

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**PROYECCIONES DE CRECIDAS EN CUENCAS ANDINAS BAJO DISTINTOS
MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL**

MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA.¹
MARÍA PAZ BOBADILLA²
XIMENA VARGAS M.³
JAVIER CEPEDA A.⁴
VICTORIA SILVA B.⁵
FELIPE URIBE⁶
NICOLÁS VÁSQUEZ P.⁷

RESUMEN

El diseño de obras hidráulicas supone caudales máximos instantáneos asociados a ciertos periodos de retorno, bajo el supuesto de que la hidrología de una cuenca se mantiene constante en el tiempo. En este estudio se presentan de forma simplificada las proyecciones de crecidas de periodos de retorno de 10, 20 y 50 años, en el escenario de cambio climático RCP8.5, para cuatro modelos de circulación general seleccionados según criterio de ajuste de estacionalidad en el período histórico. Los resultados muestran que tanto por el incremento de las precipitaciones extremas en el periodo pluvial, como de las temperaturas asociadas a dichos eventos, se esperarían, en promedio, incrementos en los caudales máximos instantáneos de hasta un 90% para el futuro lejano (2046-2075) siendo la variable de temperatura la que predomina en este aumento. Se desprende de este estudio, que los potenciales efectos del cambio climático son importantes y deberían analizarse para la determinación de caudales de diseño.

¹Ingeniero Civil, MSc, Depto de Ingeniería Civil - AMTC, Universidad de Chile – miguel.lagos@amtc.cl

²Ingeniera Civil, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – mariapazbobadilla@gmail.com

³Profesor Asociado, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – xvargas@ing.uchile.cl

⁴Ingeniero Civil (e), MSc. (c), Universidad de Chile – j.cepeda.abad@gmail.com

⁵Ingeniera Civil, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – vistoriaa@gmail.com

⁶Ingeniero Civil, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – feuribev@gmail.com

⁷Ingeniero Civil (e), MSc. (c), Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – nvasquez.plac@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El diseño hidrológico de diversas obras hidráulicas tiene en consideración que la estadística hidrológica es estacionaria, de modo que ajustada una función de densidad de probabilidad a la serie de excedencia anuales, puede garantizarse un adecuado diseño asociado a distintos periodos de retorno.

Desde el inicio de los informes del IPCC¹ se han realizado diversos estudios que involucran cuánto impactaría el efecto del cambio climático, principalmente sobre la disponibilidad de recursos hídricos en distintos escenarios (eg. UChile-DGA, 2011; y UChile-Ministerio de Energía, 2011). La proyección en la disminución de precipitaciones anuales ha despertado interés en sectores tanto público como privado, para generar distintos niveles de alerta y políticas que permitan adaptarse a estos cambios.

El último informe del IPCC (2013) agrupa proyecciones de distintos modelos de circulación general (GCM, por su sigla en inglés), bajo escenarios que suponen, en su mayoría, que las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen en cierto periodo de tiempo, teniendo a finales del siglo XXI incrementos en el balance radiativo terrestre de 2.6, 4.5, 6 y 8.5 [W/m²] respecto a la era pre-industrial, definiendo así los escenarios RCP². Estos factores describen los nuevos escenarios de cambio climático, que se diferencian del informe del IPCC (2007), el cual define los escenarios A2, A1B y B1 ,entre otros, en base a crecimientos poblacionales y económicos.

En Chile y el mundo, se han observado cambios estadísticamente significativos como el señalado por Carrasco et al. (2008), que muestra una elevación en la isoterma cero para Chile central, proyecciones que se han observado en diversas zonas del país y publicadas entre otros por Falvey y Garreaud (2009) y Vicuña et al. (2013), que han evidenciado una menor cantidad de almacenamiento de nieve disponible para deshielo producto de la disminución de eventos del tipo nieve.

El objetivo general de este estudio consiste en cuantificar mediante un método simplificado, para tres cuencas del país, los potenciales efectos del cambio climático en crecidas de periodos de retorno T=10, 20 y 50 años, mediante cuatro modelos GCM seleccionados por criterio de estacionalidad y aplicados en el escenario RCP8.5.

Revisión bibliográfica

Considerando las proyecciones del penúltimo informe IPCC (2007), se desarrolló el estudio de Lagos y Vargas (2011), en donde para estaciones de una extensión de registro superior a treinta años, se determinó que tanto para el escenario A2 como el B1, y utilizando 10 GCM, se proyectan incrementos respecto al periodo histórico para eventos diarios de T=1000 y 10000 años y para la Precipitación Máxima Probable de Hershfield. La Figura 1 muestra las proyecciones para la cuenca del río Elqui en Puclaro y Maule en Colbún en la tormenta milenaria, en los escenarios A2 y B1.

¹ Sigla en inglés para Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

² Sigla en inglés de *Representative Concentration Pathways*.

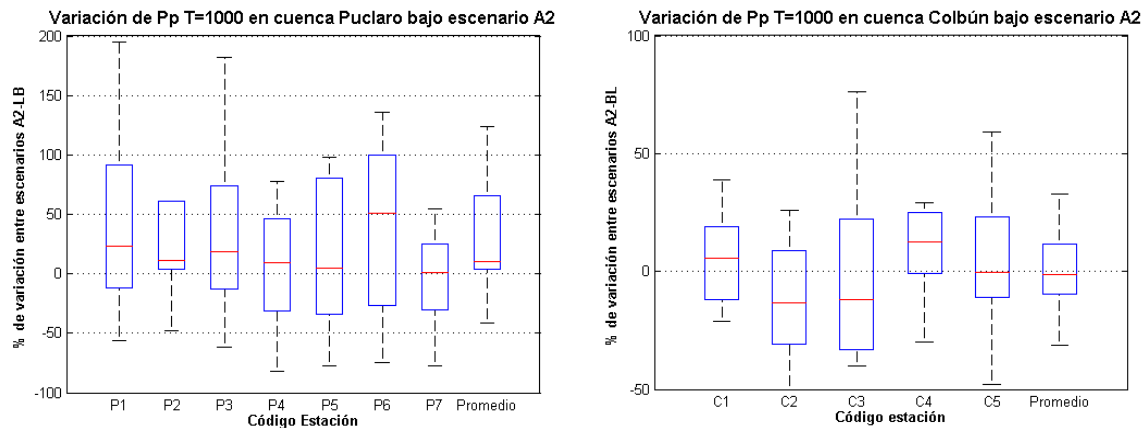


Figura 1. Proyecciones de precipitación diaria de T=1000 años en el escenario A2, en estaciones ubicadas en torno a las cuencas del río Elqui en Puclaro (izquierdo) y Maule en río Colbún (derecho). Fuente: Extraído de Lagos y Vargas (2011).

