

## Uso del agua y productividad de los bosques nativos e implantados en el NO de la Patagonia: aproximaciones desde la ecohidrología y la ecofisiología

JAVIER E. GYENGE<sup>1,2,✉</sup>, M. ELENA FERNÁNDEZ<sup>1,2</sup>, JULIÁN LICATA<sup>3</sup>, MARIANA WEIGANDT<sup>2</sup>, BARBARA J. BOND<sup>4</sup> & TOMÁS M. SCHLICHTER<sup>2</sup>

1 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Argentina.

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria Bariloche, San Carlos de Bariloche, Argentina.

3 INTA EEA Concordia, Entre Ríos, Argentina.

4 Department of Forest Science, Oregon State University, Estados Unidos.

**RESUMEN.** Existe preocupación por el posible uso excesivo de agua de las forestaciones con especies exóticas de rápido crecimiento en comparación con las especies nativas a las cuales reemplazan en la región NO de la Patagonia. Debido a ello, se han realizado estudios de productividad, consumo y eficiencia en el uso del agua tanto en plantaciones de especies exóticas como en sistemas vegetales naturales en zonas con distintos niveles de déficit hídrico. Esto se llevó a cabo mediante aproximaciones ecohidrológicas y ecofisiológicas. El objetivo del presente trabajo fue analizar y sintetizar el nivel de avance logrado en el conocimiento hasta la fecha. Tanto a nivel de árbol individual como de bosques con cobertura total de dosel arbóreo, las especies exóticas [*Pinus ponderosa* (pino ponderosa) y *Pseudotsuga menziesii* (pino oregón)] poseen un mayor consumo de agua que los individuos-sistemas nativos que crecen en sitios similares [pastizal, bosque de ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*) y bosque mixto de ñire (*Nothofagus antarctica*) y radal (*Lomatia hirsuta*), y otras especies leñosas, respectivamente), aunque en todos los casos también se verificó un aumento en la eficiencia en el uso del agua. Los resultados sugieren que las diferencias en productividad y uso de agua se relacionan principalmente con una mayor resistencia hidráulica tanto de flujos en estado líquido (menor conductividad de la madera) como en estado gaseoso (mayor sensibilidad estomática a la demanda atmosférica) en las especies nativas. En el caso de las plantaciones de pino ponderosa, es posible disminuir el consumo de agua mediante el manejo del área foliar (podas y densidad de plantación). A su vez, en el bosque mixto nativo es posible manejar la cantidad y la eficiencia en el uso del agua mediante la extracción selectiva de ciertas especies y tamaños de individuos. Por otro lado, las mayores diferencias en el consumo de agua se observaron entre los pastizales y los bosques densos de pino ponderosa, los que a su vez se ubican en las zonas más secas del área forestable. Por otro lado, la interceptación de lluvias en la zona más árida fue mayor en los bosques nativos que en los implantados, lo cual hizo similar la evapotranspiración total de ambos, aunque es levemente superior en los bosques exóticos en la zona de mayor precipitación anual. Esto pone de manifiesto la importancia de considerar la ubicación, la densidad y el tamaño de los parches forestados en situaciones en las que los recursos hídricos excedentes de las precipitaciones quieran ser aprovechados aguas abajo en otras actividades. En este tipo de situaciones se recomiendan plantaciones con una baja densidad arbórea. Por el contrario, dado los excedentes de agua en la zona más húmeda (de aptitud para el pino oregón), el mayor

✉ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria Bariloche, C.C. 277, (8400) San Carlos de Bariloche, Argentina.  
jgyenge@bariloche.inta.gov.ar

Recibido: 3 de agosto de 2010; Fin de arbitraje: 8 de diciembre de 2010; Revisión recibida: 14 de diciembre de 2010; Aceptado: 10 de enero de 2011

consumo de la especie exótica no redundaría en un impacto negativo sobre los recursos hídricos. Cabe destacar que dada la mayor eficiencia en el uso del agua de los sistemas exóticos, el costo en agua de la producción de madera de estos bosques es bastante menor al de los sistemas nativos.

[Palabras clave: uso de los recursos, eficiencia en el uso de los recursos, plantaciones forestales, cambios en el uso de la tierra, resistencia hidráulica]

**ABSTRACT. Water use and productivity of native and planted forests in NW Patagonia: ecohydrological and ecophysiological approaches:** There is a concern about the potential excessive water used of forest plantations with fast growing exotic species compared to the native vegetation systems they replace in NW Patagonia. For this reason, several studies have been conducted focused on the productivity, water consumption and water use efficiency of the different systems, in areas with different precipitation levels. The studies were carried out from ecohydrological and ecophysiological approaches. The objective of this paper was to analyze and synthesize the available knowledge about these topics. Both at the individual tree level or at forest with complete cover systems, the exotic species (*Pinus ponderosa* and *Pseudotsuga menziesii*) have a higher water consumption than all native individual tree-vegetation systems they replace (grassland- *Austrocedrus chilensis* forests, and mixed forests with *Nothofagus antarctica*, *Lomatia hirsuta*, and other native woody species, respectively). However, in all cases, an increase in water use efficiency was observed in exotic species compared to native species. Our results suggest that differences in productivity and water use are mainly due to a higher resistance to water flow, both in liquid (lower wood conductivity) and vapor (higher stomatal sensitivity to vapor pressure deficit) phases in native species compared to exotic ones. At least in the case of ponderosa pine, water use of plantations may be decreased managing leaf area of the system by means of green pruning and thinning. Moreover, in the native mixed forest water use and water use efficiency are able to be managed through selective extraction of individuals of certain species and sizes. On the other hand, the higher differences in water use between native and exotic systems were observed in the most xeric areas, between native grasslands and high density ponderosa pine plantations. On the other hand, rain interception was higher in native forests than in forests plantations in the xeric area, resulting in similar whole evapotranspiration of both systems, whereas it was slightly higher in the forests plantations than in native systems in the humid area. This highlight the importance of considering the spatial distribution, density and size of plantation patches in those situations in which water surplus has to be used for other purposes. In these situations, it is recommended to install low density plantations. In contrast, due to the high water surplus in the more humid areas (with aptitude for Douglas-fir plantations), the higher water consumption of this exotic species compared to the native systems, would not lead to a negative impact on water resources. Finally, we highlight that, due to the high water use efficiency of exotic species, the wood production costs in terms of water are much lower using these species than native ones.

