

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

**INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE LOS
CAUDALES DEL RIO ITATA BAJO**

**GONZALO BOHLE A.¹
OSCAR LINK L.²
ALEJANDRA STEHR G.³
ANGEL MONSALVE S.⁴**

RESUMEN

Se presenta la modelación hidrológica distribuida de la cuenca del río Itata mediante el modelo SWAT para analizar los efectos de un cambio climático, representado mediante los escenarios B2 y A2, sobre el régimen de caudales medios mensuales. Los resultados muestran que los caudales medios mensuales disminuyen en promedio 1.6% por cada 1% de disminución de la precipitación. La mayor disminución de los caudales medios mensuales se observó en los meses de verano y otoño.

¹Ingeniero Civil, Candidato a Magister en Ciencias de la Ingeniería, Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – mail: gbohle@udec.cl

²Profesor Asistente, Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - mail: olink@udec.cl

³Investigadora, Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción – mail: astehr@udec.cl

⁴Ingeniero Civil, Candidato a Magister en Ciencias de la Ingeniería, Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – mail: amonsalve@udec.cl

INTRODUCCION

El régimen de caudales de un río está condicionado por el clima, la geología, la topografía y el uso de suelos. A su vez, los caudales condicionan la hidrodinámica, el régimen térmico y la morfología fluvial, lo que tiene consecuencias para el ecosistema.

Se estima que el aumento de las concentraciones de CO₂ puede provocar un aumento de las temperaturas para el año 2100 de hasta 5.8°C (IPCC, 2001). Para la cuenca del río Itata, se estima para el periodo comprendido entre 2071-2100, una disminución media en las precipitaciones entre 23 y 38% y un aumento medio en las temperaturas entre 2.3 y 3.3 °C (CONAMA-DGF, 2006). Esto generará un efecto sobre el régimen de caudales del Itata que debe ser evaluado.

Un modelo hidrológico, capaz de modelar la hidrología de la cuenca del río Itata con la escasa información meteorológica disponible y que requiere la optimización de una menor cantidad de parámetros que otros modelos hidrológicos, corresponde al modelo hidrológico SWAT (Wang *et al.*, 2008). Este ha sido ampliamente utilizado para modelar la hidrología de una cuenca (Abbaspour *et al.*, 2006), estudiar el transporte de nutrientes (Grizzetti *et al.*, 2003), estimar los efectos que pueden producir modificaciones en usos de suelo (Fohrer *et al.*, 2002), modelar la calidad de agua (Santhi *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2008) y estimar probables efectos sobre la hidrología y disponibilidad de agua ante escenarios climáticos (Nunes *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2007; Chaplot *et al.*, 2007; Stehr *et al.*, 2008). Nunes *et al.* (2007) y Chaplot (2007), muestran que los cambios en la precipitación generan mayor efecto sobre la escorrentía superficial, por sobre los cambios de concentraciones de CO₂ y temperatura. Pruski and Nearing (2002) muestran que la escorrentía disminuye 1.97%, a medida que la precipitación disminuye 1%. Estos resultados son similares a los encontrados por Nunes *et al.* (2007), los cuales muestran que la escorrentía disminuye entre 1.9 y 2.1% por cada 1% que disminuyen las precipitaciones.

A continuación se presenta el área de estudio, el modelo hidrológico y la metodología utilizada y se analiza la influencia del cambio climático sobre el régimen de caudales del río Itata.

1. AREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Itata se ubica entre los paralelos 36°12' -37°16' de Latitud Sur, y los meridianos 71°00' - 73°10' de Longitud Oeste y tiene un área de 11.294 km². La cuenca se encuentra bajo la influencia de un bioclima mediterráneo. Las precipitaciones anuales varían entre los 800 y 3000 mm al interior de la cuenca, siendo menores en la costa y mayores en las cercanías de la Cordillera de los Andes. Las temperaturas máximas medias mensuales registradas bordean los 30°C en enero y las mínimas medias mensuales los 0°C en los meses de junio y julio. Esta cuenca presenta un régimen pluvial, con muy poca influencia nival ejercida por el río Ñuble que contribuye con derretimientos, ya que tiene un régimen mixto. Los caudales medios mensuales del río Itata llegan a ser de 827 m³/s en la estación ubicada en Coelemu para el mes de junio. En los suelos domina la serie Santa Barbara en la precordillera y las series San Esteban y Cauquenes en la zona costera. La elevación máxima de la cuenca es de 3200 m.s.n.m.

2. MODELO HIDROLOGICO UTILIZADO

Se utilizó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), desarrollado por USDA Agricultural Research Service (Neitsch *et al.*, 2002), que permite realizar una predicción del comportamiento de cuencas hidrográficas complejas para largos periodos tiempo (Galván *et al.*, 2007).

