

# MODELACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA AL CAMBIO CLIMÁTICO: EXPERIENCIAS DE DOS CUENCAS DE LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE

• Alejandra Stehr • Patrick Debels • José Luis Arumi •  
*Universidad de Concepción, Chile*

• Hernán Alcayaga • Francisco Romero •  
*Ministerio de Obras Públicas, Chile*

## Resumen

Durante los últimos años se ha observado un cambio progresivo de las condiciones climáticas en el mundo, que ha tenido como consecuencia aumentos de la frecuencia y severidad de fenómenos, como inundaciones y sequías. Por lo anterior, es necesario contar con herramientas que permitan tomar decisiones de manera informada. Una forma de evaluar el efecto de un cambio en las precipitaciones y temperaturas respecto de la disponibilidad de agua de una cuenca es utilizar un modelo hidrológico distribuido, el cual, una vez calibrado y validado, es perturbado con cambios (% variación precipitación y  $\Delta$  de cambio en la temperatura) obtenidos de distintos escenarios climáticos futuros. El objetivo de este trabajo consiste en cuantificar, a partir de simulaciones realizadas mediante un modelo matemático, la sensibilidad de la hidrología de dos subcuencas del río Biobío frente a un amplio set de plausibles escenarios de cambio climático. Además se analiza la amplitud en la respuesta del modelo hidrológico obtenido a partir de los distintos escenarios derivados directamente de diferentes modelos de circulación global (MCG), evaluándose también el impacto de usar variaciones de precipitación y temperatura obtenidas de un modelo de circulación Regional (MCR). Los resultados indican que, para la mayor parte de los escenarios de cambio climático modelados, se producirá una reducción en la magnitud de los caudales medios mensuales y anuales, siendo esta variación mayor en las épocas de primavera y verano. Estos resultados permiten realizar una primera interpretación cualitativa de los potenciales impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Biobío.

**Palabras clave:** cambio climático, modelación hidrológica, SWAT, MCR, MAGICC-SCENGEN, Chile, Biobío, cuenca andina.

## Introducción

Durante las últimas cinco décadas se ha producido un notable crecimiento en el consumo de agua debido al aumento explosivo de la población mundial, combinado con un desarrollo económico sin precedentes (Xu y Singh, 2004). Este crecimiento en la demanda del recurso agua va acompañado de un aumento en la contaminación del mismo recurso. En muchas partes del mundo, el efecto conjunto de ambas

tendencias ha impedido y sigue impidiendo un desarrollo económico social y ambientalmente sostenible en el tiempo. Entre los factores que influyen la inadecuada gestión del recurso agua se encuentra el insuficiente conocimiento de la disponibilidad de recursos hídricos y su relación tanto con las actividades humanas como con factores naturales, tales como las variables climáticas regionales y locales.

Considerando la actual demanda de agua para consumo humano, industrial y de los

ecosistemas, en el ámbito mundial existe preocupación por la influencia que pueden tener los cambios en el clima causados por el calentamiento global sobre la disponibilidad de los recursos hídricos. Por ello, una adecuada consideración de los potenciales impactos de un cambio climático sobre los recursos hídricos debiera constituir un requisito previo para emprender cualquier proyecto de largo plazo que esté relacionado con el uso de dichos recursos, para así poder adoptar aquellas estrategias de gestión más apropiadas, a fin de evitar efectos ambientales adversos, así como futuros conflictos entre los distintos usuarios.

El cuarto informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2007) establece que “La mayor parte del aumento observado del promedio mundial de temperatura desde mediados del siglo XX se debe muy probablemente al aumento observado de las concentraciones de gases invernadero antropógenos”. Dentro de los cambios físicos más importantes que se proyectan, se tienen modificaciones en la temporalidad de los caudales y el volumen de agua en los ríos (Whitfield *et al.*, 2002). En cuencas con un aporte nival relevante, el aumento de las temperaturas según Gleick (1986, 1987), y Dankers y Christensen (2005) podría tener tres efectos: (1) El incremento en la razón entre precipitación y nieve durante los meses de invierno, (2) la disminución de la temporada con nieve, (3) el incremento de la tasa del derretimiento nival. Lo anterior ocasionaría un aumento de la escorrentía directa por unidad de precipitación durante el invierno; el máximo en la escorrentía ocurriría más temprano en primavera y durante el verano se producirá un secado más rápido e intenso del suelo (Gleick, 1987). El calentamiento de las regiones de alta montaña podría dar lugar a la desaparición de importantes superficies actualmente cubiertas con nieve y glaciares. Dado que a menudo estas áreas contribuyen, de manera importante, a los caudales de estiaje, en muchas zonas el proceso de calentamiento también podría

reducir la disponibilidad de agua para riego, generación de energía hidroeléctrica y uso doméstico (Chiew, 2006).

Para Sudamérica, Watson *et al.* (1998) indican que, como consecuencia del calentamiento global, se esperan importantes cambios en los patrones de precipitación regionales. Por su parte, Hulme y Sheard (1999) proyectan disminuciones en las precipitaciones anuales en el cono sur de Sudamérica de entre 3 y 18% entre 2020 y 2080, en comparación con el periodo 1961-1990. En el caso de la zona del centro-sur de Chile en particular, el estudio “Variabilidad climática en Chile para el siglo XXI” (CONAMA-DGE, 2006) estima, con base en los resultados obtenidos a partir de la aplicación de un Modelo de Circulación Regional (MCR), que se produciría un aumento en las temperaturas durante el periodo 2071-2100, con un cambio mayor en verano, que podría exceder los 5 °C en algunos sectores cordilleranos. En el caso de las precipitaciones, el informe proyecta una disminución, siendo ésta mayor en la costa que en la cordillera; estimándose en uno de los escenarios entre un 25 y 50% menos de precipitaciones que en la actualidad. Por otro lado, debido a un alza en altura de la isoterma 0 °C, las crecidas invernales de los ríos con régimen pluvionival se verían incrementadas y la reserva nival disminuiría.

Hoy en día existe un notable incremento en la tendencia de los estudios que evalúan, en los ámbitos regional o local, el impacto potencial del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos. Se están usando diferentes enfoques para lograr este objetivo, entre los que se incluye el uso de modelos climáticos, hidrológicos y técnicas de regionalización.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo consiste en cuantificar, a partir de simulaciones realizadas mediante un modelo matemático, la sensibilidad de los caudales, acumulación y derretimiento de nieve en dos subcuencas del río Biobío, frente a variaciones en la precipitación y temperatura. Estas variaciones fueron obtenidas de un

set de 44 escenarios de cambio climático, derivados directamente de diferentes modelos de circulación global (MCG), y a partir de la aplicación de un MCR. Se analizó también la diferencia con respecto al escenario climático base de los promedios anuales y mensuales de caudales, cantidad de nieve caída y derretida obtenida a partir de la modelación de los distintos escenarios de cambio climático. Se discuten los potenciales impactos de las variaciones en las precipitaciones y la temperatura por efecto del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Biobío, y se realiza una reflexión sobre las consecuencias de los altos niveles de incertidumbre asociados con las proyecciones climáticas existentes actualmente.

### Estimaciones sobre cambio climático

Una temprana evaluación de la vulnerabilidad de la sociedad y/o de los sistemas físicos frente al cambio climático permite anticipar potenciales impactos negativos y así planificar y dictar acciones con tiempo; por ejemplo, asegurar un uso futuro adecuado de los recursos hídricos. Como parte de la evaluación anterior, es esencial analizar no sólo estos potenciales impactos (ya sean positivos o negativos), sino también definir aquellas medidas de adaptación que sean más adecuadas para dar respuesta a dichos impactos y así disminuir la vulnerabilidad. En este contexto, es altamente deseable poder contar con una aproximación cuantitativa de estos futuros cambios climáticos y de sus efectos en, por ejemplo, la hidrología regional y/o local. Una manera de lograr lo anterior consiste en la modelación de impactos, utilizando escenarios climáticos futuros.

En el presente estudio, por “escenarios de cambio climático” se entiende una descripción espacial y temporal, físicamente consistente, de rangos plausibles de condiciones climáticas futuras, basada en un cierto número de suposiciones y de la actual comprensión científica del sistema climático. Existen

diferentes métodos que pueden ser utilizados para crear los escenarios de cambio climático, que se pueden agrupar en escenarios sintéticos (también conocidos como incrementales), análogos y aquellos que pueden construirse a partir de salidas de MCG (Xu y Singh, 2004). Estos últimos constituyen una de las herramientas más usadas para investigar la posible respuesta del clima a futuras variaciones en la composición de la atmósfera (IPCC, 2001). Se trata de modelos matemáticos que incorporan en sus ecuaciones la descripción de los procesos físicos y de las interacciones fundamentales entre las componentes más importantes del sistema climático-atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera. Sin embargo, es importante precisar que existen varias limitaciones que restringen la utilidad de los MCG para la evaluación de impactos (IPCC, 2001); por ejemplo, a) la gran cantidad de recursos computacionales requeridos para poder realizar cada una de las simulaciones de MCG y almacenar sus salidas; b) las considerables diferencias en la sensibilidad climática frente a los gases de efecto invernadero incorporadas en las distintas versiones existentes de los modelos MCG; c) las diferencias en escala (espacial) entre las salidas de los MCG y lo típicamente requerido para la conducción de estudios de impacto local; d) los MCG no contienen todas las variables que influyen en el patrón de comportamiento del clima a escala global, por ejemplo, la respuesta del océano y la absorción de CO<sub>2</sub>, y e) utilizan datos que no pueden conocerse con exactitud, entre ellos, la tasa de emisión de los gases de efecto invernadero que depende del efecto antropogénico, especialmente del consumo y la emisión de combustibles fósiles, la elección de tecnologías, la evolución de la economía y el crecimiento demográfico de cada país. Aspectos que son considerados en forma estimativa en los distintos escenarios de emisiones utilizados para la modelación del cambio climático, persistiendo la incertidumbre debido a la complejidad de los sistemas involucrados.

En los estudios ha predominado el uso directo de la información sinóptica de variación climática proporcionada por un determinado MCG, sin ninguna posterior regionalización o sin considerar los resultados de otros modelos MCG existentes. Esto se debe fundamentalmente a a) los resultados de la mayoría de los MCG son de acceso relativamente fácil; b) al hecho de que las más importantes técnicas de regionalización fueron desarrolladas tan sólo durante la última década (Mata y Nobre, 2006), y c) a las limitaciones en cuanto al desarrollo y uso de herramientas que permitan la comparación de los resultados de diferentes modelos y/o escenarios de emisión. Estos MCG generan datos que no se pueden aplicar directamente a regiones específicas, por lo que necesariamente éstos se tienen que regionalizar en un proceso que si no se ejecuta de forma adecuada afecta directamente la precisión de las estimaciones.

