Nota técnica

Uso de imágenes de satélite para evaluar los efectos de cambio de cobertura de suelo en la escorrentía directa de una cuenca andina

• César Cano* • Andrea Andreoli • José Luis Arumi • Diego Rivera •
Universidad de Concepción, Chile
*Autor de correspondencia

Resumen

Cano, C., Andreoli, A., Arumi, J. L., & Rivera, D. (julio-agosto, 2014). Uso de imágenes de satélite para evaluar los efectos de cambio de cobertura de suelo en la escorrentía directa de una cuenca andina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *5*(4), 145-151.

El método de la curva número del Natural Resources Conservation Service de los Estados Unidos fue utilizado para estudiar el efecto del cambio de cobertura de suelo sobre la escorrentía directa en la cuenca del río Lirquén, Chile. Para calcular la curva número (*CN*) se utilizaron dos métodos: (1) la clasificación de tres imágenes LandSat de 1987, 2003 y 2009, en combinación con información de texturas de suelos y corrección por efectos de la pendiente, y (2) el uso del coeficiente de escorrentía proveniente de datos de caudal y precipitaciones diarias para los periodos 1985-1988, 2001-2004 y 2007-2010. Los resultados del primer método muestran que los valores de *CN* para los años 1987, 2003 y 2009 son de 51, 46 y 49, respectivamente, ya que existe una variación de superficie de praderas en estos años que va de 27.9 a 15 y 17.7%, respectivamente, y una variación de superficie de plantaciones adultas en los mismos años que va de 7.2 a 22.9 y 15.4%, respectivamente. Los resultados del segundo método muestran que los valores de curva número son mayores en el periodo 1985-1989 y menores en el periodo 2001-2004, ya que el volumen de escorrentía generada es menor en este periodo con respecto a los otros dos. Lo anterior se debe a una mayor superficie de plantaciones adulta que proporciona más capacidad de intercepción, una mayor tasa de evapotranspiración y un mayor almacenamiento de humedad en el suelo.

Palabras clave: curva número, coeficiente de escorrentía, imágenes LandSat, cambio de cobertura del suelo.

Abstract

Cano, C., Andreoli, A., Arumi, J. L., & Rivera, D. (July-August, 2014). Use of Satellite Images to Assess the Effects of Land Cover Change on Direct Runoff in the Andean Basin. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 5(4), 145-151.*

The curve number method by the Natural Resources Conservation Service of the United States was used to study the effect of land cover changes on runoff in the Lirquén River Basin, Chile. The curve number was calculated using two methods: (1) classification of three LandSat images from 1987, 2003 and 2009, in combination with soil texture information and correction for the effect of the slope, and (2) the use of the runoff coefficient from daily rainfall and flow data for the periods 1985-1988, 2001-2004 and 2007-2010. The first method resulted in CN values for 1987, 2003 and 2009 of 51, 46 and 49 respectively, since mature grassland areas changed over the same years from 27.9 to 15 and 17.7%, respectively. Furthermore, the adult plantation area changed over those years from 7.2 to 22.9 and 15.4%, respectively. The results from the second method show higher curve number values during the period 1985-1989 and lower numbers during the period 2001-2004, since the runoff volume generated over this period was smaller than the other two. This is due to an increase in the adult plantation area which provides greater intercept capacity, higher evapotranspiration rates and greater storage of soil moisture.

Keywords*: Curve number, LandSat images, land cover change, runoff coefficient.*

Introducción

En los últimos años ha crecido el interés en cuantificar los efectos del cambio de uso y de cobertura del suelo en los procesos hidrológicos (Wang & Kalin, 2010). Sullivan, Ternan y Williams (2004) establecen que los tipos de manejo del sector agrícola, como el

pastoreo, práctica intensiva de cultivo y una reducción de las masas forestales, han llevado a la compactación de los suelos, lo que a su vez genera una reducción en la infiltración, disminución en la recarga de aguas subterráneas y aumento en la escorrentía. En Chile se ha comparado el comportamiento hidrológico de plantaciones de *Pinus radiata* y vegetación nativa, encontrándose diferencias en el balance hídrico. En efecto, las plantaciones forestales presentan una disminución de la escorrentía en verano, cuya causa es principalmente la mayor capacidad de intercepción, lo que a su vez influye en la recarga de agua en el suelo (Huber, Iroumé, & Bathurst, 2008; Little, Lara, Mcphee, & Urrutia, 2009).