El modelo discretiza cada subcuenca en unidades de respuesta hidrológica, HRUs, que corresponden a zonas en las cuales el tipo de suelo, uso, pendiente y manejo son homogéneos (Gassman *et al.*, 2007). El balance hidrológico es calculado para cada HRU, incluyendo la intercepción de la precipitación, deshielo, evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial y subterránea. El intercambio de masa entre HRU y entre subcuencas sigue la estructura del río en forma de cascada según (e.g. Nunes *et al.*, 2007) :

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

donde SW_t corresponde al contenido final de agua en el suelo ($\text{mm } H_2O$), SW_o es el contenido de agua inicial en el suelo en el día i ($\text{mm } H_2O$), t corresponde al tiempo en días, R_{day} es la precipitación diaria en el día i ($\text{mm } H_2O$), Q_{surf} corresponde a la escorrentía diaria en el día i ($\text{mm } H_2O$), E_a es la evapotranspiración diaria en el día i ($\text{mm } H_2O$), w_{seep} corresponde a la percolación diaria en el día i ($\text{mm } H_2O$) y Q_{gw} corresponde al flujo base o de retorno en el día i ($\text{mm } H_2O$).

Los procesos de intercepción, escorrentía e infiltración se calcularon utilizando el método de la curva número (SCS, 1972):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

donde Q_{surf} corresponde a la escorrentía acumulada ($\text{mm } H_2O$), R_{day} es la precipitación durante el día ($\text{mm } H_2O$), I_a corresponde a las abstracciones iniciales ($\text{mm } H_2O$), lo cual incluye almacenamiento en la superficie, intercepción e infiltración y S corresponde al parámetro de retención ($\text{mm } H_2O$). El parámetro de retención varía espacialmente debido a cambios en tipo de suelo, uso de suelo y pendiente, y temporalmente debido a cambios en contenido de agua en el suelo. El parámetro de retención está dado por:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

donde CN corresponde al número de curva para el día. Las pérdidas iniciales se aproximan generalmente a $0.2 * S$, por lo tanto la ecuación para determinar la escorrentía está dada por:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2 * S)^2}{(R_{day} + 0.8 * S)} \quad (4)$$

El número de curva utilizado para estimar la escorrentía se encuentra en función de la permeabilidad del suelo, su respectivo uso y antecedentes acerca del contenido de agua. En la cuenca del río Itata, el grupo hidrológico se infirió a partir de la textura indicada en la descripción oficial de las series de suelo del Estudio Agrológico de la VIII Región (CIREN, 1999) y siguiendo las recomendaciones dadas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1986).

La evapotranspiración se calculó mediante el método de Hargreaves (Hargreaves et al., 1985):

$$\lambda E_o = 0.0023 * H_o * (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} * (T_{av} + 17.8) \quad (5)$$

donde λ es el calor latente de vaporización ($MJ kg^{-1}$), E_o corresponde a la evapotranspiración potencial ($mm d^{-1}$), H_o corresponde a la radiación ($MJ m^{-2}d^{-1}$), T_{mx} corresponde a la temperatura máxima diaria para cierto día ($^{\circ}C$), T_{mn} la temperatura mínima para cierto día ($^{\circ}C$), y T_{av} es la temperatura promedio diaria ($^{\circ}C$).

3. ANTECEDENTES Y METODOLOGIA

Los datos meteorológicos requeridos para la modelación hidrológica son series diarias de precipitación y temperaturas extremas. Se utilizó un total de 17 series de precipitación y 3 series de temperaturas extremas obtenidas del Banco Nacional de Aguas de la Dirección General de Aguas (BNA-DGA). La distribución espacial de los registros meteorológicos utilizados se muestra en la figura 1.

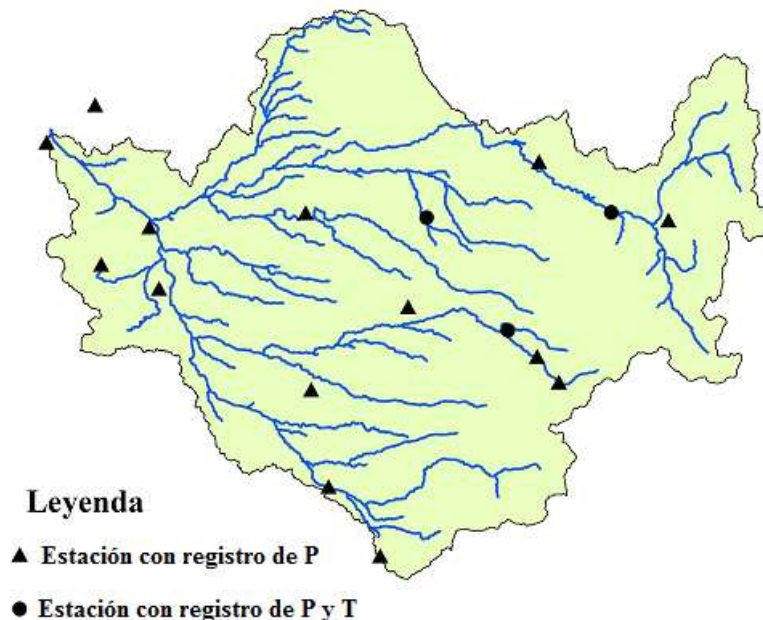


Figura 1: Registros meteorológicos utilizados en la modelación

Se utilizó registros de caudal medio diario medidos en las estaciones DGA Río Itata en Coelemu y Río Itata en Balsa Nueva Aldea a fin de realizar la calibración y validación del modelo. La ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas y el modelo de elevación digital se muestran en la figura 2.