La forma más directa para obtener escenarios espaciales de alta resolución consiste en la aplicación de proyecciones de gruesa escala a las líneas base climáticas observadas de alta resolución; es decir, el llamado “método del factor de cambio” (Díaz-Nieto y Wilby, 2005). A pesar de lo indicado anteriormente, este método sigue siendo comúnmente utilizado, sobre todo en aquellos casos donde las salidas de MCR aún no son fácilmente accesibles, o donde se requiere, en primer lugar, de una rápida evaluación de la sensibilidad de un sistema frente a cambios de determinada magnitud, o cuando se necesitan evaluaciones rápidas de múltiples escenarios climáticos (Wilby et al., 2004).

Para la aplicación del “método del factor de cambio”, a partir de los resultados de un MCG, primero se establece la climatología del periodo de referencia para el sitio o región de interés. Para ello, típicamente se colecta(n) y depura(n) la(s) serie(s) de tiempo de las variables meteorológicas de interés localmente observadas. Luego se calculan los cambios, típicamente los promedios anuales o mensuales (o estacionales), de las variables

meteorológicas equivalentes para la celda del MCG que está(n) más cercana(s) al sitio de interés. Posteriormente, la anomalía de cambio obtenida a partir del MCG es aplicada a toda la serie meteorológica de referencia.

Este método resulta atractivo por su simplicidad, sin embargo, es evidente que posee varias limitaciones que deben ser tomadas en consideración al interpretar los resultados de cualquier aplicación (Wilby et al., 2004). Entre estas limitaciones se tienen: a) el procedimiento anterior asume que el patrón espacial del clima en el área de estudio permanece constante en el tiempo, mientras que en el nivel local los cambios pueden ser diferentes de lo que se obtiene a partir del MCG; b) al determinar el cambio como una modificación en el promedio anual, el método asume que no existen cambios en la secuencia temporal de los periodos húmedos y secos, y c) los modelos hidrológicos actuales no fueron diseñados para estimar el comportamiento de algunas variables del ciclo hidrológico bajo condiciones de cambio climático. En su estado actual, los modelos referidos están limitados para modelar el cambio climático bajo un esquema de “análisis de sensibilidad” con una o dos variables, manteniendo todas las otras variables constantes.

Aun cuando en Latinoamérica gradualmente ha aumentado la disponibilidad de resultados de los MCR, falta mayor incursión en el uso de estos escenarios de alta resolución en los estudios de impacto en la región (Marengo y Ambrizzi, 2006).

### Área de estudio

La cuenca del río Biobío (24 371 km<sup>2</sup>), la tercera cuenca más grande de Chile, está ubicada en la zona centro-sur del país (36°45'-38°49' S; 71°00'-73°20' O) y cubre aproximadamente 3% del territorio nacional. Se extiende desde la Cordillera de los Andes, en el este, hasta el océano Pacífico en el oeste. Está influenciada por el clima templado del sur de Chile, así como por el clima mediterráneo de Chile

Central. Esta cuenca constituye el centro de las actividades forestales en el país, contiene una gran porción de los suelos agrícolas nacionales y juega un rol preponderante en el abastecimiento hidroeléctrico nacional. El estudio descrito en el presente artículo se enfoca en dos subcuencas del Biobío: la primera, Lonquimay, se ubica en el sector de la Cordillera de los Andes, mientras que la segunda, Vergara, se ubica en el sector suroeste de la cuenca (figura 1).

La cuenca del río Lonquimay ( $38^{\circ}20' - 38^{\circ}41' S$ ;  $71^{\circ}13' - 71^{\circ}35' O$ ) tiene una superficie de  $455 \text{ km}^2$ . El punto más bajo está a  $880 \text{ msnm}$  y el punto más alto a  $2\,533 \text{ msnm}$  (figura 1a). Es de régimen pluvionival, presentándose los caudales máximos y mínimos durante los meses de junio y marzo, respectivamente, con un segundo máximo nival en el mes de octubre (figura 1b).

La cuenca del río Vergara ( $37^{\circ}29' - 38^{\circ}14' S$ ;  $71^{\circ}36' - 73^{\circ}20' O$ ) cubre un área de  $4\,265 \text{ km}^2$ . El punto más bajo está ubicado a  $53 \text{ msnm}$  y el punto más alto a  $1\,923 \text{ msnm}$  (figura 1a). Es de régimen predominantemente pluvial, con los caudales máximos y mínimos produciéndose durante julio y febrero, respectivamente (figura 1b).

## Metodología

El desarrollo de la presente investigación se realizó en cuatro etapas:

- Calibración y validación de un modelo hidrológico para las cuencas en estudio, utilizando para tales efectos series de tiempo de datos hidrometeorológicos observados.
- Generación de una serie de plausibles escenarios de cambio climático para la zona de estudio.
- Simulación, utilizando el modelo calibrado y validado, de las características hidrológicas de la cuenca a partir de series meteorológicas perturbadas (escenarios de cambio climático).

- Comparación de la hidrología actual en cada una de las cuencas con la hidrología obtenida a partir de la aplicación de los escenarios de cambio.

En las próximas secciones se documentan brevemente las componentes más importantes de las dos primeras etapas: implementación del modelo hidrológico *SWAT* y creación de los escenarios de cambio climático. Posteriormente se presentan los resultados de las etapas tres y cuatro.

## El modelo SWAT

Para la modelación hidrológica de las dos subcuencas se utilizó el modelo Soil & Water Assessment Tool (*SWAT*; Arnold *et al.*, 1998; Di Luzio *et al.*, 2002). Éste corresponde a un modelo hidrológico y de calidad de agua espacialmente semidistribuido, diseñado para calcular la generación y el transporte de escorrentía, sedimentos y contaminantes desde unidades individuales de drenaje (subcuencas) hasta la salida de una cuenca. El modelo fue desarrollado en los años noventa en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Debido a su flexibilidad en cuanto a requerimientos de datos de entrada, *SWAT* ha sido aplicado en diferentes partes del mundo bajo diferentes condiciones de disponibilidad de información (Estados Unidos, Europa, India, Nueva Zelanda) (Abu El-Nasr *et al.*, 2005; Eckhardt *et al.*, 2005; Gosain *et al.*, 2005; Govender y Everson, 2005; Cao *et al.*, 2006; Tripathi *et al.*, 2006).

En el *SWAT*, la hidrología de una cuenca se divide conceptualmente en dos grandes componentes: a) la fase terrestre del ciclo hidrológico y b) la fase de propagación. Las contribuciones de toda la superficie de una subcuenca al caudal del cauce principal (de la misma subcuenca) son controladas por la componente terrestre del modelo, mientras que en la componente de propagación se determina el movimiento del agua a través de

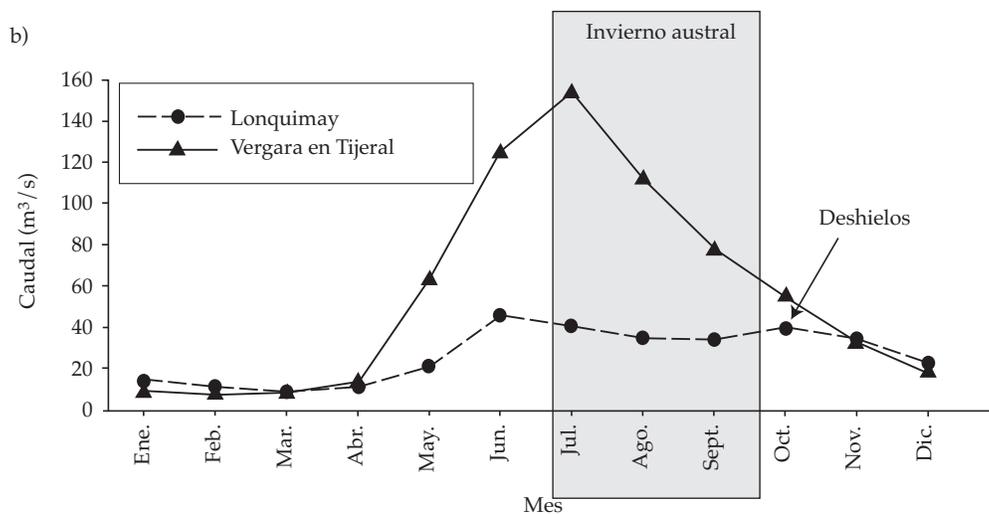
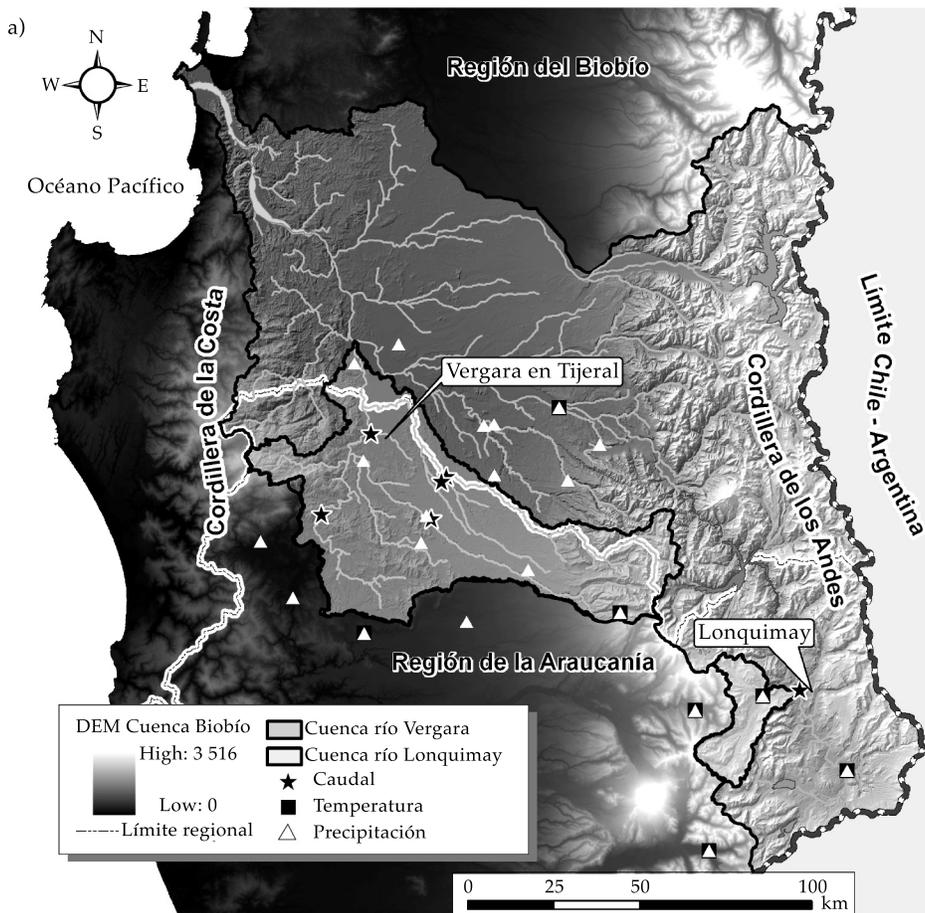


Figura 1. a) Ubicación de las cuencas del río Vergara, río Lonquimay, y estaciones meteorológicas y fluviométricas utilizadas; b) caudales medios mensuales para las cuencas del río Vergara, en Tijeral, y río Lonquimay, calculados con base en datos oficiales de la DGA (1985-2003).

las red hídrica hasta la salida de la cuenca y/o hasta los distintos “puntos de control” (es decir, puntos dentro de la cuenca donde se cuenta con caudales observados en forma de series de tiempo, los cuales sirven para la calibración y validación). Una descripción más completa del modelo SWAT y sus diferentes componentes y opciones puede encontrarse en Neitsch *et al.* (2002).

