

EVALUACIÓN DE LOS VOLÚMENES Y DE LOS EFECTOS HIDRO-MORFOLÓGICOS DEL MATERIAL LEÑOSO EN DOS TORRENTES ANDINOS (CHILE)

A. Andreoli

Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente
Facultad de Ciencias Forestales
Universidad de Concepción
Victoria 631, Casilla 160C Concepción, Chile
aandreoli@udec.cl

F. Comiti, L. Mao

Departamento Territorio e Sistemi Agroforestali
Università di Padova, Agripolis
Viale dell'Università No. 16, 35020 Legnaro (PD), Italia

A. Iroumé

Instituto de Manejo Forestal
Universidad Austral de Chile
Casilla 567, Valdivia, Chile

M.A. Lenzi

Departamento Territorio e Sistemi Agroforestali
Università di Padova, Agripolis
Viale dell'Università No. 16, 35020 Legnaro (PD), Italia

Resumen: Este estudio reporta las cantidades de material leñoso de gran tamaño (*large woody debris* o LWD) y los efectos asociados sobre la morfología del cauce y la hidráulica del flujo en dos cuencas de montaña de la zona "templada-cálida con lluvias invernales" de la Cordillera de los Andes, en Chile. Las cuencas analizadas del río Toro y del torrente Tres Arroyos (área de drenaje de 9 y de 11 km², respectivamente) se ubican en la Región de La Araucanía, Chile, y se caracterizan por una cobertura forestal de bosques nativos de *Nothofagus* y *Araucaria*. Cantidad, características y dimensiones de los residuos leñosos (> 10 cm de diámetro, > 1 m de largo) fueron examinados en los canales, así como sus efectos sobre la morfología del cauce, sobre su hidráulica y sobre el almacenamiento de sedimento; se realizó además, un monitoreo del desplazamiento de los troncos durante un periodo de un año para determinar el grado de movilidad de las piezas leñosas. Los resultados demuestran que existen grandes diferencias en la abundancia de LWD en los cauces de las dos cuencas estudiadas, posiblemente debidas a las diferentes alteraciones naturales que ocurrieron en las laderas de las cuencas. En el torrente Tres Arroyos se encontraron volúmenes medios de 700 m³ha⁻¹, mientras que en el río Toro los valores registrados son solamente de 117 m³ de residuos leñosos por hectárea de superficie del cauce.

Esta diferencia se puede justificar con el hecho que la primera cuenca fue afectada por incendios entre los años 1930 y 1940 seguidos por deslizamientos y flujos de detritos, mientras que la segunda, a pesar que sufrió un incendio que quemó toda la superficie forestal de la cuenca, todavía no presenta grandes deslizamientos y aportes de detritos leñosos al cauce, probablemente a causa del corto plazo entre el incendio (2002) y la fecha de las mediciones (Enero 2006). La consecuencia de estas diferencias de volúmenes se refleja en la morfología de los cauces: el Tres Arroyos presenta grandes acumulaciones y altos *log-steps* que entregan al canal un macro-perfil a escalones. Se estimó que las acumulaciones de LWD en el tramo estudiado del Tres Arroyos disipan el 27 % de la energía potencial total de la corriente de agua, y que existen 2000 m³ de sedimentos depositados en el cauce principal aguas arriba de acumulaciones de LWD, que corresponden aproximadamente al 100 % del aporte anual total de sedimentos de la cuenca. Por el contrario en el río Toro la influencia morfológica de los LWD es muy limitada por la total ausencia de *log-steps* o *valley-jams*.

INTRODUCCIÓN

La presencia de troncos y fragmentos leñosos en los cursos de agua constituyen un aspecto relevante ya que determina condiciones tanto ecológicas como geomorfológicas, hidráulicas y de transporte de sedimentos, especialmente en los cauces de montaña. La denominación más común utilizada para describir la presencia de estos elementos en el cauce es la de *Large Woody Debris* (LWD), que corresponde al material leñoso muerto (troncos, ramas, raíces) con un diámetro medio mayor a 10 cm y longitud superior a 1 m. Los LWD se encuentran como elementos individuales o formando acumulaciones (*log-jams*). Estas acumulaciones pueden generar estructuras tales como escalones de troncos (*log-steps*) o grandes obstrucciones en el valle aluvional (*valley-jams*). La cantidad y tipo de material leñoso existente en el cauce principal dependen de las características del bosque que lo alimenta (es decir, densidad, edad, estado fisiológico, etc.) y de los procesos que regulan el reclutamiento de detritos (Comiti *et al.*, 2006; 2008). Los factores que directamente o indirectamente aportan material leñoso al cauce cambian según el ámbito climático-geográfico analizado, pero en general incluyen procesos biológicos (insectos y enfermedades fúngicas que causan la muerte de plantas adyacentes al cauce), no biológicos (incendios, coladas detríticas, desprendimientos, viento, nieve) y acciones antrópicas. Por lo tanto, las principales variables que influyen sobre el origen y la cantidad de material leñoso en el interior del cauce pueden ser de naturaleza espacial o temporal.

Los LWD que yacen dentro de los canales tienen fuertes consecuencias sobre la hidráulica de la corriente, la morfología, el transporte de sedimento y la ecología acuática (Gurnell *et al.*, 2002; Montgomery *et al.*, 2003; Montgomery y Piegay, 2003). En particular, la morfología del canal en cuencas forestadas por bosques nativos es controlada en gran parte por LWD, dado la abundancia de grandes elementos capaces de formar estructuras estables en el canal tales como escalones de troncos, grandes acumulaciones de valle y atascos de desviación del flujo (Abbe y Montgomery, 2003).

Varios autores (Swanson *et al.*, 1976; Bilby, 1979; Keller y Swanson, 1979; Keller y Tally, 1979; Faustini y Jones, 2003) observaron una fuerte, si bien variable, disipación de energía potencial (10-80 %, pero hasta 100 %) ejercida por *log-steps* en diversas regiones de los EUA.

En canales de cabecera de cuencas en Alaska, Gomi *et al.* (2003) reportaron hasta 35 *steps* por

kilómetro de cauce formado por material leñoso, los que corresponden en promedio al 51 % del número total de *steps*. Un porcentaje similar (el 45 %) fue encontrado por Curran y Wohl (2003) en cuencas de menos de 10 km² en Cascade Range (Washington, EUA). Previamente, el porcentaje de *steps* formados por LWD había sido relacionada por Wohl *et al.* (1997) al tamaño de la cuenca/canal en flujos de Montana (EUA), con valores entre el 50 y el 10 %.

Por canales de segundo-cuarto orden en los Dolomitas italianas, Comiti *et al.* (2006) encontraron un número limitado de *log-steps* (13-35 por kilómetro), que representan solamente una pequeña fracción (~10 %) del número total de *steps*. Frecuencias de obstrucciones de LWD comprendida entre el valor de 1 por km (cuarto orden) y 100 por km (segundo orden) son reportadas por ríos que fluyen en áreas casi-naturales de Europa Central (Kaczka, 2003).

La Cordillera de Los Andes meridional representa una localización ideal para estudiar los detritos leñosos en ríos que drenan cuencas forestadas, debido a la posibilidad de encontrar cuencas caracterizadas sea por bosques nativos, así como por cuencas fuertemente manejadas bajo el perfil de la utilización forestal. Otro aspecto importante es la ocurrencia de incendios forestales como elemento natural en la dinámica de regeneración del bosque (González *et al.*, 2005).

Los sitios investigados en este estudio son dos cuencas ubicadas en el norte de la Región de La Araucanía, en la provincia de Malleco, en áreas protegidas por reservas nacionales (la Reserva Nacional Malalcahuello, en donde se sitúa la cuenca del Tres Arroyos y la Reserva Nacional Malleco donde se encuentra la cuenca del río Toro).

Este estudio se propone caracterizar los detritos leñosos presentes en el curso principal de dos torrentes Andinos ubicados en la novena región de la Araucanía, en Chile, y evaluar sus efectos sobre la morfología del cauce y sobre los procesos hidráulicos asociados.

ÁREA DE ESTUDIO

La localización de las dos cuencas investigadas se muestra en la Figura 1, mientras que las características fisiográficas principales son resumidas en la Tabla 1. La geología está fuertemente influenciada por la presencia de volcanes, dado que la cuenca del estero Tres arroyos yace en la ladera sur del Volcán Lonquimay (2865 m s.n.m.), y la cuenca del río Toro se ubica en la vertiente noroeste del Volcán Tolhuaca (2806 m s.n.m.).