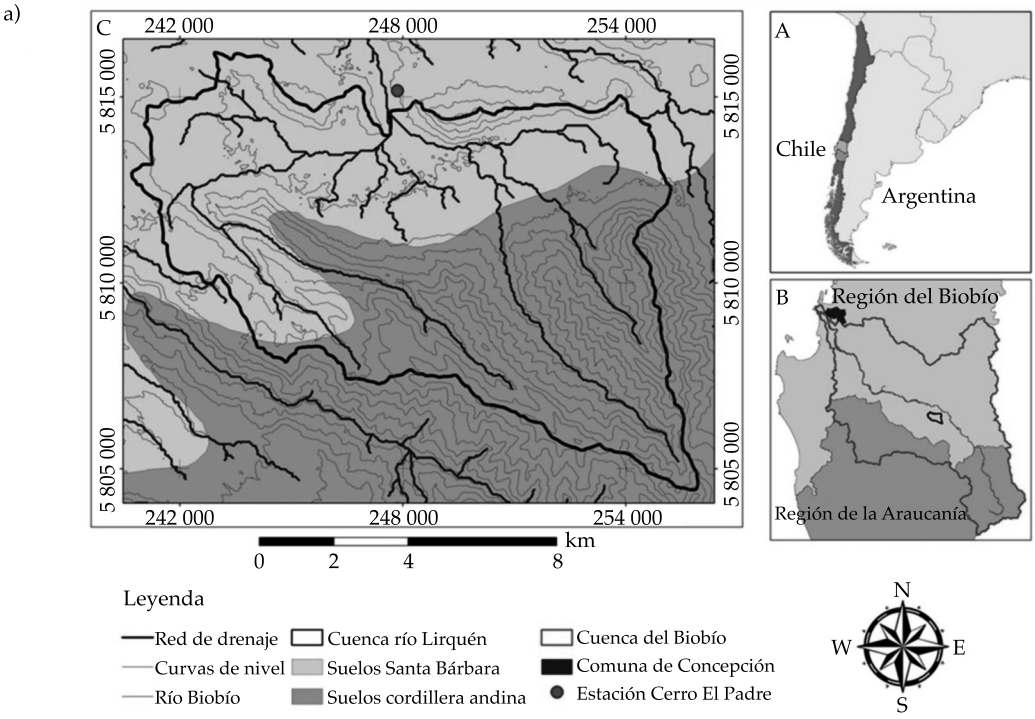
Unos de los métodos más usados para los estudios de balance hídrico y de escorrentía es la curva número (*CN*) desarrollado por el Natural Resources Conservation Service (Yu, 1998). Este método ha sido ampliamente utilizado en distintos modelos como *SWAT*, *L-THIA* y *HEC-HMS* (Ali, Khan, Aslam, & Khan, 2011; Githui, Mutua, & Bauwens, 2009; Harbor, 1994). Lo anterior se debe a que este método es fácil de aplicar en condiciones de escasez de datos, como también una forma sencilla de determinar la escorrentía (Babu & Mishra, 2012). Otra ventaja es que la determinación del número de curva depende del uso y tipo de suelo y de la topografía, resultando ser un método compatible con técnicas de teledetección y sistemas de información geográficos (Shi *et al*., 2007).

Este estudio tiene como objetivo validar el uso de imágenes de satélite para evaluar los efectos de cambio de cobertura de suelo en la escorrentía directa en la cuenca del río Lirquén, Chile. Para lograr lo anterior se deben (a) obtener valores de curva número a través de la clasificación de imágenes de satélite en distintos periodos; (b) obtener valores de curva número por medio de registros hidrometeorológicos en los mismos periodos, y (c) comparar los valores de curva número obtenidos con los métodos antecedentes.

