

Escorrentías y caudales máximos luego de la cosecha a tala rasa y del establecimiento de una nueva plantación en una cuenca experimental del sur de Chile

Runoff and peakflows after clearcutting and the establishment of a new plantation in an experimental catchment, southern Chile

Andrés Iroumé^{a*}, Hardin Palacios^a, James Bathurst^b, Anton Huber^c

*Autor de correspondencia: ^aUniversidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Instituto de Manejo Forestal, Casilla 567, Valdivia, Chile, airoume@uach.cl

^bUniversity of Newcastle, Institute for Research on Environment and Sustainability, Devonshire Building 3.16, Newcastle upon Tyne, NE1 7RU, UK.

^cUniversidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias, Instituto de Geociencias, Valdivia, Chile.

SUMMARY

The hydrological effects of plantation clearcutting and reforestation were studied in a 34.4 ha experimental catchment localized in an area with rainy temperate climate in southern Chile. Monthly, annual and summer runoffs and peakflows were analyzed comparing the pre and post-harvesting conditions. During the first four years after clearcutting an important increase in annual runoff was observed, but after eight years of development of the new plantation a recovery towards pre-harvesting levels is being noticed. Summer runoffs also increased after plantation harvesting and the effect was still noticeable six years after the forest operation, but since the seventh summer period low flows became similar to those from the pre-harvesting condition. Peakflows also increased after clearcutting but the effect was higher in low magnitude rain storms. Although this increase is still noticeable eight years after the intervention, peakflows from the pre and post-harvesting conditions in the study catchment would only differ for events with return periods lower than 10 years.

Key words: hydrological effects, *P. radiata* clearcutting, *E. nitens* reforestation, Chile.

RESUMEN

Se estudiaron los efectos hidrológicos de la cosecha a tala rasa y posterior reforestación en una cuenca de 34,4 ha localizada en una zona con clima templado lluvioso del sur de Chile. Se analizaron los caudales mensuales, anuales, de verano y los caudales máximos comparando las condiciones de pre y postcosecha. Durante los primeros cuatro años de la cosecha se observó un importante aumento de los caudales anuales, pero luego de 8 años de desarrollo de la nueva plantación se está notando una declinación hacia los niveles de precosecha. Los caudales de verano aumentaron luego de la cosecha, situación que se mantuvo hasta seis años después de la intervención, pero a partir del séptimo verano la cuenca muestra caudales de estío similares a los de la condición de precosecha. Los caudales máximos también aumentaron luego de la cosecha, aun cuando el incremento se notó más en tormentas de menor magnitud. Aunque el aumento de caudales se ha mantenido luego de ocho años de la intervención, los caudales máximos de las condiciones de pre y postcosecha para la cuenca estudiada sólo serían diferentes para eventos con períodos de retorno inferiores a 10 años.

Palabras clave: efectos hidrológicos, cosecha de *P. radiata*, reforestación con *E. nitens*, Chile.

INTRODUCCIÓN

Las intervenciones en las cubiertas de bosques generan modificaciones importantes en los procesos biofísicos de las cuencas (Grant *et al.* 2008). Luego de la cosecha final, se observan cambios en los caudales anuales, máximos y mínimos, así como en las tasas de transporte de sedimentos y la calidad de las aguas (Harr *et al.* 1979, Fahey 1994, Jones y Grant 1996, Swank *et al.* 2001, Vertessy *et al.* 2002, Andréassian 2004, Brown *et al.* 2005, Iroumé *et al.* 2006, Beets y Oliver 2007, Grant *et al.* 2008). Estas modificaciones dependen, entre otras características físicas, del

tamaño y forma de la cuenca, de la superficie intervenida, del método de cosecha, de las precipitaciones y de las condiciones climáticas del lugar.

La mayoría de las investigaciones concuerdan en que los caudales aumentan luego de una reducción de la cubierta de bosques (Jones y Swanson 2001, Cassie *et al.* 2002, Gush *et al.* 2002, Vertessy *et al.* 2002). Los bosques consumen más agua que una vegetación más baja (pasturas, vegetación herbácea o chaparral), principalmente porque las copas interceptan parte de la precipitación, la que luego es evaporada, y por disponer de raíces más profundas y acceder así a una mayor reserva de agua del suelo (Calder

1992, Benyon *et al.* 2007). Existe, sin embargo, una mayor discrepancia respecto al efecto de la deforestación en los caudales máximos, ya que hay investigaciones que reportan un efecto casi inapreciable (Whitehead y Robinson 1993), o sobre los caudales máximos asociados a períodos de retorno de hasta cinco a 10 años (Beschta *et al.* 2000, La Marche y Lettenmaier 2001), o de hasta 30 años (Verry 1986) o incluso hasta crecidas con períodos de retorno de 100 años (Smith 1987).

El aumento de caudal es proporcional al porcentaje de la superficie de la cuenca que se interviene (Hibbert 1967), aun cuando el efecto debido a cambios en la cubierta de bosques que comprometen menos del 15 - 20 % de la superficie de la cuenca no puede ser detectado por las mediciones en los caudales (Bosch y Hewlett 1982, Stednick 1996, MacDonald y Stednick 2003). El efecto es mayor en cosechas a tala rasa que en cortas parciales (Rothacher 1970, Fahey 1994, Brown *et al.* 2005, Tremblay *et al.* 2008), es más apreciable en regiones con climas más húmedos (Keppeler 1998, Keenan *et al.* 2004) y es más notorio en cuencas pequeñas que en grandes (Calder 2007).

La duración de los efectos postcosecha depende, entre otros, de los suelos, geología y pendientes de la cuenca, de las precipitaciones, de la extensión y tipo de las operaciones forestales y de las características de la vegetación que se restablece luego de la cosecha. El aumento de caudales con respecto al período de precosecha es más notorio durante los primeros tres a cinco años después de la intervención, y con el crecimiento de la nueva vegetación los caudales tienden hacia los niveles de precosecha en un período que podría ir de cinco a 60 años (Fahey 1994, Bari *et al.* 1996, Keppeler 1998, Ruprecht y Stoneman 1993, Hornbeck *et al.* 1997, Swank *et al.* 2001, MacDonald y Stednick 2003, Andréassian 2004, Brown *et al.* 2005). Sin embargo, cuando se reemplazan bosques maduros, el desarrollo de la nueva plantación puede incluso generar caudales menores que en la condición de precosecha (Cornish 1993, Lane y Mackay 2001, Vertessy *et al.* 2002).

Algunos de estos efectos son reportados para un estudio en una cuenca experimental de 34,4 ha de superficie ubicada en la Cordillera de la Costa en la provincia de Osorno, Chile (Iroumé *et al.* 2005, 2006). Luego de la cosecha a tala rasa de la plantación de *Pinus radiata* D. Don de 24 años que cubría el 79,4 % de la cuenca, la escorrentía anual aumentó en algo más de 1.000 mm/año y los caudales máximos en un 32 % con respecto a la condición de precosecha, y se notó también un incremento de los caudales de verano. Ambos estudios comparan los caudales en los últimos años (1997 a 1999) de la rotación de la plantación de *P. radiata* con los primeros tres años (2000 a 2002) del período postcosecha y de desarrollo de la nueva plantación de *Eucalyptus nitens* (Deane *et Maiden*) Maiden establecida el año 2000. La consecuencia de la cosecha a tala rasa en crecidas generadas por tormentas de lluvia de diferente magnitud en La Reina es estudiada por Birkinshaw y Bathurst (2008), quienes, aplicando

un sistema de modelamiento hidrológico, comprueban la hipótesis que a medida que el tamaño de la crecida aumenta el efecto del cambio de uso del suelo se hace menos importante.

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados del análisis del comportamiento de los caudales durante el período de postcosecha en la cuenca de La Reina, donde se evalúa la tendencia en los caudales mensuales, anuales, de verano y máximos por efecto del crecimiento de la nueva plantación de *E. nitens*, que al año 2008 alcanza ocho años de crecimiento. Este trabajo es el primer estudio de este tipo en el país, y permite comparar la evolución de los caudales luego de la cosecha y establecimiento de un nuevo bosque con investigaciones similares realizadas en otros países y ambientes.