Desde el punto de vista de las temperaturas, el estudio de Lagos y Vargas (2014) muestra que la hipsometría de una cuenca juega un rol fundamental en la magnitud de los efectos producto de variaciones de temperatura. Esto se muestra en la Figura 2 para la cuenca del río Elqui en Puclaro, donde un incremento de 500 [m] en la elevación de la línea de nieves puede significar un incremento en casi un 20% del área pluvial aportante.

Considerando los efectos combinados de precipitación y temperatura, se muestra en la Figura 3 las proyecciones en las crecidas milenaria y deca-milenaria para la cuenca de Elqui en Embalse Puclaro, donde se tienen incrementos de hasta 500 [m³/s] en mediana en el escenario A2; un cambio importante considerando que el caudal medio anual es de 9.5 [m³/s]. La Figura 4 por su parte, muestra las proyecciones en la crecida máxima probable obtenida por dos métodos hidrometeorológicos, teniendo proyecciones aún más severas que para eventos de alto periodo de retorno.

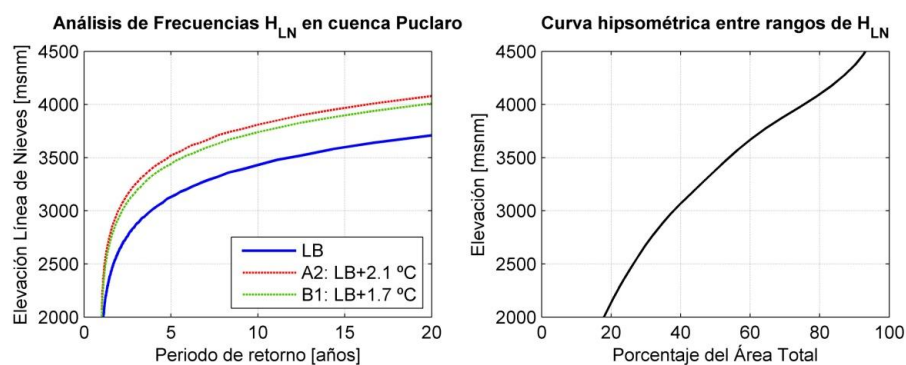


Figura 2. Relación entre la elevación de la línea de nieves bajo escenarios de cambio climático (izquierda) y el área porcentaje del área total de la cuenca (derecha). Fuente: extraído de Lagos y Vargas (2014)

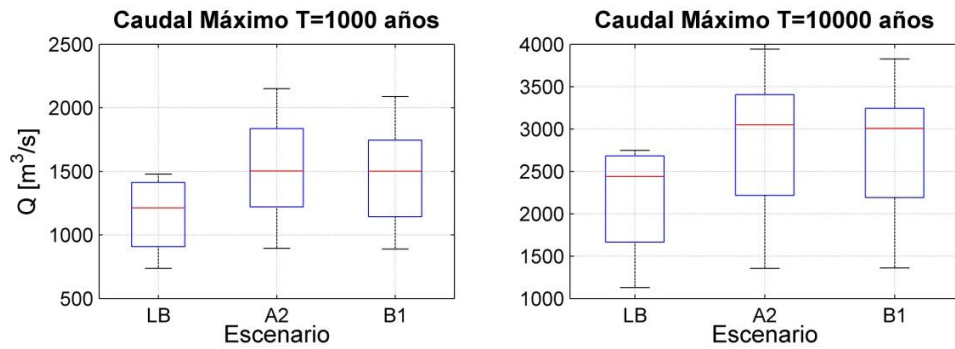


Figura 3. Rangos de caudales obtenidos de la combinación de periodos de retorno de precipitación y línea de nieves en los escenarios histórico (LB), A2 y B1 (2045-2075). Fuente: Adaptado de Lagos y Vargas (2014a).

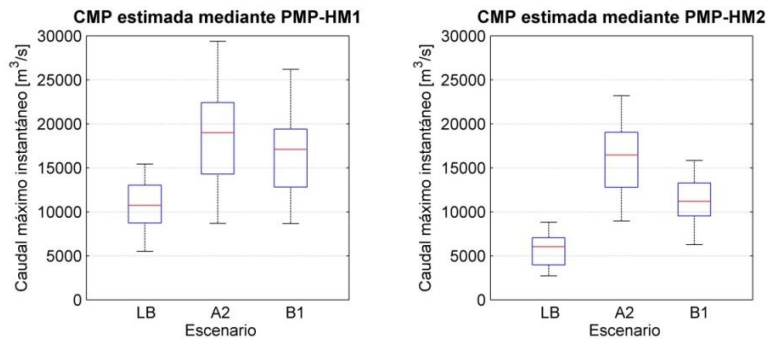


Figura 4. Rangos de caudales máximos instantáneos de la crecida máxima probable obtenida por dos métodos hidrometeorológicos. Fuente: Lagos y Vargas (2013)

Entre los estudios más importantes y completos realizados en el último tiempo en Chile, destacan los de Dimaría et al. (2013) y PUC (2013), donde se analiza la cuenca del río Mataquito mediante un modelo hidrológico distribuido. La Figura 5 muestra los rangos para distintos periodos de retorno de precipitaciones y caudales máximos en tres días para el escenarios RCP8.5, en esta Figura destaca que no existen diferencias significativas para bajos periodos de retorno respecto al escenario histórico, sin embargo a mayores periodos de retorno el aumento es considerable.