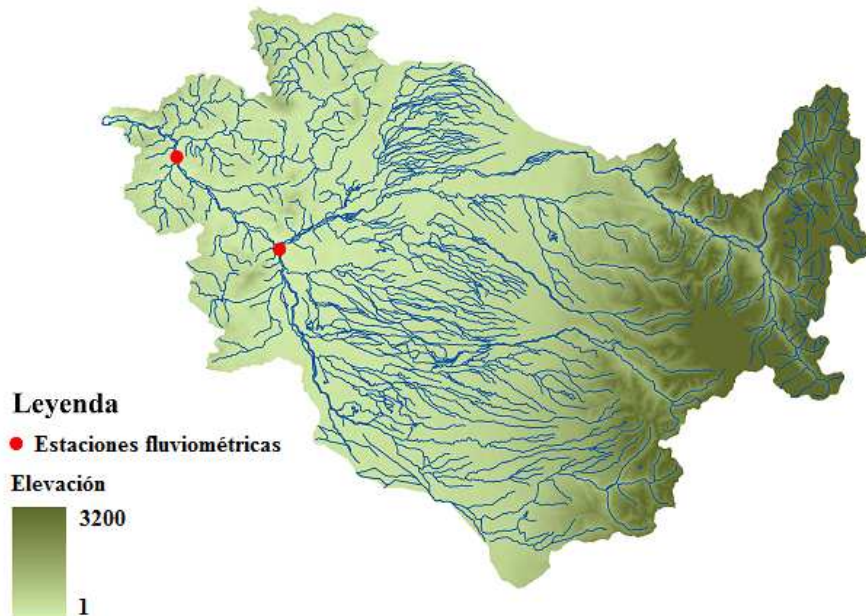


Figura 2: Modelo de elevación digital y estaciones fluviométricas utilizadas

El modelo de elevación digital se obtuvo a partir de imágenes satelitales del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Se generó un modelo de 30 x 30 m de la cuenca, proyectado a UTM, con huso 19 y datum de referencia WGS1984.

La información de los usos de suelo de la cuenca del río Itata, se obtuvo de una clasificación realizada por el INE (1999) donde se utilizaron fotografías aéreas 1:70.000 y 1:115.000 de 1996-1998 (INE, 1999). Se obtuvo la superficie destinada a cada uso y su respectiva distribución espacial.

La información de las series de suelo en la cuenca del Itata se obtuvo del “Estudio Agrológico de la VIII Región” (Ciren, 1999) donde se utilizaron ortofotos con escala 1:20.000. A partir del estudio agrológico se obtuvo la distribución espacial de las series, además de los porcentajes de arcilla, arena, limo y contenido de carbono para cada uno de los estratos. La textura, conductividad hidráulica saturada, contenido de agua y densidad se obtuvo a partir de información granulométrica y contenido de materia orgánica desprendido con el software Soil Water Characteristics (USDA, 2007). En función de la textura dominante para cada una de las series, se determinó el grupo hidrológico basándose en la teoría presentada en USDA (1986). La figura 4 muestra las series de suelo utilizadas en la modelación hidrológica.

A fin de cambiar las precipitaciones y temperaturas de entrada en el modelo de la cuenca según escenarios climáticos posibles, se utilizó la información disponible en el “Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI” (CONAMA-DGF, 2006) que entrega los escenarios climáticos B2 y A2 simulados para el periodo 2071-2100.