MÉTODOS

Área de estudio. El estudio se realizó en la cuenca experimental La Reina ubicada en la Cordillera de la Costa a 60 km al oeste de la ciudad de Osorno. Su superficie es de 34,4 ha y hasta fines del año 1999 el 79,4 % de la cuenca estaba cubierta por una plantación de *P. radiata* establecida el año 1977. Vegetación ripariana compuesta principalmente por especies nativas y caminos ocupan el 20,6 % restante. La plantación de *P. radiata* fue cosechada a tala rasa entre octubre de 1999 y marzo de 2000 y esa superficie fue reforestada con *E. nitens* entre junio y julio de 2000. Mayores antecedentes de la cuenca La Reina se presentan en Iroumé *et al.* (2005, 2006).

Instrumentación, registros de datos y período de estudio. La precipitación se cuantificó con un pluviógrafo de registro continuo del tipo “tipping bucket” con resolución de 0,2 mm, ubicado en la salida de la cuenca junto a la estación fluviométrica. Los caudales se midieron en una estación fluviométrica artificial dotada de un sistema de registro continuo del nivel de aguas. Se dispuso de registros de precipitación en la cuenca desde mediados del año 1996 y de caudales desde inicios de 1997. Los registros de precipitación y caudal en los años 2003, 2004 y 2005 no estaban completos debido a fallas intermitentes de uno u otro equipo. El período de estudio fue desde enero del año 1997 hasta marzo de 2009. El período 1997-1999 se consideró como de precosecha y el que inicia el 2000 como de postcosecha.

Métodos. El efecto en los caudales debido a la cosecha de la plantación y posterior desarrollo del nuevo bosque se analizó usando el procedimiento de las curvas doble acumuladas descrito por Shaw (1994). El análisis se realizó para todo el período de disponibilidad de datos comparando las escorrentías mensuales acumuladas en la cuenca La Reina con los registros de una estación patrón. En este caso se usó como estación patrón el promedio

de los valores mensuales de precipitación de los datos medidos por el pluviógrafo de La Reina y los registrados en la Estación Isla Teja de Valdivia.

Para cada uno de los años con registro completo de precipitación anual (P , mm) y escorrentía anual (Q , mm), es decir, para los años 1997 a 1999 (pre cosecha), y 2000 a 2002 y 2006 a 2008 (post cosecha), se analizó la evolución del coeficiente de escorrentía (Q/P) y se comparó la evapotranspiración real con la evapotranspiración estimada según el modelo de Zhang (Zhang *et al.* 2001). Asumiendo que los cambios interanuales del almacenamiento de agua en el suelo son despreciables, la evapotranspiración real anual (ET_r , mm) se calculó restando la escorrentía anual a la precipitación anual (ecuación 1)

$$ET_r = P - Q \quad [1]$$

ET_r se contrastó con los valores de evapotranspiración anual estimados usando el modelo de Zhang, el que ha sido también descrito y adoptado por Sun *et al.* (2005, 2006) para estudiar reducciones en los caudales debido a desarrollos forestales. Para cada año, ET_r se comparó con la evapotranspiración estimada obtenida con la expresión:

$$ET = \left(\frac{1 + w \frac{E_o}{P}}{1 + w \frac{E_o}{P} + \left(\frac{E_o}{P} \right)^{-1}} \right) P \quad [2]$$

En esta ecuación, P es la precipitación anual (mm), E_o la evapotranspiración potencial anual por tipo de vegetación (mm) y w un coeficiente que representa cómo diferentes tipos de plantas usan el agua disponible del suelo para transpirar. E_o y w asumen valores de 1.410 y 2,0 para bosques y 1.100 y 0,5 para cubiertas herbáceas (Zhang *et al.* 2001).

En La Reina, el efecto de la cosecha y posterior desarrollo de la plantación en los caudales de verano se analizaron comparando las curvas de duración de caudales medios diarios (Shaw 1994). Los períodos de verano (1 de diciembre al 31 de marzo) considerados fueron 1997-1998 y 1998-1999 (pre cosecha), 1999-2000 (cosecha), 2000-2001, 2001-2002, 2002-2003, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008 y 2008-2009 (post cosecha). De las curvas de duración de caudales medios diarios se extrajeron y compararon los valores de $Q_{50\%}$, $Q_{80\%}$ y $Q_{90\%}$, correspondientes a los caudales medios diarios que fueron excedidos el 50, 80 y 90 % de los días de cada período de verano.

El análisis de caudales máximos se realizó comparando los del período de pre cosecha (años 1997 a 1999) con los de post cosecha (desde el año 2000), agrupados por tormentas de diferente magnitud. En esta investigación, las tormentas se clasificaron según el volumen de las precipitaciones en eventos ‘pequeños’ (5-10 mm), ‘medios’

(10-50 mm) y ‘grandes’ (mayores a 50 mm). Se definieron tormentas individuales aquellos períodos con precipitación, antecedidos y seguidos por cinco horas sin lluvias. No se consideraron en los análisis las tormentas con volúmenes de precipitación inferiores a 5 mm, ya que se consideró que en este tipo de eventos la respuesta hidrológica a lluvias similares es muy variable y fuertemente dependiente de las condiciones previas de contenido de humedad del suelo y de las copas de los árboles. Para examinar en mayor detalle la hipótesis que el efecto amortiguador del bosque en los caudales máximos es menos prevalente en los eventos mayores, se compararon los valores de los caudales máximos de los períodos de pre cosecha (1997 a 1999) y post cosecha (considerando aquí sólo los años 2000, 2001, 2002 y 2003 hasta el mes de octubre) generados por los eventos de precipitación con lluvias sobre 100 mm, es decir, la sección superior de la categoría de eventos ‘grandes’ de lluvia.

Por último, el estudio de caudales máximos en La Reina se complementó analizando los períodos de retorno de las precipitaciones medidas en estaciones pluviométricas y los caudales máximos registrados en cuencas ubicadas en las cercanías del área estudiada, para los años en los cuales se midieron los mayores caudales máximos en La Reina. Los períodos de retorno fueron determinados mediante análisis de frecuencia y la aplicación de la función Extrema Tipo I o de Gumbel (Shaw 1994) a las series de precipitaciones anuales y máximas en 24 horas para las estaciones de Remehue (Osorno) e Isla Teja (Valdivia) y de caudales máximos de las cuencas de La Reina y de los ríos Collileufu (en Los Lagos), Ñaque (en Mafil), Cruces (en Rucaco), Damas (en Tacamo), Negro (en Chahuilco) y Santo Domingo (en Rincón de Piedra). Los registros de caudales diarios de estas cuencas localizadas en las regiones de Los Ríos y Los Lagos fueron obtenidos de las bases de datos de la Dirección General de Aguas¹.

Las diferencias (Δ) en la escorrentía y caudales entre las condiciones de pre cosecha y cada año o período de post cosecha se obtuvieron usando la siguiente expresión:

$$\Delta (\%) = (X_2/X_1 - 1) * 100 \quad [3]$$

donde X_1 y X_2 representan la información de las condiciones de pre y post cosecha, respectivamente.

Los análisis estadísticos se realizaron con el *software* SAS® (Statistical Analysis System, versión 9.1). Para agrupar períodos se usó la prueba de múltiples rangos con el procedimiento de diferencia mínima significativa de Fisher, y para determinar la significancia estadística de las diferencias entre X_1 y X_2 se usó la prueba F para los

¹ Datos proporcionados por la Dirección General de Aguas: registros de caudales diarios de cuencas localizadas en las regiones de Los Ríos y Los Lagos. Base de datos DGA. 2009.

promedios y la de Mood para las medianas. Las diferencias se consideraron significativas para $P < 0,05$.

Para los análisis de frecuencia se usó la función de Gumbel (Shaw, 1994). La significancia estadística entre valores estimados y observados de probabilidad se determinó mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov para un nivel de confianza del 5 %.

RESULTADOS

Escorrentías, caudales mensuales y anuales, y evapotranspiración. La comparación entre la escorrentía mensual acumulada de la cuenca La Reina y la precipitación mensual acumulada de la estación patrón para el período 1997-2008 mostró un aumento de la pendiente de 0,41 a 0,74 entre el período de precosecha (1997 a 1999) y los primeros años del período de postcosecha (2000 a octubre de 2003) (figura 1). La diferencia entre las pendientes que representan el comportamiento de los caudales de ambos períodos resultó estadísticamente significativa.