La Figura 6 por su parte muestra la comparación entre los rangos de caudales máximos instantáneos de periodo de retorno de 100 años. Se aprecia de esta Figura que las diferencias entre los distintos GCM proyectan que la mediana para el escenario RCP8.5 podrían ser casi el doble respecto al caudal de diseño, siendo un incremento de hasta 3 veces para el más desfavorable de los GCM.

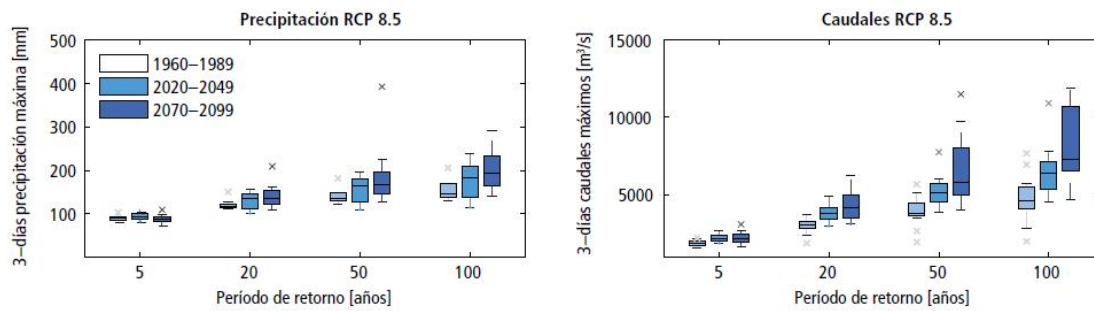


Figura 5. Proyecciones de precipitaciones y caudales máximos en tres días para la cuenca del río Mataquito. Fuente: Adaptado Dimaria et al. 2013.

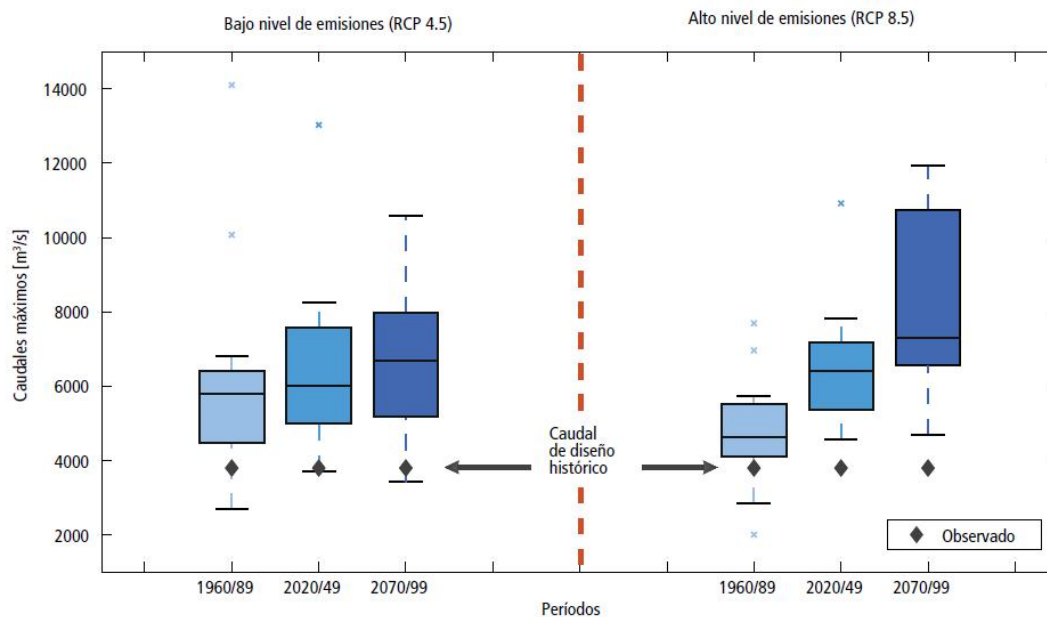


Figura 6. Comparación de rangos de caudales máximos instantáneos de periodo de retorno 100 años, obtenido en distintos periodos temporales en la cuenca del río Mataquito y su comparación con el caudal de diseño histórico utilizado. Fuente: PUC (2013).

2. ZONA DE ESTUDIO

Las cuencas donde se realiza el estudio corresponden a las del río Maipo en el Manzano, Maule en bocatoma Central Pehuenche y Bío-Bío en Llanquén, todas ellas influenciadas en su régimen hidrológico por una componente nival. La Figura 7 muestra la ubicación general de la zona de estudio, donde se sitúan las tres cuencas y además las estaciones meteorológicas bases consideradas para las proyecciones de cambio climático.

En la Tabla 1 se muestran las principales características de las estaciones base, mientras que en la Tabla 2 se resumen las principales características hidrológicas y geomorfológicas de las cuencas estudiadas.

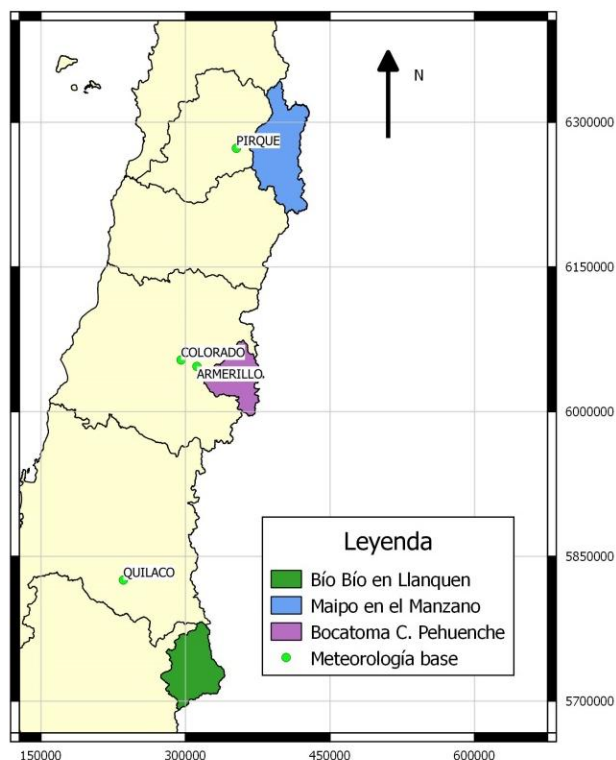


Figura 7. Ubicación general de cuencas de estudio y estaciones meteorológicas base. Datum WGS 84, huso 19 S.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas base consideradas como base para el estudio.