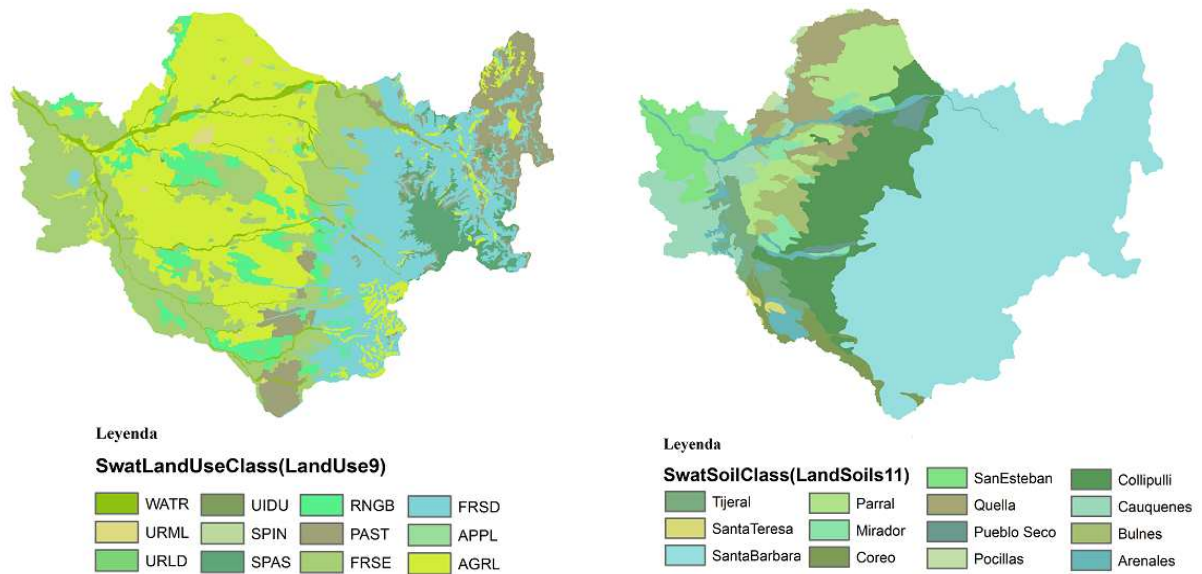


Figura 3 y 4: Usos y series de suelo utilizados en la modelación hidrológica

4. RESULTADOS

La cuenca se subdividió en 37 subcuencas con un total de 473 HRU. Se modeló el caudal medio mensual para el periodo 1996-2007. Se efectuó un análisis de sensibilidad utilizando la técnica de Muestreo por Hiper cubo Latino - uno a la vez, incorporado en la última versión SWAT2005 (van Griensven *et al.*, 2006), que permitió identificar para luego calibrar los 3 parámetros de mayor incidencia en la respuesta hidrológica. Se utilizó los primeros 6 años para la calibración y los 6 siguientes para la validación. Para estimar la eficiencia de las modelaciones, se compararon los caudales medios mensuales modelados con los observados utilizando dos indicadores estadísticos (R^2 y EF). Los caudales medios mensuales calculados y observados en las estaciones Itata en Nueva Aldea e Itata en Coelemu para el periodo 1996-2007 se muestran en las figuras 5 y 6 respectivamente.

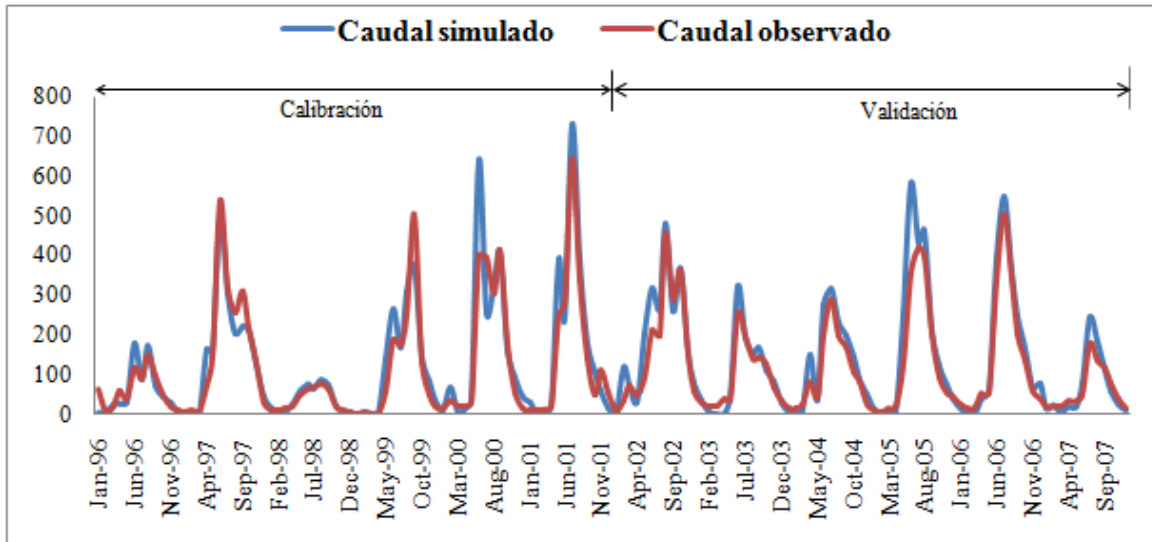


Figura 5: Caudal medio mensual calculado y observado para la calibración (1996-2001) y validación (2002-2007) en Río Itata en balsa Nueva Aldea