Al extender el análisis a partir de agosto de 2005, se apreció que las pendientes del gráfico para el período agosto 2005-2008 fueron menores al período inmediatamente anterior (es decir, el correspondiente a los años 2000 a 2003). Para el período 2005-2006 la pendiente del gráfico fue 0,69 y para el período 2007-2008 se redujo aún más a 0,61. Las diferencias entre las pendientes del gráfico para los períodos descritos fueron todas estadísticamente significativas.

El coeficiente promedio de escorrentía anual en La Reina para el período de precosecha (1997 a 1999) fue

38 %, con valores anuales entre 20 y 56 % (figura 2). En los tres primeros años de postcosecha se notó un aumento del coeficiente de escorrentía anual, el que alcanzó un valor medio de 70 % (entre 69 y 72 %). El coeficiente de escorrentía anual medio del período 2006-2008 fue 59 %, valor menor al período anterior (2000-2002), pero aún superior al correspondiente a los años 1997-1999. Los

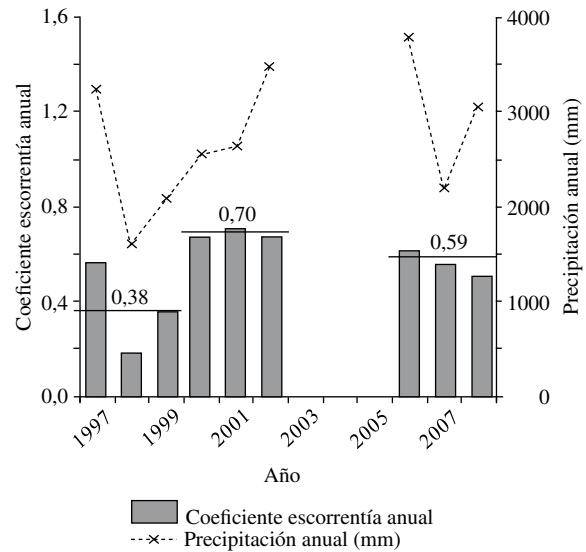


Figura 2. Coeficientes de escorrentía y precipitación anuales, cuenca La Reina.

Annual runoff coefficients and precipitation, La Reina.

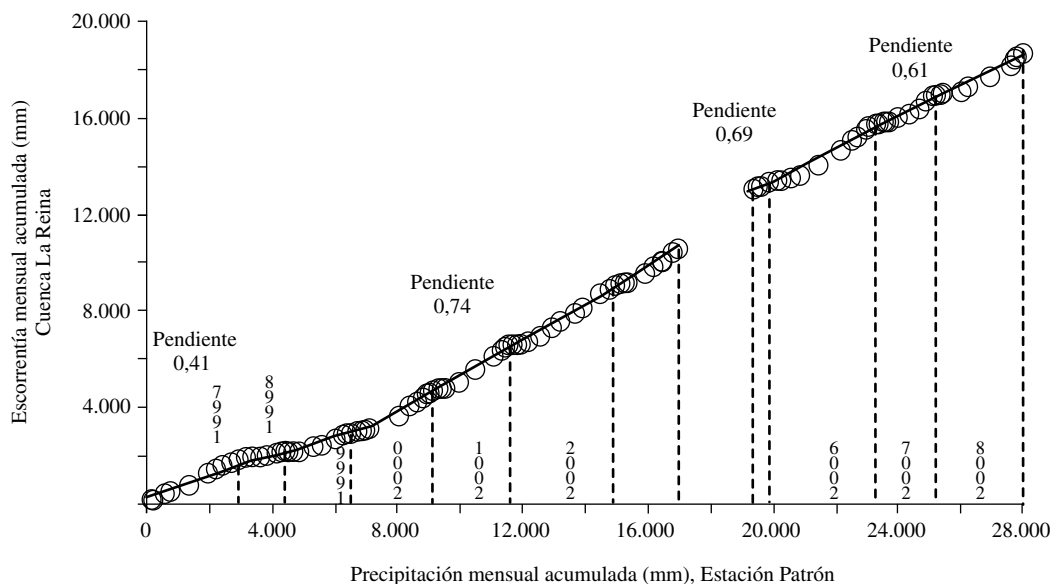


Figura 1. Valores mensuales acumulados de la escorrentía de la cuenca La Reina y la precipitación de la estación patrón, período 1997-2008.

Cumulated monthly values of runoff at La Reina and precipitation at Control Station, period 1997-2008.

promedios de los coeficientes de escorrentía anuales de estos tres períodos fueron estadísticamente diferentes.

Las evapotranspiraciones anuales reales en La Reina (ET_r) para los años 1997 a 1999 (La Reina cubierta por la plantación de *P. radiata*) resultaron comparables e incluso superiores a las estimadas para una cuenca boscosa con el modelo de Zhang (figura 3). En los primeros dos años, luego de la cosecha a tala rasa y el establecimiento de la nueva plantación de *E. nitens* (años 2000 y 2001), las evapotranspiraciones anuales reales fueron menores a las estimadas para una cuenca de praderas. Para el año 2002, y luego para los años 2006 a 2008, la evapotranspiración anual real resultó entre los valores estimados por el modelo de Zhang para praderas y bosques.

Caudales de verano. Las curvas de duración de caudales medios diarios en La Reina para los 10 períodos de verano estudiados se resumen en la figura 4. Los caudales medios diarios que fueron excedidos el 50, 80 y 90 % de los días de cada período ($Q_{50\%}$, $Q_{80\%}$ y $Q_{90\%}$, respectivamente) aumentaron durante el período 1999-2000 con respecto a los valores de los dos años del período de precosecha (1997-1998 y 1998-1999) (figura 5).

Usando el procedimiento de diferencia mínima significativa de Fisher, se identificaron tres grupos de períodos de verano cuyos $Q_{50\%}$, $Q_{80\%}$ y $Q_{90\%}$ promedios son significativamente diferentes entre sí. Estos grupos son los períodos de precosecha (1997-1998 y 1998-1999, G1) y los conformados por los períodos 2000-2001 a 2006-2007

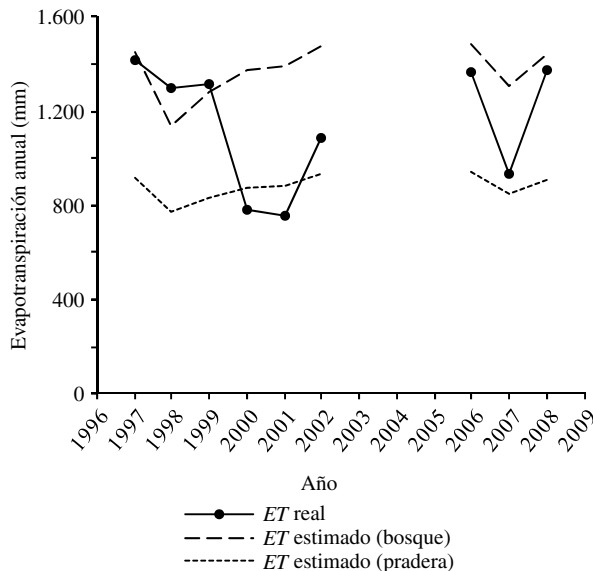


Figura 3. Evapotranspiración (ET) anual real y estimada para bosques y praderas (modelo de Zhang) para las condiciones de precipitación anual en La Reina.

Real and estimated (for forest and grasslands, Zhang model) annual evapotranspiration for La Reina annual rainfall conditions.