Materiales y métodos

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Lirquén (figura 1a), cuya superficie es de 102 km^2, siendo una subcuenca de la cuenca del río Biobío (36° 42′ - 38° 49′ latitud sur). La cuenca del río Lirquén posee una cota máxima de 1 420 msnm y una cota mínima de 330 msnm, con un largo de cauce de 16.9 km y una pendiente promedio de 16°. La precipitación anual es de 2 000 mm y la temperatura promedio anual fluctúa entre los 7 y 10°C (DGA, 2004). El área de estudio está caracterizada por dos series de suelos: serie Santa Bárbara y suelos de la cordillera andina. Los suelos de la cordillera andina presentan características similares a la serie Santa Bárbara, salvo que se encuentran en sectores con fuertes pendientes (Carrasco, Millán, & Peña, 1993; CIREN, 1999). Para la serie de suelo Santa Bárbara se definió un grupo hidrológico según la textura, tasa de infiltración y valores de conductividad hidráulica saturada para suelos con profundidades que superan los 100 cm (NRCS, 2007). Estos valores se asignaron también a la serie de la cordillera andina. La serie de suelo Santa Bárbara corresponde al grupo hidrológico B, ya que son suelos profundos, bien drenados, de texturas francas o franco limosas, con valores de conductividad hidráulica de 15 mm/h y de 28 mm/h, según la base de datos Soil Water Characteristic (Saxton & Rawls, 2006).

Se utilizaron imágenes LandSat TM de los años 1987, 2003 y 2009. En primer término, la imagen del año 1987 fue corregida geométricamente usando como bases cartográficas las imágenes de los años 2003 y 2009 (Chuvieco, 2002); este proceso consistió en eliminar las distorsiones geométricas que son producidas por una serie de factores que varían para cada evento de adquisición de imágenes, para garantizar la correcta referencia geográfica de cada píxel en un mapa; luego, a todas las imágenes se les realizó una corrección topográfica, que consiste en eliminar los efectos de la sombra, producto de la topografía, empleando el método de corrección