[Keywords: resource use, resource use efficiency, forest plantations, land use change, hydraulic resistance]

**Nota de los autores:** el presente artículo se basa en el trabajo presentado en el XIII° Congreso Forestal Mundial realizado en Buenos Aires (octubre del 2009), el cual fue modificado y especialmente ampliado en lo referente a la información ecofisiológica, para adecuarlo a la presente sección especial.

## INTRODUCCIÓN

### *Forestaciones y uso de agua*

Numerosos estudios han demostrado que la introducción de forestaciones con especies de rápido crecimiento puede afectar los recursos hídricos de una región (e.g., Farley et al. 2005).

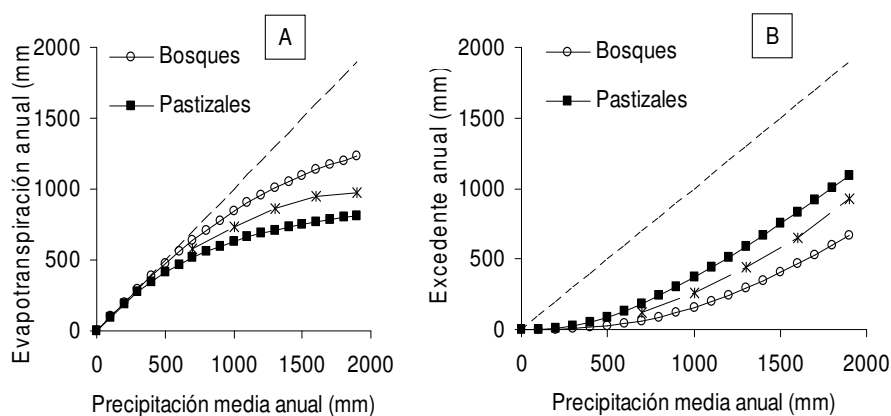
Sin embargo, la magnitud del impacto de las forestaciones sobre los recursos hídricos dependerá de distintos factores asociados al sitio (e.g., tipo de suelo, distribución de lluvias, tipo de evento de precipitación, etc.) y de la biología de las especies (e.g., forma de vida: pastos, arbustos o árboles; fisiología del uso de agua: derrochadora o conservadora de agua; etc.) (Andréssian 2004). Así, Zhang et

al. (1999) demostraron que la relación entre la evapotranspiración anual de un ecosistema vegetal y la precipitación puede ser modelada a partir de datos de evapotranspiración potencial, precipitación y cobertura vegetal (Figura 1A). Este modelo asintótico indica una relación positiva entre la precipitación y la evapotranspiración de los sistemas hasta un valor determinado de precipitación en el cual la evapotranspiración muestra una disminución en la tasa de crecimiento de la función (meseta). Esta meseta se presenta a menores valores de precipitación en el caso de los pastizales, por lo que a partir de un determinado valor de precipitación, los excedentes de agua de los pastizales son mayores que los de los bosques (Figura 1B). Si bien la evapotranspiración de los bosques supera a la de los pastizales, se observan valores intermedios cuando la cobertura de los árboles es menor a 100% (sistema mixto) (Figura 1A). Por supuesto, estos valores son promedios y la variación alrededor de los mismos es muy grande según los factores antes mencionados. Por ejemplo, Farley et al. (2005) encontraron patrones similares, en los que el excedente de agua se redujo en mayor grado al forestar pastizales (~44% de reducción) que cuando se realizaron plantaciones en arbustales (~31%). No sólo es importante el ecosistema en términos generales (bosques vs. pastizales), sino también considerar la especie, tal como es

el caso de forestaciones monoespecíficas. Así, por ejemplo, Farley et al. (2005) encontraron un mayor impacto sobre los flujos de agua por parte de las forestaciones con eucaliptos que con pinos. Es importante destacar que la evapotranspiración mencionada se compone tanto de la magnitud del uso del agua (transpiración o agua que se evapora desde el mesófilo de la hoja y que llega a la atmósfera a través de los estomas) como de la cantidad de agua que queda adsorbida en la superficie de hojas y tallos y que se evapora sin intervenir en el proceso de intercambio gaseoso. En este sentido, ambos aspectos pueden diferir según la especie estudiada (e.g., Putuhena & Cordery 1996, 2000). Por lo tanto, es posible esperar diferencias "a priori" en la evapotranspiración de pastizales y bosques a partir de un cierto nivel de precipitaciones, y las tendencias resultan difíciles de predecir cuando se comparan especies o sistemas forestales entre sí y se desconocen los factores que limitan los flujos de agua en cada uno.