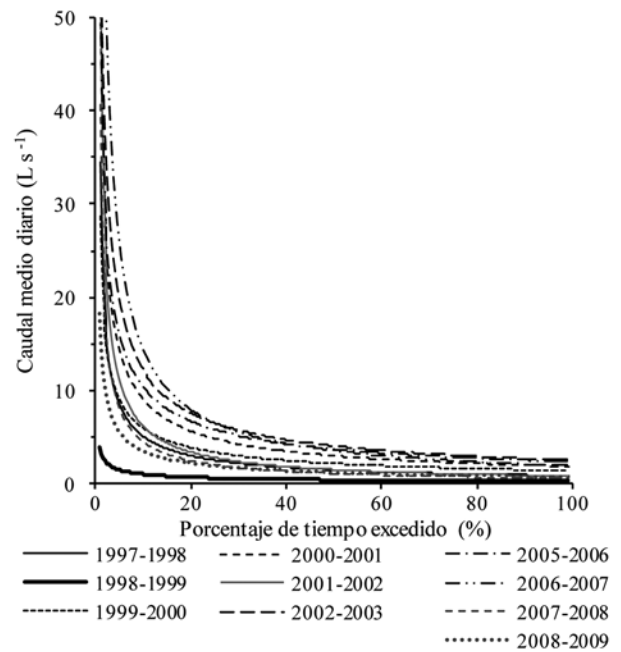


Figura 4. Curvas de duración de caudales medios diarios en La Reina para varios períodos de verano.

Daily mean discharge duration curves at La Reina for several summer periods.

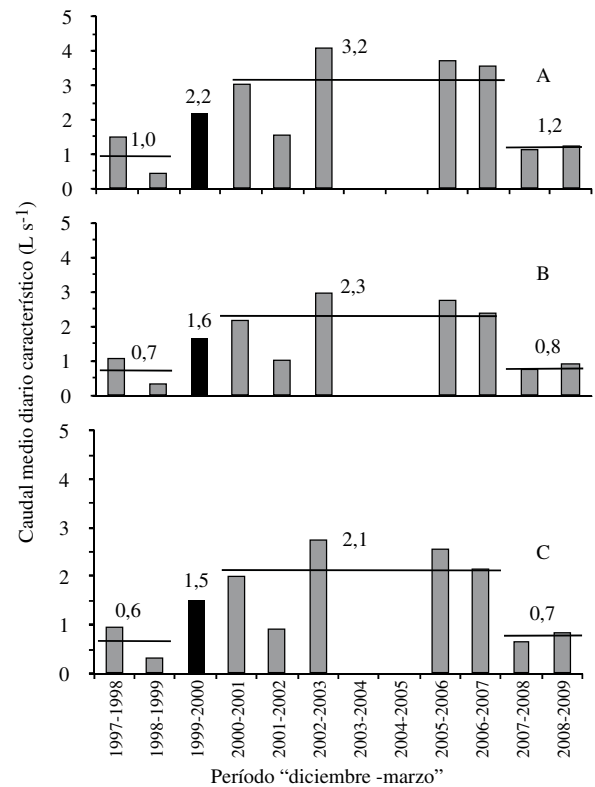


Figura 5. Caudales medios diarios característicos en La Reina para varios períodos de verano. A) $Q_{50\%}$; B) $Q_{80\%}$; C) $Q_{90\%}$.

Characteristic mean daily discharges at La Reina for several summer periods. a) $Q_{50\%}$; b) $Q_{80\%}$; c) $Q_{90\%}$.

(G2) y 2007-2008 a 2008-2009 (G3) en la condición de postcosecha. $Q_{50\%}$ promedio resultó 1,0, 3,2 y 1,2 $L s^{-1}$, $Q_{80\%}$ promedio fue 0,7, 2,3 y 0,8 $L s^{-1}$ y $Q_{90\%}$ promedio dio valores de 0,6, 2,1 y 0,7 $L s^{-1}$, para G1, G2 y G3, respectivamente. Los promedios de $Q_{50\%}$, $Q_{80\%}$ y $Q_{90\%}$ son estadísticamente diferentes entre G1 y G2 y entre G2 y G3 pero estadísticamente similares entre G1 y G3.

Caudales máximos. Las medianas de los caudales máximos por categoría de eventos de lluvia (eventos ‘pequeños’ con precipitación total entre 5 y 10 mm, ‘medios’ entre 10 y 50 mm y ‘grandes’ con valores de precipitación total superiores a 50 mm), para el período precosecha y cada uno de los años del período de postcosecha se presentan en el cuadro 1.

En la cuenca La Reina y para las tres categorías de eventos de precipitación, las medianas de los caudales máximos para todos los años del período de postcosecha fueron mayores que en el período de precosecha, aun cuando las diferencias no siempre resultaron estadísticamente significativas (cuadro 1). El cambio en porcentaje para la categoría eventos ‘grandes’ resultó menor que para los eventos ‘medios’ y ‘pequeños’. Considerando tres años del período postcosecha (años 2000, 2006 y 2008), el aumento del valor de la mediana de los caudales máximos para las categorías ‘pequeño’, ‘medio’ y ‘grande’ de las tormentas, con respecto a la condición de precosecha, fue:

- Eventos ‘pequeños’: año 2000 con respecto al período precosecha, aumento de 200 %; año 2006 con respecto a

precosecha, aumento de 224 %; año 2008 con respecto a precosecha, aumento de 74 %.

- Eventos ‘medios’: año 2000 con respecto al período precosecha, aumento de 61 %; año 2005 con respecto a precosecha, aumento de 130 %; año 2008 con respecto a precosecha, aumento de 137 %.
- Eventos ‘grandes’: año 2000 con respecto al período precosecha, aumento de 46 %; año 2005 con respecto a precosecha, aumento de 57 %; año 2008 con respecto a precosecha, aumento de 51 %.

La relación entre la magnitud de los eventos de precipitación con lluvias sobre 100 mm (la sección superior de la categoría de eventos ‘grandes’ de lluvia) y los caudales máximos resultantes se resume en la figura 6. En total, entre los años 1997 y 2003 sólo 25 eventos de precipitación excedieron este total, nueve en el período de precosecha y 16 en el de postcosecha.

Los registros de caudales máximos en la cuenca La Reina se muestran en el cuadro 2, mientras que el resultado del análisis de frecuencia (Gumbel) para determinar los períodos de retorno asociados a estos caudales máximos se grafican en la figura 7.

El mayor valor de caudal máximo instantáneo medido durante el estudio en la estación pluviométrica de La Reina fue $0,342 m^3 s^{-1}$, registrado el 17 de julio de 2001, con un período de retorno estimado de 4,1 años. El año 2002 se registró un caudal máximo instantáneo algo menor al registrado el 2001 que alcanzó a $0,337 m^3 s^{-1}$ (12 de octubre) con un período de retorno asociado de 3,9 años.

Cuadro 1. Mediana de caudales máximos por categoría de eventos de lluvia, para el período precosecha y cada año del período de postcosecha, cuenca La Reina.

Median of peakflows per event category, for the pre-harvesting period and each year of the post-harvesting period at La Reina catchment.

Condición	Año	Tamaño del evento de lluvia		
		Pequeño	Medio	Grande
Mediana de los caudales máximos, condición de precosecha ($L s^{-1}$)	Todos (1997 a 2000)	4,6	18,5	69,2
	2000	13,8*	29,8*	101,3 ns
	2001	11,7*	29,5*	180,2*
	2002	14,2*	46,6*	100,6 ns
	2003 ^a	13,1*	41,2*	154,9*
Mediana de los caudales máximos, condición de postcosecha ($L s^{-1}$)	2004	n.d.	n.d.	n.d.
	2005 ^b	20,7*	41,2*	99,4 ns
	2006	14,9*	42,6*	108,3 ns
	2007	23,0*	30,2*	73,7 ns
	2008	8,0 ns	43,8*	104,8 ns

^a Datos disponibles período 1 de enero al 31 de octubre.

^b Datos disponibles período 29 de julio al 31 de diciembre.

n.d.: No disponible. Diferencia entra las medianas de cualquier año de postcosecha con las del período de precosecha:

* estadísticamente significativa ($P < 0,05$); ns, no significativa.

