para todas las estaciones independientemente de la trayectoria de

concentraciones de GEI considerada. Los resultados sugieren que bajo un escenario de concentraciones de GEI de RCP 8.5, la reducción en los caudales se verá intensificada, especialmente hacia fines de siglo, donde las proyecciones indican pérdidas de caudal del 35 % en Andacollo y de alrededor del 50 % en Paso Flores, Paso Córdova y Primera Angostura. Se encontró que la disminución en el caudal se deberá principalmente a una reducción en las precipitaciones en los Andes del norte de la Patagonia argentina (cambios robustos) que se observó para la media del ensamble para ambos RCP y para la primera y segunda mitad de siglo, con reducciones en la precipitación media anual del orden del 30 % (RCP 8.5, segunda mitad de siglo) sobre gran parte del oeste de la provincia de Neuquén. A su vez, es posible que el aumento de temperaturas proyectado para toda la región (cambios robustos) contribuyan en el aumento de la evapotranspiración y, por lo tanto, en la reducción del caudal.

Por otro lado, teniendo en cuenta que es posible que la vegetación se adapte frente al clima cambiante, se analizó la sensibilidad del modelo VIC al reemplazar la cobertura vegetal en todos los puntos de retícula por 1) todo bosque de coníferas, y 2) todo matorral abierto. Estas pruebas fueron realizadas con el objetivo de obtener escenarios extremos de cambio de cobertura vegetal y poder cuantificar cotas máximas y mínimas entre las cuales podrían encontrarse los cambios esperados en el caudal medio anual en el contexto del cambio climático. Los resultados encontrados sugieren que, si bien reemplazar la cobertura vegetal con todo bosque (todo matorral) aumentaría (disminuiría) la evapotranspiración y reduciría (aumentaría) relativamente el caudal medio anual con respecto a la cobertura vegetal realista, las diferencias en cambio a futuro del caudal medio anual entre las diferentes coberturas no resultaron ser superiores al 10 %, y en ningún caso hubo cambio de signo en el cambio esperado en el caudal medio anual producto del cambio de cobertura vegetal. Esto sugiere que los cambios en el caudal medio anual están fuertemente controlados por los cambios

en el clima, y la vegetación podría tener un papel secundario.

Los resultados encontrados en este trabajo pueden ser de utilidad para la adaptación y para ayudar al desarrollo de estrategias de mitigación del impacto hidrológico del cambio climático en la región de estudio. Sin embargo, los tomadores de decisiones deben tener en cuenta que existen diversas fuentes de incertidumbre asociadas a las proyecciones climáticas, las cuales fueron solo parcialmente evaluadas en este trabajo. Si bien los cambios en el clima medio para la región del Comahue coinciden en signo con las perspectivas de otros conjuntos de modelos como los del Programa Mundial de Investigaciones del Clima (WCRP, por sus siglas en inglés) del CMIP5 (Blázquez y Núñez, 2013), es posible que el grado de incertidumbre esté siendo subestimado debido al bajo número de modelos utilizado en ISIMIP2b (Iso y otros, 2020). Por otro lado, si bien en este estudio se consideró la incertidumbre asociada al cambio en vegetación, estudios anteriores (Jobbágy y otros, 2013) indican que, principalmente en regiones semiáridas como el caso del llano de la región del Comahue, los cambios en la vegetación pueden tener una importancia relativa más grande que la encontrada en este trabajo. Es necesario, por lo tanto, contar con más cantidad de estudios de impacto del cambio climático sobre la región.

Agradecimientos: Al IANIGLA por proveer los datos de temperatura mensual utilizados en este trabajo. A Katharina Berger del Centro de Computación para la Investigación del Clima en Alemania DKRZ (en alemán, DeutschesKlimarechenzentrum) por facilitar la descarga de los datos del ISIMIP2b.