Nombre estación	Código BNA	Elevación [msnm]	Precipitación media anual [mm]	Temperatura media anual [°C]
Pirque	05711003-1	659	445	14,3
Armerillo	07320002-4	530	2326	-
Colorado	07378003-9	420	-	13,4
Quilaco	08318002-1	225	1514	13,2

Tabla 2. Principales características hídricas y geomorfológicas de las cuencas en estudio.

Nombre cuenca	Área [km ²]	Elevación media [msnm]	Elevación máxima [msnm]	Caudal medio anual [m ³ /s]	Régimen hidrológico
Maipo en el Manzano	4851	3525	6539	122	Nival
Maule en Bocatoma Central Pehuenche	2543	2185	3914	105	Nival
Bío-Bío en Llanquén	3349	1680	2726	135	Nivo-Pluvial

3. METODOLOGÍA

Para el presente estudio se evalúan las proyecciones de cambio climático para los periodos de retorno T=10, 20 y 50 años bajo el escenario RCP8.5 en cuatro GCM seleccionados por estacionalidad. Las metodologías empleadas para cumplir estos objetivos se describen en los siguientes apartados.

Estimación de caudales máximos instantáneos

Con el fin de estimar las crecidas, se evalúa el modelo simplificado de precipitación esorrentía de Verni y King modificada, descrita por la Ecuación (1).

$$Q(T) = C(T) \cdot 0,00618 \cdot P_{24}^{1,24} \cdot A_p^{0,88} \quad (1)$$

Donde:

$Q(T)$: caudal máximo instantáneo asociado al periodo de retorno T [años] en [m³/s].

$C(T)$: coeficiente empírico de periodo de retorno T.

P_{24} : precipitación máxima diaria asociada al periodo de retorno T en [mm].

A_p : área pluvial de la cuenca, expresada en [km²].

Las precipitaciones se definen mediante análisis de frecuencia, ajustando mediante el test χ^2 distintas funciones de densidad de probabilidad. El área pluvial de la cuenca según el estudio MOP (1995), se determina en gran parte de los estudios hidrológicos mediante las elevaciones de línea de nieves de Peña y Vidal (1993) o Escobar y Vidal (1992) establecida en base a gradientes adiabáticos húmedos para diversas latitudes y considerando una temperatura umbral para la ocurrencia de eventos de nieve.

En este estudio, para considerar la variabilidad climática se determina el área pluvial mediante la Ecuación (2) y la curva hipsométrica, considerando una temperatura umbral de 2 [°C] para la ocurrencia de nieve y una temperatura base, que se caracteriza como la temperatura promedio de las mayores 30 tormentas en cada periodo temporal analizado en la estación base.

$$H_{Ln} = h_{base} - \frac{\Delta h}{\Delta T} (2 - T_{base}) \quad (2)$$

Donde:

H_{Ln} : Estimación de la elevación de la línea de nieves [msnm].

h_{base} : Elevación de la estación base [msnm].

$\frac{\Delta h}{\Delta T}$: Inverso del gradiente adiabático húmedo determinado en base a varias estaciones de temperatura en días de lluvia.

T_{base} : Temperatura media diaria de las 30 mayores tormentas.

Los coeficientes empíricos C(T) se obtienen del estudio MOP (1995), para el caso de la cuenca del Maipo, se realiza un análisis de frecuencia de los caudales máximos instantáneos registrados en la estación fluviométrica, para luego calibrar los resultados obtenidos de Verni y King en función del área pluvial para cada período de retorno.

En el caso de las temperaturas se determinó, mediante el balance hídrico de Chile y para distintas cotas, un factor de precipitación media ($k(H_{LN})$) respecto a la precipitación de la estación base de cada cuenca en estudio ($Pp_{Estación\ base}$), de modo que se puede conocer la precipitación media de la cuenca en función de la línea de nieves ($Pp_{media}(H_{LN})$) según la Ecuación (3).

$$Pp_{media}(H_{LN}) = Pp_{Estación\ base} \cdot k(H_{LN}) \quad (3)$$

Los resultados se muestran para tres periodos temporales, histórico (1976-2005), futuro cercano (2015-2045) y futuro lejano (2046-2075) en el escenario RCP8.5, que considera que las emisiones de gases de efecto invernadero no se reducen durante el siglo XXI, alcanzando el balance radiativo $8.5 [W/m^2]$ más a finales del año 2100.

Análisis de sensibilidad climática

Antes de realizar el ejercicio de determinar los potenciales efectos de cambio climático en las cuencas de estudio mediante la Ecuación (1), se determina que tan sensible es el caudal máximo instantáneo de cada cuenca, a variaciones de precipitación y temperatura, tanto de forma independiente como conjunta para el caudal de periodo de retorno 10 años, determinando de este modo las implicancias esperables en términos de caudales máximos instantáneos estimados con la metodología de Verni y King.

Evaluación de las forzantes de cambio climático

Los distintos modelos GCM presentan diversas resoluciones espaciales, teniendo proyecciones que pueden ser bastante dispersas, especialmente en términos de precipitación como se mostró en las Figuras 1 y 5. Con el fin de minimizar la incertidumbre de las proyecciones se seleccionan cuatro GCM, según criterio de ajuste de la estacionalidad de precipitación y temperatura del modelo en el periodo histórico, considerando que si se representa adecuadamente la estacionalidad un modelo es más confiable. Un ejemplo de la evaluación de la distribución mensual de precipitaciones se muestra en la Figura 8, mientras que los modelos seleccionados y sus principales características se muestran en la Tabla 3.