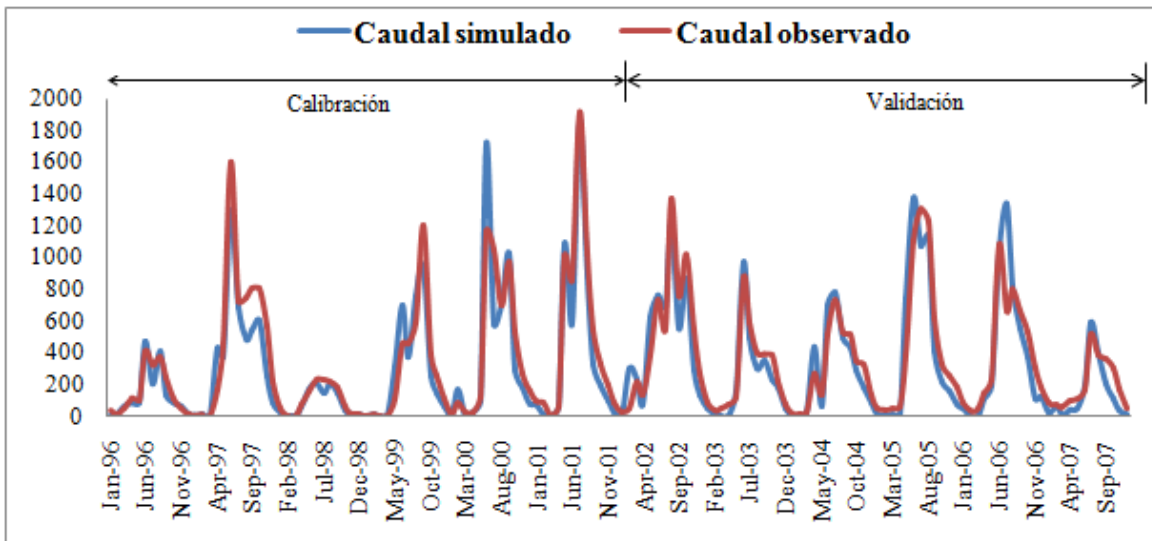


Figura 6: Caudal medio mensual calculado y observado para la calibración (1996-2001) y validación (2002-2007) en Río Itata en Coelemu

Se observa una buena concordancia entre los valores medidos y calculados. El modelo replica los peaks de baja y mediana magnitud y sobreestima los peaks de mayor magnitud. La tabla 1 muestra los indicadores estadísticos utilizados para el periodo de calibración (1996-2001) y validación (2002-2007).

Tabla 1: Indicadores estadísticos para el periodo de calibración y validación en las estaciones Río Itata en Coelemu y Río Itata en balsa Nueva Aldea

Indicador	Calibración		Validación	
	Coelemu	Nueva Aldea	Coelemu	Nueva Aldea
EF	0.85	0.87	0.82	0.85
R ²	0.87	0.89	0.85	0.93

Para analizar el efecto de un eventual cambio climático sobre el régimen de caudales, se modeló la respuesta hidrológica sin variar los parámetros del modelo, pero cambiando la entrada de acuerdo a los escenarios B2 y A2. El escenario B2 presenta una disminución media de las precipitaciones al interior de la cuenca de un 23% y un aumento medio de las temperaturas extremas de 2.3°C. El escenario A2 presenta una disminución media de las precipitaciones de un 38% y un aumento medio en las temperaturas de 3.3°C.

Las figuras 7 y 8 muestran la comparación de los caudales medios mensuales para los escenarios climáticos modelados y el escenario BASE en las estaciones ubicadas en Nueva Aldea y Coelemu respectivamente.