#### Problema y objetivo del trabajo

La producción forestal sobre la base de coníferas exóticas de rápido crecimiento es una actividad que se viene desarrollando desde hace algunas décadas a ritmos variables



**Figura 1.** Relación entre la evapotranspiración y la precipitación anual (A) y el excedente de agua (precipitación-evapotranspiración anual, B) utilizando la fórmula de Zhang et al. (1999).

**Figure 1.** Relationship between annual evapotranspiration and precipitation (A) and water surplus (annual precipitation-evapotranspiration, B) following Zhang et al. (1999).

en el NO de la Patagonia argentina. En la actualidad existen ~100000 ha plantadas, y se prevé un impulso mayor para las próximas décadas, principalmente en las provincias de Neuquén y Chubut. Dados los antecedentes para otras regiones del mundo y las grandes diferencias en productividad observadas en Patagonia entre sistemas nativos e implantados (ver siguientes puntos), una de las preocupaciones surgidas en torno a este cambio en el uso de la tierra se centra en los posibles impactos sobre los recursos hídricos. A finales de la década de 1990 se comenzaron a realizar estudios tendientes a dilucidar dicho impacto, lo que implicaba conocer no sólo el uso de agua por parte de los mencionados cultivos arbóreos sino también por parte de los sistemas naturales que éstos reemplazaban. Es importante destacar que hace una década atrás existía un gran vacío de información sobre el uso del agua de los sistemas vegetales del NO de la Patagonia, en particular de los leñosos (matorrales y bosques), excepto por antecedentes en *N. antarctica* (ñire, Pérez 1989). El objetivo del presente trabajo es analizar e integrar el conocimiento existente sobre el consumo de agua, la productividad y la eficiencia en el uso de este recurso por parte de las especies forestales exóticas introducidas en comparación con los ecosistemas que reemplazan. De esta manera, se pretende aportar información que contribuya al desarrollo de la actividad forestal en la región Patagónica en un marco de sustentabilidad ambiental, económica y social.

#### *Sitios de estudio*

Los estudios que se revisan en el presente artículo se han llevado a cabo en sitios representativos de zonas de producción forestal con *P. ponderosa* y *P. menziesii* (pino ponderosa y oregón, respectivamente), las principales especies exóticas implantadas en la región NO de la Patagonia. A continuación se resumen las características (incluyendo vegetación nativa preponderante) de dichos sitios de estudio, que permiten comprender los patrones de productividad y uso de agua descritos en apartados posteriores.

#### **Valle de Meliquina (Provincia de Neuquén).**

Sitio de aptitud forestal intermedia, con ecosistemas naturales de pastizal y bosque de ciprés de la cordillera. Las mediciones fueron realizadas dentro de la Estancia Lemú Cuyén (40°30' S, 71°10' O, 810 m.s.n.m.), Parque Nacional Lanín. El promedio de lluvia anual del sitio para el período 1978-1999 fue de 684±283 mm. Se realizaron estudios en bosques, tanto naturales de ciprés de la cordillera (bosque discetáneo con distintas densidades) como en implantados de pino ponderosa (coetáneos a tres densidades de plantación y con distintos niveles de poda), así como también en zonas de pastizal contiguas a las forestaciones.

#### **Arroyo del Medio (Provincia de Río Negro).**

Zona de aptitud forestal intermedia, aunque con características edáficas contrastantes con Meliquina (suelos más someros en Arroyo del Medio). Los ecosistemas naturales de esta zona son pastizales y matorrales bajos de ñire (en la actualidad casi inexistentes dado que se lo utilizó como fuente de leña de la ciudad de San Carlos de Bariloche durante gran parte del siglo XX). Las mediciones se desarrollaron en un rodal de pino ponderosa con dos densidades de plantación y el pastizal circundante presentes en la Ea. La Veranada (41°13'53" S, 71°11'40" O). La precipitación media anual es de 800 mm/año (Pereyra 2007), con una profundidad de suelo inferior a 1 m.

#### **Valle del Río Foyel (Povincia de Río Negro).**

Esta región se caracteriza por sitios de mediana a alta aptitud forestal, donde se suele implantar pino oregón, de mayores requerimientos de sitio en comparación con el pino ponderosa. Las mediciones se desarrollaron en dos plantaciones de pino oregón y en bosques bajos mixtos contiguos conformados por especies arbóreas y arbustivas nativas (sitio 1: 41°39'54,3" S; 71°33'11,4" O; sitio 2: 41°42'45,9" S; 71°26'56,8" O), entre las que codominaban *N. antarctica*, *Lomatia hirsuta* (Radal), *Schinus patagonicus* (laura) y *Diostea juncea* (retamo). La zona se caracteriza por poseer una precipitación media de 1414 mm/año y una evapotranspiración potencial de 560 mm/año, por lo que se estima un exceso de agua anual de 854 mm (Gallopín 1978).

*Productividad de sistemas vegetales en el NO de la Patagonia*

La presencia de distintos sistemas vegetales en la región patagónica está relacionada con la particular distribución de las precipitaciones, caracterizada por un fuerte gradiente O-E, en el que se pueden verificar diferencias en precipitación de hasta 2500 mm/año en tan sólo 100 km de distancia. Los bosques nativos forman una franja estrecha con dirección N-S, limitada hacia el oeste por la Cordillera de los Andes y hacia el este por zonas de estepa (Schlichter & Laclau 1998). Se estima una superficie de 1660000 ha cubierta por bosques nativos en las provincias del NO de la Patagonia (Neuquén, Río Negro y Chubut) (SAyDS 2007). En estas tres provincias se estimó en 2000000 ha la superficie de tierras aptas para la forestación con coníferas exóticas (SAGPyA 1999). Cabe destacar que estas áreas se encuentran por fuera de las zonas ocupadas por bosque nativo, principalmente en el ecotono entre este bosque y la Estepa patagónica.