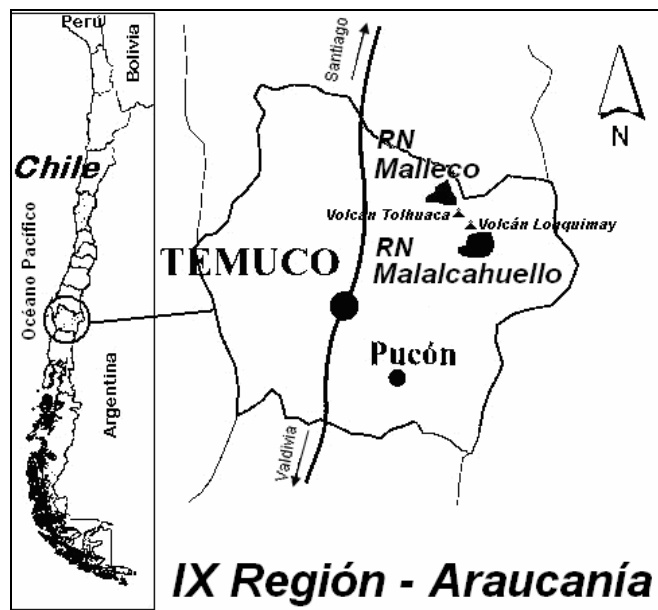


Figura 1. Localización geográfica de las dos cuencas. El Tres Arroyos está ubicado en la Reserva Nacional Malalcahuello, mientras el río Toro se encuentra en la Reserva Nacional Malleco

	Unidad	Tres Arroyos	Toro
Área	km ²	9,1	11,1
Altura media	m s.n.m.	1478	1250
Altura mínima	m s.n.m.	1000	750
Altura máxima	m s.n.m.	1850	1750
Pendiente media	%	43	20
Cubierta forestal	%	74	98
Tipología forestal	-	Bosques nativos	Bosques nativos
Perturbación forestal	-	Incendios (1930-1940)	Incendios (2002)
Precipitación anual	mm	2217	2480
Clima	-	Templado-cálido con lluvias invernales	Templado-cálido con lluvias invernales
Geología	-	Volcánica/piroclástica	Volcánica/piroclástica

Tabla 1. Características principales de las cuencas

Además de influir en la geología, los volcanes, junto con los relámpagos, son factores que ceban el fuego, la modificación más importante que contribuye a formar el paisaje forestal de Araucarias y *Nothofagus* en esta región (Burns, 1993; González *et al.*, 2005). Durante la estación del fuego 2001-02, incendios catastróficos quemaron casi 20000 hectáreas de bosques templados en la Región andina de La Araucanía de Chile. Éstos fueron interpretados inicialmente como una novedad ecológica, pero estudios recientes (González *et al.*, 2005) han determinado que estos grandes incendios forman parte del régimen histórico del fuego que ha formado este paisaje boscoso.

Los bosques nativos en ambas cuencas corres-

ponden a dos tipos forestales (Donoso, 1993): el bosque de araucaria (*Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch) y el bosque de roble-raulí-coigüe (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst., *Nothofagus alpina* (P. et E.) Oerst. y *Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst., respectivamente). Las araucarias están presentes solamente por encima de una elevación de 1200-1300 m, mientras que la parte más baja está caracterizada por el tipo *Nothofagus* (DGA, 1998). El sotobosque de esta última formación está totalmente dominado por quila y coligüe (*Chusquea spp.*), especies de bambúes autóctonos muy invasoras.

Bajo el perfil climático, según la clasificación de Fuenzalida (1965), el área presenta un clima "Templado-cálido con lluvias invernales". La

precipitación media anual de la región sobrepasa los 2000 mm. El mes más lluvioso es junio, mientras que el más seco es enero. Aunque se presentan nevadas en invierno, el régimen hidrológico es dominado por la precipitación. La temperatura media anual es alrededor de 8,5°C; el mes más cálido es enero con una temperatura media de 14°C mientras que el mes más frío es julio con 3°C, de promedio.

El 72% de la superficie de la cuenca del Tres Arroyos está cubierta por bosques (Figura 2): el 64% está representada por bosques nativos que tienen árboles que alcanzan hasta 40-50 m de altura y 1-2 m de diámetro, el 8% por bosques con árboles de menor tamaño y edad compuestos por coníferas de menos de 40 años plantadas para reducir la erosión de suelo, después de los incendios que ocurrieron durante la primera mitad del siglo pasado. El 6% de la cuenca está caracterizada por cenizas volcánicas arenosas sin vegetación (en la divisoria de la cuenca) y el 22% por cobertura herbáceo-arbustiva (cerca del límite de los árboles). El tiempo medio de concentración de la cuenca del Tres Arroyos ha sido estimado en 1,1 horas (DGA, 2000). El canal principal (tercer orden), desde la fuente hasta la desembocadura, tiene casi 5 kilómetros de longitud con un gradiente promedio del 18% (Tabla 2). Sin embargo, el gradiente está localmente controlado por deslizamientos, grandes *valley-jams* y altos *log-steps* que imparten al perfil longitudinal una figura a escalones a gran escala. Según la clasificación de Montgomery y Buffington (1997), la morfología de los tramos abarca desde rápidas (*cascade*) y escalón-remanso (*step-pool*) hasta los

tipos rápido-remanso (*riffle-pool*), pero con un alto nivel de morfologías forzadas asociadas a la presencia de LWD. El canal principal está bien confinado por laderas rocosas escarpadas, con un valle aluvial activo estrecho que se ensancha en la sección más baja del tramo examinado. Las terrazas, cuya formación está probablemente asociada a los grandes *valley-jams* (tal como lo reporta para el Queets river, Washington, Abbe y Montgomery, 2003) son evidentes a lo largo del canal principal. La cuenca del río Toro se encuentra forestada en un 98% (tabla 1), con el 75% representado por bosques nativos que tienen árboles que alcanzan hasta 40-50 m de alto y 1-2 m de diámetro, y el 19% por renovales de bosque nativo. El área restante se caracteriza por cobertura herbáceo-arbustivas (cerca del límite de los árboles, el 5%) y por afloramientos rocosos (menos del 1%). Los enormes incendios que ocurrieron en el 2002 quemaron casi toda la superficie vegetada (el 98%) con diferente grado de daño (desde daño ligero hasta daño grave como reportado en Figura 2). En el momento de las mediciones en el terreno se observó una fuerte recolonización por parte de *Chasquea spp.*

El canal principal del río Toro (tercer orden) tiene 7 kilómetros de largo desde la fuente hasta la desembocadura, con un gradiente promedio del 7% (Tabla 2). La morfología de los tramos cubre la gama desde lecho plano (*plane-bed*) hasta escalón-remanso (*step-pool*), sin evidencia de morfologías forzadas asociadas a los LWD y sin presencia de flujos de detritos. El canal está bien confinado dentro de laderas rocosas escarpadas, y presenta un valle aluvial activo muy estrecho.

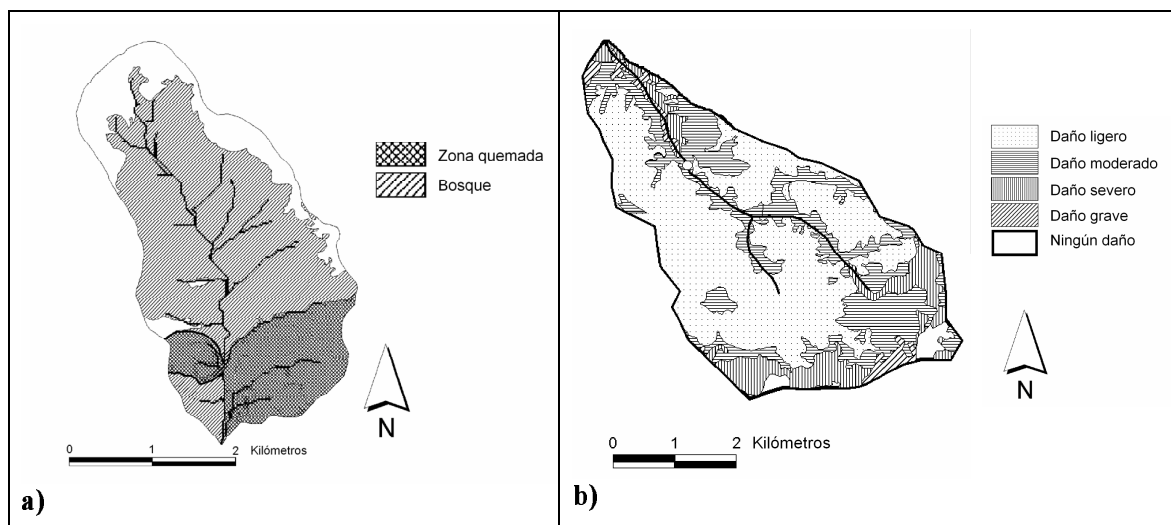


Figura 2. Mapas de la cubierta vegetal de las cuencas de estudio: Tres Arroyos (a) y río Toro (b). La cuenca del río Toro estaba totalmente cubierta por bosques, el nivel del daño se refiere al incendio del año 2002

	Unidad	Tres Arroyos	Toro
Longitud del cauce principal	km	4,89	7
Longitud del cauce investigado	km	1,54	2,17
Pendiente media del canal investigado	(m/m)	0,08	0,05
Orden del cauce	-	3	3
Morfología del canal	-	<i>Step-pool/Cascade</i>	<i>Plane bed/Step-pool</i>
Ancho medio de cauce lleno	m	7,8	11,91
Nivel de cauce lleno	m	0,45	0,8
Caudal máximo registrado*	m ³ s ⁻¹	14	-

Tabla 2. Características principales de los canales estudiados. *El valor se refiere a la estación que controla la parte superior de la cuenca de 5,9 km². El orden del cauce se determinó por un mapa escala 1:50.000