La técnica de escalamiento empleada corresponde a un enfoque estadístico, utilizado para series diarias en el periodo histórico 1976-2005, que consiste en realizar en primera instancia un escalamiento espacial por inverso de la distancia, y en segunda instancia un escalamiento estadístico temporal ajustando funciones de transferencia construidas mes a mes para cada forzante. Esta metodología ha sido ampliamente utilizada en estudios anteriores (eg. UChile-DGA, 2011; UChile-Ministerio de Energía, 2011).

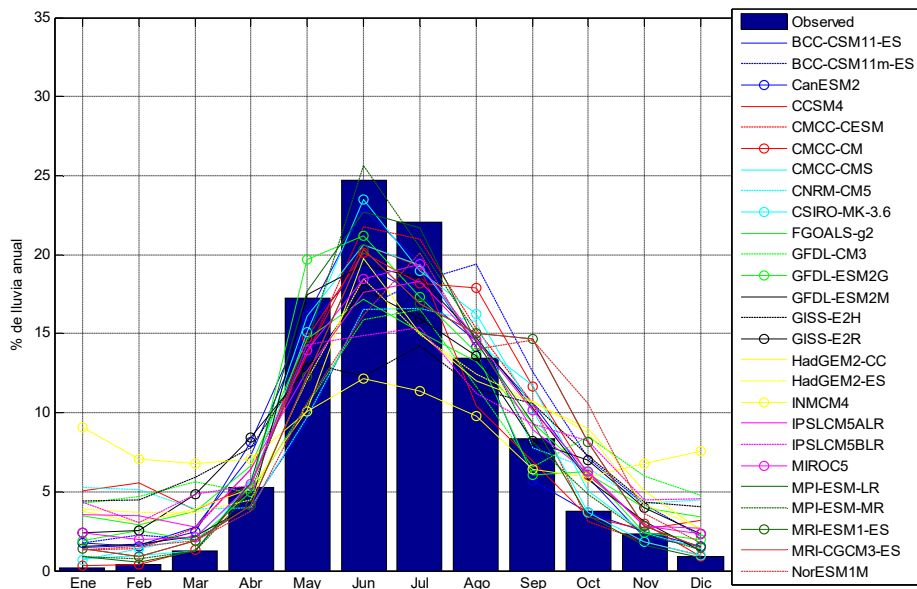


Figura 8. Ejemplo de evaluación por estacionalidad de modelos GCM en una estación base por criterio de precipitación.

Tabla 3. Modelos GCM seleccionados para realizar este estudio.

Centro de modelamiento	Modelo	Institución	Δ° Lat.	Δ° Lon.	Calendario
BCC	BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	2,791	2,813	Año Juliano
CMCC	CMCC-CESM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	3,711	3,750	Año normal
	CMCC-CMS		1,865	1,875	Año normal
CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	1,865	1,875	Año Juliano
MPI-M	MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	1,865	1,875	Año normal

4. RESULTADOS

Análisis de sensibilidad climática

En los distintos paneles de la Figura 9 se muestra el efecto de la sensibilidad climática para las tres cuencas de estudio en los caudales máximos instantáneos de 10 años de periodo de retorno, en función de variaciones de temperatura base en días de lluvia [$^\circ\text{C}$] y en función de variaciones de la precipitación del mismo periodo de retorno.