Al considerar los valores de productividad de bosques nativos e implantados, Schlichter & Laclau (1998) concluyeron que si se tiene en cuenta sólo el fuste maderable, la productividad de los bosques de ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Ser. et Bizarri) en el ecotono bosque-estepa sería entre 2 y 2.5 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. En contraste, las estimaciones de productividad de plantaciones de pino ponderosa para la zona comprendida entre 500 a 900 mm de precipitación anual (zona de precipitación similar a la ocupada por bosques de ciprés nativo) estaría comprendida entre 4 y 10 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. En el caso de los pastizales, su productividad en la zona apta para forestaciones se estima entre 0.2 a 2 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> (Bonvissuto & Somlo 1998). Debido a la interrelación existente entre los flujos de agua y carbono en las plantas, estas diferencias en productividad entre sistemas nativos (tanto bosque como pastizal) y plantaciones con especies exóticas permitirían hipotetizar que estas últimas tendrían un mayor consumo de agua (de más del doble que los sistemas nativos).

Los estudios llevados a cabo en paralelo con mediciones de uso de agua (sitios descriptos en el apartado anterior) mostraron nuevamente que las coníferas exóticas poseen una mayor productividad anual de fuste que todas las especies nativas estudiadas, tanto expresada en peso como en volumen de madera. En general, existe escasa información sobre productividad de biomasa total en especies leñosas, y por lo general está restringida a ecuaciones alométricas que permiten el cálculo de biomasa o volumen de fuste maderable de aquellas especies de importancia forestal (Rey et al. 2000; Laclau 2003; Reque et al. 2007; Gyenge et al. 2008a, 2009a). Las plantaciones de pino ponderosa del Valle de Meliquina produjeron entre 13.5 y 18 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de madera; los rodales de 500 pinos/ha mostraron las mayores tasas de producción, y la mayor productividad anual ocurrió a los 20 años de edad en comparación con rodales coetáneos de 350 y de 1300 pinos/ha (Gyenge et al. 2010a). Estos valores se corresponden con los promedios de productividad de fuste de plantaciones de pino ponderosa reportados para las provincias de Neuquén y Río Negro (Andenmatten, comunicación personal, INTA EEA Bariloche). En comparación con el bosque nativo, los valores promedio de producción de pino ponderosa fueron superiores a la productividad anual de bosques de ciprés (de 2.6 a 7.4 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de madera) (Ferrando et al. 1999; Loguercio et al. 1999). Estas diferencias en productividad de fuste se relacionan con que, bajo condiciones de campo, la conductancia estomática y total, la conductividad hidráulica específica y la tasa fotosintética son menores en ciprés que en pino ponderosa (Gyenge et al. 2008b). Sin embargo, tanto la conductancia estomática como la tasa fotosintética del ciprés son mayores cuando se realizan mediciones en ramas cortadas y rehidratadas, sugiriendo que las principales limitantes de la producción de la especie nativa están relacionadas con factores hidráulicos (resistencias parciales y totales, altos valores de potencial osmótico en pérdida de turgencia, etc.) (Gyenge et al. 2005, 2008b) y no bioquímicos (capacidad fotosintética).

Las estimaciones de productividad en el Valle del Río Foyel (zona húmeda) indicaron que la

mayor tasa de crecimiento diamétrico de los árboles del bosque mixto natural correspondió al ciprés de la cordillera (6.1 mm/año), seguido por el ñire y el radial, que mostraron valores similares entre sí (2.9 mm/año). La menor tasa de crecimiento anual se encontró en el retamo y la laura (promedio de 0.2 mm/año). Sobre la base de las funciones alométricas y al crecimiento anual en diámetro de cada especie mencionada, se estimó la productividad anual de distintos rodales, encontrando una alta variabilidad entre los mismos (desde 250 hasta 4711 kg/año de materia seca de fuste). Dicha variación se correspondió tanto con el área basal total de la parcela como con el aporte realizado por cada especie en distintos sectores de bosque. En este sentido, las parcelas con mayor cantidad de ñires o radales, y dentro de las mismas, las que poseían los individuos de mayor tamaño, fueron las que mostraron una mayor productividad (Gyenge et al. 2008a). En la misma zona, los árboles de pino oregón crecieron en diámetro a una tasa de 10 mm/año, con una productividad de fuste de 5479 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, duplicando la productividad de fuste del sistema nativo (promedio: 2413 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>) (Gyenge et al. 2008a).

#### *Patrones de consumo de agua a nivel de árbol*

Se observó una relación lineal positiva entre el tamaño del individuo y su consumo de agua, independientemente de la especie arbórea estudiada (Figura 2) (Gyenge 2005; Gyenge et al. 2008a b). Sin embargo, como el consumo de agua depende, entre otros factores, de la disponibilidad de este recurso en el suelo, el grado de competencia entre individuos puede modificar dicha relación. Así, árboles de pino ponderosa que crecen en densidades de 350 y 500 pies/ha consumen en promedio más agua que un pino del mismo tamaño que crece en el mismo sitio pero en una plantación a 1300 pies/ha (Figura 2) (Gyenge 2005).