MÉTODOS DE ESTUDIO

Los estudios de los cauces se efectuaron entre los meses de marzo y diciembre de 2005 en el Tres Arroyos (TA) y en enero 2006 en el río Toro (TO). En el estudio del perfil longitudinal y de las secciones transversales se utilizó un distanciómetro láser con inclinómetro. Basándose en la uniformidad de la pendiente, en el ancho del canal o en la abundancia de detritos leñosos, se identificaron diecisiete tramos en cada canal. En cada tramo se midieron las siguientes características: pendiente media del cauce, ancho medio de cauce lleno (o *bankfull*, B_{BF}) y ancho medio del corredor fluvial (B_{FP}), profundidad media del flujo correspondiente al caudal *bankfull* (H_{BF}), número de escalones (*steps*) y número de escalones de troncos (*log-steps*) más altos de H_{BF} , número de rocas más altas y largas que el tirante de cauce lleno. El nivel de *bankfull* se estimó en campo considerando la altura del límite más bajo de vegetación, cambios en la granulometría del sedimento en las barras laterales, y residuo orgánico depositado por el flujo (Montgomery y Buffington 1997). La profundidad y el ancho del nivel al *bankfull* y del corredor fluvial se determinaron utilizando 3 secciones transversales medidas en cada tramo del cauce. Las 3 secciones, medidas en posiciones uniformemente distribuidas a lo largo del tramo, fueron seleccionadas por ser representativas del dicho tramo, pero evitando pozas, estrechamientos y saltos. Se determinó además el área de la cuenca drenada en cada tramo usando un modelo digital de elevación del terreno, en un sistema de información geográfico (SIG).

Para caracterizar los detritos leñosos, se midió el diámetro medio D_{log} y la longitud L_{log} de cada elemento más grande de 10 cm de diámetro y de 1 m de longitud, en el cauce activo y en el área de inundación adyacente, con una forcípula y una cinta métrica, respectivamente. El nivel de precisión adoptado fue de ~ 1 cm

para el diámetro y de ~ 5 cm para el largo de las piezas.

Donde el área de inundación estaba ausente -como en muchos tramos confinados- se estimó un nivel de flujo máximo que sirvió como límite de elevación superior para que los detritos leñosos fueran incluidos en los registros de cada ubicación. Con este método, se registraron más de 3300 elementos en los segmentos estudiados de los dos cauces.

Se registraron, además, datos adicionales para cada elemento leñoso, tal como la tipología (tronco, raíz, tronco con raíces), especie (*Nothofagus/Araucaria/coníferas*), orientación al flujo (paralelo, ortogonal, oblicuo), estado de descomposición (bajo, intermedio y alto, basado en una estimación visual), mecanismo de distribución (erosión de orilla, deslizamientos de tierra, mortalidad natural, transporte desde aguas arriba) y posición en el canal (en una acumulación, en el cauce, en la línea de cauce lleno, suspendido sobre el cauce, en las márgenes del canal).

De cada acumulación (de al menos 2 elementos) se midieron las dimensiones geométricas (longitud, ancho y altura) y las dimensiones de cada pieza que la formaban.

Para los *log-steps*, se midieron altura de caída y profundidad de fondo de la poza formada por el agua. Los elementos de LWD encontrados a una elevación coincidente con el caudal del *bankfull*, se agruparon en un conjunto separado. Los detritos leñosos que cruzan el cauce, correspondientes a una elevación mayor al *bankfull*, fueron clasificados como *channel-bridging*, y las piezas *channel margins* fueron definidas como aquellas ubicadas sobre el área adyacente y sobre el nivel de *bankfull*, pero sujetas a inundación durante eventos de flujo de baja frecuencia. En el caso de troncos largos extendidos a lo ancho de diferentes porciones del cauce, se asignó su ubicación prevaleciente. Para elementos ubicados parcialmente sobre el nivel máximo de inundación no se redujo su volumen total al volumen de tronco

realmente ubicado dentro del flujo, registrándose en estos casos el volumen y el largo total de las piezas. Este procedimiento puede generar una pequeña sobrestimación del volumen total de los LWD.

El volumen de cada elemento leñoso fue calculado a partir de su diámetro medio D_{log} y longitud L_{log} , asumiendo una forma sólida cilíndrica. El volumen de las raíces fue aproximado a la sección del tallo -también como un cilindro- desatendiendo la masa de raíces realmente presentes.

Se calculó posteriormente la densidad espacial de LWD -en términos de volumen y número de elementos- en el cauce activo y en el corredor fluvial. Para encontrar correlaciones entre las propiedades del canal y las variables de los detritos leñosos, se utilizaron los valores transformados ($\log+1$) en el programa STATISTICA 6.1.

Entre marzo y abril de 2005, en el Tres Arroyos, fueron aplicadas 500 etiquetas de metal en 322 elementos leñosos de diferentes tamaños y localización. Luego del periodo invernal del año 2005, estos 322 elementos fueron nuevamente medidos para estudiar su movilidad, utilizando algunas estacas como puntos de referencia. Las etiquetas de metal numeradas fueron colocadas progresivamente desde aguas abajo, hacia aguas arriba en los elementos leñosos elegidos en modo aleatorio, clavando desde 1 hasta 3 etiquetas en función de la longitud de los troncos (aproximadamente 1 etiqueta en elementos de 1-3 metros de largo, 2 etiquetas en elementos de 3-6 m, 3 etiquetas en elementos más largo de 6 m). Para asignar la posición de las piezas etiquetadas, se midieron la distancia y la dirección respec-

to a una estaca de referencia, la posición en el canal (izquierdo, derecho o central) y el grado de obstrucción del mismo. La disponibilidad de una serie temporal de caudales y de tasas de sedimento puede permitir (después de repetidas mediciones) relacionar la dislocación de los elementos leñosos a las características de las crecidas. Estos datos son disponibles gracias al monitoreo de la cuenca mediante una estación fluviométrica localizada a una cota aproximada de 1095 m s.n.m., que corresponde a una sección natural del estero Tres Arroyos. La sección, instrumentada desde el 1997, cuenta con dos reglas limnimétricas y con un sensor de presión conectado a un datalogger para monitorear en forma continua el nivel de aguas (Iroumé, 1997, 2003). Relaciones entre la concentración de sedimentos en suspensión (muestras obtenidas en forma manual), el arrastre de fondo (muestras obtenidas mediante un muestrador manual del tipo *Helley-Smith*) y el caudal líquido fueron elaboradas para estimar el transporte sólido (Iroumé, 2003) y el inicio del transporte de sedimentos (Mao *et al.*, 2008).

RESULTADOS

La Figura 3 muestra la cantidad media de LWD en términos de densidad espacial numérica y volumétrica en las dos cuencas del estudio, en el canal activo (es decir dentro del ancho del cauce lleno) y en el entero corredor fluvial. Los datos que se refieren al corredor fluvial deben considerarse como indicativos, porque no fue siempre factible medir todos los elementos de LWD sobre el valle aluvial, debido a la densa vegetación que crece en las cuencas araucanas.

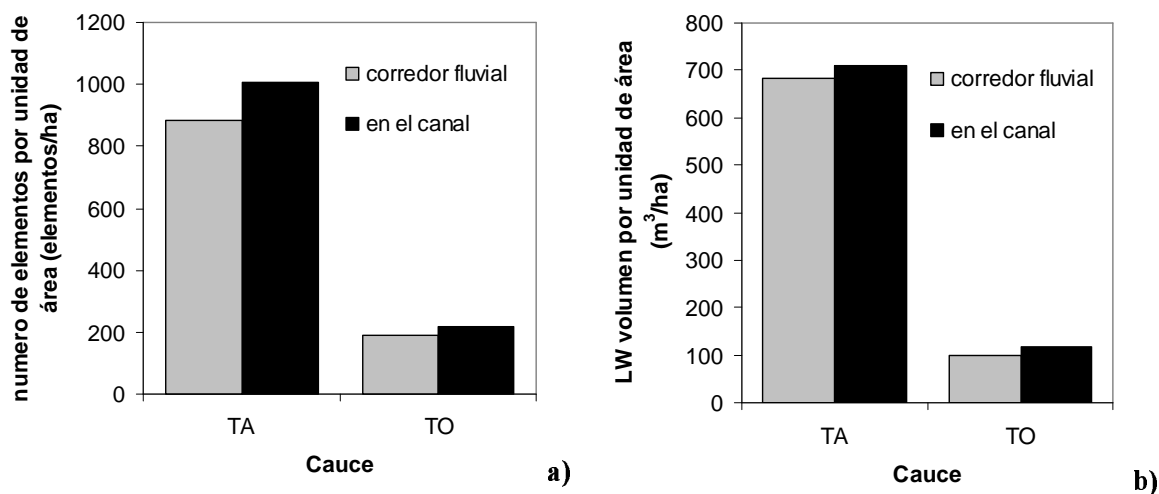


Figura 3. Cantidades de LWD en términos de número total de elementos (a) y volumen total (b) en el canal activo (es decir dentro de la anchura de cauce lleno) y en el valle fluvial de las dos cuencas del estudio (TA, Tres Arroyos; TO, río Toro)

Los valores medios han sido obtenidos dividiendo el número y el volumen totales de los elementos leñosos encontrados, por el área total de referencia, es decir área de cauce lleno del canal o área del corredor fluvial (en hectáreas), de los tramos del canal examinado.