REFERENCIAS

- Bianchi, E., R. Villalba, M. Viale, F. Couvreur y R. Marticorena, 2015: New Precipitation and Temperature Grids for Northern Patagonia: Advances in Relation to Global Climate Grids. *J. Meteorol. Res.*, 30, 38-52. Blázquez, J. y

- M. N. Núñez, 2013: Analysis of uncertainties in future climate projections for South America: comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 models. *Springer, Climate Dynamics*, 41, 3,8-2013, 1039-1056.
- Bronstert, A., V. Kolokotronis, D. Schwandt y H. Straub, 2007: Comparison and evaluation of regional climate scenarios for hydrological impact analysis: General scheme and application example. *Int. J. Climatol.*, 27, 1579-1594.
- Chilès, J. y P. Delfiner, 2012: *Kriging. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. Second Edition*, John Wiley & Sons.
- Chu, J. T., J. Xia, C.-Y. Xu y V. P. Singh, 2010: Statistical downscaling of daily mean temperature, pan evaporation and precipitation for climate change scenarios in Haihe River, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 99, 1-2, 149-161.
- Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico, 2017: Informe Anual. CAMMESA. Recuperado de: <http://portalweb.cammesa.com/memnet1/Pages/descargas.aspx>.
- Forni, L., M. Escobar, P. Cello, M. Marizza, G. Nadal, L. Girardin, F. Losano, L. Bucciarelli, C. Young y D. Purkey, 2018: Navigating the water-energy governance landscape and climate change adaptation strategies in the northern Patagonia region of Argentina. *Water*, 10(6), 1-18.
- Frieler, K., S. Lange, F. Piontek, C. P. O. Reyer, J. Schewe, L. Warszawski, F. Zhao, , L. Chini, S. Denvil, K. Emanuel, T. Geiger, K. Halladay, G. Hurtt, M. Mengel, D. Murakami, S. Ostberg, A. Popp, R. Riva, M. Stevanovic, T. Suzuki, J. Volkholz, E. Burke, P. Ciais, K. Ebi, T. D. Eddy, J. Elliott, E. Galbraith, S. N. Gosling, F. Hattermann, T. Hickler, J. Hinkel, C. Hof, V. Huber, J. Jägermeyr, V. Krysanova, R. Marcé, H. Müller Schmied, I. Mouratiadou, D. Pierson, D. P. Tittensor, R. Vautard, M. van Vliet, M. F. Biber, R. A. Betts, B. L. Bodirsky, D. Deryng, S. Frohking, C. D. Jones, H. K. Lotze, H. Lotze-Campen, R. Sahajpal, K. Thonicke, H. Tian e Y. Yamagata, 2017: Assessing the impacts of 1.5°C global warming – simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). *Geosci. Model Dev.*, 10, 4321-4345.
- González, M. H., F. Losano, y S. Eslamian, 2020: Rainwater Harvesting Reduction Impact on Hydro-Electric in Argentina. *Handbook of Water Harvesting and conservation*. John Wiley & Sons ed.,1-16.
- Greve, P., B. Orlowsky, B. Mueller, J. Sheffield, M. Reichstein y S. Seneviratne, 2014: Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience*. 7.
- Grimson, R., N. Montroull, R. Saurral, P. Vasquez e I. Camilloni, 2013: Hydrological modelling of the Iberá Wetlands in southeastern South America. *J. of Hydrology*, 503, 47-54.
- Haddeland, I., T. Skaugen y D. P. Lettenmaier, 2006: Anthropogenic impacts on continental surface water fluxes. *Geophys. Res. Lett.*, 33(8).
- Haddeland, I., T. Skaugen y D. P. Lettenmaier, 2007: Hydrologic effects of land and water management in North America and Asia: 1700-1992. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2), 1035-1045.
- Hamlet, A. F. y D. P. Lettenmaier, 1999: Effects of Climate Change on Hydrology and Water Resources in the Columbia River Basin. *Am. Water Res. Assoc.*, 35(6), 1597-1623.
- Hoffman, G. J. y D. T. Bolvin, 2015: Real-Time TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA-RT): 3B42RT, version 7. NASA's Precipitation Processing Center. Fecha de acceso: Junio, 2017.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535.
- Ito, R., H. Shiogama, T. Nakaegawa e I. Takayabu, 2020: Uncertainties in climate