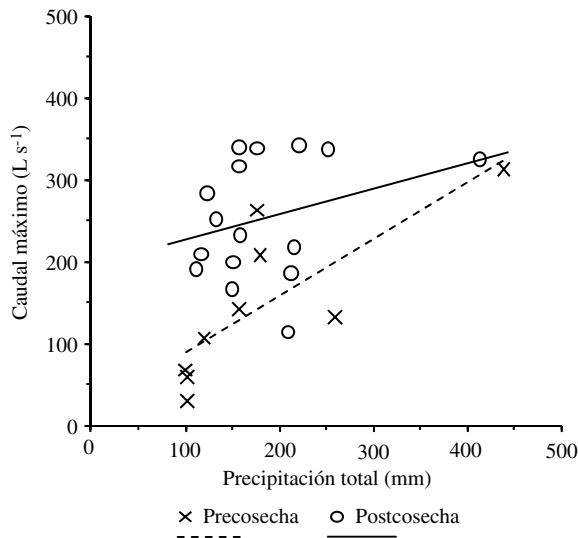


Figura 6. Relación entre precipitación de eventos extremos (más de 100 mm de lluvia por evento) y caudales máximos en las condiciones de pre (1997-1999) y postcosecha (2000-2003), cuenca La Reina.

Relation between precipitation of extreme events (more than 100 mm of rain per event) and peakflows for the pre (1997-1999) and post-harvesting (2000-2003) conditions, La Reina catchment.

Cuadro 2. Caudales máximos, cuenca La Reina.

Peakflows, La Reina catchment.

Año	Caudal máximo instantáneo		Caudal máximo medio diario	
	Q (m³ s⁻¹)	Fecha	Q (m³ s⁻¹)	Fecha
1997	0,313	28-07-97	0,255	28-07-97
1998	0,039	09-04-98	0,033	15-08-98
1999	0,263	09-08-99	0,152	09-08-99
2000	0,325	02-06-00	0,240	03-06-00
2001	0,342	17-07-01	0,275	07-01-01
2002	0,337	12-10-02	0,318	12-10-02
2003 ^a	0,340	19-06-03	0,163	20-06-03
2004	-	-	-	-
2005 ^b	0,179	30-07-05	0,116	30-07-05
2006	0,296	24-07-06	0,230	24-07-06
2007	0,180	20-06-07	0,099	05-09-07
2008	0,288	15-07-08	0,237	15-07-08

^a Datos disponibles período 1 de enero al 31 de octubre.
^b Datos disponibles período 29 de julio al 31 de diciembre.

Para expandir el análisis de los caudales máximos en La Reina, se estudió el comportamiento de las precipitaciones anuales y máximas en 24 horas en las estaciones pluviométricas de Remehue (Osorno) e Isla Teja (Valdivia). Del análisis de frecuencia de los datos de precipitación de Remehue (Osorno) e Isla Teja se determinaron los períodos de retorno asociados a las precipitaciones anuales y máximas en 24 horas (figura 8).

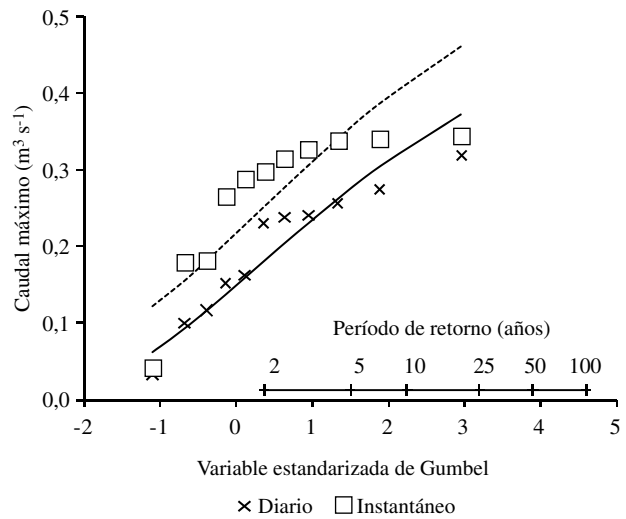


Figura 7. Períodos de retorno de los caudales máximos, cuenca La Reina.

Peakflows return periods, La Reina catchment.

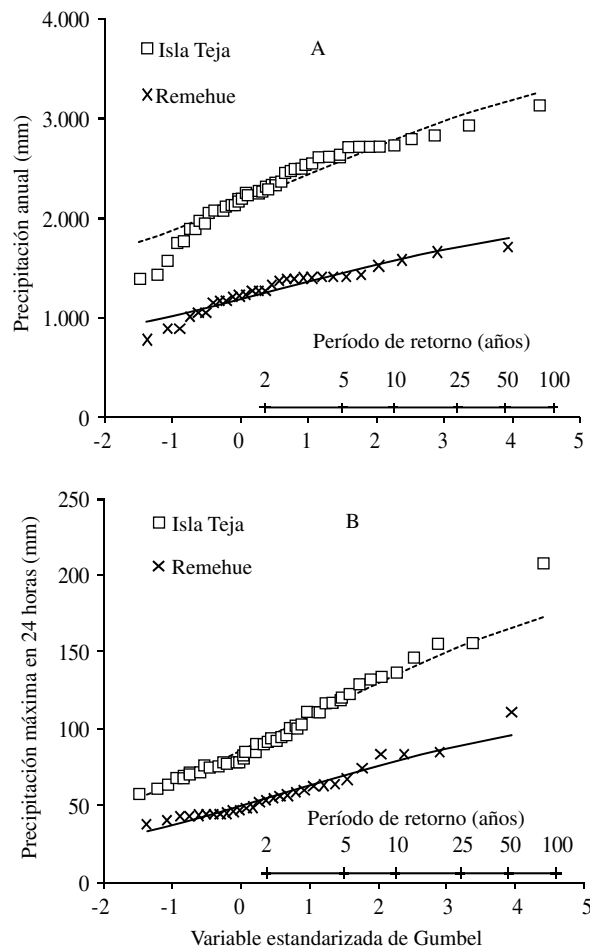


Figura 8. Períodos de retorno de las precipitaciones anuales y máximas en 24 horas, estaciones Remehue e Isla Teja.

Annual precipitations and maximum daily precipitations return periods, Remehue and Isla Teja stations.

En la figura 8 se puede apreciar que para un período de retorno determinado tanto las precipitaciones anuales como las máximas en 24 horas resultaron mayores en Isla Teja que en Remehue. De estos análisis de frecuencia, se obtuvieron los períodos de retorno correspondientes a las precipitaciones de los años 2001 y 2002 en ambas estaciones (cuadro 3).

Para el 2001, los valores de precipitación anual y máxima en 24 horas corresponden, tanto para Isla Teja como para Remehue, a períodos de retorno del orden de dos años. El año 2002, la precipitación anual y la máxima en 24 horas tienen períodos de retorno de 22 y 29 años en Isla Teja y de 12 y 15 años en Remehue.

El análisis de los caudales máximos medios diarios registrados en cuencas monitoreadas por la Dirección General de Aguas, y localizadas en el área donde se ubica La Reina (datos de las estaciones fluviométricas de Cruces en Rucaco, Iñaque en Máfil, Collilelfu en Los Lagos, Damas en Tacamó y Negro en Chahuilco), permitió asignar períodos de retorno a los caudales máximos de los años 2001 y 2002 (cuadro 4).

Con excepción de La Reina, en todas estas cuencas los caudales máximos en el año 2001 resultaron con períodos de retorno entre uno y tres años, es decir, del mismo orden de magnitud que los períodos de retorno de la precipitación anual y máxima en 24 horas en Isla Teja

y Remehue ese mismo año. Para el año 2002, los períodos de retorno de los caudales máximos registrados en todas las cuencas grandes son superiores a los del año 2001, siendo nuevamente La Reina la excepción. Adicionalmente, destaca el hecho que todos los caudales máximos (incluido el medido en La Reina) fueron generados por la misma tormenta (todos los caudales máximos ocurrieron entre el 12 y 14 de octubre de 2002).

DISCUSIÓN

Escorrentías, caudales y evapotranspiración. El cambio que se aprecia en la figura 1 de la pendiente del gráfico entre el período de pre cosecha (1997 a 1999) y los tres primeros años del período de post cosecha (2000 a 2002), ya fue analizado por Iroumé *et al.* (2006). El aumento de la pendiente de 0,41 a 0,74 indica que una mayor cantidad de agua ha sido descargada por la cuenca luego que gran parte de la vegetación fue removida, y de acuerdo a estos autores el aumento de la escorrentía fue en promedio de 1.000 mm año⁻¹ en los tres primeros años de post cosecha. Las escorrentías mensuales de los 10 primeros meses de 2003 muestran que hasta octubre de ese año se mantiene la misma tendencia mostrada de 2000 a 2002.