El río Toro tiene la cantidad más baja de LWD en términos de número de elementos y de volumen (215 elementos/ha y 117 m³/ha, respectivamente). La Figura 3 también muestra que la densidad espacial de LWD es generalmente más baja en el corredor-valle fluvial que en el canal activo, aunque esta diferencia es pequeña.

Las piezas de LWD que yacen en el valle aluvial representan casi la mitad del número total de elementos en el Tres Arroyos, mientras que en el río Toro constituyen una fracción menor (cerca del 20%).

El hallazgo de material leñoso a la elevación correspondiente al cauce lleno es algo común en el Tres Arroyos (el 22%), pero no tanto en el río Toro (<1%). Los elementos que ocupan todo el canal (*channel-spanning*) son menos del 2% en ambos ríos. Igual proporción es representada para los *log-steps* en el Tres Arroyos, mientras que en el río Toro, no se encontró algún *log-steps*.

Para facilitar una comparación más significativa entre los cauces analizados, todos los resultados que se presentan a continuación, salvo que se especifique lo contrario, consideran sólo a los elementos de LWD encontrados en el canal activo, excluyendo los de las márgenes.

En el Tres Arroyos y en el río Toro, una fracción muy baja del material leñoso deriva de los árboles de *Araucaria* (el 6 y el 1%, respectivamente); la gran mayoría son de *Nothofagus*.

En ambos ríos, el 68% de todos los LWD forma acumulaciones (*log-jams*) en los cauces. La gran mayoría de las piezas parecen haber sido transportadas (el 68% en el río Toro y el 88% en el Tres Arroyos), aún cuando el recorrido real no puede ser determinado en forma precisa, y estas piezas pudieron haber venido de localizaciones aguas arriba del mismo tramo, mientras que muchos pedazos clasificados como transportado en el Tres Arroyos pueden derivar de flujo de detritos, más que del transporte fluvial (Andreoli *et al.*, 2007). Solamente un pequeño porcentaje del LWD medido tiene todavía raíces (2,1 y 4 para TO y TA, respectivamente).

La mortalidad natural, que incluye los árboles muertos que resbalan abajo de cuevas adyacentes, es más alta en el Toro (el 27%), mientras que en el Tres Arroyos representa solo un 10%. El material leñoso encontrado al pie de deslizamientos dentro del canal representa el 5% de los elementos en el río Toro, y el 1% en el Tres Arroyos.

La orientación de las piezas respecto al flujo está bien distribuida entre las tres clases en el Tres Arroyos (es decir aproximadamente un tercio en cada clase); en cambio, el río Toro presenta un número más elevado de elementos ortogonales (el 51%).

Algunos parámetros característicos de las dimensiones de los elementos leñosos (es decir diámetro, longitud y volumen) se resumen en la Tabla 3. Además, la Figura 4(a) y (b) ilustra la distribución de frecuencia del diámetro de los elementos (truncado a 1 m) y sus longitud (truncados a 15 m), respectivamente.

	TA		TO	
	Canal activo	Corredor fluvial	Canal activo	Corredor fluvial
Diámetro máximo (m)	1,2	2,2	1,2	1,2
Diámetro medio (m)	0,50	0,41	0,33	0,33
D_{84}	0,55	0,60	0,50	0,5
D_{50}	0,30	0,35	0,30	0,29
D_{16}	0,20	0,20	0,20	0,15
Longitud máxima (m)	25,7	26,0	15,0	15,0
Longitud media (m)	3,0	3,2	3,6	3,6
L_{84}	5,0	4,9	4,0	4,0
L_{50}	2,2	2,5	2,2	2,2
L_{16}	1,2	1,2	1,5	1,4
Volumen máximo (m ³)	24,86	36,85	12,43	12,43
Volumen medio (m ³)	0,70	0,77	0,56	0,53
Longitud/Ancho de cauce lleno	0,40 (0,35)	-	0,30 (0,22)	-
Diámetro/profundidad de cauce lleno	0,95 (0,46)	-	0,41 (0,23)	-

Tabla 3. Resumen de las dimensiones principales de los detritos leñosos. Para las dimensiones relativas, se reportan los valores medios y la desviación estándar (en paréntesis)

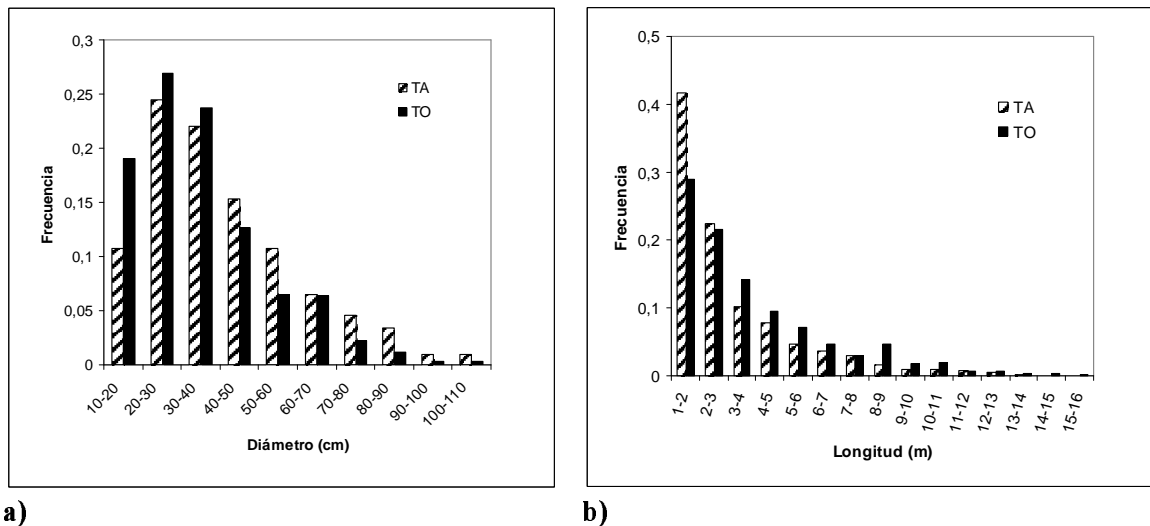


Figura 4. Distribución de frecuencia del diámetro (a) y de la longitud (b) de los elementos leñosos en los dos canales del estudio. LWD fuera del canal no son incluidos

En el Tres Arroyos, piezas con diámetro mayor de 50 cm (es decir aproximadamente la profundidad de cauce lleno) son relativamente comunes, mientras que en el río Toro son más comunes elementos con diámetro inferior a la profundidad media de cauce lleno. En ambos cauces, la mejor distribución de frecuencia (estadísticamente no significativa, coeficiente D de Kolmogorov-Smirnov) de los diámetros y la longitud de los elementos es de tipo logarítmico normal (Figura 4). En el Tres Arroyos, la longitud media de los elementos clasificados como *log-steps* corresponde al 87 % de la distribución acumulada de la longitud, mientras que el diámetro medio de los *log-steps* corresponde al 59 % de la distribución acumulada del diámetro. En el río Toro no se encontró ningún *log-step*.

En términos de relación entre las dimensiones de los elementos y las características geométricas del canal en los tramos (es decir, ancho de cauce lleno para la longitud de las piezas y profundidad de cauce lleno para el diámetro de los elementos; Braudrick y Grant, 2001), estas resultan estadísticamente diferentes (Tabla 3), al comparar entre los dos cauces, según el cociente entre longitud de las piezas y ancho del canal (test ANOVA y t a una vía, $p < 0,05$). Basándose en el cociente entre el diámetro de las piezas y la profundidad del canal, el Tres Arroyos presenta elementos significativamente más grandes respecto al río Toro (t -test, $p < 0,05$).

Las dimensiones de las acumulaciones se presentan en la Tabla 4. El número de elementos que forman cada *jam* parece ser relativamente similar en las dos cuencas (diferencias no significativas, test ANOVA a una vía, $p > 0,10$), pero

el Tres Arroyos presenta una densidad de *jams* por kilómetro, que es más del doble de aquella del río Toro.

Para el Tres Arroyos la pérdida de la elevación asociada a los *log-steps* y a los *valley-jams* (el conjunto de estas dos estructuras naturales de aquí en adelante serán referidas como LW dams) se calculó como la suma de todos los desniveles debidos a estas estructuras, y este valor fue entonces dividido por la pérdida total de la elevación en el segmento examinado. Los resultados se presentan en la Tabla 5, donde el río Toro no ha sido incluido porque en él no se encontró ningún LW dams a lo largo del segmento investigado. En el Tres Arroyos se observaron cinco grandes *valley-jams* intactos que se extendían a través del canal y las márgenes, y también siete que se encontraron derrumbados al momento del estudio. El más grande de estos se estimó tener 3,5 m de alto, 22 m de ancho y un depósito de aproximadamente 1.700 m³ de sedimento, y había causado el ensanchamiento del lecho del canal hasta 60 m aguas arriba (Andreoli *et al.*, 2007).