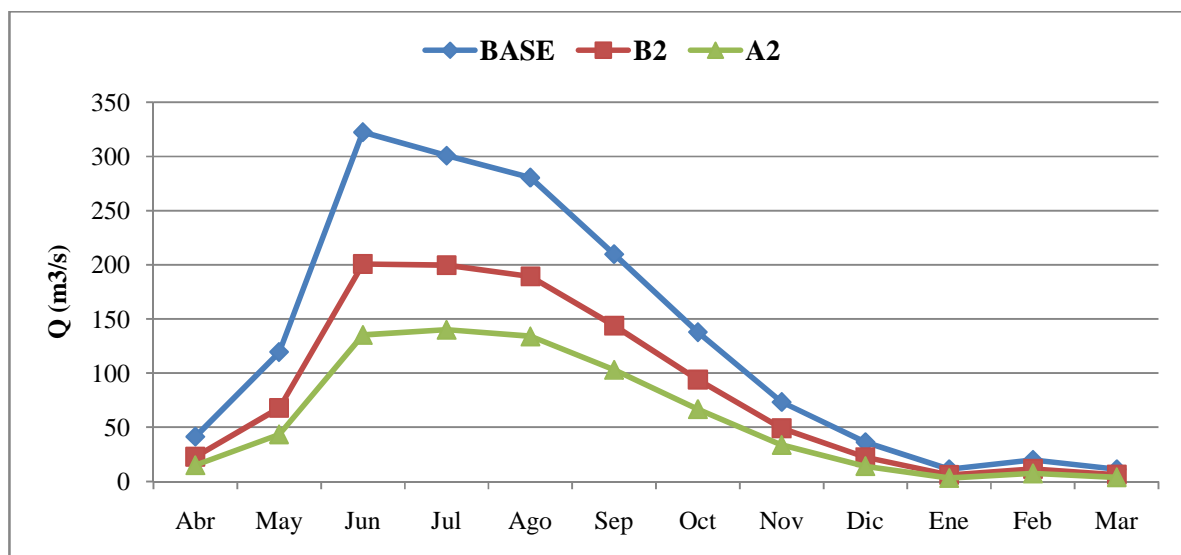


Figura 7: Comparación de los caudales medios mensuales en la estación Itata en Nueva Aldea para los escenarios climáticos modelados y el escenario BASE

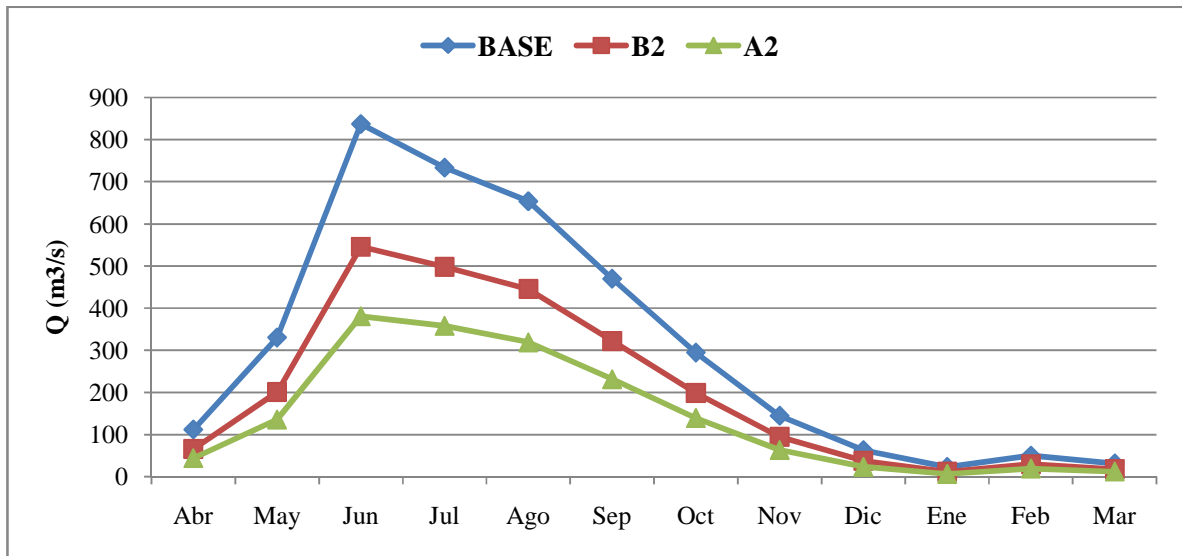


Figura 7: Comparación de los caudales medios mensuales en la estación Itata en Coelemu para los escenarios climáticos modelados y el escenario BASE

Las mayores variaciones porcentuales ocurren en los meses de verano y otoño. En el escenario B2, los caudales disminuyen en promedio un 38% en la estación Itata en Nueva Aldea y un 37% en la estación ubicada en Coelemu con respecto al escenario BASE. En el escenario A2, las disminuciones son de un 59 y 57% respectivamente. La disminución media de la escorrentía corresponde a 1.6% por cada 1% que disminuye la precipitación en ambos escenarios.

Las figuras 8 y 9 muestran la variación en las curvas de duración de caudales medios anuales en las estaciones Itata en Nueva Aldea e Itata en Coelemu respectivamente.