Un aspecto interesante del modelo SWAT, que facilita su uso en los análisis de impacto, consiste en la opción de aplicar factores de cambio a las series de tiempo, precipitaciones y temperaturas. Esto permite la simulación del impacto hidrológico de escenarios climáticos futuros. Para lo anterior, el modelo tiene implementada una metodología más bien sencilla, útil, sin embargo, como primera aproximación, mediante la cual se ajusta toda la serie de precipitaciones y temperaturas utilizadas como escenario base:

$$P_{\text{día, escenario}} = P_{\text{día, base}} * \left( 1 + \frac{\text{ajuste}_{pcp}}{100} \right) \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

Donde  $P_{\text{día, base}}$  es la precipitación que cae sobre la subcuenca para un día determinado,  $\text{ajuste}_{pcp}$  es el porcentaje de cambio estimado por mes en la precipitación y  $P_{\text{día, escenario}}$  corresponde a la precipitación ajustada que cae sobre la subcuenca en un día determinado:

$$T_{\text{máx, escenario}} = T_{\text{máx, base}} + \text{ajuste}_{tmp} \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

$$T_{\text{mín, escenario}} = T_{\text{mín, base}} + \text{ajuste}_{tmp} \quad (^\circ\text{C}) \quad (3)$$

Donde  $T_{\text{máx, base}}$  es la temperatura máxima para un día determinado,  $T_{\text{mín, base}}$  es la temperatura mínima diaria,  $\text{ajuste}_{tmp}$  es el cambio mensual estimado para temperatura y  $T_{\text{máx, escenario}}$  y  $T_{\text{mín, escenario}}$  corresponden a las temperaturas ajustadas máxima y mínima para un día determinado.

## Escenarios de cambio climático

Para evaluar la sensibilidad de la hidrología local frente al cambio climático se generaron diferentes plausibles escenarios climáticos y se simularon sus impactos sobre los caudales de las cuencas de los ríos Lonquimay y Vergara. Primero, para representar la condición de control (“línea base”), se utilizaron las series meteorológicas registradas para el periodo 1961-1990, mediante el modelo MCR (CONAMA-DGF, 2006) para la cuenca. Este periodo coincide con el periodo de línea base modelado por MAGICC-SCENGEN, lo que permite una fácil comparación de los resultados hidrológicos obtenidos al perturbar las series de tiempo de entrada “línea base” de SWAT con las anomalías de cambio provenientes tanto de los MCG sin regionalizar (MAGICC-SCENGEN) versus aquellas obtenidas al usar los resultados del MCR. La metodología anterior también permite evaluar los niveles de incertidumbre en los impactos asociados con la existencia de diferentes MCG y escenarios de emisiones. A continuación se describen brevemente las dos fuentes desde donde se obtuvieron los escenarios climáticos.

### MAGICC-SCENGEN (Wigley, 2003a y 2003b)

La herramienta MAGICC/SCENGEN v. 4.1. (Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change/Scenario Generator) corresponde a un generador de escenarios climáticos simple. Es útil para la realización de estudios de impacto en los cuales se quiere evaluar el efecto de las incertidumbres, asociados con la representación matemática de los procesos climatológicos y de cambio global reflejadas en la existencia de diferentes MCG. Además permite evaluar el efecto diferencial en el clima de distintos escenarios que han sido desarrollados para describir las futuras emisiones de gases invernaderos. Se trata de un *software* amigable que consiste de dos componentes:

- MAGICC es un modelo climático simple (modelo acoplado de ciclo de gases, temperatura global media y nivel del mar global medio), que permite hacer tanto simulaciones independientes como emular los resultados globales de los más complejos modelos MCG 3-dimensionales (Harvey et al., 1997). MAGICC permite al usuario elegir entre diferentes escenarios de emisiones para los gases invernadero, aerosoles y dióxido de sulfuro, los cuales luego son tomados por este modelo como *input* para calcular condiciones futuras para la temperatura promedio global. La versión 4.1, utilizada en el presente estudio, incluye la opción de simular los cambios climáticos globales para una amplia serie de escenarios de emisión contenidos en el *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) del IPCC (2001).
- La segunda componente de la herramienta, el modelo SCENGEN, consiste fundamentalmente en una base de datos que contiene patrones espaciales “normalizados” (es decir, patrones de cambios regionales por cambio unitario en la temperatura promedio global), generados a partir de las salidas de los modelos MCG más complejos, en conjunto con un algoritmo de regionalización; a partir de la temperatura promedio global calculada por MAGICC y mediante un método de escalamiento, SCENGEN permite, entre otras opciones, “simular” y comparar los patrones de cambios en la temperatura y precipitaciones regionales producidos por un total de 17 MCG para un mismo cambio en la temperatura global (una descripción más completa sobre el proceso de escalamiento y sus limitaciones se tiene en Wigley (2003a). Las simulaciones de SCENGEN son producidas para una grilla con cobertura global, la cual consiste de celdas de tamaño 5 x 5°.

Para incorporar en la evaluación de impacto la incertidumbre asociada tanto a la representación de la modelación de los

procesos climáticos globales y regionales, como aquella asociada con los futuros escenarios de emisiones de gases invernadero, en el presente estudio se analizaron las anomalías de cambio climático regional (centro-sur de Chile) producidos por MAGICC/SCENGEN, correspondientes a siete MCG: HADCM3, ECHAM4.5, GFDL, CCSR/NIES, CCCMa, NCAR/PCM y CSIRO. Considerando el efecto combinado de gases invernadero y aerosoles, se simuló la respuesta de seis escenarios de emisiones (SRES: A1FI, A1T, A1B, A2, B2, B1), obteniéndose así un total de 42 escenarios. Los cambios fueron simulados para una ventana de tiempo de treinta años, centrada en el año 2085, considerando escenarios de cambio promedio para temperaturas y precipitaciones, tanto anual como mensual. Para el análisis de sensibilidad se utilizaron directamente los resultados obtenidos desde MAGICC/SCENGEN, sin un proceso de regionalización, obteniéndose un valor de cambio para toda la cuenca. Así, es posible evaluar la diferencia en la respuesta que se obtiene al utilizar los resultados provenientes de un MCG *versus* los obtenidos a partir de un MCR.

#### *Modelo regional de cambio climático*

En el “Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI” (CONAMA-DGF, 2006), se utilizaron los resultados de un modelo acoplado océano-atmósfera de gran escala (HadCM3, resolución media 300 x 300 km) para forzar indirectamente simulaciones de los impactos regionales de un cambio climático global. La componente atmosférica del modelo (HadAM3) es forzada en superficie con las salidas de la componente oceánica del HadCM3 (HadOM3), el cual tiene características muy similares al anterior, pero es de mayor resolución, el HadAM3, a su vez, forzó las simulaciones regionales generadas con el modelo PRECIS, con una resolución espacial de 25 km. Las distintas variables de salidas de este último modelo (como temperatura media, máxima y mínima, y precipitación) están

disponibles para cada uno de los puntos de una grilla de celdas de tamaño 25 x 25 km del dominio geográfico 18°-57° S, 62°-85° O. Así, para cada punto de grilla y variable, se pueden obtener tres series de datos diarios, cada una de ellas para un periodo de treinta años. La primera serie corresponde al clima de referencia o control (clima "actual", periodo 1961-1990), mientras que las otras dos corresponden a "climas futuros" para el periodo 2070-2100, una para el escenario de emisiones A2 y la otra para B2. De los resultados del estudio se pueden extraer las series de tiempo de datos diarios (precipitación y temperaturas), correspondientes al área de las subcuencas del Biobío, los que posteriormente pueden ser utilizados en combinación con el modelo SWAT.

En el presente estudio, para la realización del análisis de sensibilidad de los caudales frente al cambio climático de los sistemas Lonquimay y Vergara, sólo se modificaron o perturbaron las variables de precipitación y temperatura de la "línea base", manteniéndose constantes todas las otras variables de entrada. Los cambios hechos a ambas variables fue uniforme en el tiempo; se asumió la misma variación anual con respecto a la "línea base" durante los treinta años considerados en la modelación. Espacialmente, también se consideró una variación uniforme, es decir, a todas las estaciones de precipitación y temperatura utilizadas para la calibración y validación se les aplicó el mismo cambio porcentual con respecto a la "línea base" en el caso de las precipitaciones y se le sumó un mismo valor en el caso de las series de temperatura. Se modelaron 44 escenarios de cambio, 42 obtenidos de un MCG de resolución 5 x 5° y dos obtenidos de un MCR de resolución 25 x 25 km.

## Aplicación y resultados

### *Calibración y validación del modelo SWAT para las cuencas en estudio*

Los datos meteorológicos para el periodo 1994-2002 (series de tiempo de precipitaciones

y temperaturas, valores diarios) utilizados para la calibración y validación del modelo hidrológico fueron obtenidos del Banco Nacional de Aguas, perteneciente a la Dirección General de Aguas de Chile (DGA). En el caso de la cuenca del río Vergara, se utilizaron 16 estaciones de precipitación y tres de temperatura, el porcentaje de datos faltantes era de 2.5 y 5%, para las estaciones de precipitación y temperatura, respectivamente. Para el proceso de calibración y validación en la cuenca del río Lonquimay se utilizaron las series de precipitación y temperatura observadas en tres estaciones meteorológicas, siendo el porcentaje de datos faltantes de 3 y 2%, para las estaciones de precipitación y temperatura, respectivamente. Las series de precipitación y temperatura fueron rellenadas de tal manera, a fin de tener series sin vacíos para los nueve años que comprende la modelación. Las series de precipitaciones se rellenaron interpolando con base en el inverso de la distancia al cuadrado entre la estación a rellenar y las otras estaciones cercanas disponibles. En el caso de las series diarias de temperatura (máximas y mínimas), se utilizó la tasa de variación de la temperatura con la altura; para las temperaturas máximas se usó un gradiente de  $-0.008 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$  y para las temperaturas mínimas  $-0.002 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ . Finalmente, para el relleno, se utilizó la estación que tuviese la menor diferencia de altura con respecto a la estación por rellenar. Para la modelación de los patrones de escorrentía (superficial), el modelo hidrológico fue alimentado con un Modelo de Elevación Digital, *SRTM DEM*, versión final, con resolución espacial de 90 m. La descripción del uso y tipos de suelo en las cuencas de estudio se hizo a partir de la información disponible en el país. Una descripción más detallada de estos *sets* de datos utilizados en el proceso de modelación se puede encontrar en Stehr et al. (2008), Stehr (2008) y Stehr et al. (2009).