Cuadro 3. Períodos de retorno de las precipitaciones anuales y máximas en 24 horas en las estaciones Isla Teja y Remehue: resultados para los años 2001 y 2002.

Return periods for annual and maximum dairy precipitation at Isla Teja and Remehue: results for years 2001 and 2002.

Año	Estación	Precipitación máxima en 24 horas			Precipitación anual	
		P _{max} 24h (mm)	Fecha	Período de retorno (años)	P (mm)	Período de retorno (años)
2001	Isla Teja	102,4	08/07/2001	2,6	2.245,7	2,0
	Remehue	48,8	26/05/2001	1,5	1.270,3	2,0
2002	Isla Teja	155,7	12/10/2002	22	3.140,2	29
	Remehue	83,3	01/10/2002	12	1.668,1	15

Cuadro 4. Caudales máximos en los años 2001 y 2002 y períodos de retorno en cuencas seleccionadas en el área de Valdivia-Osorno (incluida La Reina).

Peakflows and corresponding return periods in selected catchments in the Valdivia-Osorno area (including La Reina).

Estación fluviométrica	Superficie (km ²)	Año 2001			Año 2002		
		Q _{max} ^a (m ³ s ⁻¹)	Fecha	Período de retorno años	Q _{max} ^a (m ³ s ⁻¹)	Fecha	Período de retorno años
La Reina	0,344	0,342	17/07/2001	10,0	0,337	12/10/2002	3,3
Collilelfu-Los Lagos	581	257	08/06/2001	2,9	416	13/10/2002	15,4
Iñaque-Máfil	424	144	09/06/2001	2,9	249	13/10/2002	16,4
Cruces-Rucaco	1.740	677	09/06/2001	3,5	821	14/10/2002	8,7
Damas-Tacamó	408	48	28/05/2001	1,2	113	13/10/2002	4,3
Negro-Chahuilco	2.318	437	17/07/2001	2,6	682	13/10/2002	7,6
Sto. Domingo - R. de Piedra	127	92	08/07/2001	2,1	189	12/10/2002	9,9

^a Q_{max} para La Reina es caudal máximo instantáneo y máximo medio diario para las otras cuencas.

La menor pendiente que se nota para el período agosto 2005-2008, en relación con la del período inmediatamente anterior (es decir, el correspondiente a los años 2000 a 2003), indica que con el desarrollo de la nueva plantación de *E. nitens* la producción de agua en La Reina está comenzando a descender hacia los niveles de precosecha. Este descenso se acentúa para los últimos años del estudio, ya que para el período 2005-2006 la pendiente del gráfico es 0,69 y para el período 2007-2008 se reduce aún más, a 0,61 (figura 1).

La tendencia de una declinación de los caudales anuales hacia los niveles de precosecha, luego de ocho años de desarrollo de la plantación de *E. nitens*, se refuerza al analizar los coeficientes de escorrentía anuales en La Reina, figura 2. El coeficiente promedio de escorrentía anual aumenta de 38 % en el período de precosecha (1997 a 1999), a 70 % en los tres primeros años de postcosecha (2000-2002), para luego reducirse a 59 % para los años 2006-2008. El efecto del crecimiento de la plantación, acompañado por un mayor consumo de agua (Calder 1992, Cornish 1993, Brown *et al.* 2005, Benyon *et al.* 2007), parece notarse cada vez más al apreciar que el coeficiente de escorrentía anual correspondiente al año 2007 (58 %) es menor que el del año 2006 (63 %), y que el de 2008 (55 %) es a su vez menor que el de 2007, a pesar que la precipitación anual el 2008 es superior en unos 800 mm a la registrada el 2007 (figura 2). Esto tiende a confirmar un consumo creciente de agua, sin duda asociado al desarrollo de la plantación de *E. nitens* aun cuando esta tendencia debe considerarse con mesura al notar la variabilidad de los coeficientes de escorrentía en los otros dos períodos (1997-1999 y 2000-2002). La variación en los coeficientes de escorrentía anuales que se aprecia para el período 1997 a 1999 se explica por las importantes diferencias en las precipitaciones anuales ocurridas en esos años, ya que por ejemplo para el año 1997 se registraron 3.201 mm año⁻¹ y 1.566 mm año⁻¹ en 1998.

La evapotranspiración anual estimada con el modelo de Zhang (Zhang *et al.* 2001) concuerda razonablemente bien con la calculada como $(P - Q)$ para La Reina (figura 3). Para el período 1997-1999, la evapotranspiración según el modelo de Zhang para una cuenca completamente forestada y la real medida para La Reina son similares y siguen la misma tendencia. Luego de la cosecha a tala rasa, la evapotranspiración real es menor que la estimada por el modelo de Zhang para una cuenca con cubierta herbácea, cuestión que Beets y Oliver (2007) asocian a la reducida vegetación que queda por la extracción del bosque y la alteración al suelo por los equipos de cosecha y madereo, que hacen que la cobertura de la vegetación en La Reina en los años 2000 y 2001 corresponda a una condición de menor desarrollo que la correspondiente a una cobertura herbácea. Para el año 2002 la evapotranspiración anual real resulta entre los valores estimados según el modelo de Zhang para praderas y bosques, y empieza a notarse así el efecto de un mayor consumo de agua por la vegetación en

desarrollo. Entre los años 2006 y 2008, es decir, entre seis a ocho años después de la reforestación, el nuevo bosque de *E. nitens* evapotranspira a una tasa inferior que la que el modelo de Zhang estima para un bosque completamente desarrollado. Vertessy *et al.* (2002), Brown *et al.* (2005) y Benyon *et al.* (2007), entre otros, encuentran una concordancia relativamente buena entre los valores medidos de *ET* y los estimados con el modelo de Zhang, aun cuando este último debe verse como una herramienta para evaluar el impacto de cambios permanentes de la vegetación en las escorrentías anuales, y no necesariamente para analizar variabilidad intra o interanual ni el tiempo que requiere una cuenca para ajustarse a los cambios en la vegetación.

El comportamiento de la escorrentía anual en La Reina luego de la cosecha a tala rasa y posterior reforestación, caracterizado por un importante aumento de la producción de agua seguido por una declinación hacia niveles de precosecha que empieza a notarse desde el quinto año de la intervención, concuerda en general como lo reportado por Jones y Swanson (2001), Swank *et al.* (2001), Cassie *et al.* (2002), Gush *et al.* (2002), Vertessy *et al.* (2002), MacDonald y Stednick (2003), Andréassian (2004) y Brown *et al.* (2005). El tiempo que está tomando la nueva plantación de *E. nitens* en alcanzar niveles de consumo de agua como los que mostraba el bosque anterior de *P. radiata* es algo mayor al que informan Cornish (1993), David *et al.* (1994) y Fernández *et al.* (2006) en forestaciones con *Eucalyptus spp.*, pero concuerda con lo que muestran Vertessy *et al.* (2002), Cameron (2003) y Benyon *et al.* (2007). Sin embargo, la alta variabilidad entre cuencas del comportamiento de los caudales luego de la reforestación es algo que destacan Brown *et al.* (2005).

Caudales de verano. No es fácil interpretar las curvas de duración de caudales medios diarios en La Reina para los 10 períodos de verano estudiados (figura 4). No se nota a simple vista una agrupación de las curvas de duración de caudales de los períodos pre y postcosecha. Sin embargo, el análisis de los caudales característicos seleccionados ($Q_{50\%}$, $Q_{80\%}$ y $Q_{90\%}$) permite estudiar el comportamiento de los caudales de verano.

El aumento que muestran los caudales $Q_{50\%}$, $Q_{80\%}$ y $Q_{90\%}$ durante el verano de 1999-2000 con respecto a los valores de los dos años del período de precosecha (1997-1998 y 1998-1999), es consistente con el menor consumo de agua por evapotranspiración en La Reina considerando que la cosecha a tala rasa de la plantación de *P. radiata* se inició en octubre de 1999. A partir del período 2000-2001, la cuenca estudiada se encontraba en una condición de postcosecha, lo que se refleja en valores de $Q_{50\%}$, $Q_{80\%}$ y $Q_{90\%}$ superiores a los de los períodos de precosecha y de cosecha (figura 5).