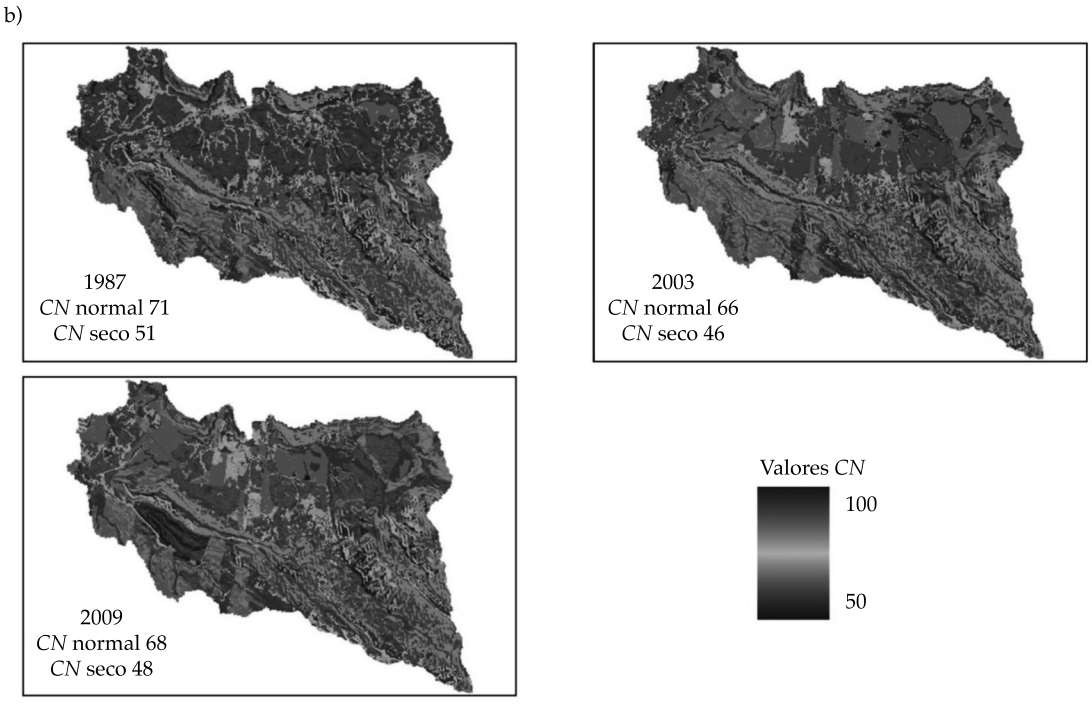


Figura 1. a) Cuenca del río Lirquén y sus series de suelos; b) valores de curva número de los años 1987, 2003 y 2009, según cobertura, grupos hidrológicos de la series de suelos y corrección por efecto de la pendiente.

semiempírica conocida como corrección-c (Chuvieco, 2002), para después realizar una corrección atmosférica, que consiste en eliminar la dispersión de la radiación electromagnética originada por los gases y partículas en suspensión de la atmósfera, empleando

el método de Chávez (2006); después se calcularon índices de vegetación como razón simple (Simple ratio, SR), índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), índice de vegetación ajustada al suelo (Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI), e índice de diferencia normalizada de infrarrojos (Normalized Difference Infrared Index, NDII) (Chuvieco, 2002); por último, las imágenes fueron clasificadas mediante el método de máxima verisimilitud (Chuvieco, 2002) apoyados con datos en terreno, fotografías aéreas y en los tipos de uso de suelo en el Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales de Chile (CONAF-CONAMA-BIRF, 1999). La clasificación se validó aplicando el método de kappa, que mide la diferencia entre la realidad observada y lo que se espera al azar; un valor 0 implica que no hay concordancia y un valor de 0.8 a 1 significa una concordancia de casi perfecta a perfecta (Chuvieco, 2002).

Obtención del valor de la curva número y coeficiente de escorrentía

Los valores de curva número (*CN*) se definieron en función de la cobertura de uso de suelo y del tipo hidrológico al que pertenecen las series de suelo (NRCS, 2004). Luego, a estos valores se le aplicó una corrección por pendiente (α) (ecuación (1)), donde CN_c es el valor de curva número corregido. El efecto de la pendiente sobre la escorrentía puede resumirse en que: (1) la abstracción inicial disminuye, (2) la tasa de infiltración decrece, (3) el tiempo de recesión del flujo superficial se reduce y (4) la velocidad de escorrentía aumenta:

$$CN_C \frac{CN}{\mathrm{Cos}(\alpha)} \qquad (1)$$

Después se tomaron 50 eventos de precipitaciones diarias de la estación meteorológica Cerro El Padre (figura 1a) en tres periodos: 1985-1988 (periodo A); 2001-2004 (periodo B), y 2007-2010 (periodo C); estos eventos fueron seleccionados desde septiembre hasta mayo, excluyendo eventos con presencia de nieve y así evitar escorrentía por derretimiento. Todos estos eventos de precipitación fueron en condiciones de baja humedad, separadas según la cantidad de agua caída: la clase 1 corresponde a precipitaciones que superan los 100 mm; la clase 2, a precipitaciones mayores que 60 mm y menores que 100 mm; y la clase 3, a precipitaciones mayores que 40 mm y menores que 60 mm. Para los eventos ocurridos en los meses de septiembre a diciembre se definió el periodo de crecimiento, y en los meses de enero a mayo se asignó el periodo de dormancia (NEH-4, 1972), debido a que las condiciones ambientales entre las estaciones influyen en la fisiología de las plantas. Para estimar el volumen de escorrentía de estos eventos, se sustrajo el caudal base de los hidrogramas, en donde este último se obtuvo usando el método de Eckhardt (2005), un tipo de filtro de paso bajo que usa la teoría de la separación de procesamientos de señales, cuyo razonamiento es que el caudal base es el componente de baja frecuencia de los caudales. Este método usa como parámetros la constante de recesión y el índice flujo base máximo, donde este último se obtuvo usando el método de Collischonn y Fan (2012). Luego, usando el método racional, se estimaron los valores de curva número de cada evento, usando los coeficientes de escorrentía (Hevia, Martínez, & Mongil, 2009).