Para ambas cuencas, con el fin de seleccionar los parámetros más relevantes para

el proceso de calibración, se realizó un análisis de sensibilidad (Van Griensven *et al.*, 2006). Para la calibración se aplicó el procedimiento automático *PARASOL* (*Parameter Solution Method*), implementado en *SWAT2005* (Van Griensven y Bauwens, 2003).

La calibración y validación se hicieron a partir de datos mensuales de caudal; en la evaluación del comportamiento del modelo se usaron tres indicadores estadísticos: eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF), PBIAS y  $R^2$ . Además, se analizó la concordancia entre las gráficas de caudales observados *versus* modelados. Se considera que el modelo funciona mejor en la medida que: a) EF y  $R^2$  se acercan más al valor unitario, b) PBIAS es más cercano a 0 y c) la gráfica indique una buena correspondencia entre los caudales modelados y observados. De acuerdo con Van Liew *et al.* (2005), se considera que la representación es buena cuando EF es mayor a 0.75 y PBIAS es menor que  $\pm 20\%$ , y se considera satisfactoria cuando EF y PBIAS se encuentran entre 0.36-0.75 y  $\pm 20\%$ - $\pm 40\%$ , respectivamente.

En el caso de la aplicación del modelo a las cuencas de los ríos Vergara y Lonquimay, los resultados obtenidos indican que el modelo representa bien los caudales de ambas cuencas (figura 2, cuadro 1) durante la calibración; mientras que durante la fase de validación, la representación de los caudales por el modelo es satisfactoria para Lonquimay y buena para Vergara (figura 2, cuadro 1).

#### *Resultados de la generación de escenarios*

La figura 3a muestra los resultados (anomalías de cambio anuales regionalizadas) obtenidos a partir de la aplicación de *MAGICC-SCENGEN* para el periodo centrado en 2071-2100. Para el área de interés ( $35^{\circ}$ - $40^{\circ}$  S,  $70^{\circ}$ - $75^{\circ}$  O), predomina fuertemente en el pronóstico del modelo para los seis escenarios marcadores SRES, combinados con los 7 MCG, y con respecto al periodo de referencia, un incremento en las temperaturas y una

disminución en las precipitaciones. Eso sí, para un mismo cambio en la temperatura promedio global (*MAGICC*), en los resultados de *SCENGEN* difieren considerablemente entre sí las magnitudes de cambio para los distintos escenarios, generados a partir de distintos MCG y escenarios de emisión (figura 3a). Con las series de datos obtenidas para el área de estudio a partir del MCR (CONAMA-DGF, 2006), también se estimó el cambio en el valor promedio anual para la cuenca para las precipitaciones (cambio porcentual) y las temperaturas (cambio absoluto) entre el periodo 2071-2100 y el periodo de referencia (figura 3b). Se aprecia que las anomalías de cambio obtenidas a partir del MCR son mayores que aquellas obtenidas al simular los patrones regionales para el modelo *HadCM3* (tanto para A2 y B2) mediante *SCENGEN* (corrida estándar del modelo *MAGICC*); la conclusión se mantienen mayoritariamente al correr *MAGICC*, emulando específicamente a *HadCM3*). Aun así, también estos valores se encuentran en el segundo cuadrante (-/+ ) de la figura 3, y dentro de la envolvente formada por los 42 escenarios de *MAGICC-SCENGEN*. Se observa que gran parte de los escenarios predicen mayores disminuciones de precipitación que las esperadas por Hulme y Sheard (1999).

#### *Resultados de la modelación de impactos hidrológicos*

Los 44 diferentes escenarios considerados en el presente trabajo generaron una reducción promedio de 28% en los caudales medios anuales para la cuenca del río Vergara, con respecto a la situación actual. Los valores varían desde -81% a +7%; 42 escenarios muestran una reducción en los caudales promedio anuales; en un escenario no se registra ningún cambio; mientras que en otro se muestra un aumento de dichos caudales. Para la cuenca del río Lonquimay, la reducción en el promedio anual fue de 19% (rango de -65% a

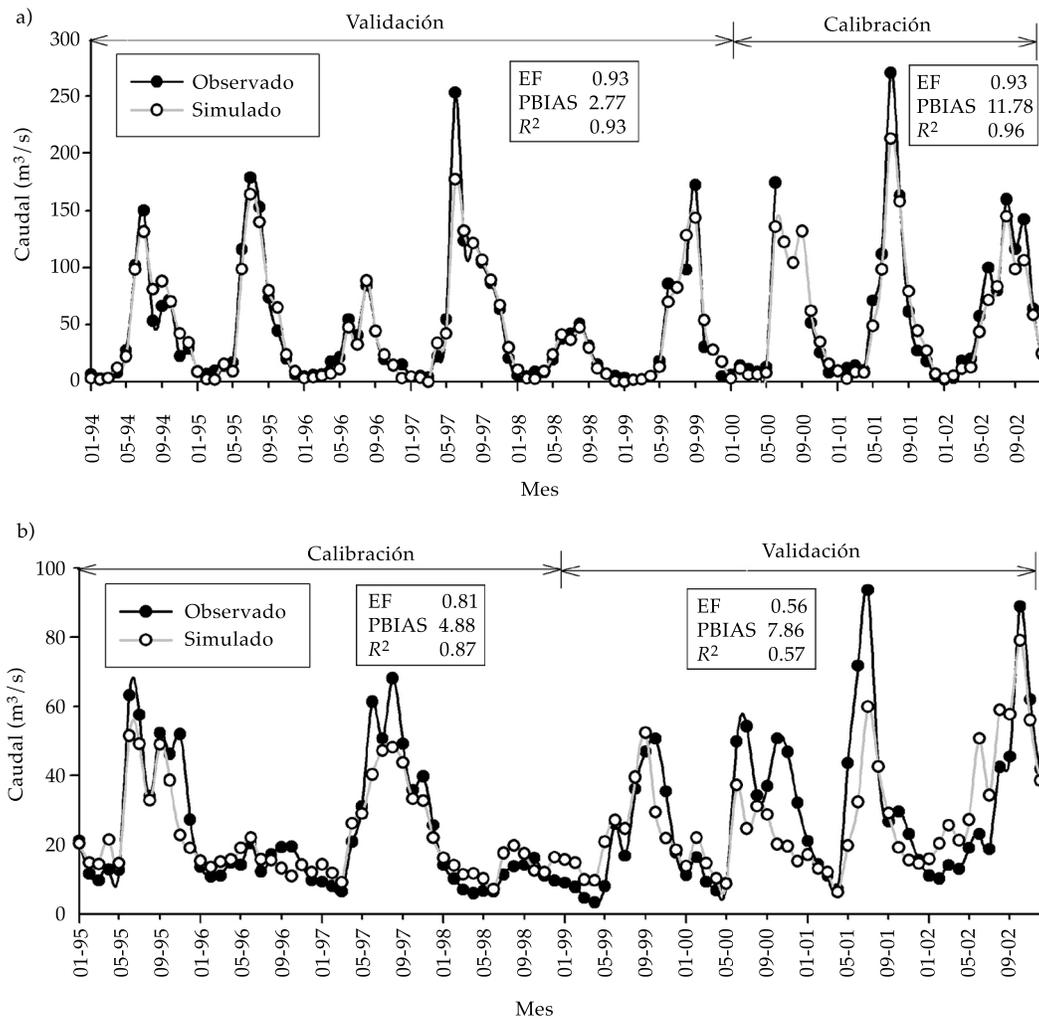


Figura 2. Calibración y validación (resultados mensuales) para (a) cuenca del río Vergara (estación Vergara en Tijeral), (b) cuenca del río Lonquimay.

Cuadro 1. Indicadores estadísticos para las etapas de calibración y validación para las cuencas de los ríos Vergara y Lonquimay.

	Vergara*		Lonquimay	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
EF	0.93	0.93	0.81	0.56
PBIAS	11.78	2.77	4.88	7.86
R <sup>2</sup>	0.96	0.93	0.87	0.57

\*Estos parámetros corresponden a los obtenidos en la estación DGA Vergara en Tijeral.

6%); 41 escenarios indicaron una reducción y tres mostraron un aumento de caudales. Los resultados de los escenarios basados en el MCR entregan una disminución del caudal medio anual de 48% (A2) y 32% (B2) para la cuenca

del río Vergara, y de 27% (A2) y 17% (B2) para la cuenca del río Lonquimay, manteniéndose dentro de la envolvente generada por los escenarios *MAGICC-SCENGEN*. El cuadro 2 muestra la media, mediana, desviación