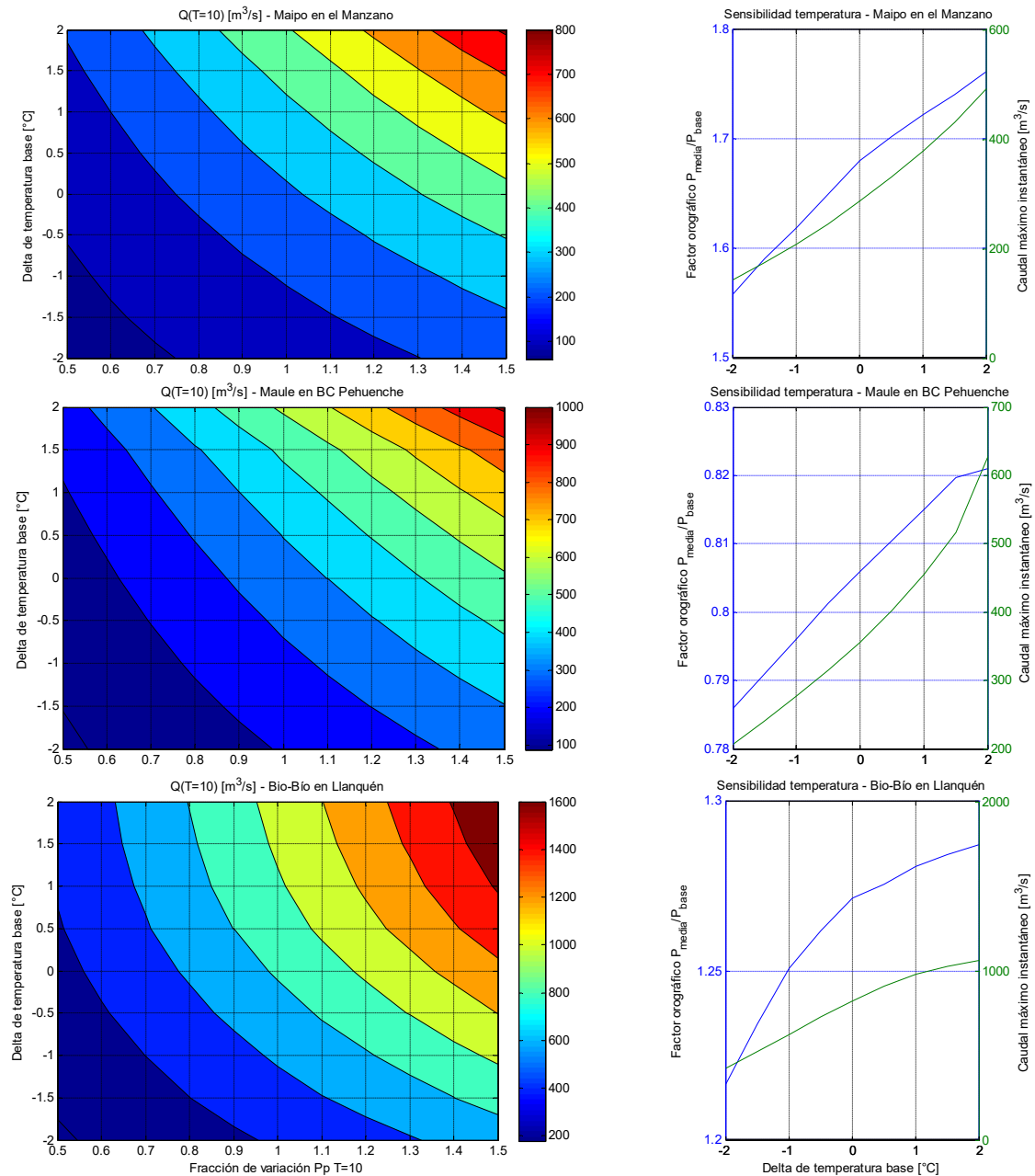


Figura 9. Sensibilidad climática según el efecto combinado de variaciones de precipitación y temperatura en el caudal de T=10 años (panel izquierdo) y sensibilidad del factor orográfico (línea azul) y caudal (línea verde) de T=10 años en función de la temperatura (panel derecho).

Proyecciones de forzantes meteorológicas

La Figura 10 muestra, a modo de ejemplo, las proyecciones de precipitación máxima diaria para distintos periodos de retorno en la estación Armerillo para todos los GCM seleccionados, mostrando la gran variabilidad que se puede encontrar entre distintos modelos para distintos periodos temporales.

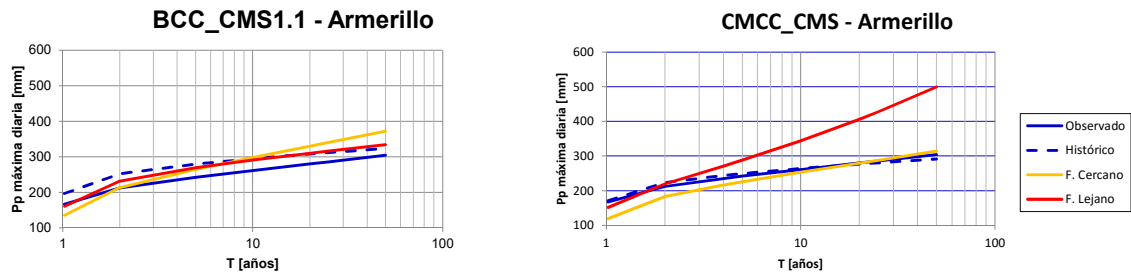


Figura 10. Precipitaciones máximas diarias para distintos periodos de retorno en dos GCM seleccionados, estación Armerillo.

En la Figura 11 se muestran las proyecciones de temperatura para la estación Colorado, donde se aprecia que existe una clara tendencia en el incremento de temperaturas en los días de lluvia respecto al periodo histórico.

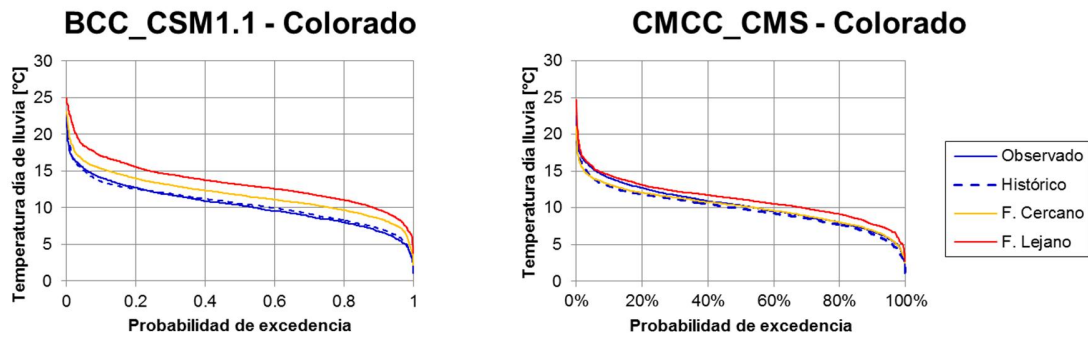


Figura 11. Proyecciones de temperatura en días de tormenta para la estación Colorado en los cuatro GCM seleccionados.

La Tabla 4 muestra un resumen de las proyecciones de variación de precipitación asociadas a distintos periodos de retorno, mientras que la Tabla 5 muestra las proyecciones del promedio de temperatura media diaria en las 30 mayores tormentas para cada GCM.

Tabla 4. Proyecciones de variación de precipitación máxima diaria asociada a distintos periodos de retorno para cada GCM seleccionado.

Estación	T [años]	BCC_CSM1.1		CMCC_CMS		CSIRO MK3.6		MPI_ESM_LR	
		Cer.	Lej.	Cer.	Lej.	Cer.	Lej.	Cer.	Lej.
Pirque	10	-28%	-3%	-24%	7%	-4%	-4%	16%	33%
	20	-4%	-2%	2%	6%	-3%	-8%	25%	44%
	50	-1%	-1%	-5%	3%	-4%	-14%	38%	61%
Armerillo	10	1%	-1%	-4%	30%	3%	10%	22%	-5%
	20	7%	1%	1%	47%	6%	13%	28%	-4%
	50	15%	3%	8%	71%	9%	16%	36%	-4%
Quilaco	10	23%	6%	54%	37%	6%	13%	28%	5%
	20	25%	6%	51%	47%	7%	15%	15%	6%
	50	49%	6%	51%	58%	8%	17%	5%	8%

Tabla 5. Proyecciones de variación de temperatura media diaria (°C) para las 30 mayores tormentas en cada GCM.