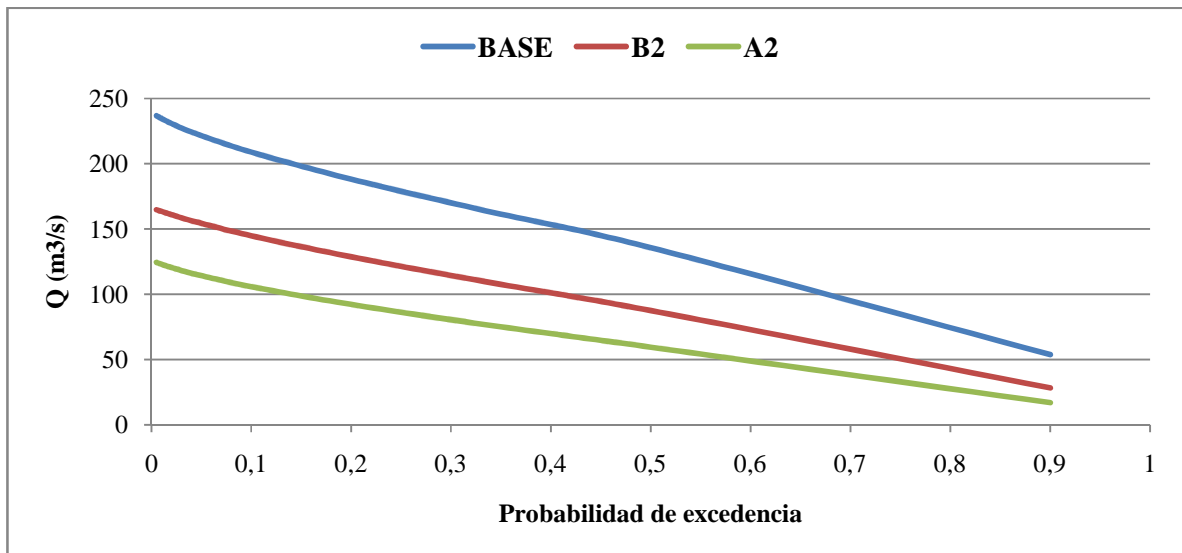


Figura 8: Comparación de las curvas de duración de caudales medios anuales para estación Itata en Nueva Aldea

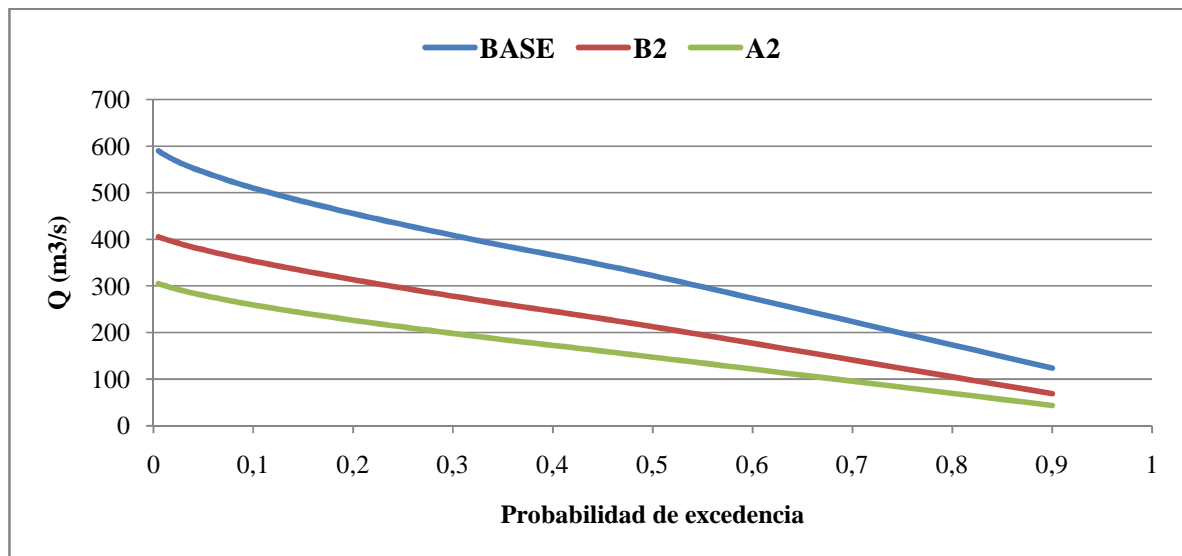


Figura 9: Comparación de las curvas de duración de caudales medios anuales para estación Itata en Coelemu

Se aprecia en las curvas de duración la disminución de los caudales medios anuales ante la modelación de los escenarios climáticos. Disminuye notablemente la probabilidad de crecidas y la disponibilidad del recurso agua.

5. CONCLUSIONES

Se generó un modelo P-E de la cuenca del río Itata utilizando el modelo hidrológico SWAT para analizar la influencia del cambio climático sobre el régimen de caudales.

Se realizó un análisis de sensibilidad de parámetros y una calibración del modelo para el periodo 1996-2001, obteniendo eficiencias de Nash-Sutcliffe para las estaciones Itata en Coelemu e Itata en Nueva Aldea de 0.85 y 0.87 respectivamente. Para el periodo de validación (2002-2007) las eficiencias fueron de 0.82 y 0.85 en Nueva Aldea y Coelemu.

Se modelaron los escenarios A2 y B2 obteniendo la mayor disminución de los caudales en los meses de verano y otoño. Los caudales medios mensuales modelados utilizando el escenario B2 disminuyen en promedio un 38% en la estación Itata en Nueva Aldea y un 37% en la estación ubicada en Coelemu con respecto al escenario BASE. Al modelar el escenario A2, las disminuciones son de un 59 y 57% respectivamente. La disminución media de la escorrentía corresponde a 1.6% por cada 1% que disminuye la precipitación en ambos escenarios. Estos resultados son similares a los encontrados por Pruski and Nearing (2002) y por Nunes *et al.* (2007). Cabe destacar que el cambio porcentual de caudales resultante de un cambio porcentual unitario en precipitaciones es específico para la cuenca modelada, valor que puede disminuir o aumentar en cuencas que presenten condiciones climáticas, topográficas, geológicas y de uso de suelo distintas. Además se debe mencionar, que los escenarios climáticos utilizados en la modelación son sólo una aproximación de las condiciones climáticas futuras, ya que no hay forma de obtener resultados exactos, lo cual se observa al comparar resultados obtenidos por distintos modelos climáticos globales.