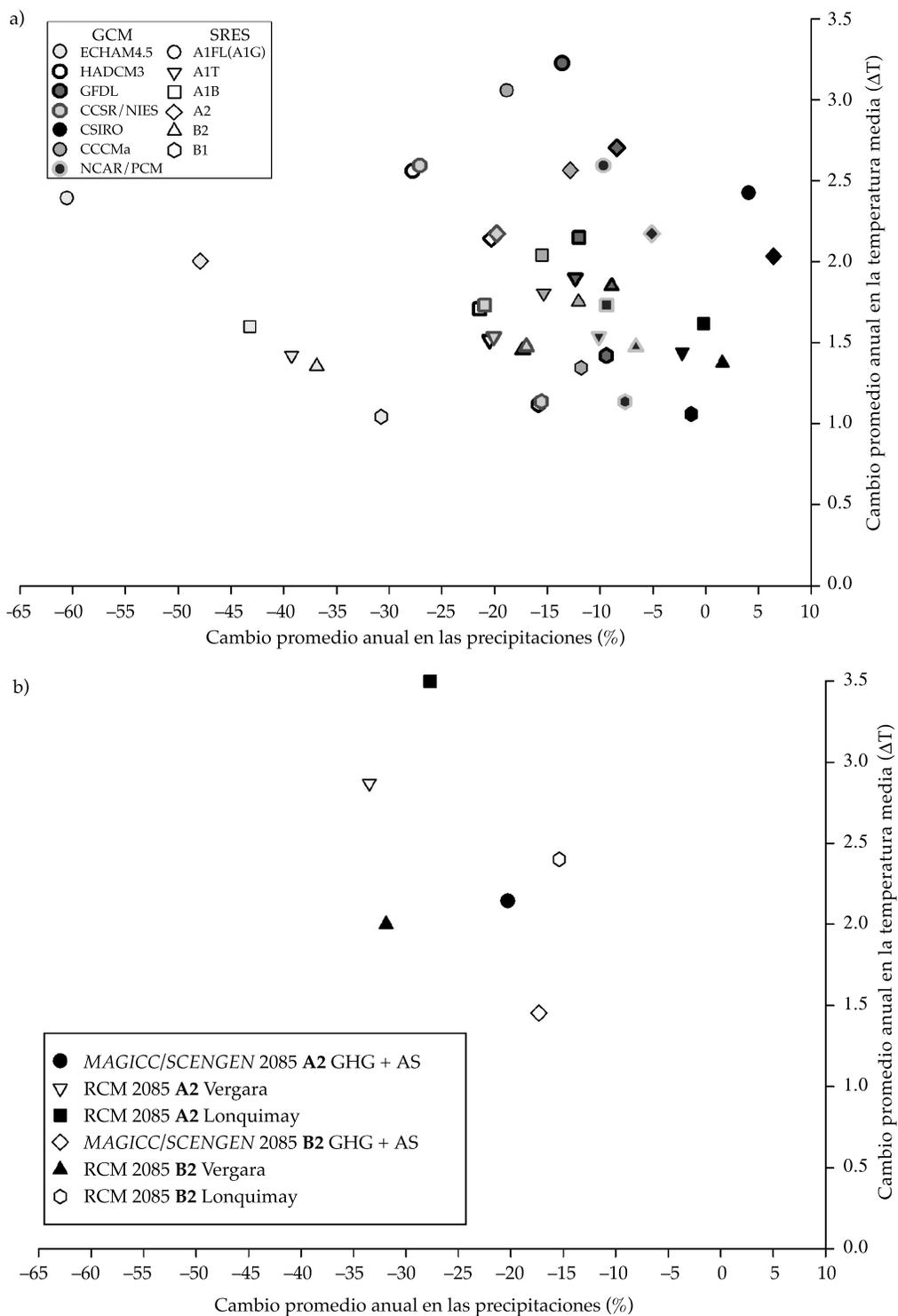


Figura 3. a) Cambios regionalizados (35°-40° S, 70°-75° O) para seis escenarios marcadores y siete diferentes MCG (MAGICC/SCENGEN), ventana de treinta años centrada en el año 2085 (se consideró efecto de gases invernadero y aerosoles); b) comparación de las anomalías de cambio (cuencas ríos Vergara y Lonquimay) obtenidas a partir del MCR versus anomalías obtenidas mediante SCENGEN para el MCG HADCM3 (corrida estándar de MAGICC), ambas para el periodo 2071-2100.

estándar, coeficiente de asimetría y valores máximo y mínimo de las series (treinta años) de caudales promedio anuales para cada uno de los 44 escenarios modelados y la línea base; además, se muestra el valor de la variación promedio de cada uno de estos escenarios con respecto a la línea base. Se aprecia que para la cuenca del río Vergara, la mayoría de las simulaciones (35) entrega una distribución con simetría negativa al igual que la línea base, lo que no sucede con los caudales de la cuenca del río Lonquimay, donde la mitad posee simetría negativa.

Tal como se puede apreciar en la figura 4a, una relación prácticamente lineal ( $R^2 = 0.93$  para ambas cuencas) se obtiene al graficar los cambios porcentuales en la precipitación promedio anual para los diferentes escenarios *versus* el correspondiente cambio porcentual en los valores promedio anuales de los caudales modelados mediante SWAT (periodo de referencia *versus* el periodo "futuro", ambos de treinta años). La figura 4a muestra un cambio porcentual en los caudales, que es mayor que el cambio porcentual en las precipitaciones. De las dos observaciones anteriores se desprende que existe una proporcionalidad entre la disminución promedio anual de las precipitaciones y la disminución de los caudales anuales promedio. Se puede ver cómo un mismo cambio porcentual en el valor promedio de las precipitaciones anuales produce un mayor cambio en los caudales anuales promedio en la cuenca del río Vergara (régimen pluvial) que en la cuenca del río Lonquimay (régimen pluvionival).

Las figuras 4b y 4c muestran para cada mes los valores promedios de los caudales modelados para las cuencas de los ríos Vergara y Lonquimay, respectivamente. La figura incluye los resultados de la modelación del periodo de referencia 1961-1990 (línea), la modelación de los 42 diferentes escenarios de cambio producidos mediante *MAGICC-SCENGEN* (envolvente) y los resultados obtenidos a partir de los escenarios MCR (una

línea para A2, otra para B2). Se puede apreciar que en el caso de la cuenca del Vergara (figura 4b), gran parte de los caudales mensuales de la línea base caen dentro de la envolvente producida por las modelaciones basadas en los escenarios *MAGICC-SCENGEN*. Esto es consecuencia del hecho de que, entre dichos escenarios, se encuentran algunos que predicen un aumento en las precipitaciones, mientras que la mayoría de los escenarios predice una disminución con respecto a la línea base. Las únicas excepciones se producen durante el periodo de estiaje (octubre a febrero-marzo, aproximadamente), cuando predomina el efecto del aumento en las temperaturas y sus impactos en la evapotranspiración, resultando en una envolvente que para este periodo está localizada generalmente por debajo de la curva de línea base. Los caudales obtenidos a partir de los escenarios MCR caen dentro de la envolvente anterior, pero todos corresponden a una disminución con respecto a los caudales promedio mensuales de la línea base. La forma general del hidrograma anual es bien preservada bajo los escenarios de cambio, aun cuando es posible observar un pequeño cambio en el mes de ocurrencia del caudal máximo para los escenarios de mayor reducción de las precipitaciones.

En el caso de la cuenca del Lonquimay (figura 4c), se puede apreciar una envolvente que está por debajo de la línea base durante los meses de la primavera y el verano austral; envolvente que también incluye los resultados de los escenarios MCR. Esta pronunciada disminución de los caudales durante el periodo de estiaje, para todos los escenarios de cambio climático, guarda una estrecha relación con la disminución que se presenta en la cantidad de nieve caída y acumulada durante el invierno (figura 5a), fenómeno que se presenta para todos los escenarios, incluyendo aquellos tres donde aumentan las precipitaciones anuales. Para la cuenca del Lonquimay se aprecia un aumento en la razón entre lluvia y nieve durante los meses de invierno bajo los escenarios de cambio climático; en la situación base, esta

Cuadro 2. Características estadísticas de las series de treinta años obtenidas de las simulaciones de la línea base y de los 44 escenarios de cambio de precipitación y temperatura. En negrita se indican los resultados de la modelación de caudales a partir de los resultados del MCR.

Vergara										Lonquimay							
$\Delta T$	$\Delta\%PP$	Media	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de asimetría	Máximo	Mínimo	Variación promedio (%)	$\Delta T$	$\Delta\%PP$	Media	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de asimetría	Máximo	Mínimo	Variación promedio (%)
	Base	135.97	148.34	40.20	-0.14	202.00	56.69		Base		37.73	38.10	7.21	-0.09	50.69	22.68	
2.03	0.10	145.31	148.65	46.15	-0.06	220.66	62.40	6.87	2.03	0.10	40.05	41.83	9.14	0.15	62.49	23.00	6.15
2.43	0.07	134.15	133.94	45.60	-0.06	207.27	53.32	-1.34	2.43	0.07	38.04	38.71	9.37	0.19	60.89	21.42	0.83
1.38	0.03	132.04	137.67	42.48	-0.09	199.25	53.12	-2.90	1.38	0.03	37.31	39.31	8.10	0.07	56.44	21.49	-1.10
1.62	0.01	124.97	130.94	41.96	-0.07	189.29	48.31	-8.09	1.62	0.01	35.94	37.55	8.20	0.08	55.17	20.41	-4.72
2.09	0.00	136.34	147.35	44.33	-0.10	217.27	51.52	0.27	2.09	0.00	38.30	39.41	8.51	-0.20	52.84	21.91	1.52
1.06	-0.01	123.29	129.99	40.54	-0.09	183.20	48.64	-9.33	1.06	-0.01	35.64	37.50	7.53	0.01	52.74	20.52	-5.53
1.44	-0.02	119.55	126.09	40.62	-0.10	179.86	45.36	-12.08	1.44	-0.02	34.90	36.48	7.87	0.04	52.94	19.76	-7.49
1.42	-0.04	125.55	135.53	41.57	-0.10	199.70	46.65	-7.67	1.42	-0.04	36.07	37.66	7.70	-0.21	49.63	20.67	-4.39
2.49	-0.05	123.65	135.82	44.11	-0.04	209.72	43.75	-9.07	2.49	-0.05	35.97	37.63	8.61	-0.21	49.59	20.14	-4.67
1.09	-0.07	118.32	128.82	39.60	-0.10	188.90	44.15	-12.98	1.09	-0.07	34.69	36.24	7.25	-0.21	47.60	19.88	-8.05
1.66	-0.08	117.65	127.17	40.82	-0.09	194.14	41.50	-13.48	1.66	-0.08	34.56	35.55	7.75	-0.24	47.58	19.50	-8.39
2.69	-0.08	120.34	126.96	38.38	-0.17	184.88	41.16	-11.50	2.69	-0.08	35.32	35.53	7.94	-0.04	51.74	19.20	-6.37
1.48	-0.09	113.43	123.39	39.78	-0.06	189.45	40.35	-16.58	1.48	-0.09	33.71	34.59	7.50	-0.24	46.43	18.96	-10.66
1.84	-0.10	114.44	123.31	37.08	-0.18	174.36	38.62	-15.84	1.84	-0.10	33.96	34.08	7.34	-0.11	48.99	18.64	-9.98
1.42	-0.11	109.85	119.90	36.21	-0.15	168.60	38.14	-19.21	1.42	-0.11	33.08	33.13	6.96	-0.13	47.11	18.30	-12.31
2.14	-0.14	104.82	112.78	35.73	-0.17	165.52	33.31	-22.91	2.14	-0.14	32.21	32.46	7.28	-0.10	46.68	17.37	-14.63
1.89	-0.14	102.93	111.17	35.40	-0.14	164.44	32.75	-24.30	1.89	-0.14	31.68	31.94	7.11	-0.13	45.67	17.12	-16.03
3.21	-0.14	104.97	111.62	36.04	-0.18	165.52	32.35	-22.80	3.21	-0.14	32.43	33.34	7.87	-0.04	47.93	17.05	-14.04
1.32	-0.15	108.43	117.76	36.65	-0.16	167.32	38.85	-20.26	1.32	-0.15	31.41	31.64	6.93	0.03	45.81	18.05	-16.73
1.72	-0.16	112.12	121.58	37.58	-0.19	169.94	40.62	-17.54	1.72	-0.16	32.42	34.14	7.03	-0.11	47.24	18.20	-14.06
1.14	-0.16	92.39	103.50	31.54	-0.07	148.42	32.43	-32.05	1.14	-0.16	33.09	34.82	7.41	-0.08	49.03	18.52	-12.29

Cuadro 2 (continuación). Características estadísticas de las series de treinta años obtenidas de las simulaciones de la línea base y de los 44 escenarios de cambio de precipitación y temperatura. En negrita se indican los resultados de la modelación de caudales a partir de los resultados del MCR.