Resultados

Los resultados de la clasificación de las imágenes se muestran en el cuadro 1, en que se puede apreciar, por cada tipo de coberturas, los valores de curva número en condiciones de humedad baja y normal en el suelo y la superficie de éstas en los años 1987, 2003 y 2009. Se observa principalmente una disminución de la superficie de praderas de un 28% en el año 1987 a un 15 y 17.7% en 2003 y 2009, respectivamente, y un incremento de

la superficie de plantaciones adultas de 7.2% en 1987 a 23% en 2003 y un 15.4% en 2009. Es necesario notar que los otros usos de suelo se mantuvieron constantes, por lo que es posible indicar que la principal transformación en la cuenca corresponde a conversión de praderas en plantaciones forestales. Los valores del coeficiente de kappa fueron de 0.83, 0.80 y 0.79, respectivamente.

En el cuadro 2 se observan valores promedio de escorrentía, precipitación, coeficiente de escorrentía y de curva número obtenidos por registro hidrometeorológico, según la clase de precipitación y periodos, en donde al comparar el periodo B con el A en las distintas clases, se observa que los valores de precipitación promedio son mayores en el B con respecto al A, pero los valores promedios de escorrentía, coeficiente de escorrentía y de curva número son menores en el periodo B con respecto al A. Lo anterior se debe a que en el periodo B hay una mayor superficie de plantaciones adultas, generando una mayor capacidad de intercepción, evapotranspiración y almacenaje de humedad en el suelo (Huber *et al*., 2008; Sriwongsitanon & Taesombat, 2011). Por otra parte, las mayores diferencias entre periodos para los coeficientes de escorrentía se observan en lluvias mayores a 100 mm. En la figura 1b se muestran los valores de curva número provenientes de: la clasificación de las imágenes 1987, 2003 y 2009; los grupos hidrológicos de la series de suelos, y la corrección por pendiente. Se puede observar que estos valores de curva número son muy semejantes a los valores de curva número obtenidos con el coeficiente de

Cuadro 1. Superficies (%) y valores de *CN* en condiciones de humedad baja y normal de las coberturas de suelo en la cuenca del río Lirquén.

Cobertura de suelo	*CN* condición normal	*CN* condición seca	Superficie (%)		
			Año 1987	Año 2003	Año 2009
Pradera	80	60	27.91	15.01	17.67
Matorral arborescente	65	45	14.34	10.37	10.22
Plantación adulta	60	40	7.18	22.88	15.36
Renoval nativo	55	35	41.85	45.04	45.42
Plantación joven	75	55	2.71	1.14	5.59
Matorral	70	50	2.05	1.59	1.77
Bosque nativo adulto	50	30	3.93	3.93	3.93
Agua	100	100	0.04	0.04	0.04

Cuadro 2. Valores promedio de escorrentía, precipitación, coeficiente de escorrentía y curva número, según clase de precipitaciones y periodos.

Clase	Periodo	Escorrentía promedio (mm)	Precipitación promedio (mm)	Coeficiente de escorrentía promedio	Curva número promedio
1	A	36.8	150.2	0.190	51
	B	29.9	170.4	0.140	46
	C	103.4	275.0	0.315	49
2	A	9.1	78.3	0.114	60
	B	6.8	79.6	0.083	55
	C	5.6	71.8	0.079	56
3	A	3.0	46.7	0.065	66
	B	2.8	50.5	0.054	63
	C	4.3	52.6	0.082	64