En el Tres Arroyos, el 27 % de la energía potencial total se disipa localmente por los LW dams. En total, el 20 % de todos los *steps* (es decir escalones más grandes que la profundidad de cauce lleno media en cada tramo) están representados por los LW dams. En promedio, los *valley-jams* son más altos que los *log-steps*. Aguas arriba de los LW dams, se forma un depósito de sedimentos y la pendiente del cauce es más baja que el promedio en el canal. Una cuña de sedimento depositado se puede atribuir

	TA	TO
Número de <i>jams</i> por km	51	19
Número de elementos	15 (119 %)	12 (87 %)
Volumen de los <i>jams</i> (m ³)	9,0 (119 %)	6,5 (81 %)
Diámetro de los elementos (m)	0,40 (23 %)	0,33 (55 %)
Longitud de los elementos (m)	3,0 (35 %)	3,6 (71 %)
Longitud de los <i>jams</i> (m)	5,6 (64 %)	n/a
Anchura de los <i>jams</i> (m)	3,3 (68 %)	n/a
Altura de los <i>jams</i> (m)	1,0 (44 %)	n/a
Volumen geométrico (m ³)	24 (145 %)	n/a

Tabla 4. Características medias de las acumulaciones de detritos leñosos. Entre paréntesis se indica el coeficiente de variación

	TA	Unidad
Frecuencia de los LW <i>dam</i>	20	Número/km
Frecuencia de los <i>log-steps</i>	17	Número/km
Frecuencia de los <i>valley-jams</i>	3	Número/km
Fracción de LW <i>dams</i> en relación al no. de <i>steps</i>	22	%
Altura máxima de los <i>dam</i>	3,5	m
Altura media de los LW <i>dam</i>	1,12	m
Longitud de canal afectada por los LW <i>dam</i>	24	%
Pérdida de elevación del canal debido a los LW <i>dams</i>	27	%
Sedimento almacenado detrás de los LW <i>dams</i>	1270	m ³ /km

Tabla 5. Características de los *log-steps* y *valley-jams* en el Tres Arroyos

así a cada LW *dams*. La suma de todas las longitudes de los depósitos, evidencian como el 24 % de la longitud del canal está controlada por los LWD presentes en el cauce del Tres Arroyos (Tabla 5). En cambio, el río Toro no exhibe ningún control significativo del cauce ejercido por los LWD.

El volumen total de sedimento almacenado detrás de los LW *dams* en el Tres Arroyos (sin tener en cuenta de la porosidad y normalizado por la longitud de canal examinada) es de 1270 m³ km⁻¹ (Tabla 5). En el río Toro, la ausencia substancial de LW *dams* lleva básicamente a la carencia del almacenaje de sedimento relacionado a los detritos leñosos.

La relación entre las características de la cuenca y del canal con la cantidad y características del LWD, así como las correlaciones entre diversas características de las piezas leñosas, fueron investigadas usando valores relacionados a los tramos considerados. Diecisiete tramos fueron identificados en ambas cuencas. Los datos de LWD usados para este análisis, como para la mayoría de los análisis anteriores, se refieren solo al canal activo. La Figura 5 muestra la alta magnitud de variabilidad a escala de tramo en la cantidad de LWD dentro de los dos canales del estudio. Los valores de las medianas reflejan

lo que se observó para las cantidades promedio de LWD a escala de canal. El patrón longitudinal de la carga de material, en términos de piezas leñosas por hectárea de área del cauce en los dos canales del estudio, se ilustra en la Figura 6, donde las distancias longitudinales han sido normalizadas en relación a la longitud total investigada.

Un patrón muy dentado, irregular, caracteriza el Tres Arroyos, mientras que el río Toro ofrece una distribución más uniforme de los LWD a lo largo de su curso. Los picos de LWD en el cauce del Tres Arroyos son asociados a los tramos caracterizados por LW *dams* que pueden actuar como localizaciones de trampa para las piezas leñosas flotantes, o accionados por árboles caídos de las riberas erosionadas en los tributarios con flujo de detritos (en el Tres Arroyos, ver Andreoli *et al.*, 2007). En cambio, la ausencia de LW *dams* en el río Toro hace su distribución de detritos leñosos más dependiente de la mortalidad natural crónica de las laderas, por lo menos hasta el momento.

Además se realizó una matriz de correlación del coeficiente de Pearson obtenida con variables, transformadas en escala logarítmica y basadas en los tramos, que describen la geometría del canal (pendiente, ancho y profundidad de cauce

llo del canal, número de rocas y escalones más anchos de la profundidad de cauce lleno) y las características de los LWD (densidad espacial de las piezas leñosas, de las raíces y del volumen, frecuencia de los *log-steps* y de los *log-jams*, dimensiones de los detritos leñosos en relación a la geometría del canal) para todos los tramos de los dos canales. Los coeficientes de correlación resultaron generalmente bajos, y las relaciones en términos de volumen de LWD han sido fuertemente influenciadas por las grandes diferencias de fuentes de detritos leñosos entre las dos cuencas. Sin embargo, un resultado interesante es la alta correlación ($R^2 = 0,58$; $p < 0,001$) entre la abundancia de madera y el número de las piezas más largas que el ancho de cauce lleno (número por hectárea de área del cauce para am-

bas variables). En cambio, no se observa ninguna correlación al considerar el número de piezas leñosas más anchas de la profundidad de cauce lleno. Analizando los dos cauces separadamente, solamente algunas correlaciones significativas pueden ser observadas. La densidad espacial de LWD se correlaciona significativamente con la pendiente del tramo ($R^2 = 0,310$; $p = 0,02$) y el área de drenaje ($R^2 = 0,25$; $p = 0,04$) en el Tres Arroyos, pero no en el río Toro. El ancho y la profundidad de cauce llenos no se correlacionan con la densidad de detritos leñosos en ningún canal. En cambio parece existir en ambos canales una significativa relación entre la abundancia (es decir densidad espacial) de raíces y el volumen de detritos leñosos ($R^2 = 0,25 - 0,26$; $p < 0,05$).

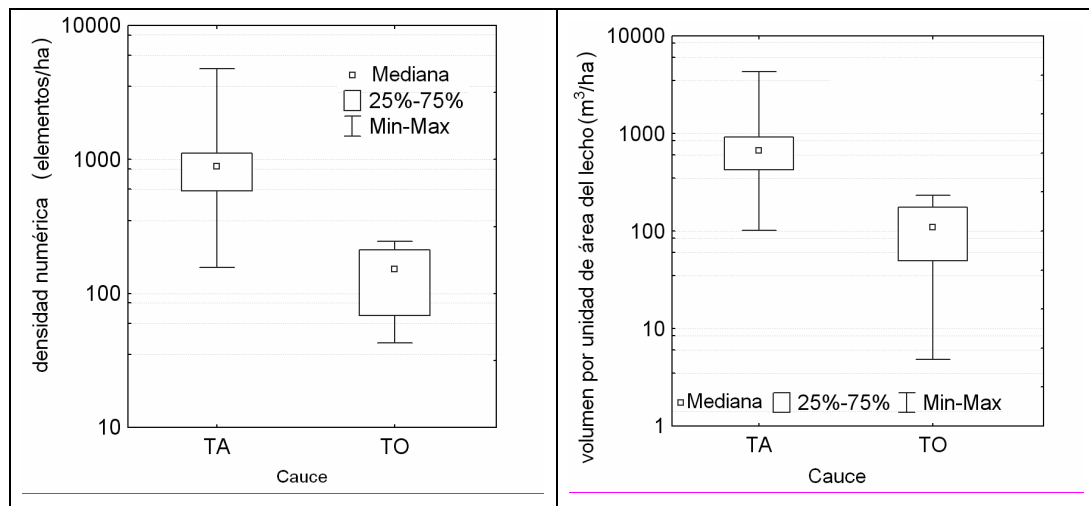


Figura 5. Variación total de almacenamiento de LWD a escala de tramo en el canal activo en términos de número de elementos por hectárea (izquierda) y volumen por hectárea (derecha) para los dos canales del estudio

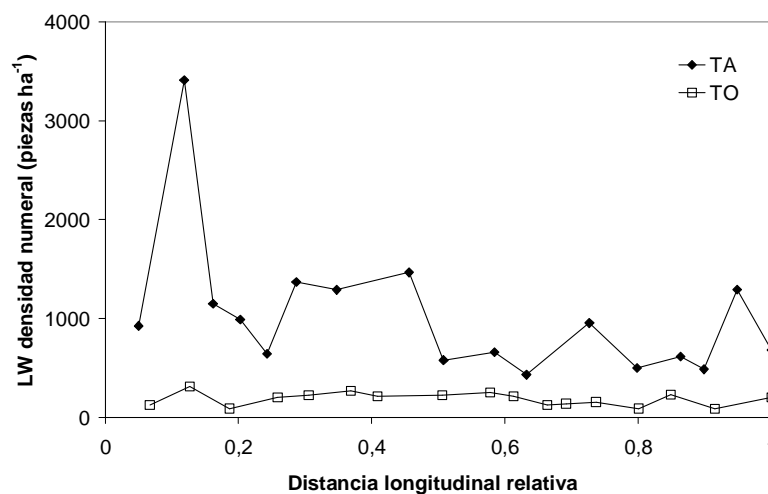


Figura 6. Variación longitudinal de almacenamiento de LWD a escala de tramo (piezas por hectárea) para los dos canales del estudio