2.52	-0.16	117.17	125.25	38.61	-0.19	176.04	44.20	-13.83	1.14	-0.16	29.61	30.41	6.25	-0.06	42.87	16.68	-21.51
1.48	-0.17	90.66	101.14	30.54	-0.08	146.39	31.12	-33.32	2.52	-0.16	34.08	35.23	7.97	-0.02	51.61	18.94	-9.67
1.11	-0.17	97.23	104.73	31.81	-0.09	150.04	35.82	-28.50	1.48	-0.17	29.41	29.90	6.39	-0.02	43.30	16.50	-22.05
1.45	-0.18	96.97	101.11	31.53	-0.05	150.94	35.82	-28.68	1.11	-0.17	30.46	31.03	6.25	0.04	44.86	17.35	-19.27
2.18	-0.18	87.08	95.99	29.18	-0.05	140.26	29.84	-35.96	1.45	-0.18	30.52	30.79	6.41	0.11	45.98	17.37	-19.10
2.14	-0.20	95.93	96.90	30.63	-0.01	152.93	35.87	-29.45	2.18	-0.18	28.87	28.99	6.59	0.04	43.39	16.09	-23.47
1.77	-0.20	100.53	109.46	35.65	-0.16	159.44	34.40	-26.07	2.14	-0.20	30.47	30.01	6.65	0.23	47.48	17.31	-19.25
2.00	-0.20	102.37	110.19	35.88	-0.18	160.43	35.10	-24.72	1.77	-0.20	30.86	31.91	7.18	-0.10	45.76	16.93	-18.21
1.54	-0.21	79.94	88.93	28.88	-0.03	134.44	25.49	-41.21	2.00	-0.20	31.24	32.27	7.35	-0.08	46.73	17.16	-17.18
1.74	-0.22	78.90	87.71	28.36	-0.02	133.34	25.05	-41.97	1.54	-0.21	27.30	27.58	6.19	-0.07	40.13	15.03	-27.64
<b>2.00</b>	<b>-0.22</b>	<b>92.46</b>	<b>90.86</b>	<b>30.40</b>	<b>0.04</b>	<b>153.55</b>	<b>40.44</b>	<b>-32.00</b>	1.74	-0.22	27.11	27.37	6.22	-0.04	40.16	14.93	-28.13
1.51	-0.22	85.93	90.75	29.36	-0.05	134.35	29.27	-36.81	1.51	-0.22	28.38	28.53	6.21	0.07	42.90	15.81	-24.77
1.70	-0.23	85.53	88.67	28.84	-0.05	135.42	29.34	-37.10	1.70	-0.23	28.38	28.24	6.25	0.13	43.44	15.85	-24.78
3.00	-0.24	101.25	105.89	36.32	-0.19	158.19	34.64	-25.54	3.00	-0.24	30.98	32.67	7.89	-0.01	47.87	16.69	-17.88
2.61	-0.26	66.58	74.01	25.16	0.08	119.74	19.60	-51.03	2.61	-0.26	24.76	25.08	6.18	0.05	37.81	13.30	-34.38
2.55	-0.28	76.60	75.40	26.58	0.07	128.60	25.75	-43.67	<b>3.52</b>	<b>-0.28</b>	<b>27.63</b>	<b>28.21</b>	<b>7.00</b>	<b>0.13</b>	<b>43.17</b>	<b>15.01</b>	<b>-26.77</b>
1.00	-0.32	66.00	66.99	28.07	0.23	131.94	18.83	-51.46	2.55	-0.28	26.71	25.78	6.31	0.31	43.15	14.72	-29.21
<b>2.87</b>	<b>-0.33</b>	<b>70.35</b>	<b>72.25</b>	<b>25.67</b>	<b>-0.13</b>	<b>118.65</b>	<b>19.32</b>	<b>-48.26</b>	1.00	-0.32	23.77	24.06	6.17	0.52	41.86	12.15	-37.00
1.30	-0.37	57.10	54.91	27.01	0.55	130.59	15.24	-58.01	1.30	-0.37	21.81	22.02	6.32	0.83	41.89	10.70	-42.19
1.37	-0.41	48.75	47.82	24.68	0.59	115.85	12.36	-64.15	1.37	-0.41	20.04	20.35	6.11	0.75	38.94	9.50	-46.89
1.53	-0.45	43.34	39.28	23.79	0.88	114.20	11.00	-68.13	1.53	-0.45	18.73	19.03	6.16	0.99	38.89	8.59	-50.35
1.93	-0.47	42.78	34.44	25.26	1.27	125.60	11.21	-68.54	1.93	-0.47	18.27	18.49	6.53	1.41	41.53	8.17	-51.57
2.30	-0.61	26.03	17.97	20.69	2.02	102.71	6.85	-80.86	2.30	-0.61	13.23	12.79	6.39	1.79	37.30	4.76	-64.94

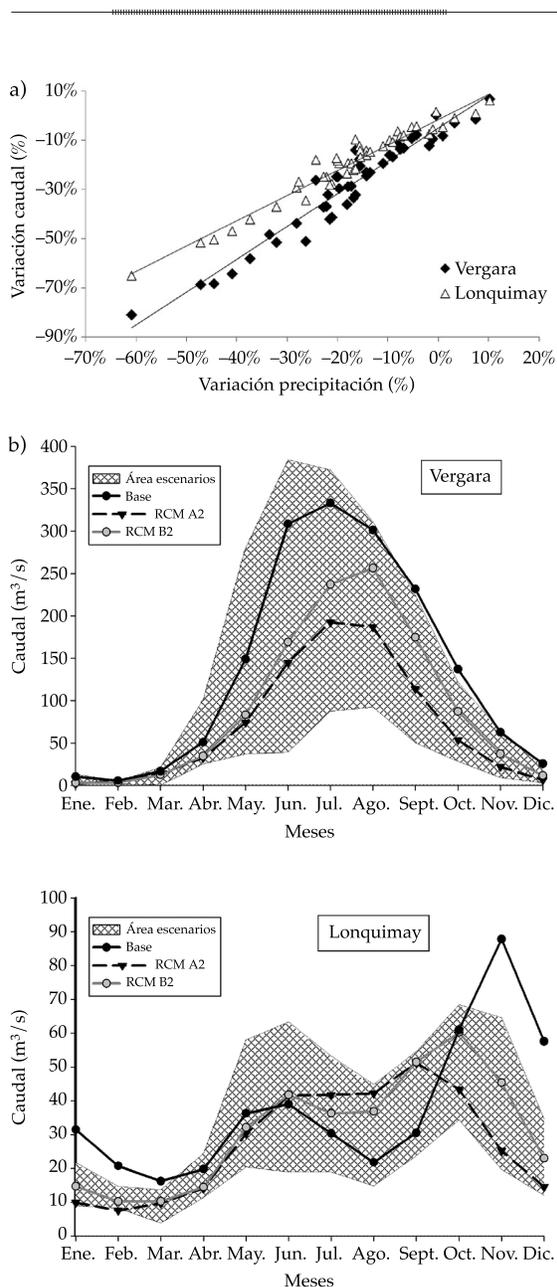


Figura 4. (a) Variaciones de los valores anuales de precipitación *versus* los promedios anuales de los caudales para las cuencas de los ríos Lonquimay y Vergara; escenarios centrados en el año 2085, considerando gases invernadero y aerosoles; (b) caudales promedio mensuales para los treinta años modelados.

La figura muestra los caudales mensuales para la línea base, aquellos obtenidos para los escenarios del MCR y la envolvente de los caudales promedio mensuales obtenidos a partir de los escenarios de MAGICC/SCENGEN.

razón es de 1.26 y 1.15, para julio y agosto, aumentando estos valores como mínimo a 1.82 y 1.62 para julio y agosto, respectivamente, en la situación futura modelada. Este fenómeno influye, al mismo tiempo, en los caudales de invierno, los cuales tienden a ser mayores a los de la línea base, incluso para un buen número de los escenarios que representan una disminución en las precipitaciones totales. La disminución general de las precipitaciones, combinada con mayores tasas de derretimiento de nieve y un inicio más temprano de la fase de deshielo, hacen que el caudal máximo debido al derretimiento decrezca y se adelante en uno o dos meses (noviembre a septiembre), esto dependiendo del escenario utilizado (figura 5b). Consecuentemente, el impacto combinado de los cambios en las precipitaciones y temperatura hacen que en esta cuenca, con importante aporte nival, la forma general del hidrograma varíe más que en el caso de la cuenca del Vergara bajo los escenarios de cambio considerados.

## Discusión y conclusiones

### a) Acerca del impacto hidrológico del cambio climático en la cuenca del río Biobío

La gran mayoría de los 44 escenarios de cambio climático (2071-2100 *versus* 1961-1990) desarrollados en el presente estudio, a partir de MCG y MCR, indican una disminución en las tasas de precipitaciones anuales sobre la cuenca del río Biobío (valores entre aproximadamente +7% y -60%). Este cambio en las precipitaciones va aparejado con un aumento en la temperatura promedio anual (todos los escenarios), que varía entre aproximadamente +1 °C y +3.5 °C.