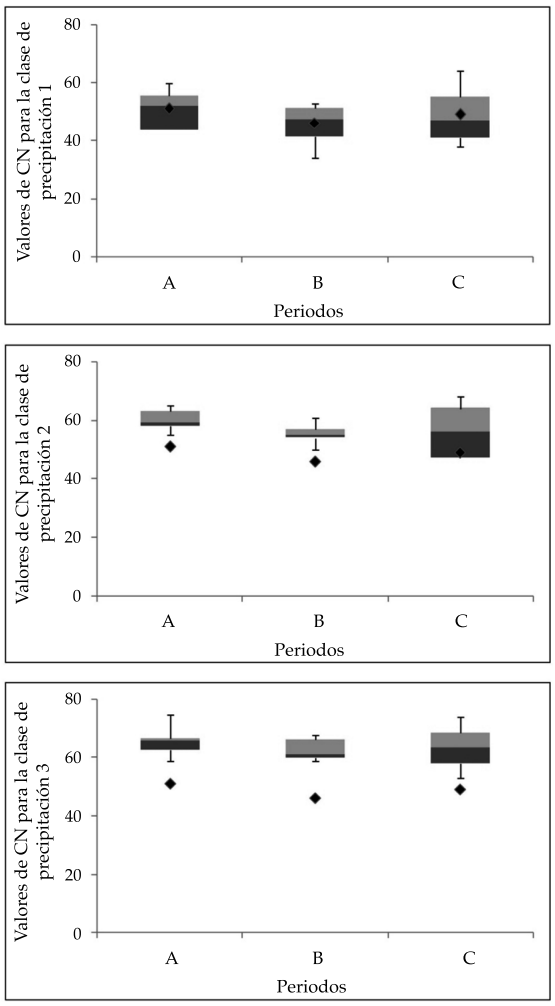


Figura 2. Comparación de valores de curva número obtenidos entre la clasificación de imágenes más textura del suelo y corrección por pendiente (punto) con el método del coeficiente de escorrentía para cada clase de precipitación (barras).

escorrentía para eventos de precipitaciones de la clase 1 (figura 2). Lo anterior puede deberse a que la resolución temporal de los datos utilizados de caudal y de precipitaciones provocan una sobrestimación del volumen de escorrentía generada para los eventos de precipitación de las clases 2 y 3.

Conclusiones

Los valores de curva número obtenidos por medio de las clasificaciones de imágenes de satélite corregidos por la pendiente muestran un patrón similar a los valores de curva número obtenidos por medio del coeficiente de escorrentía en los mismos periodos, demostrando que el uso de imágenes de satélite es una herramienta confiable para estudios hidrológicos.

En este estudio se demuestra con claridad el efecto del cambio de uso y de cobertura del suelo en la generación de escorrentía. En particular, se evidencia que un cambio de pradera a plantación adulta disminuye fuertemente la generación de escorrentía debido a una mayor capacidad de intercepción, una mayor tasa de evapotranspiración y una mayor capacidad de retención de humedad en el suelo de las plantaciones forestales.

Agradecimientos

Agradecemos al proyecto Fondecyt número 1090774 por el apoyo entregado para poder realizar este estudio.

Recibido: 02/04/13
Aceptado: 22/01/14

Referencias

Ali, M., Khan, S. J., Aslam, I., & Khan, Z. (September, 2011). Simulation of the Impacts of Land-Use Change on Surface Runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landscape and Urban Planning*, *102*, 271-279.

Babu, P. S., & Mishra S. K. (November, 2012). An Improved SCS-CN Inspired Model. *Journal of Hydrology Engineering*, *17*(11), 1164-1172.

Carrasco, P., Millán, J., & Peña, L. (1993). *Suelos de la cuenca del río Biobío, características y problemas de uso* (108 pp.). Concepción, Chile: Centro EULA-Chile. Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Biobío y del Área Marina Costera Adyacente, Editorial Universidad de Concepción.

Chávez, P. J. (September, 1996). Image Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *62*(9), 1025-1036.

Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio* (586 pp.). España: Editorial Ariel Ciencia.