Además de la densidad de individuos, en el caso particular de pino ponderosa también se estudió el efecto de la remoción de parte del área foliar (poda) sobre el uso del agua (Gyenge et al. 2009c). Los resultados indicaron que el pino ponderosa no puede compensar la transpiración del área foliar

remanente ante la extracción de copa verde debido al tipo particular de arquitectura hidráulica que posee, por lo cual una parte del tejido xilemático quedaría "ocioso". De esta manera, los árboles podados mostraron menores potenciales hídricos y conductancias estomáticas, lo que condujo también a un menor crecimiento durante la temporada inmediata siguiente a la poda (Gyenge et al. 2009c, 2010a). Esto demuestra que al podar un individuo de pino ponderosa, el tejido xilemático que antes alimentaba las ramas extraídas no puede suplir con agua al follaje remanente. Dado que la cantidad de agua máxima que los árboles podados pudieron transpirar no superó, en promedio, los 0.6 L.día<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup> de área foliar, el consumo promedio diario fue linealmente proporcional a la cantidad de área foliar de los individuos. Esto demuestra que es posible modificar la relación establecida entre tamaño y consumo de agua promedio en cada densidad de plantación al reducir el área de transpiración de los individuos mediante la poda.

Al comparar el consumo de agua entre distintas especies de los sistemas más xéricos dentro de la región, se observa que los pinos pueden transpirar más agua (de 2 a 4 veces más en un rango diamétrico de 40 a 15 cm) que los cipreses de tamaño similar cuando ambos crecen en forma libre (sin competencia) en el mismo sitio (Gyenge et al. 2008b). Esto puede explicarse por la mayor resistencia hidráulica en el sistema suelo-hoja (tanto en la conductividad hidráulica del xilema activo como la estomática) del ciprés de la cordillera en comparación con el pino ponderosa (Gyenge et al. 2008b). Además, en el caso de la especie nativa se ha observado que el xilema posee una alta vulnerabilidad a la cavitación (ruptura de la columna de agua en el interior del sistema de conducción) y un mayor potencial osmótico en pérdida de turgencia del tejido foliar, que en conjunto con bajas conductividades hidráulicas de la madera (Gyenge et al. 2005), limitan los valores de conductancia estomática del ciprés e impiden que éste alcance valores de intercambio gaseoso similares a los de pino ponderosa creciendo en el mismo sitio (Gyenge et al. 2005, 2008b). Sin embargo, a pesar de las diferencias en conductancia hidráulica, tanto

la concentración de isótopos estables de O y H en el agua xilemática (Fernández et al. 2007b) como el patrón de extracción de agua en el suelo (Licata et al. 2008) mostraron que ambas especies tienen la capacidad de acceder a similares fuentes de agua en el suelo, hasta por lo menos 180 cm de profundidad (máxima profundidad muestreada).

En el caso de los sistemas forestales en sitios más húmedos (plantaciones con pino oregón y bosque mixto con ñire) también se verificó que, a nivel individual, los árboles de la especie exótica transpiran más que cualquiera de las nativas de similar tamaño (Gyenge et al. 2008a). Entre estas últimas también se verificaron diferencias, siendo

el radial la especie nativa con mayor tasa de transpiración (Gyenge et al. 2008a; Fernández et al. 2009a). En este sentido, comparando el consumo de agua de individuos de 10 cm de diámetro, el pino oregón y el radial utilizan en promedio más de 8 L/día de agua, contra los 6.5 y 3.5 L/día utilizados por la laura y el ñire, respectivamente. Sin embargo, al comparar individuos de mayor tamaño (25 cm de diámetro) el pino oregón consumió aproximadamente 40 L/día, contra los 30 y 22 L/día de agua consumidos por el radial y el ñire, respectivamente (Gyenge et al. 2008a). Si bien se observaron distintos patrones de respuesta de la conductancia de la canopia al déficit de presión de vapor de la atmósfera (DPV), en general las especies nativas presentaron mayor

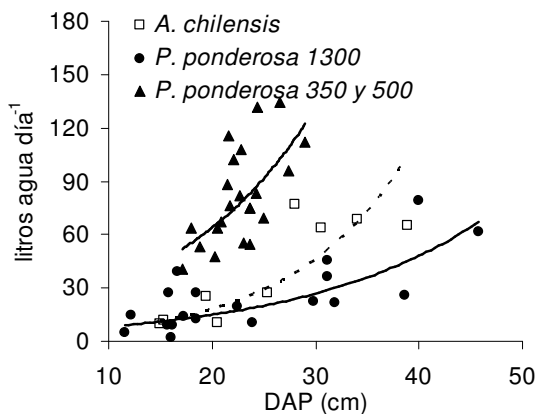
**Tabla 1.** Consumo de agua de bosques (mediante la determinación del flujo de savia) y de pastizales (mediante la construcción de balances hídricos), caracterización de los sitios (IAF=índice de área foliar) y agua excedente (precipitación-consumo anual, ver texto) en el NO de la Patagonia argentina. Los distintos resultados del Valle de Meliquina se refieren a los mismos sistemas en distintos años.

**Table 1.** Water use of forests (from sap flow determination) and grasslands (from water balance estimations), site characteristics (IAF=Leaf Area Index, m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) and water surplus (annual precipitation-water used, see text) in NW Patagonia, Argentina. Different results in Meliquina Valley correspond to measurements in the same site but in different years.