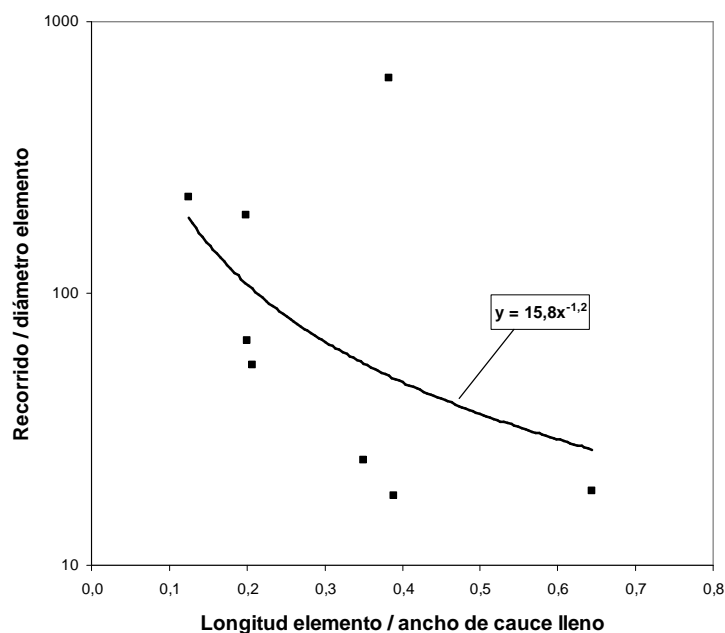


Figura 7. Recorrido de los elementos leñosos en el Tres Arroyos; relación entre la longitud no dimensional del recorrido y la longitud no dimensional del elemento. Ha sido graficado la función interpolante de potencia, aunque no estadísticamente significativa

El estudio de la dislocación de los residuos leñosos en el Tres Arroyos en enero 2006, después de casi un año desde su etiquetadura, permite expresar algunas consideraciones sobre la movilidad de los LWD en el cauce. Después de una escorrentía de otoño (caudal máximo de $4,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, cercano al nivel de *bankfull*), sólo 8 elementos de 322 marcados (el 2,5%) se habían movido, mientras que 7 elementos no pudieron ser recuperados, probablemente porque el nivel del flujo hídrico en el momento de las mediciones en diciembre de 2005 era más alto del nivel encontrado cuando se aplicaron las etiquetas de metal, impidiendo así una identificación precisa.

Las dimensiones de los elementos leñosos transportados se ubican entre 0,15 - 0,45 m de diámetro y 1,00 - 5,30 m en longitud. Normalizando el recorrido por el diámetro del elemento, se evidencia una relación de potencia, si bien débil y no significativa ($R^2 = 0,23$) con el cociente entre la longitud del elemento y el ancho de *bankfull* (Figura 7). Es significativo que la mayoría de los elementos transportados (el 62%) estaban dispuestos en forma aislada (es decir no en acumulaciones), tenían una orientación paralela al flujo hídrico y fueron definidos como elementos libres, es decir no anclados a otros elementos leñosos, rocas o a las riberas. En cuanto a la localización original de los residuos, 6 elementos de 8 habían sido clasificados inicial-

mente como internos al canal, mientras que 2 como situados al borde del cauce lleno.

DISCUSIÓN

La cantidad de detritos leñosos en el cauce de las cuencas de montaña forestadas por bosques nativos de los Andes meridionales de Chile, puede variar considerablemente entre y dentro de los canales. La fuerte variación longitudinal de la cantidad de LWD en el Tres Arroyos, así como su vinculación a factores externos y a las características del flujo demostradas por las bajas correlaciones con las variables del canal, refleja lo que Comiti *et al.* (2006) han observado en canales de segundo-cuarto orden en los Dolomitas italianas.

Básicamente, la localización de los detritos leñosos en tales cauces de montaña, confinados y relativamente pequeños, no está determinada por la hidráulica de la corriente, tal como la deposición en barras según lo encontrado para ríos más anchos y con gradiente más bajos (Gurnell *et al.*, 2000; Wzyga y Zawiejska, 2005), si no más bien por procesos complejos que incluyen las riberas y las laderas, tales como la caída de grandes árboles al cauce, los flujos de detritos de canales afluentes al cauce principal y los deslizamientos). Estos tres últimos procesos son las fuentes principales de piezas estables de detritos leñosos (es decir relativamente largos y con las

raíces adosadas), que pueden atrapar posteriormente los LWD móviles que flotan y provienen desde aguas arriba. Es decir, el almacenamiento de detritos leñosos se relaciona sobre todo con la disponibilidad de las piezas de madera estables localmente aportado por las riberas y las laderas, así como por los elementos provenientes de tramos de aguas arriba.

De hecho, en este estudio, la movilidad de los elementos leñosos en condiciones de bankfull aparece baja (< del 4% de las piezas leñosas fueron movidas), con los recorridos inversamente relacionados con el cociente entre la longitud de los elementos y la anchura del canal.

El almacenamiento de LWD en el Tres Arroyos (de $700 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en el canal activo, o $556 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ basados en la longitud del canal) es extremadamente abundante. Valores comparables tan elevados se conocen solamente para los bosques nativos de coníferas en la costa del Pacífico norte de los EUA, en donde se ha registrado un almacenamiento de detritos leñosos medio, de hasta $1000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Gurnell, 2003). Por ejemplo, en el Mack Creek, un cauce de tercer orden (9 m de ancho, comparable con el Tres Arroyos) que atraviesa un bosque conífero de 500 años, el almacenamiento de madera medio es de $812 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Gurnell *et al.*, 2002). Tal alto almacenamiento de LWD se puede atribuir en parte a la pequeña fracción de las piezas leñosas movidas por inundaciones ordinarias (< del 1% en el Mack Creek; Gurnell *et al.*, 2002), porcentaje bajo y semejante a lo encontrado en el Tres Arroyos. La reducida movilidad de los elementos leñosos en el Tres Arroyos es también evidenciada por el elevado porcentaje (casi 70%) de piezas orientadas perpendicularmente o transversalmente al cauce, que representa un indicador de la baja propensión de los troncos a ser transportados (Bilby y Ward, 1989). De toda forma, hay que destacar que los elementos leñosos en ríos de bajo orden son transportados mayormente en ocasión de las avenidas a baja recurrencia (Berg *et al.*, 1998; Gurnell *et al.*, 2002) y que tal fenómeno no ha todavía ocurrido durante el periodo de investigación.

La cuenca del río Toro está caracterizada por una escasa cantidad de detritos leñosos ($117 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Valores similares ($100\text{-}200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) son, sin embargo, típicos de los bosques de latifoliadas maduros no manejados (Harmon *et al.*, 1986; Hering *et al.*, 2000; Gurnell, 2003), y, especialmente, de los ríos de segundo orden que drenan bosques nativos de *Nothofagus* en Nueva

Zelanda ($94\text{-}101 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; Evans *et al.*, 1993; Baillie y Davies, 2002). En general se puede prever, como referencia, un almacenaje de LWD mínimo entre 100 y $120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para cauces de montaña que drenan bosques prístinos de *Nothofagus* en Sudamérica y Nueva Zelanda.

Volúmenes menores de LWD caracterizan los canales de segundo-tercer orden en otras partes del mundo, como las cuencas boscosas manejadas de las montañas italianas ($30\text{-}70 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; Comiti *et al.*, 2006), en los cursos de agua de segundo-cuarto orden en los Highlands del Reino Unido ($44\text{-}88 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; Gurnell *et al.*, 2002), en canales relativamente imperturbados de segundo-cuarto orden en Europa Central ($20\text{-}85 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$; Kaczka 2003), y en un cauce de tercer orden de la península Ibérica ($0,4\text{-}4,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; Díez *et al.*, 2001). El manejo forestal reduce fuertemente el aporte de grandes troncos al cauce, los que a su vez controlan el volumen de detritos leñosos en el mismo (Meleason *et al.*, 2005) y que actúan como elementos claves capaces de atrapar detritos leñosos más finos.

Junto con la densidad espacial, los efectos morfológicos de los LWD pueden extenderse desde casi insignificantes, como en el caso de río Toro, hasta controlar más de un cuarto del desnivel y de la longitud total del canal, como en el Tres Arroyos. Es interesante observar como las diferencias pueden ser relevantes en cuencas cercanas, como en el caso de este estudio, y menos pronunciadas que entre diversos climas y tipo de bosque en distintas latitudes (Comiti *et al.*, 2008).

La substancial diferencia en términos de cantidad de LWD encontrada en el Tres Arroyos y en el río Toro, y consecuentemente en el efecto sobre la morfología del cauce, puede ser debida al hecho que el aporte de material leñoso al cauce no responde inmediatamente al paso del fuego en el bosque, sino más bien a un retraso de varias décadas después del incendio, tal como lo reporta Benda *et al.* (2003) y Zelt y Wohl (2004).