- change projections covered by the ISIMIP and CORDEX model subsets from CMIP5. *Geoscientific Model Development*, 13, 3, 859-872.
- Jobbágy, E. G., A. M. Acosta, y M. D. Nosetto, 2013: Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina). *Ecología austral*, 23(2), 87-96.
- Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood y S. J. Burges, 1994: A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.*, 99(D7), 14415–14428.
- Liang X., E. F. Wood y D. P. Lettenmaier, 1996: Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification. *Global Planet Change*, 13, 195-206.
- Lohmann, D., R. Nolte-Holube y E. Raschke, 1996: A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes. *Tellus*, 48(A), 708-721.
- Lohmann, D., E. Raschke, B. Nijssen y D. P. Lettenmaier, 1998: Regional scale hydrology: II. Application of the VIC-2L model to the Weser River, Germany. *Hydrological Sciences Journal*, 43:1, 143-158.
- Losano, F., C. Pablo, M. Marizza, L. Forni, C. Young, G. Nadal, O. Girardin, L. Bucciarelli, R. Vallejos y S. Godoy, 2015: Modelo de gestión para la evaluación del estrés hídrico en la región del Comahue. VIII Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos. 22-25 de abril de 2015. Santa Fe, Argentina.
- Maraun, D., F. Wetterhall, A. M. Ireson, R. E. Chandler, E. J. Kendon, M. Widmann, S. Brienen, H. W. Rust, T. Sauter, M. Themeßl, V. K. C. Venema, K. P. Chun, C. M. Goodess, R. G. Jones, C. Onof, M. Vrace I. Thiele-Eich, 2010: Precipitation downscaling under climate change, Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Rev. Geophys.*, 48, RG3003.
- Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. Mitchell, R. J. Stouffer, y K. E. Taylor, 2007: The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate 436 change research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, 1383-1394.
- Ministerio de Hacienda de la Nación, 2017a: Informes Productivos Provinciales. Río Negro, Año 2 - N° 13. Recuperado de: https://www.economia.gov.ar/peconomica/dnper/fichas_provinciales/RioNegro_2017VF.pdf.
- Ministerio de Hacienda de la Nación, 2017b: Informes Productivos Provinciales. Neuquén, Año 2 - N° 15. Recuperado de: https://www.economia.gov.ar/peconomica/dnper/fichas_provinciales/SSPMicro%20-%20Informes%20Productivos%20Provinciales%20-Neuquen.pdf.
- Montroull N., R. Saurral, I. Camilloni, R. Grimson y P. Vasquez, 2013: Assessment of climate change on the future water levels of the Iberá wetlands, Argentina, during the twenty-first century. *International Journal of River Basin Management*, 11:4, 401-410.
- Nash, J. E y J. V. Sutcliffe, 1970: River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 3, 282-290.
- Nadal, G., O. Girardin, F. Losano, M. Marizza, P. Cello, L. Bucciarelli, L. Forni, I. Camilloni, G. Bravo, F. Lallana y N. Di Sbroiavacca, 2017: La Planificación del manejo de los recursos hídricos en el contexto del cambio climático. Una aplicación a la región del Comahue, Patagonia, Argentina. *Aqua-LAC*, 9(2), 59-72.
- Nijssen, B., D. Lettenmaier, D. Lohmann y E. Wood, 2001: Predicting the Discharge of Global Rivers. *Journal of Climate*. 14(15), 3307-3323.
- Piani, C., y J. O. Haerter, 2012: Two-dimensional bias correction of temperature and precipitation copulas in climate models. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20401.
- Salio, P., M. P. Hobouchian, Y. García Skabar y D. Vila, 2015: Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. *Atmospheric Research* 163. 6th Workshop of the International Precipitation Working Group, 146-161.

- Saurral, R., 2010: The Hydrologic Cycle of the La Plata Basin in the WCRP-CMIP3 Multimodel Dataset. *J. Hydrometeor.*, 11, 1083–1102
- Sherwood, S. y F. Qiang, 2014: A Drier Future? *Science*, 343, 6172, 737-739.
- Thornton, P. y S. Running., 1999: An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology* 93, 211-228.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer y G.A. Meehl, 2012: An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485-498.
- Teutschbein, C. y J. Seibert, 2012: Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456–457, 12-29.
- Wood, A. W., E. P. Maurer, A. Kumar y D. P. Lettenmaier, 2002: Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 4429.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.