Precipitación anual (mm)	Localización	Vegetación	Consumo de agua (mm/día)	IAF (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Excedente (mm)	Referencias bibliográficas
684	Valle de Meliquina	Pino ponderosa (1300 individuos/ha)	3.79	6.4	1.8	3
		Pino ponderosa (500 individuos/ha)	2.98	1.83	147.6	2, 3
		Pino ponderosa (350 individuos/ha)	2.15	0.97	297	2, 3
		Pino ponderosa (1300 individuos/ha)	3.65	9	27	5
		Pino ponderosa (350 individuos/ha)	2.19	3	289.8	5
		Ciprés de la Cordillera	2.24	9	280.8	5
		Ciprés de la cordillera	1.40	5	432	5
		Pastizal	2.12*	--	302.4	1, 3
		Pastizal	0.92*	--	518.4	3
		Pastizal	2.79*	--	181.8	3
1414	Valle del Río Foyel	Bosque mixto	3.59	5.1	768.1	4
		Pino oregón	4.79	12.6	552.1	

\* Estimado a partir de balances hídricos (Gyenge et al. 2002).

Referencias bibliográficas: 1- Gyenge et al. (2002); 2- Gyenge et al. (2003); 3- Gyenge (2005); 4- Gyenge et al. (2008a); 5- Licata et al. (2008).



**Figura 2.** Consumo de agua diario promedio (L/día de agua) de árboles individuales en relación a su diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) de pino ponderosa (*P. ponderosa*) correspondiente a la temporada de crecimiento primavera-verano) creciendo en tres densidades de plantación (1300, 500 y 350 pinos/ha) y de ciprés de la cordillera (*A. chilensis*) a baja densidad de individuos (bosque natural). Las líneas continuas corresponden a las regresiones para pino ponderosa, mientras que la discontinua para ciprés de la cordillera (Gyenge 2005).

**Figure 2.** Relationship between mean daily water use (L/day of water, corresponding to the growing season period) of individual trees and their diameter at the breast height (DAP, cm) of ponderosa pine (*P. ponderosa*) growing at three plantation densities (1300, 500 and 350 pines/ha) and ciprés de la cordillera (*A. chilensis*) growing at lower densities (spontaneous forest). Continuous and dotted lines correspond to ponderosa pine and ciprés de la cordillera regressions, respectively (Gyenge 2005).

sensibilidad estomática en comparación con el pino oregón, lo que redundaría en cierres estomáticos más tempranos y explicaría las diferencias en el consumo de agua con los individuos de pino oregón (Fernández et al. 2009a).

*Patrones de uso de agua e interceptación de precipitaciones a nivel de sistema 1: bosque de ciprés de la cordillera-pastizal-pino ponderosa*

Considerando la profundidad de suelo a la que los árboles pueden extraer agua (más de 180 cm), la construcción de un balance hídrico para

estimar la evapotranspiración total de sistemas con pinos se torna muy difícil. Por este motivo, los valores de consumo de agua de las especies arbóreas (Tabla 1) se estimaron mediante la construcción de un balance hídrico (para llegar a un primer valor preliminar) y luego, a partir de mediciones de flujo de savia xilemática (transpiración). En el caso del pastizal, la evapotranspiración se estimó a partir de la utilización del primer método mencionado. En este sentido, mediante la medición de isótopos estables de H y O se pudo determinar que los pastos hacen mayoritariamente uso del agua contenida en los primeros 20 cm de suelo y cubren con dicha fuente entre 75% y más de 90% del agua transpirada en los períodos seco y húmedo, respectivamente, de la estación de crecimiento (Fernández et al. 2008). En el caso de los pinos, la medición periódica del contenido de agua del suelo demostró que 60% del agua consumida en años con mayor déficit hídrico que la media proviene de perfiles de suelo por debajo de los 80 cm de profundidad. Por el contrario, durante los años húmedos, más de 60% del agua consumida proviene de los primeros 80 cm de suelo (Licata et al. 2008). Por estos motivos, las estimaciones de evapotranspiración mediante balances hídricos en las plantaciones ralas de pino ponderosa (350 y 500 pinos/ha) indican una disminución de la misma al final del verano, cuando el contenido de agua del suelo es mínimo (Gyenge et al. 2002). Sin embargo, las mediciones de flujo de savia xilemática indicaron que los pinos en estas mismas plantaciones mantienen una tasa constante y alta incluso durante períodos de baja disponibilidad de agua en el suelo superficial, demostrando así la subestimación de la transpiración del sistema mediante el uso del balance hídrico (Gyenge et al. 2003).

Los pastizales mostraron una gran variación anual en la evapotranspiración, que en promedio fue de 1.94 mm/día (promedios de 0.92 hasta 2.79 mm/día) (Gyenge et al. 2002; Gyenge 2005). A partir de diciembre-enero (principios de verano) se observaron diferencias en el contenido de agua del suelo por debajo de los 80 cm de profundidad entre el pastizal y los sistemas forestados, con un menor contenido en estos últimos