La modelación de la sensibilidad de la respuesta hidrológica a cambios en la precipitación y temperatura en las cuencas de los ríos Vergara y Lonquimay (región del Biobío, Chile) efectuada en el presente estudio mediante una versión previamente calibrada y validada del modelo SWAT y con base en los 44

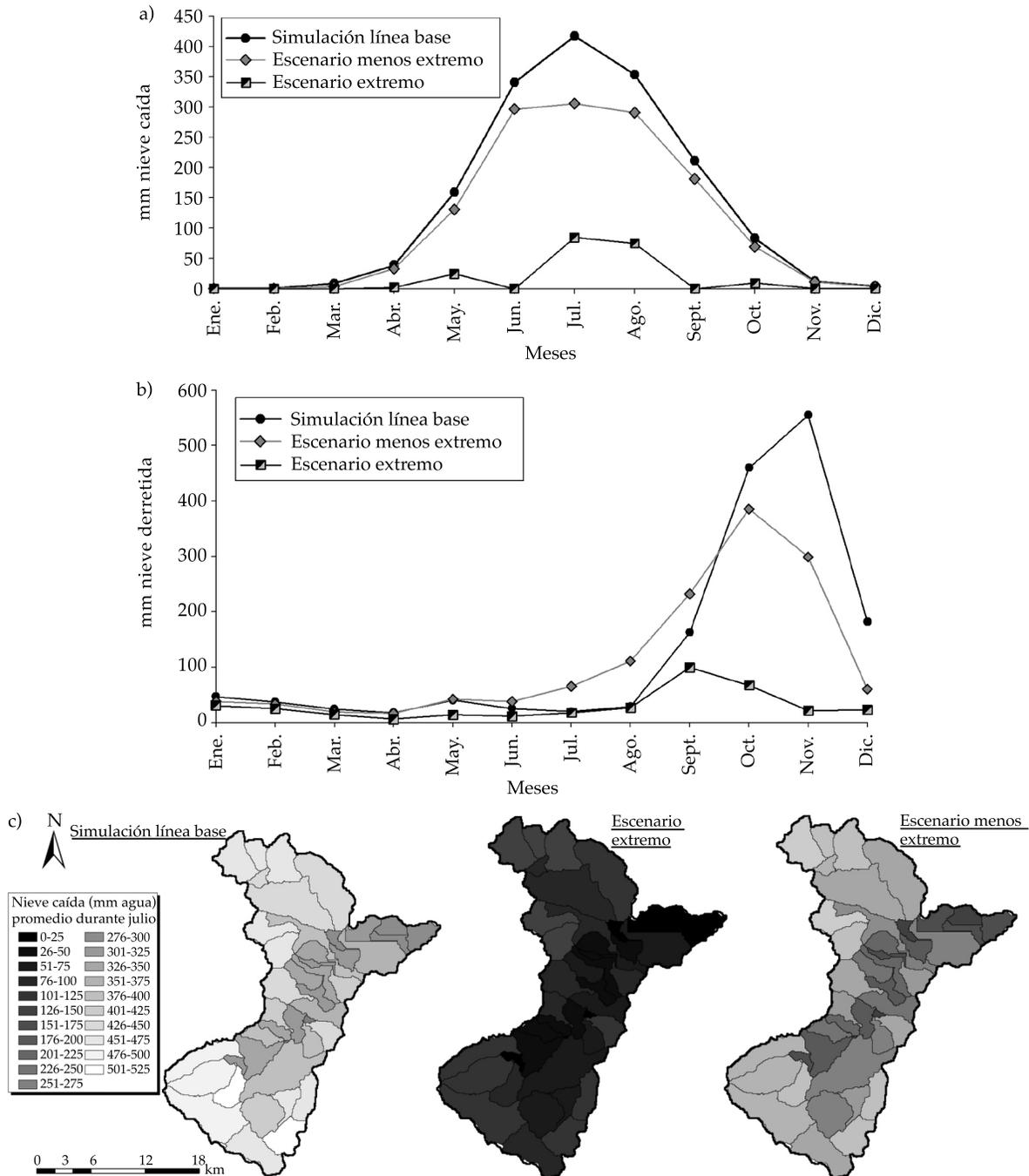


Figura 5. Promedios mensuales de nieve para los treinta años modelados en la cuenca del río Lonquimay.  
 (a) Diferencias en la cantidad de nieve caída promedio en los distintos meses del año;  
 (b) diferencias en la cantidad de nieve derretida promedio en los distintos meses del año;  
 (c) cantidad de nieve caída durante julio (mm) en las distintas subcuencas de Lonquimay, escenario base (simulación línea base), escenario con una mayor disminución en la cantidad de nieve caída (escenario extremo) y escenario con una menor disminución en la cantidad de nieve caída (escenario menos extremo).

escenarios previamente mencionados, muestra un amplio rango de variaciones para los posibles futuros caudales promedio anuales ( $-81\%$  a  $+7\%$ ) y mensuales en estas dos cuencas. Incluso cuando existen estas diferencias en los resultados, en función de los diferentes escenarios utilizados es posible concluir que en ambas cuencas, el caudal, según lo modelado mediante *SWAT*, es muy sensible a los cambios en las variables climáticas, especialmente en lo referido a la precipitación, donde una disminución del  $30\%$  en las precipitación provoca una disminución de  $45$  y  $32\%$  en los caudales de las cuencas Vergara y Lonquimay, respectivamente.

En el caso de la cuenca del río Vergara, la reducción porcentual de los caudales es considerablemente más alta que la correspondiente reducción porcentual en las precipitaciones. Esto indica un mayor impacto en los caudales debido al cambio climático, de lo que se podría asumir en un principio al simplemente tomar en consideración los valores de cambio en las precipitaciones. Sin embargo, parece existir una clara relación lineal entre ambos cambios, lo que permitiría obtener una primera aproximación de los potenciales impactos en los caudales promedios anuales en esta cuenca (y otras cuencas adyacentes y/o de regímenes similares) directamente, a partir del valor de cambio previsto para las precipitaciones.

Un fenómeno similar puede observarse en el caso de la cuenca del río Lonquimay. Cabe señalar, sin embargo, que para esta cuenca, el incremento proporcional en el cambio, en el caso de los caudales, es mucho menos pronunciado. Mucho más notable en esta cuenca de régimen pluvio-nival es el efecto combinado de los cambios en las precipitaciones y temperaturas, lo cual resulta en una considerable modificación de la forma del hidrograma anual. Las simulaciones claramente demuestran lo expresado por Gleick (1986), Chalecki y Gleick (1999), y López-Moreno y Nogués-Bravo (2005), quienes pronostican un aumento en la razón entre lluvia

y nieve durante los meses de invierno, además de sugerir una disminución de la temporada de nieve y un adelanto en el tiempo del caudal máximo de derretimiento.

A pesar de que sólo se modelaron dos subcuencas —un  $20\%$  del área total de la cuenca del Biobío— los resultados obtenidos en el presente estudio permiten realizar una interpretación cualitativa o incluso una primera aproximación “de carácter cuantitativa” de los potenciales impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos en el río Biobío. Se recalca la importancia de las conclusiones anteriores tanto por los potenciales impactos del cambio climático en los ecosistemas acuáticos como por sus potenciales consecuencias en la economía de la región (producción hidroeléctrica, agricultura bajo riego, caudales ecológicos, cargas máximas diarias admisibles durante estiaje para los efluentes urbanos e industriales, y producción de agua potable). Los resultados del presente estudio claramente indican que el cambio climático puede sumarse como un factor de estrés extra y potencialmente muy importante dentro de la cuenca del río Biobío, dejando claro la importancia y utilidad de medidas anticipadas de mitigación y adaptación, tales como una mayor concientización sobre la importancia de un uso racional del agua en la cuenca, y la implementación de estructuras operativas para la toma de decisiones consensuada entre los distintos usuarios del recurso.

#### *b) Acerca de la modelación de impactos*

El amplio rango de valores para los cambios porcentuales en los caudales que pueden ser obtenidos en un estudio de impacto, como el presentado en este trabajo, es consecuencia directa de las incertidumbres que persisten con respecto a la intensidad, e incluso la dirección, de los cambios que puedan manifestarse en las variables climáticas, precipitación y temperatura, en los ámbitos regional o local, como consecuencia del fenómeno de

calentamiento global (por ejemplo, el caso de las precipitaciones del presente estudio, donde el rango abarca tanto cambios positivos como negativos). Es decir, mediante diferentes MCG, se obtienen distintos patrones regionales de cambio para una misma variación en la temperatura promedio global. A esto se suman las incertidumbres asociadas con los efectos precisos de las emisiones de gases invernaderos y aerosoles en este calentamiento global, así como con las magnitudes y evolución temporal que tendrán estas futuras emisiones.

Las incertidumbres anteriores están reflejadas en la generación y el uso de múltiples entradas (44 escenarios-series de tiempo de datos meteorológicos) en este estudio, para el ejercicio de modelación de los impactos hidrológicos. Adicionalmente, es preciso indicar que el modelo hidrológico también influye en el rango final de los valores de cambios porcentuales en el caudal, al reproducir y propagar el efecto de los cambios de las precipitaciones y la temperatura en los diferentes componentes del balance hídrico.

Al reconocer las imperfecciones intrínsecas (simplificación conceptual y parameterización) que afectan al modelo hidrológico, la magnitud final de la incertidumbre en los resultados (posibles cambios en los caudales promedios) debiera ser aún más amplia que lo presentado aquí.

Aun así, el estudio también demostró que, incluso bajo estos escenarios de incertidumbre, se pueden obtener conclusiones muy valiosas en apoyo a la futura gestión del recurso hídrico y los procesos de adaptación. El modelo aplicado demostró sensibilidad, al variar la temperatura y/o la precipitación, con las anomalías introducidas a escala regional. A partir de este resultado se concluye que se deben realizar esfuerzos para mejorar la regionalización de las anomalías precipitación y temperatura; actualmente en Chile sólo existe un MCR, y de los escenarios generados con *MAGICC-SCENGEN* se aprecia la gran variabilidad existente entre los resultados

de los distintos MCG, los que son la base de los MCR. Con lo anterior se podrían realizar mejores proyecciones cualitativas, e incluso de carácter cuantitativas, sobre probables futuras condiciones de disponibilidad del recurso hídrico dentro de una cuenca hidrográfica del Biobío y en su entorno inmediato.

Se considera importante en los estudios de impacto el uso de varios escenarios plausibles de cambio generados a) a partir de un amplio set de MCG y escenarios de emisiones, como aquellos obtenidos, y b) a partir de la aplicación de un MCR. Ambos presentan varias ventajas y limitaciones: aun cuando los MCR ofrecen las ventajas de: a) utilizar más detalle en la descripción de varias características regionales y locales del ambiente (como topografía) que influyen en la modelación del clima; b) por su mayor resolución espacial, facilitan una validación, al menos parcial, de la modelación de la línea base en los ámbitos regional o local. Una de las más claras desventajas la constituye el hecho de que, a la fecha, los MCR sólo han sido típicamente aplicados a partir de un solo MCG, y para un número muy limitado —normalmente dos— escenarios de emisiones, por lo que no permiten evaluar el impacto de varias de las fuentes de incertidumbre que han sido mencionadas anteriormente.

Una fuente de incertidumbre, cuyos impactos en los caudales finales modelados (escenarios de cambio) no ha sido evaluada matemáticamente en el presente estudio, es aquella asociada con las imperfecciones de la modelación hidrológica (aun cuando se presentan los resultados del ejercicio de calibración y validación). En muchas cuencas de altura en Latinoamérica, y en el mundo en general, la falta de disponibilidad de información de entrada y validación puede afectar seriamente la posibilidad de construir modelos válidos que puedan usarse en los estudios de impacto. Sin embargo, la importancia de estas zonas de altura, especialmente aquéllas con aportes nivales tanto para los ecosistemas como para las sociedades humanas, es ampliamente

reconocida. En el caso particular de la cuenca del río Biobío, la instalación de estaciones meteorológicas a alturas superiores a los 2 000 msnm (midiendo precipitaciones líquidas y sólidas, entre otras) podría contribuir a mejorar considerablemente, en el mediano plazo, la factibilidad y calidad de futuros y más amplios trabajos de modelación.