El aumento notable en el consumo de agua en los últimos años, debido al aumento explosivo de la población mundial, mejora en los estándares de vida y el desarrollo económico ha generado una preocupación en el último tiempo sobre la disponibilidad de agua. El modelo desarrollado y los resultados obtenidos pueden ayudar a desarrollar estrategias alternativas y políticas para mitigar el impacto del cambio climático y así poder asegurar la disponibilidad de agua.

6. AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados son parte de los proyecto DIUC 208.310.050-1.0 “Distribución Espacio-Temporal de la Temperatura en el Río Itata e Influencia del Cambio Climático” y FONDECYT N° 1090428 “Efectos del cambio en el uso de suelo y cambio climático sobre los recursos hídricos. Hacia una gestión integrada de cuencas.”

7. REFERENCIAS

Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. y Srinivasan, R. 2006. Modelling Hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*. 333. 413-430.

Chaplot, V. 2007. Water and soil resources response to rising levels of atmospheric CO₂ concentration and to changes in precipitation and air temperatura. *Journal of Hydrology*. 337. 159-171.

Ciren. 1999. Descripción de Suelos y Materiales y Símbolos – Estudios Agrológicos de la VIII Región. Centro de información de Recursos Naturales. Chile.

CONAMA-DGF. 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Facultad de Ciencias. Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, Chile.

Fohrer, N., Möller, D. y Steiner, N. 2002. An interdisciplinary modelling approach to evaluate the effects of land use change. *Physics and Chemistry of the Earth*. 27. 655-662.

Galván, L., Olías, M., Fernández de Villarán, R., Domingo, J.M. y Nieto, J.M. 2007. Modelación hidrológica de la cuenca del río Meca (Huelva, España). Quinto congreso Ibérico Gestión y Planificación de Agua. Faro. Portugal. Diciembre.

Gassman, P.W., Reyes, M.R., Gree, C.H. y Arnold, J.G. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Hydrological Development Applications, and Future Research Directions. *American Society of Agricultural and Hydrological Engineers*. 50(4). 1211-1250.

Grizzetti, B., Bouraoui, F., Granlund, K., Rekolainen, S. y Bidoglio, G. 2003. Modelling diffuse emission and retention of nutrients in the Vantaanjoki watershed (Finland) using the SWAT model. *Ecological Modelling*. 169. 25-38.

Hargreaves, G.H. y Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*. 1. 96-99.

INE. 1999. Clasificación uso de suelos en la octava región. Informe Regional, Octava Región. Instituto nacional de estadística. Santiago. Chile

IPCC. 2001. Third Assessment Report-Climate Change 2001: The scientific basis. Approved by IPCC Working Group 2. Génova.

Neitsch, S. L., Arnold, J. C., Kiniry, J. R., Williams, J. R. y King, K. W. 2002. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000. Texas Water Resources Institute. College Station. Texas. USA.

Nunes, J.P., Seixas, J. y Pacheco, N.R. 2007. Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to Climate change in Mediterranean Watersheds. Hydrological Processes. 22. 3115-3134.

Pruski, F.F y Nearing, M.A. 2002. Runoff and soil loss responses to changes in precipitation: a computer simulation study. Journal of Soil and Water Conservation. 57(1). 7-16.

Santhi, C., Srinivasan, R., Arnold, J.G. y Williams, J.R. 2006. A modelling approach to evaluate the impacts of water quality management plants implemented in a watershed in Texas. Environmental Modelling y Software. 21. 1141-1157.

SCS. 1972. SCS National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. Washington D.C.

Stehr, A., Debels, P. y Arumi, J.L. 2008. Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático; experiencia de una cuenca andina del centro-sur chileno. XXIII Congreso latinoamericano de hidráulica. Cartagena de Indias. Colombia. Septiembre.

USDA. 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds, TR 55. United States Department of Agriculture. Texas.

USDA. 2005. SWAT. Versión 2005. USDA Agricultural Research Service. Texas.

USDA. 2007. Soil Water Characteristics. Versión 6.02.74. United States Department of Agriculture. Texas.

Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T. y Srinivasan, R. 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. Journal of Hydrology. 324. 10-23.

Wang, S., Kang, S., Zhang, L. y Li, F. 2008. Modelling hydrological response to different landuse and Climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China. Hydrological Processes. 22. 2502-2510.

Zhang, X., Liu, X., Luo, Y. y Zhang, M. 2008. Evaluation of water quality in an agricultural watershed as affected by almond pest management practices. Water research. 42. 3685-3696.