En el clima de la Región de La Araucanía, los incendios influyen en la regeneración del bosque y en consecuencia en el aporte de detritos leñosos a los canales. En el Tres Arroyos, la destrucción de la cubierta del bosque causó una severa inestabilidad de las laderas que dio lugar a fenómenos de flujo de detritos y deslizamientos capaces de transportar muchos elementos leñosos al cauce principal, incitando la formación de grandes *valley-jams*. En cambio, en el río Toro, los árboles quemados están aun en pie,

y todavía no ha ocurrido ningún deslizamiento, posiblemente como consecuencia de laderas con menor pendiente (Tabla 1). La cantidad de detritos leñosos en este cauce es baja, especialmente cuando es considerada como número de elementos por hectárea de área del cauce. Por supuesto, la geología de la cuenca y la topografía desempeñan también un papel fundamental en el aporte de detrito leñoso quemado desde las laderas hasta el canal principal. Las pendientes de ladera y cauce del Tres Arroyos son mucho mayores que las de Río Toro (Tablas 1 y 2), y es razonable que esto también contribuya a explicar la mayor cantidad de deslizamientos en la primera cuenca.

Las dimensiones relativas de los elementos leñosos en el río Toro son más pequeñas que en el Tres Arroyos (Tabla 3), favoreciendo probablemente el transporte de los troncos y limitando así el almacenamiento de madera. Sin embargo, es posible plantear la hipótesis de que dentro de algunas décadas (10-30 años) el cauce del río Toro se pueda enriquecer mucho en detritos leñosos, una vez que las vertientes de la cuenca pierdan el efecto estabilizador de las raíces de los árboles, los árboles caigan, y eventualmente alcancen la red hídrica. Hasta que la cantidad de deslizamientos, la frecuencia de flujos de detritos y consecuentemente el almacenamiento de detritos leñosos de la cuenca no alcance un nivel comparable a los del Tres Arroyos, es difícil predecir el efecto de otros factores topográficos y litológicos. De toda forma, parece improbable que las cantidades de detritos leñosos del río Toro lleguen en el futuro a parecerse a las del Tres Arroyos ya que sus laderas y el cauce son de menor pendiente, limitando la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos y coladas detríticas en la cuenca.

La presencia de estructuras formadas por detritos leñosos puede disipar una energía potencial equivalente a poco más de un cuarto de la pérdida total de la elevación en el cauce del Tres Arroyos, aumentar la resistencia del flujo hasta en un orden de magnitud y almacenar detrás de ellas un volumen de sedimento grueso de aproximadamente $1000 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$, aparentemente del mismo orden de la producción anual de sedimento de la cuenca. En el cauce del río Toro, al contrario, la total ausencia de organización en estructuras de detritos leñosos, no permite un efecto similar sobre el almacenamiento de sedimentos y el aumento de resistencia al flujo.

El Tres Arroyos presenta el 27 % de pérdida de la elevación del canal debido a los *LW dams*,

y un 22 % de *steps* relacionados a los detritos leñosos. Estos valores son generalmente más bajos que en la costa del Pacífico norte de los EUA, pero son muy similares a lo que reportan Faustini y Jones (2003) para el cauce de tercer orden Mack Creek (Oregon, EUA) y Keller y Swanson (1979) y Keller y Tally (1979) para otros canales de cabecera de cuencas en la costa del Pacífico norte de los EUA. Valores mucho más bajos de pérdida de desnivel causadas por los *LW dams* se observaron en ríos de montaña en la zona alpina en Italia (Comiti *et al.*, 2006).

La frecuencia longitudinal de los *LW dams* (Tabla 5) en el Tres Arroyos (20 *dams* por kilómetro) aparece algo más bajo que en cuencas de similar tamaño dentro del Queets basin (estado de Washington, EUA; Montgomery *et al.*, 2003), probablemente debido al número más pequeño de *log-steps* (17 km^{-1}). La frecuencia de las grandes acumulaciones de valle (*valley-jams*) es muy similar a la encontrada en las cuencas del Noreste del Pacífico; una frecuencia idéntica de *log-steps* fue observada en la cuenca del Mack Creek (Faustini y Jones, 2003), pero *log-steps* menos frecuentes fueron observados en Oregon (4 km^{-1} ; Marston, 1982). En New England, cauces prístinos de tercer orden presentaban valores de 10-60 *dams km}^{-1}* (Bilby, 1979), muy similares, por lo tanto, a la frecuencia observada en el Tres Arroyos.

En contraste con los cuencas prístinas ubicadas en todo el mundo, una frecuencia de *LW dams* de 13 km^{-1} fue medida en el canal de tercer orden del río Cordón (Alpes italianos, Comiti *et al.*, 2006), un valor similar (alrededor 15 km^{-1}) fue encontrado en un canal de tercer orden de los Alpes bávaros (Kaczka, 2003) y la ausencia de *dams* fue observada en varios canales de tercer orden en el norte de España (Díez *et al.*, 2001). Es interesante notar como en cuencas italianas de segundo-tercer orden (Comiti *et al.*, 2006), las longitudes medias de los *log-steps* relativas a la distribución acumulada de la longitud de las piezas leñosas son más pequeñas (74°-76° percentil) que la encontrada para el Tres Arroyos (87° percentil). En cambio, los diámetros medios de los *log-steps* son más grandes (68-83 % de la distribución acumulativa) en los Alpes que en las cuencas Andinas (59 y el 73 %). Esta comparación sugiere que la frecuencia más baja de los *LW dam* observada en los cauces Alpinos, y probablemente presente en otras cuencas manejadas, sea sobre todo debida a la limitada disponibilidad de grandes troncos en estos canales.

Finalmente, según lo divulgado por Andreoli *et*

al. (2007), los detritos leñosos pueden ser considerado responsables del almacenamiento en el canal de una cantidad de sedimento cercana al 187% del transporte de fondo anual y del 119% de la producción total de sedimentos de la cuenca. Estos resultados son similares con el valor (123% de la producción anual media de sedimento) encontrado por Marston (1982) para los ríos de la Oregon Coast Range.

CONCLUSIONES

En este estudio se determinó que los residuos leñosos de gran tamaño (LWD) en el área del cauce de una de las dos cuencas analizadas, que drena bosques nativos maduros en Los Andes meridionales de Chile son muy abundantes. De hecho, la cantidad de LWD en el torrente Tres Arroyos (700 y 1500 m³ por ha de lecho del canal, considerando LWD en relación al volumen del cauce lleno y al área entera del canal, respectivamente) es comparable sólo con valores registrados en los bosques nativos maduros del Noreste de Norteamérica, cercanos a la costa del Océano Pacífico. La mortalidad natural de los árboles, más que los deslizamientos o la erosión de las orillas, parece ser la causa más importante de ingreso de LWD al cauce del torrente Tres Arroyos; sin embargo los puntos donde confluyen al colector principal canales laterales de *debris flow* representan sitios críticos de concentración de LWD que afectan fuertemente la morfología del canal. Estas grandes acumulaciones de material leñoso ejercen una considerable influencia en la funcionalidad del flujo hídrico, formando grandes acumulaciones o tacos de valle y altos diques de troncos que imponen al canal un perfil de escalones a nivel de macroescala. Esto contribuye a la disipación de más de 1/4 de la energía potencial de la corriente de agua y al depósito de un volumen de sedimentos por lo menos del mismo orden de magnitud que la producción anual de sedimentos de la cuenca del Tres Arroyos. Sin embargo, la cantidad de detritos leñosos y sus efectos morfológicos varían considerablemente en función de la historia de las modificaciones naturales que han afectado el bosque. En la región de la Araucanía los incendios, reconocidos ya como el factor principal que conduce al rejuvenecimiento del bosque, parecen desempeñar un papel principal en el aporte de grandes piezas leñosas a la red hídrica, por lo menos en cuencas relativamente escarpadas. Es por este motivo que en el Río Toro la influencia morfológica de los LWD es muy limitada dada la total ausencia de *log-steps* o *valley-jams*.

Además, la total ausencia de organización en estructuras de LWD, no permite un efecto similar a la cuenca del Tres Arroyos, sobre el almacenamiento de sedimentos y el aumento de la resistencia al flujo. Se necesitarían entonces más investigaciones para entender el retraso de tiempo entre la ocurrencia del fuego y la respuesta del almacenamiento de material leñoso en los ríos, supervisando idealmente la abundancia de madera en la cuenca del río Toro, que fue afectada en el 2002 por un severo incendio, y que después de 4 años todavía no manifiesta relevantes aportes de detritos leñosos en el cauce.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido realizada en el ámbito de las actividades conjuntas entre las Universidades de Padua y la Universidad Austral de Chile en Valdivia, previstas en el Proyecto financiado por la Unión Europea INCO-CT-2004-510735 *EPIC FORCE* (Evidence-based policy for integrated control of forested river catchments in extreme rainfall and snowmelt). Se agradecen al Ing. Hardin Palacios (Universidad Austral de Chile) y la Dra Theresa Blume de la Universidad de Potsdam (Alemania) por la ayuda y el soporte brindado en la elaboración de la serie histórica de los datos de caudales del torrente Tres Arroyos y al Ing. Luis Opazo (Universidad Austral de Chile) por su apoyo a los trabajos de terreno. Se agradecen también dos revisores anónimos por la atenta y constructiva revisión del texto.