Estación	BCC CSM1.1		CMCC CMS		CSIRO MK3.6		MPI ESM LR	
	Cer.	Lej.	Cer.	Lej.	Cer.	Lej.	Cer.	Lej.
Pirque	-1.4	0.3	1.2	2.3	0.2	1.7	0.5	2.6
Colorado	2.52	3.82	-0.7	1.6	0.5	2.6	1.4	1.8
Quilaco	2.3	3.1	-2.1	-0.6	0.6	2.3	1.6	2.1

Proyecciones de caudales máximos instantáneos

Finalmente, en el panel de la Figura 12, se muestran las proyecciones de variación de caudales máximos instantáneos para las tres cuencas en estudio.

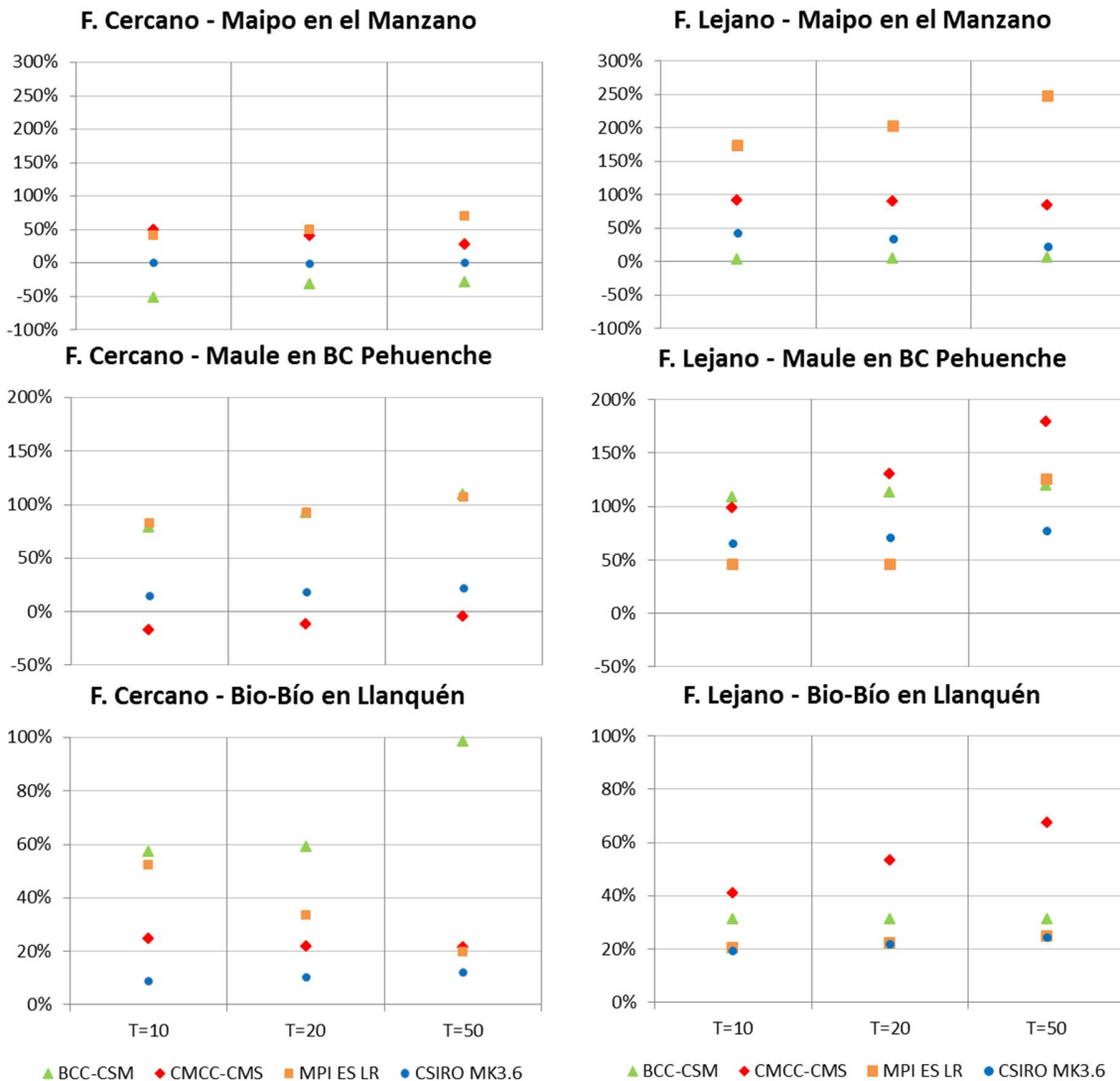


Figura 12. Proyecciones de caudales máximos instantáneos según los cuatro GCM seleccionados en las tres cuencas de estudio para el futuro cercano 2015-2045 (izquierda) y el futuro lejano 2046-2075 (derecha).

5. DISCUSIÓN

De la Figura 9 se desprende que si la precipitación no cambia, las variaciones de temperatura sí tienen efectos en la precipitación media de la cuenca producto de las variaciones del área pluvial aportante. Sin embargo que efecto predomina sobre otro depende de las características topográficas de cada cuenca que dominan la distribución espacial de la precipitación. A modo de ejemplo en la cuenca Maipo en el Manzano, se tiene que si la precipitación disminuye a la mitad, el caudal para T=10 años estimado con Verni y King se mantiene si la temperatura aumenta en 2 [°C].

De las tres cuencas analizadas, Maule en BC Pehuenche resulta ser la más sensible en términos de temperatura para el incremento de caudales, mientras que Bio-Bío en Llanquén resulta ser más sensible en términos de variaciones de precipitación que de temperatura.