El hecho que $Q_{50\%}$, $Q_{80\%}$ y $Q_{90\%}$ promedio son estadísticamente diferentes entre G1 y G2 y entre G2 y G3 pero estadísticamente similares entre G1 y G3, indica que el desarrollo de la nueva plantación en La Reina parece

no afectar significativamente los caudales de verano hasta seis veranos después de su establecimiento, pero a partir del verano de 2007-2008 la cuenca muestra caudales de estío similares a los de la condición de precosecha. Al final del período estudiado, los caudales de verano en La Reina han retornado a los niveles de precosecha, cuestión que no ocurre aún para las escorrentías anuales.

La Reina se ubica en una zona caracterizada por lluvias invernales y veranos más secos, y el aumento detectado en los caudales de verano luego de la cosecha concuerda con los resultados de Keppeler (1998), MacDonald y Stednick (2003), Andréassian (2004), Keenan *et al.* (2004), Calder (2007). El tiempo que ha demorado la plantación en desarrollo en llevar los caudales de verano a los niveles de precosecha es coincidente con lo que reportan Keppeler (1998) y MacDonald y Stednick (2003).

Caudales máximos. Los valores de las medianas de los caudales máximos (cuadro 1) indican que en la cuenca La Reina los caudales máximos para cada año de postcosecha son mayores que en el período de precosecha, y esto ocurre para las tres categorías de eventos de precipitación. Esto muestra que la remoción de la cubierta de bosques tiene un efecto significativo en los caudales máximos, pero ya que el cambio en porcentaje para la categoría eventos “grandes” es menor que para los eventos “medios” y “pequeños”, parece confirmarse que el efecto de la cosecha es de mayor importancia para eventos de menor magnitud y, por lo tanto, con menores períodos de retorno. Los resultados muestran, además, que a pesar del desarrollo de la nueva plantación establecida el año 2000, los caudales máximos registrados en el sexto y octavo año después de la cosecha siguen siendo significativamente mayores que los del período de precosecha, y que no muestran un aumento importante seguido de una gradual disminución hacia los niveles de precosecha. No se nota un patrón consistente para ninguna de las categorías de tamaño de eventos de lluvia, y tampoco es posible apreciar, por ejemplo, un año particular del período de postcosecha donde todas las medianas de los caudales máximos hayan alcanzado un “máximo”. Las medianas de los caudales máximos para el año 2008 siguen siendo mayores que las de la condición de precosecha. Aun cuando la escorrentía anual ha iniciado el año 2006 una reducción hacia los niveles de precosecha (figura 1) y las escorrentías de verano han llegado a los niveles que la cuenca tenía en la condición previa a la cosecha, este no es aún el caso para los caudales máximos.

El análisis de los valores de los caudales máximos en los períodos de precosecha (1997 a 1999) y postcosecha (2000 a 2003) generados por los eventos de precipitación con lluvias sobre 100 mm (la sección superior de la categoría de eventos ‘grandes’ de lluvia), sirve para examinar en mayor detalle la hipótesis que el efecto amortiguador del bosque en los caudales máximos es menos prevalente en los eventos mayores. La tendencia mostrada en la figura

6 y la extrapolación de la relación hacia tormentas cada vez mayores parecen sugerir que a la escala de eventos extremos, los correspondientes valores de caudales máximos para las condiciones de pre y postcosecha no difieren considerablemente, tal como lo manifiestan Birkinshaw y Bathurst (2008). Este resultado parece consistente con las suposiciones relativas a caudales máximos y eventos extremos planteadas por Bathurst *et al.* (2010).

No es fácil interpretar los resultados del análisis Gumbel para definir los períodos de retorno de los caudales máximos medidos en La Reina, dado el corto registro de datos (cuadro 2 y figura 7). Los mayores caudales máximos instantáneos registrados durante el estudio en la estación fluviométrica de La Reina ocurrieron los años 2001 y 2002 con valores de 0,342 y 0,337 m³ s⁻¹ y períodos de retorno de 4,1 y 3,9 años, respectivamente. Para el año 2001, las precipitaciones anual y máxima en 24 horas corresponden, tanto para Isla Teja como para Remehue, a períodos de retorno del orden de dos años. Esto significa que el mayor caudal medido en La Reina ocurrió en un año que no fue particularmente lluvioso en la zona donde la cuenca está localizada. El año 2002, la precipitación anual y la máxima en 24 horas tienen períodos de retorno de 22 y 29 años en Isla Teja y de 12 y 15 años en Remehue, pero para este año que fue lluvioso el caudal máximo registrado en La Reina tuvo un período de retorno menor al medido el año 2001. Exceptuando a La Reina, los caudales máximos registrados el año 2001 en diversas cuencas cercanas al estudio tienen períodos de retorno entre uno y tres años, es decir, del mismo orden de magnitud que los períodos de retorno de la precipitación anual y máxima en 24 horas en Isla Teja y Remehue para ese mismo año. Para el año 2002, los períodos de retorno de los caudales máximos registrados en las mismas cuencas son superiores a los del año 2001, siendo nuevamente La Reina la excepción. Con los períodos de retorno asociados a los caudales máximos de los años 2001 y 2002 de las demás cuencas (cuadro 4), es posible asignar a los mayores caudales registrados en La Reina períodos de retorno en el rango de cuatro a 16 años (en promedio, del orden de 10 años). En estas circunstancias, los caudales máximos de las condiciones de pre y postcosecha para La Reina sólo serían diferentes para eventos con períodos de retorno inferiores a los 10 años. La tendencia mostrada en la figura 5 y este análisis de caudales máximos en la cuenca La Reina parecen sugerir que para eventos de 10 y más años de período de retorno, los caudales máximos para condiciones de pre y postcosecha no serían significativamente diferentes, lo que parece apoyar la hipótesis planteada por Bathurst *et al.* (2010), quienes concluyen que a medida que el tamaño de la tormenta aumenta, el efecto del uso del suelo se muestra menos importante. Sin embargo, es necesario resaltar que estos períodos de retorno fueron derivados por asociación con valores regionales más que por análisis estadísticos, y que se comparó La Reina con cuencas de superficie muy superior.

El aumento en los caudales máximos luego de la cosecha a tala rasa en La Reina en relación a la condición de precosecha y el hecho que el efecto se nota para tormentas con períodos de retorno menores a 10 años es concordante con lo que reportan, entre otros, Jones (2000), MacDonald y Stednick (2003), Andréassian (2004) y Grant *et al.* (2008). La duración del efecto luego de la cosecha y desarrollo del nuevo bosque concuerda también con lo expresado por Andréassian (2004).

CONCLUSIONES

Se registran aumentos significativos en las escorrentías anuales y de verano luego de cosechar a tala rasa la plantación que cubre poco más del 79 % de la superficie de la cuenca La Reina. A ocho años de la cosecha y con el desarrollo del nuevo bosque, estas escorrentías están retornando a los niveles de precosecha. Los caudales máximos también aumentaron luego de la operación forestal, sin embargo, el efecto parece notarse sólo en tormentas con períodos de retorno inferiores a 10 años. La tendencia mostrada para el caso de tormentas cada vez mayores parece sugerir que a la escala de eventos extremos, los valores de caudales máximos para las condiciones de pre y postcosecha no difieren considerablemente, resultado que parece consistente con las suposiciones relativas a caudales máximos y eventos extremos.

El comportamiento de los caudales a la cosecha a tala rasa coincide con lo que se ha reportado para cuencas de tamaño, magnitud de la intervención, tipo de clima y características del nuevo bosque similares a las condiciones encontradas en La Reina. Este trabajo es el primer estudio de este tipo en el país, y sería de gran importancia poder continuarla en el tiempo.

AGRADECIMIENTOS

El análisis de los datos y la preparación de este documento se realizaron en el marco del proyecto EPIC FORCE, financiado por la Comisión Europea como parte del 6° Programa Marco bajo el contrato INCO-CT2004-510739. Los autores agradecen también el apoyo de Forestal Degenfeld, de la Corporación Nacional Forestal (Oficina Provincia de Osorno), y de la Dirección General de Aguas.