CIREN (1999). *Estudio agrológico de la VIII Región* (550 pp.). Chile: Centro de información de Recursos Naturales, Ministerio de Agricultura.

CONAF-CONAMA-BIRF (1999). *Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Informe Nacional con Variables Ambientales* (87 pp.). Santiago, Chile: Universidad Austral de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Católica de Temuco.

Collischonn, W., & Fan, F. M. (April, 2012). Defining Parameters for Eckhardt's Digital Baseflow Filter. *Hydrological Processes*, doi: 10.1002/hyp.9391.

DGA (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca del río Biobío* (179 pp.). Chile: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.

Eckhardt, K. (February, 2005). How to Construct Recursive Digital Filters for Base Flow Separation. *Hydrological Processes*, *19*, 507-517.

Githui, F., Mutua, F., & Bauwens, W. (October, 2009). Estimating the Impacts of Land-Cover Change on Runoff Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Case Study of Nzoia Catchment, Kenya. *Hydrological Science Journal*, *54*, 899-908.

Harbor, J. (1994). A Practical Method for Estimating the Impact of Land-Use Change on Surface Runoff, Groundwater Recharge and Wetland Hydrology. *Journal of the American Planning Association*, *60*, 95-108.

Hevia, J., Martinez, A., & Mongil, J. (2009). *Hidrología de conservación de aguas. Captación de precipitaciones horizontales y escorrentía en zonas secas* (446 pp.). Valladolid: Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones.

Huber, A., Iroumé, A., & Bathurst, J. (January, 2008). Effect of *Pinusradiata* Plantations on Water Balance in Chile. *Hydrological Processes*, *22*, 142-148.

Hundecha, Y., & Bárdossy, A. (June, 2004). Modeling of the Effect of Land Use Changes on the Runoff Generation of a River Basin through Parameter Regionalization of a Watershed Model. *Journal of Hydrology*, *292*, 281-295.

Little, C., Lara, A., Mcphee, J., & Urrutia, R. (June, 2009). Revealing the Impact of Forest Exotic Plantations on Water Yield in Large Scale Watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology*, *374*, 162-170.

NEH-4 (1972). *NRCS National Engineering Handbook. Chapter 21. Hydrology, Natural Resources Conservation Service*. US Department of Agriculture.

NRCS (2004). *NRCS National Engineering Handbook, Chapter 10. Hydrologic Soil-Cover Complexes, Natural Resources Conservation Service*. Washington, DC: US Department of Agriculture.

NRCS (2007). *NRCS National Engineering Handbook, Chapter 7. Hydrologic Soil Groups, Natural Resources Conservation Service*. Washington, DC: US Department of Agriculture.

Shi, P., Yuan, Y., Zheng, J., Wang, J., Ge, Y., & Qiu, G. (January, 2007). The Effect of Land Use/Cover Change on Surface Runoff in Shenzhen Region, China. *Catena*, *69*, 31-35.

Sriwongsitanon, N., & Taesombat, W. (November, 2011). Effects of Land Cover on Runoff Coefficient. *Journal of Hydrology*, *41*, 226-238.

Sullivan, A., Ternan, J. L., & Williams, A. G. (April, 2004). Land Use Change and Hydrological Response in the Camel Catchment, Cornwall. *Applied Geography*, *24*, 119-137.

Wang, R., & Kalin, L. (November, 2010). Modelling Effects of Land Use/Cover Changes under Limited Data. *Ecohydrology*, *4*, 265-276.

Yu, B. (November, 1998). Theoretical Justification of SCS Method for Runoff Estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *124*, 306-310.

Dirección institucional de los autores

Dr. César Cano

Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería Agrícola
Departamento de Recursos Hídricos
Chillán, Chile
ccano@udec.cl

Dr. Andrea Andreoli

Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Forestales
Departamento de Bosques y Medioambiente
Laboratorio de Ecología de Paisaje
Concepción, Chile

Dr. José Luis Arumi
Dr. Diego Rivera

Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería Agrícola
Departamento de Recursos Hídricos
Chillán, Chile