En términos de las forzantes meteorológicas, se puede apreciar tanto de las Tablas 4 y 5 que en general se proyectan aumentos de la magnitud de los eventos de precipitación asociados a distintos periodos de retorno para todos los modelos, aunque existe una amplia dispersión tanto entre los modelos, como entre las estaciones base analizadas. En términos de temperaturas, se tiene una menor dispersión en las variaciones futuras, proyectando en general temperaturas más elevadas para las 30 máximas tormentas en las estaciones base analizadas. Estas proyecciones resultan similares a las encontradas por Lagos y Vargas (2011) en el escenario A2 y las encontradas por Dimarí et al (2013) en la cuenca del río Mataquito.

Finalmente las proyecciones de los cuatro GCM seleccionados en los caudales máximos instantáneos muestran incrementos importantes en los caudales de distintos periodos de retorno analizados para las tres cuencas en estudio. En el futuro lejano se tiene que, bajo las proyecciones de precipitación y temperatura de todos los modelos, se obtiene incrementos en los caudales respecto al periodo histórico, siendo la cuenca Maipo en el Manzano la que presenta mayor dispersión de resultados, y Bio-Bío en Llanquén la que presenta menores dispersiones e incrementos para todos los modelos y periodos temporales analizados.

De este estudio, al igual que los revisados en la introducción, se desprende la necesidad de incorporar el cambio climático en la determinación de caudales de diseño, puesto que el supuesto de estacionariedad de series hidrológicas ya no puede ser considerado válido. Se tiene además que en la actualidad se han observado emisiones de CO₂ por sobre el escenario recientemente analizado (Peters et al. 2012), por lo que la adaptación y medidas a tomar relativas al cambio climático toman cada vez más prioridad, siendo el mayor avance a nivel gubernamental el estudio de PUC (2013), en donde con la colaboración del MOP se propone una metodología para enfrentar esta problemática.

6. CONCLUSIONES

El análisis de sensibilidad climática es una herramienta de bajo costo que define, con bastante rapidez, los impactos en caudales asociados a distintos periodos de retorno debido a variaciones de temperatura en días de tormenta y/o eventos extremos de precipitación.

Los aumentos de temperatura son los que generan mayores incrementos de caudales en las cuencas estudiadas, pues al incrementar el área pluvial aportante se produce un incremento en la precipitación media de cada cuenca debido al efecto orográfico. Sin embargo este impacto depende fuertemente de la hipsometría de cada sistema.

Los modelos seleccionados proyectan en general incrementos en los caudales máximos instantáneos, siendo los más significativos para la crecida de T=50 años y el periodo 2046-2075, no obstante, existe una gran dispersión entre los modelos y cuencas analizadas. Lo anterior permite concluir que es necesario realizar este tipo de análisis para determinar un correcto diseño hidrológico de obras hidráulicas.

REFERENCIAS

- Carrasco, J., R. Osorio and G. Casassa. 2008. Secular trend of the equilibrium line altitude in the western side of the southern Andes derived from radiosonde and surface observations. *J. of Glaciology*, 54(186), 538-550.
- Demaria E.M.C., E.P. Maurer, B. Thrasher, S. Vicuña, F.J. Meza, Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story?, *Journal of Hydrology*, Volume 502, 10 October 2013, Pages 128-138, ISSN 0022-1694, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.027>.
- Dirección General de Aguas (DGA). 1987. Balance Hídrico de Chile. MOP, Gobierno de Chile.
- Escobar, F. y F. Vidal, 1992. Experiencia sobre la determinación de la línea de nieves en cuencas de Chile central. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, Vol. 7, N° 2.
- Falvey, M. and R. Garreaud, 2009: Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the SE Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *J. Geophys. Res.*, 114, D04102, doi:10.1029/2008JD010519.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 996 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. *Climate change 2013. The physical science basis*. Disponible en internet: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Lagos, M. y Vargas, X. 2011. Variación de eventos extremos de precipitación diaria proyectados a mediados del siglo XXI, resultados en regiones de Coquimbo y Maule. Presentado en XX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Lagos, M. y Vargas, X. 2013. Diseño hidrológico en cuencas de régimen mixto, incertidumbre y cambio climático: el caso del embalse Puclaro. Presentado en XX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Lagos, M y Vargas, X. 2014. Potenciales influencias del cambio climático en crecidas pluviales en una cuenca Andina. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. V, núm 2, pp 19-38.
- Ministerio de Obras Públicas, (MOP), República de Chile. 1995. Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica. Dirección General de Aguas.
- Peña, H y F. Vidal. 1993. Estimación estadística de la línea de nieves durante los eventos de precipitación entre las latitudes 28 y 38 grados sur. XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Peters, G. P., Marland, G., Le Quéré, C., Boden, T., Canadell, J. G., & Raupach, M. R. 2012. Rapid growth in CO2 emissions after the 2008-2009 global financial crisis. *Nature Climate Change*, Vol. 2, 1, Pages 2-4.
- Pontificia Universidad Católica de Chile. 2013. Marco Estratégico para la adaptación de la infraestructura al cambio climático. Proyecto Financiado por Environment Canada.
- Universidad de Chile - Ministerio de Energía, 2011. Selección y aplicación de un modelo hidrológico para estimar los impactos del cambio climático en la generación de energía del sistema interconectado central. Realizado para el Ministerio de Energía por el Depto. de Ingeniería Civil, RHMA, Universidad de Chile.
- Universidad de Chile – Dirección General de Aguas, 2011. Investigación de los aportes nivoglaciares en algunas cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel y estimación de los efectos del cambio climático. Realizado para la Dirección General de Aguas por el Depto. de Ingeniería Civil, RHMA, U. de Chile.
- Vicuña, S., Gironás, J., Meza, F.J., Cruzat, M.L., Jelinek, M., Bustos, E., Poblete, D., and Bambach, N., 2013. Exploring possible connections between hydrological extreme events and climate change in central south Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 58 (8), 1598–1619.