## Agradecimientos

La presente investigación se efectuó en el marco del proyecto DIUC 208.310.050-1.0. Los autores desean expresar su sincera gratitud a la Dirección General de Aguas de Chile (DGA), en particular a la dirección y personal de la DGA de la Región del Biobío, así como a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), que proporcionó las series de tiempo de variables meteorológicas para el área de estudio. Un especial reconocimiento va dirigido a la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y a la Dirección de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF), que proporcionaron los datos de las corridas del modelo MCR. A Fernando Torrejón, por su ayuda en la revisión del manuscrito. Finalmente, queremos agradecer también a todas las demás personas que colaboraron con datos, sugerencias e información, y que no hayan sido explícitamente mencionadas aquí.

Recibido: 28/10/08  
Aprobado: 31/05/10

## Referencias

- ABU EL-NASR, A., ARNOLD, J.G., FEYEN, J. and BERLAMONT, J. Modelling the hydrology of a catchments using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrological Processes*. Vol. 19, 2005, pp. 573-587.
- ARNOLD, J.G., SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R.S. and WILLIAMS, J.R. Large area hydrologic modeling and assessment - Part I: model development. *JAWRA*. Vol. 34, no. 1, 1998, pp. 73-89.
- CAO, W., BOWDEN, W.B., DAVIE, T. and FENEMOR, A. Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchments with high spatial variability. *Hydrological Processes*. Vol. 20, 2006, pp. 1057-1073.
- CONAMA-DGF *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2006, 63 pp.
- CHALECKI, E.L. and GLEICK, P.H. A framework of ordered climate effects on water resources: A comprehensive bibliography. *JAWRA*. Vol. 35, no. 6, 1999, pp. 1657-1665.
- CHIEW, F.H.S. Estimation of rainfall elasticity of stream flow in Australia. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 51, 2006, pp. 613-625.
- DANKERS, R. and CHRISTENSEN, O.B. Climate change impact on snow coverage, evaporation and river discharge in the Sub-Arctic Tana basin, Northern Fennoscandia. *Climatic Change*. Vol. 69, 2005, pp. 367-392.
- DI LUZIO, M., SRINIVASAN, R., ARNOLD, J.C. and NEITSCH, S.L. ArcView Interface for SWAT 2000 User's Guide. College Station: Texas Water Resources Institute, 2002, 345 pp.
- DÍAZ-NIETO, J. and WILBY, R.L. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the river Thames, United Kingdom. *Climatic Change*. Vol. 69, 2005, pp. 245-268.
- ECKHARDT, K., FOHRER, N. and FREDE, H.G. Automatic model calibration. *Hydrological Processes*. Vol. 19, 2005, pp. 651-658.
- GLEICK, P.H. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *Journal of Hydrology*. Vol. 88, 1986, pp. 97-116.
- GLEICK, P.H. Global climatic changes and regional hydrology: impacts and responses. *IAHS Publication*. No. 168, 1987, pp. 389-402.
- GOSAIN, A.K., RAO, S., SRINIVASAN, R. and REDDY, N.G. Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. *Hydrological Processes*. Vol. 19, 2005, pp. 673-682.
- GOVENDER, M. and EVERSON, C.S. Modelling stream flow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. *Hydrological Processes*. Vol. 19, 2005, pp. 683-692.
- HARVEY, L.D.D., GREGORY, J., HOFFERT, M., JAIN, A., LAL, M., LEEMANS, R., RAPER, S.C.B., WIGLEY, T.M.L. and DE WOLDE, J.R. *An introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report*. IPCC Technical Paper II. Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, D.J. Griggs, y K. Maskell (editors). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 1997, 50 pp.
- HULME, M. and SHEARD, N. *Climate change Scenarios for Argentina*. Norwich, United Kingdom: Climate Research Unit, University of East Anglia, 1999, 6 pp.
- IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden,

- P.J., Dai, X., Maskell, K. y Johnson, C.A. (editors). Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2001, 881 pp.
- IPCC. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (editores). Ginebra: IPCC, 2007, 104 pp.
- LÓPEZ-MORENO, J.I. and NOGUÉS-BRAVO, D. A generalized additive model for the spatial distribution of snowpack in the Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes*. Vol. 19, no. 16, 2005, pp. 3167-3176.
- MARENGO, J.A. and AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in Impact Assessments and Adaptation Studies from Continental to Regional and Local Scales. The CREAS (Regional Climate Change Scenarios for South-America) initiative in South America. *Proceedings of the 8th ICSHMO*, Foz do Iguaçu, Brazil, 2006, pp. 291-296.
- MATA, L. and NOBRE, C. *Impacts, vulnerability and adaptation to climate change in Latin America*. Lima: Background paper commissioned by the Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change, 2006, 67 pp.
- NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.C., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J.R. and KING, K.W. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000*. College Station: Texas Water Resources Institute, 2002, 498 pp.
- STEHR, A., DEBELS, P., ROMERO, F. and ALCAYAGA, H. Hydrological modelling with SWAT under limited conditions of data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 53, no. 3, 2008, pp. 588-601.
- STEHR, A. *Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua, bajo escenarios de cambio climático, para dos subcuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, 2008, 123 pp.
- STEHR, A., DEBELS, P., ARUMI, J.L., ALCAYAGA, H. and ROMERO, F. Combining the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and MODIS imagery to estimate monthly flows in a data-scarce Chilean Andean basin. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 54, no. 6, 2009, pp. 1053-1067.
- TRIPATHI, M.P., RAGHUWANSHI, N.S. and RAO, G.P. Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrological Processes*. Vol. 20, 2006, pp. 1137-1156.
- VAN GRIENSVEN, A. and BAUWENS, W. Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models. *Water Resources Research*. Vol. 39, no. 12, 2003, pp. 1348-1356.
- VAN GRIENSVEN, A., MEIXNER, T., GRUNWALD, S., BISHOP, T. and SIRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchments models. *Journal of Hydrology*. Vol. 324, 2006, pp. 10-23.
- VAN LIEW, M.W., ARNOLD, J.G. and BOSCH, D.D. Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. *Transaction of the American Society of Agriculture*. Vol. 48, 2005, pp. 1025-1040.
- WATSON, R., ZINYOWERA, M.C., MOSS, R.H. and DOKKEN, D.J. *IPCC Special Report on the Regional Impacts of Climate Change: An assessment of vulnerability*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 1998.
- WHITFIELD, P., REYNOLDS, C.J. and CANNON, A.J. Modelling stream flow in present and future climates: Examples from the Georgia Basin, British Columbia. *Canadian Water Resources Journal*. Vol. 27, 2002, pp. 427-456.
- WIGLEY, T.M.L. *MAGICC/SCENGEN 4.1: Technical Manual*. Boulder, USA: National Center for Atmospheric Research, October 2003a, 14 pp.
- WIGLEY, T.M.L. *MAGICC/SCENGEN 4.1: User Manual*. Boulder, USA: National Center for Atmospheric Research, October 2003b, 23 pp.
- WILBY, R.L., CHARLES, S.P., ZORITA, E., TIMBAL, B., WHETTON, P. and MEARN, L.O. *Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [http://unfccc.int/resource/cd\\_roms/na1/v\\_and\\_a/Resource\\_materials/Climate/StatisticalDownscalingGuidance.pdf](http://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/v_and_a/Resource_materials/Climate/StatisticalDownscalingGuidance.pdf), 2004.
- XU, C.-Y. and SINGH, V.P. Review on Regional Water Resources Assessment Models under Stationary and Changing Climate. *Water Resources Management*. Vol. 18, 2004, pp. 591-612.

## Abstract

STEHR, A., DEBELS, P., ARUMI, J.L., ALCAYAGA, H. & ROMERO, F. Modeling the hydrological response to climate change: experiences from two south-central Chilean watersheds. *Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. I, No. 4, October-December, 2010, pp. 37-58.

During the past few years, a progressive worldwide change of the climatic conditions has been observed that has consequently brought increases in the frequency and severity of phenomena like floods and droughts. Thus, it is necessary to have tools for making informed decisions. One way to assess the effects of the climate change on the hydrology of a river basin is to use a distributed hydrologic model, which once calibrated and validated is perturbed with changes (% of change in precipitation and  $\Delta$  variation in temperature) obtained from different future climate scenarios. The objective of this work is to quantify by means of simulations done with a mathematical model perturbed with plausible scenarios of climatic change, the sensitivity of the hydrology of two sub-basins of the Biobío River. In addition, the amplitude in the response obtained from the hydrologic model perturbed with changes obtained from different Global Circulation Models is analyzed, and the impact to using signals of change derived from the application of more advanced regionalization methods is evaluated. The results indicate that for most of the modeled scenarios of climate change, a reduction in the mean monthly and annual flows will take place, being this variation greater in the spring and in the summer. These results allow to perform one of the first quantitative interpretations of the potential impacts of the climate change in the availability of water resources in the Biobío river basin.

**Keywords:** climate change, hydrological modeling, SWAT, RCM, MAGICC-SCENGEN, Chile, Biobío, Andean watershed.

## Dirección institucional de los autores:

*Dra. Alejandra Stehr*

Investigadora  
Universidad de Concepción  
Centro EULA-Chile  
Edmundo Larenas s/n  
Concepción, Chile  
Teléfono: +56 41 220 4053  
astehr@udec.cl

*M.C. Patrick Debels*

Investigador  
Universidad de Concepción  
Centro EULA-Chile  
Edmundo Larenas s/n  
Concepción, Chile  
Teléfono: +56 41 220 4336  
pdebels@udec.cl

*Dr. José Luis Arumi*

Profesor Asistente  
Universidad de Concepción  
Facultad de Ingeniería Agrícola

Departamento Recursos Hídricos  
Avenida Vicente Méndez 595  
Chillán, Chile  
Teléfono: +56 42 20 8804  
jarumi@udec.cl

*Ing. Hernán Alcayaga*

Dirección General de Aguas  
Ministerio de Obras Públicas  
Av. Arturo Prat 501, piso 6  
Concepción, Chile  
Teléfono: + 56 (41) 285 2273  
hernan.alcayaga@mop.gov.cl

*Ing. Francisco Romero*

Dirección General de Aguas  
Ministerio de Obras Públicas  
Morandé 59, piso 8  
Santiago, Chile  
Teléfono: +56 2 449 3782  
francisco.romero.b@mop.gov.cl