REFERENCIAS

- Abbe, T.B. y Montgomery D.R., (2003). Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington. *Geomorphology*, 51, 81–107.
- Amigo, J. y Ramirez, C., (1998). A bioclimatic classification of Chile: woodland communities in the temperate zone. *Plant Ecology* (Holanda), 136(1), 9–26.
- Andreoli, A., Comiti, F. y Lenzi M.A., (2007). Characteristics, distribution and geomorphic role of large woody debris in a mountain stream of the Chilean Andes. *Earth Surf. Process. Landforms*, 32(11), 1675–1692.
- Andreoli, A., Carlig, G., Comiti, F. y Iroumé A., (2007). Residuos leñosos de gran tamaño en un torrente de la Cordillera de los Andes, Chile: su funcionalidad e importancia. *Bosque* (Valdivia), 28(2), 83–96.

- Baillie, B.R. y Davies, T.R. (2002). Influence of large woody debris on channel morphology in native forest and pine plantation streams in the Nelson region, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 36, 763–774.
- Benda, L., Miller, D., Sias, J., Martin, D., Bilby, R., Veldhuisen, C. y Dunne, T., (2003). Wood recruitment processes and wood budgeting. In *The ecology and management of wood in world rivers*, Gregory SV, Boyer KL, Gurnell AM (eds.), American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 49–73.
- Berg, N., Carlson, A. y Azuma, D., (1998). Function and dynamics of woody debris in stream reaches in the central Sierra Nevada, California. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55, 1807–1820.
- Bilby, R.E., (1979). The Function and distribution of organic debris dams in forest stream ecosystems. PhD dissertation, Division of Biological Sciences, Cornell University.
- Bilby, R.E. y Ward, J.W., (1989). Changes in characteristics and function of woody debris with increasing size of streams in western Washington. *Transactions of the American Fisheries Society*, 118, 368–378.
- Braudrick, C.A. y Grant, G.E., (2001). Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment. *Geomorphology*, 41, 263–283.
- Burns, B., (1993). Fire-induced dynamics of *Araucaria araucana*-*Nothofagus antarctica* forest in the Southern Andes. *Journal of Biogeography*, 20(6), 669–685.
- Comiti, F., Andreoli, A., Lenzi, M.A. y Mao, L., (2006). Spatial density and characteristics of woody debris in five mountain rivers of the Dolomites (Italian Alps). *Geomorphology*, 78, 44–63.
- Comiti, F., Andreoli, A., Mao, L. y Lenzi, M.A., (2008). Wood storage in three mountain streams of the Southern Andes and its hydro-morphological effects. *Earth Surface processes and Landforms*, 33(2), 244–262.
- Curran, J.H. y Wohl, E.E., (2003). Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, Cascade Range, Washington. *Geomorphology*, 51, 141–157.
- DGA Dirección General de Aguas, (1998). Cuenca Experimental Representativa Reserva Forestal Malalcahuello, cuenca Río Imperial, IX Región de la Araucanía. Ministerio de Obras Públicas, Departamento de estudios de planificación y Universidad Austral de Chile (Valdivia).
- DGA Dirección General de Aguas, (2000). Cuenca experimental representativa, Reserva Forestal Malalcahuello, Cuenca Río Imperial, IX Región de la Araucanía. Ministerio de Obras Públicas (Departamento de Estudios y Planificación) y Universidad Austral de Chile (Valdivia).
- Diez, J.R., Eloegi, A. y Pozo, J., (2001). Woody debris in north Iberian streams: influence of geomorphology, vegetation and management. *Environmental Management*, 28(5), 687–698.
- Donoso, C., (1994). Bosques templados de Chile y Argentina. Editorial Universitaria, Chile, 483 pp.
- Evans, B.F., Townsend, C.R. y Crowl, T.A., (1993). Distribution and abundance of coarse woody debris in some southern New Zealand streams from contrasting forest catchments. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 27, 227–239.
- Faustini, J.M. y Jones, J.A., (2003). Influence of large woody debris on channel morphology and dynamics in steep, boulder-rich mountain streams, western Cascades, Oregon. *Geomorphology*, 51, 187–205.
- Fuenzalida, H., (1965). Geografía económica de Chile. CORFO (Corporación de Fomento de la Producción), 130–267.
- Gomi, T., Sidle, R.C., Woodsmith, R.D. y Bryant, M.D., (2003). Characteristics of channel steps and reach morphology in headwater streams, southeast Alaska. *Geomorphology*, 51, 225–242.
- Gonzalez, M.E., Veblen, T.T. y Sibold, J.S., (2005). Fire history of *Araucaria-Nothofagus* forests in Villarica National Park, Chile. *Journal of Biogeography*, 32, 1187–1202.
- Gurnell, A.M., (2003). Wood storage and mobility. In *The ecology and management of wood in world rivers*, Gregory SV, Boyer KL, Gurnell AM (eds.), American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 75–91.
- Gurnell, A.M., Piegay, H., Gregory, S.V. y Swanson, F.J., (2002). Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, 47, 601–619.

- Gurnell, A.M., Petts, G.E., Hannah, D.M., Smith, B.P.G., Edwards, P.J., Kollmann J., Ward, J.V. y Tockner, K., (2000). Wood storage within the active zone of a large European gravel-bed river. *Geomorphology*, 34, 55–72.
- Harmon, M.E., Franklin, J.K., Swanson, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin J.D., Anderson, N.H., Cline, S.P., Aumen, N.G., Sedell, J.R., Lienkaemper, G.W., Cromack, K., Cummins, K.W., (1986). Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research*, 15, 133–302.
- Hering, D., Kail, J., Eckert, S., Gerhard, M., Meyer, E.I., Mutz, M., Reiche, M. y Weiss, I., (2000). Coarse woody debris quantity and distribution in Central European streams. *International Review of Hydrobiology*, 85, 5–23.
- Iroumé, A., (1997). Estudio de los procesos hidrológicos en una cuenca experimental andina de la IX Región, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 18(1), 73–81.
- Iroumé, A., (2003). Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 24(1), 125–136.
- Kaczka, R.J., (2003). The coarse woody debris dams in mountain streams of central Europe, structure and distribution. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 37, 111–127.
- Keller, E.A. y Swanson, F.J., (1979). Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 4, 361–380.
- Keller, E.A. y Tally T., (1979). Effects of large organic debris on channel form and fluvial processes in the coastal Redwood environment. In *Adjustments of the Fluvial System*, Rhodes DD, Williams GP (eds), Kendall-Hunt, Dubuque, IA, 169–197.
- Mao, L., Uyttendaele, G.P., Iroumé, A. y Lenzi, M.A., (2008). Field based analysis of sediment entrainment in two high gradient streams located in Alpine and Andine environments. *Geomorphology*, 93, 368–383.
- Marston, R.A., (1982). The geomorphic significance of log steps in forest streams. *Annals of the Association of American Geographers*, 72(1), 99–108.
- MacFarlane, W.A. y Wohl, E.E., (2003). Influence of step composition on step geometry and flow resistance in step-pool streams of the Washington Cascades. *Water Resources Research*, 39(2), 1037.
- Meleason, M.A., Davies-Colley, R., Wright-Stow, A., Horrox, J. y Costley, K., (2005). Characteristics and geomorphic effect of wood in New Zealand's native forest streams. *International Review of Hydrobiology*, 90(5/6), 466–485.
- Montgomery, D.R., Collins, B.D., Buffington, K.M. y Abbe, T.B., (2003). Geomorphic effects of wood in rivers. In *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*, Gregory S.V., Boyer K.L., Gurnell A.M. (eds), American Fisheries Society, Bethesda, MD, 21–47.
- Montgomery, D.R. y Piégay, H., (2003). Wood in rivers: interactions with channel morphology and processes. *Geomorphology*, 51, 1–5.
- Montgomery, D.R. y Buffington, J.M., (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109, 596–611.
- Picco, L., (2006). Caratteristiche e movimento del legname in alveo in due bacini delle Ande Cilene. MSc Thesis, Università di Padova, Italia.
- Ramirez, C., (1978). Estudio florístico y vegetal del Parque Nacional Tolhuaca. Santiago, Museo Nacional de Historia Natural (Chile), Publicación Ocasional, 24, 3–23.
- StatSoft Italia srl (2004). *Statistica*, version 6.1, www.statsoft.it.
- Swanson, F.J., Lienkaemper, G.W. y Sedell, J.R., (1976). History, physical effects and management implications of large organic debris in western Oregon streams. US Forest Service General Technical Report PNW-56.
- Wohl, E., Madsen, S. y MacDonald, L., (1997). Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana, USA. *Geomorphology*, 20, 1–10.
- Wyzga, B. y Zawiejska, J., (2005). Wood storage in a wide mountain river: case study of the Czarny Dunajec, Polish Carpathians. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(12), 1475–1494.
- Zelt, R.B. y Wohl, E.E., (2004). Channel and woody debris characteristics in adjacent burned and unburned watersheds a decade after wildfire, Park County, Wyoming. *Geomorphology*, 57(3), 217–233.