(Gyenge et al. 2002). En los 80 cm superiores, el potencial hídrico del agua de suelo es igual o inferior a -1.5 MPa, haciéndose dificultosa su accesibilidad por parte de las plantas. Bajo dichas condiciones de bajo contenido de agua en el suelo, los pastos manifestaron estrés hídrico en mayor o menor grado, dependiendo de la cobertura de árboles (Fernández et al. 2007) y de la demanda atmosférica (Fernández et al. 2006). Es por ello que la evapotranspiración del pastizal depende más de las lluvias ocasionales durante el verano que la de los árboles, mostrando una gran variación entre años. En contraposición, los individuos de pino ponderosa estudiados en el mismo sitio no mostraron síntomas de estrés hídrico al utilizarse el potencial hídrico en pre-alba como indicador del mismo (Gyenge et al. 2003; Gyenge 2005). Sin embargo, sí se encontraron síntomas de estrés hídrico en los pinos podados (Gyenge et al. 2009c) de la zona caracterizada por suelos profundos, así como en dos temporadas sucesivas con veranos secos en la zona de Arroyo del Medio, donde los suelos son más someros (Fernández et al. 2010). En este último caso, los síntomas de estrés manifestados fueron la disminución del potencial hídrico en pre-alba hasta valores umbrales para el pino ponderosa como son -2 MPa, en la densidad de flujo de savia, en la conductancia estomática y de la canopia, así como bajas tasas de crecimiento (Fernández et al. 2010; Gyenge et al. 2010c). A la vez, dichos síntomas fueron mucho menos marcados en árboles creciendo en rodales ralos (500 pies/ha) que en los más densos (2500 pies/ha) (Fernández et al. 2010).

Si bien es complejo determinar el consumo de agua de sistemas que combinen árboles y especies del sotobosque, cuando el valor de índice de área foliar (IAF,  $m^2/m^2$ ) del estrato superior del dosel supera a 3, la evapotranspiración del estrato inferior es despreciable en relación con el uso del agua de los árboles (Kelliher et al. 1995). De esta manera, al valor de transpiración de pino ponderosa de las parcelas más ralas habría que sumarle un valor correspondiente al estrato herbáceo que se desarrolla en su sotobosque, mientras que a valores de IAF > 3 (i.e., plantaciones de pino ponderosa densas o ralas de al menos 20 años de edad), la transpiración estimada

mediante medición de flujo de savia xilemática se acercaría más al verdadero uso total de agua del sistema. De acuerdo a nuestros resultados, las plantaciones con altos valores de IAF exceden en  $\sim 1$  mm/día a la máxima evapotranspiración de los pastizales (Gyenge 2005). Este mayor consumo de agua hace que las reservas del recurso en el suelo disminuyan rápidamente hasta el punto de producir un impacto negativo sobre la propia producción del rodal (Gyenge et al. 2010a). En particular, las plantaciones de pino ponderosa con IAF > 3 consumen en promedio toda el agua que llega al lugar por precipitación. Licata et al. (2008) demostraron que debido al consumo de agua elevado, la transpiración de los rodales de altos valores de IAF disminuye antes que la de las forestaciones de menor IAF, las que son capaces de mantener una tasa de transpiración relativamente constante aun a fines de la temporada seca (Gyenge et al. 2003). Se presume que el mantenimiento de la tasa de transpiración también implica una fijación activa de  $CO_2$  en las hojas. Así, los árboles de los rodales menos densos produjeron más biomasa que los que crecían a altas densidades, e incluso mostraron una productividad mayor a nivel de rodal, aun habiendo menos de la mitad de árboles por hectárea (Gyenge et al. 2010a).

En el caso de los bosques de ciprés de la cordillera, se observó que aun con altos niveles de IAF, el consumo de agua es levemente inferior al de las plantaciones ralas de pino ponderosa (Tabla 1). Esto tiene explicación al tener en cuenta las limitantes ecofisiológicas a la transpiración que posee esta especie (Gyenge et al. 2008b; Gyenge et al. 2007). El ciprés tiene como estrategia mantener sus tejidos con un alto contenido de humedad mediante un estricto control estomático (mecanismo de evitación de la sequía). De esta manera, la conductancia estomática del ciprés de la cordillera disminuye a menores valores de demanda atmosférica y/o a mayores valores de contenido de agua en el suelo que en el caso del pino ponderosa (Gyenge et al. 2005, 2008b). Esta disminución de la transpiración está acoplada a la reducción de la fijación de carbono y, en consecuencia, de la productividad; esto no

implica que además ocurran otros procesos indirectamente asociados, como procesos de foto-inhibición en el caso del ciprés de la cordillera (Gyenge et al. 2008b). Incluso en etapas juveniles, la resistencia hidráulica del ciprés de la cordillera es tan alta que hasta posee limitaciones para proveer de agua a las hojas a niveles de demanda evaporativa del aire moderadas a bajas, por más que haya una alta disponibilidad de agua en el suelo. Desde el punto de vista ecológico, esta estrategia ha sido implicada en la necesidad de plantas nodriza en períodos tempranos de su establecimiento (Kitzberger et al. 2000; Gyenge et al. 2007).

El consumo diferencial de agua por parte de sistemas leñosos en comparación con pastizales u otros sistemas leñosos de menor consumo (exóticos vs. nativos en el caso de la Patagonia) conduce a cambios en los flujos de agua superficiales, subsuperficiales y/o drenaje profundo (excedentes). Por otro lado, las diferencias en IAF, rugosidad de la corteza y otros aspectos relacionados con la arquitectura de las plantas, conllevan a cambios en la magnitud de agua que llega al suelo luego de las precipitaciones (Licata et al. 2011). En este sentido, se define como interceptación de lluvia a la cantidad de agua que queda retenida en la copa y luego se evapora, y que por lo tanto, no ingresa al suelo durante un evento de precipitación. Licata et al. (2011) demostraron que dada la distinta conformación de hojas y arquitectura de los árboles, los individuos de ciprés de la cordillera interceptan más agua de precipitación que los pinares. En conjunto, la cantidad de agua que evapotranspiran los bosques en promedio aumentaría entre 1.5 y 2.11 mm/día debido al agua interceptada por pinos y cipreses, respectivamente. Esto implica que del agua total evapotranspirada en las forestaciones con pino es mayor el agua que sale del sistema a través de las plantas (transpiración) que la que se pierde por interceptación, sin redundar en productividad. En el caso de los bosques densos de ciprés, un alto porcentaje del agua evapotranspirada (~50%) se pierde por interceptación de lluvias, lo que no redundaría en productividad de los árboles ni en recarga del suelo.