REFERENCIAS

- Andréassian V. 2004. Water and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* 291: 1-27.
- Bari MA, N Smith, JK Ruprecht, BW Boyd. 1996. Changes in streamflow components following logging and regeneration in the southern forest of Western Australia. *Hydrological Processes* 10: 447-461.
- Bathurst JC, J Amezaga, F Cisneros, M Gaviño Novillo, A Iroumé, MA Lenzi, J Mintegui Aguirre, M Miranda, A Urciuolo. 2010. Forests and floods in Latin America: science, management, policy and the EPIC FORCE project. *Water International*
- Beets PN, GR Oliver. 2007. Water use by managed stands of *Pinus radiata*, indigenous podocarp/hardwood forest, and improved pasture in the central North Island of New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science* 37 (2): 306-323.
- Benyon R, J England, J Eastham, P Polglase, D White. 2007. Tree water use in forestry compared to other dry-land agricultural crops in the Victorian Context: Report prepared for the Department of Primary Industries Victoria to promote scientific knowledge in this area. 50 p. (ENSIS, Technical Report N° 159).
- Beschta RL, MR Pyles, AE Skaugset, CG Surfleet. 2000. Peak flow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. *Journal of Hydrology* 233: 102-120.
- Birkinshaw SJ, JC Bathurst. 2008. Model Analysis of Land-use Impact on Flood Response for the EPIC FORCE Focus Areas. INCO-CT2004-510739 Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt. 83 p. (Deliverable 14 Revised). <http://www.ceg.ncl.ac.uk/epicforce/deliverables.htm>
- Bosch JM, JD Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3-23.
- Brown AE, L Zhang, TA McMahon, AW Western, RA Vertessy. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology* 310: 28-61.
- Calder IR. 1992. The hydrological impact of land-use change. In: Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management, Natural Resources and Engineer Advisers Conference, Southampton, July 1992. Overseas Development Administration. p. 91-101.
- Calder IR. 2007. Forests and water-Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management* 251: 110-120.
- Cameron J. 2003. Victorian plantations and catchment water yield. Plantation Timber Association of Australia, Australian Paper Industry Council, Australian Forest Growers. 32 p. (PTAA Report N° 3).
- Cassie D, S Jolicœur, M Bouchard, E Poncet. 2002. Comparison of streamflow between pre and post timber harvesting in Catamaran Brook (Canada). *Journal of Hydrology* 258: 232-248.
- Cornish PM. 1993. The effects of logging and forest regeneration on water yields in a moist eucalypt forest in New South Wales, Australia. *Journal of Hydrology* 150: 301-322.
- David JS, MO Henriques, TS David, J Tomé, DC Ledger. 1994. Clearcutting effects on streamflow in coppiced *Eucalyptus globulus* stands in Portugal. *Journal of Hydrology* 162: 143-154.
- Fahey B. 1994. The effect of plantation forestry on water yield in New Zealand. In: NZ plantation forestry - a sustainable resource. Proceedings of the NZ Institute of Forestry Inc. Conference 1994. NZ Institute of Forestry, Christchurch. p. 18-23.
- Fernández C, JA Vega, JM Gras, T Fonturbel. 2006. Changes in water yield after a sequence of perturbations and forest

- management practices in an *Eucalyptus globulus* Labill. watershed in Northern Spain. *Forest Ecology and Management* 234: 275-281.
- Grant GE, SL Lewis, FJ Swanson, JH Cissel, JJ McDonnell. 2008. Effects of forest practices on peak flows and consequent channel response: a state-of-science report for western Oregon and Washington. USDA For. Serv. 76 p. (Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-760).
- Gush MB, DF Scott, GPW Jewitt, RE Schulze, LA Hallows, AHM Gorgens. 2002. A new approach to modelling streamflow reductions resulting from commercial afforestation in South Africa. *Southern African Forestry Journal* 196: 27-36.
- Harr R, RL Fredriksen, J Rothacher. 1979. Changes in streamflow following timber harvest in southwestern Oregon. USDA For. Serv. 22 p. (Gen. Tech. Rep. PNW-249).
- Hibbert AR. 1967. Forest treatment effects on water yield. In: Sopper, W.E., Lull, H.W. eds. *Symposium of Forest Hydrology*. Pergamon Press, New York. p. 527-543.
- Hornbeck JW, CW Martin, C Eager. 1997. Summary of water yield experiments at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 2043-2052.
- Iroumé A, A Huber, K Schulz. 2005. Summer flows in experimental catchments with different forest covers, Chile. *Journal of Hydrology* 300 (1-4): 300-313.
- Iroumé A, O Mayen, A Huber. 2006. Runoff and peak flow responses to timber harvest and forest age in southern Chile. *Hydrological Processes* 20: 37-50. DOI: 10.1002/hyp.5897
- Jones JA, GE Grant. 1996. Peak flow response to clearcutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research* 32 (4): 959-974.
- Jones JA. 2000. Hydrological processes and peak discharge response to forest removal, regrowth, and roads in ten small experimental basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research* 36 (9): 2621-2642.
- Jones JA, FJ Swanson. 2001. Hydrological inferences from comparisons among small basin experiments. *Hydrological Processes* 15, 2363-2366.
- Keenan RJ, M Parsons, E O'Loughlin, A Gerrand, S Beavis, D Gunawardana, M Gavran, A Bugg. 2004. Plantations and water use: A review. Australian Government, Forest and Wood Products Research and Development Corporation. 81 p.
- Keppeler ET. 1998. The summer flow and water yield response to timber harvest. USDA For. Serv. p. 35-43 (Gen. Tech. Rep. PSW-168).
- La Marche JL, DP Lettenmaier. 2001. Effects of forest roads on flood flows in the Deschutes river, Washington. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 115-134.
- Lane PNJ, SM Mackay. 2001. Streamflow response of mixed-species eucalypt forests to patch cutting and thinning treatments. *Forest Ecology and Management* 143: 131-142.
- MacDonald LH, JD Stednick. 2003. *Forests and Water: A State-of-the-Art Review for Colorado*. Colorado State University. 65 p. (CWRRI Completion Report N° 196).
- Rothacher J. 1970. Increases in water yield following clear-cut logging in the Pacific Northwest. *Water Resources Research* 6: 653-658.
- Ruprecht JK, GL Stoneman. 1993. Water yield issues in the jarrah forest of south-western Australia. *Journal of Hydrology* 150: 369-391.
- Shaw EM. 1994. *Hydrology in Practice*. Third Edition, Chapman&Hall. London. 569 p.
- Smith PJT. 1987. Variation of water yield from catchments under grass and exotic forest, east Otago. *Journal of Hydrology (New Zealand)* 26: 175-184.
- Stednick JD. 1996. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology* 176: 79-95.
- Sun G, SG McNulty, J Lu, DM Amayta, Y Liang, RK Kolka. 2005. Regional annual water yield from forest lands and its response to potential deforestation across the southeastern United States. *Journal of Hydrology* 308: 258-268.
- Sun G, G Zhou, Z Zhang, X Wei, SG McNulty, JM Vose. 2006. Potential water yield reduction due to forestation across China. *Journal of Hydrology* 328: 548-558.
- Swank WT, JM Vose, KJ Elliott. 2001. Long-term hydrologic and water quality responses following commercial clearcutting of mixed hardwoods on a southern Appalachian catchment. *Forest Ecology and Management* 143: 163-178.
- Tremblay Y, AN Rousseau, AP Plamondon, D Lévesque, S Jutras. 2008. Rainfall peak flow response to clearcutting 50 % of three small watersheds in a boreal forest, Montmorency Forest, Québec. *Journal of Hydrology* 352: 67-76.
- Verry ES. 1986. Forest harvesting and water: the Lake States experience. *Water Resources Bulletin* 22 (6): 1039-1047.
- Vertessy R, L Zhang, W Dawes, 2002. Plantations, river flow and river salinity. In Gerrand, A. ed. *Proceeding of the Prospects for Australian Forest Plantation conference*, 20-21 August 2002 Canberra, Australia, Bureau of Rural Sciences, Australia. p. 29-40.
- Whitehead PG, M Robinson. 1993. Experimental basin studies-an international and historical perspective of forest impacts. *Journal of Hydrology* 145: 217-230.
- Zhang L, WR Dawes, GR Walker. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 14 (3): 701-708.

Recibido: 01.09.09
Aceptado: 23.12.09