Finalmente, dado que el uso del agua de un bosque se relaciona con su nivel de cobertura, es posible manejar los excedentes de agua de un sistema mediante raleos y podas tendientes a minimizar los impactos negativos sobre economías externas al mismo sistema (sistemas ubicados aguas abajo). En este sentido, estudios recientes han demostrado que la incidencia en la productividad forrajera aguas abajo de los parches de forestaciones en las laderas de los mallines (humedales patagónicos) fue nula, aún con plantaciones de alta densidad (Weigandt et al. 2011). Esto ha sido así debido a que la recarga de agua de estos sistemas se produce en su mayoría durante el invierno, cuando la actividad biológica de los pinares es despreciable. En el momento de máximo uso de agua por parte de los mismos (primavera-verano), los excedentes de agua en las laderas siempre es baja (la percolación profunda es muy baja con o sin presencia de pinares), por lo que la recarga por esta vía de las márgenes de los mallines no se ve afectada de manera significativa. El desarrollo de modelos matemáticos que permita simular los flujos de agua de una cuenca y el efecto sobre los mismos debido a los cambios de vegetación permitirá, en un futuro, establecer pautas de manejo sitio-dependientes.

*Patrones de uso de agua e interceptación de precipitaciones a nivel de sistema 2: bosque mixto-oregonal*

Como ya se ha mencionado, en términos generales, los bosques consumen más agua que los pastizales. Por lo tanto, la introducción de árboles (plantaciones) o el avance natural del bosque sobre los sistemas de pastizal (Veblen et al. 1988) podría conllevar una disminución de los flujos de agua formados a partir de los excedentes de éstos, en especial en las zonas de menor precipitación. Por otro lado, en el caso de las plantaciones con coníferas exóticas en la zona más húmeda de la región NO de la Patagonia, es posible que los peligros de la deforestación superen al del incremento del consumo. Si bien las plantaciones de pino oregón consumen en promedio más agua que el bosque nativo mixto (aproximadamente 1 mm/día de diferencia en sistemas de máxima

cobertura en ambos casos), el excedente de agua en todos los sistemas es ampliamente positivo, especialmente en primavera. De manera similar, los valores de interceptación de lluvias estivales de pino oregón y bosque mixto natural de especies leñosas nativas fue de ~55 y 45%, respectivamente (Gyenge et al. 2009b). Estos valores representan, en promedio, una pérdida de 44 y 36 mm de las lluvias de verano, de un total de 80.5 mm de precipitaciones registradas. Por otro lado, los bosques y matorrales mixtos naturales del NO de la Patagonia codominados por ñire se caracterizan por poseer zonas con alta y baja cobertura (Reque et al. 2007) debido a diferentes historias de uso previo y condiciones microambientales. Dado los altos excedentes de precipitaciones en estas zonas, la deforestación de los parches de bosques de mayor densidad podría incrementar los problemas asociados con el exceso de escorrentía (e.g., pérdida de suelos, aludes en zonas de alta pendiente, anegamiento en zonas deprimidas, etc.) (Zheng 2006; Cerda 1998). En términos generales, nuestros resultados sugieren que, si se tiene en cuenta sólo el impacto de las forestaciones sobre los recursos hídricos, el reemplazo de ñirantales no supone cambios importantes en los flujos de agua. Este no es un caso aislado ya otros estudios también han demostrado pocos cambios en los balances hídricos cuando un sistema leñoso es reemplazado por otro del mismo tipo (aunque diferentes especies). Tal es el caso, por ejemplo, de estudios en Chile que han demostrado que el reemplazo de bosque nativo por plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don) no causaron cambios en el comportamiento hidrológico de las cuencas estudiadas (Pizarro et al. 2005, 2006).

#### *Patrones de eficiencia en el uso del agua*

En el caso de las especies forestales es común definir la eficiencia en el uso del agua (EUA) como el cociente entre la productividad de fuste y el consumo de agua ocurridos durante un determinado período (Binkley et al. 2004). Es decir, no se considera la productividad total de los individuos (hojas, ramas, raíces, entre otras fracciones) sino la productividad del fuste maderable, principal producto de

interés en términos productivos. A nivel biológico, esta EUA puede estar más o menos correlacionada con la eficiencia en el uso del agua considerando todos los componentes de la planta, teniendo en cuenta, a su vez, la productividad neta o la bruta. En cada caso, intervienen procesos de asignación del carbono a distintos compartimentos (e.g., biomasa, respiración, fructificación, etc.) que es necesario conocer si se quieren comparar y analizar patrones de EUA en distintos niveles. Esto, por supuesto, implica un conocimiento acabado y detallado del sistema bajo estudio. De acuerdo al grado de conocimiento existente para los sistemas analizados en este trabajo, y a los fines con que el conocimiento fue desarrollado, en esta revisión sólo nos referiremos al primer tipo de EUA, es decir, aquella que considera la producción de fuste.

Al considerar los bosques estudiados en el NO de la Patagonia, en todos los casos las especies exóticas presentaron similares o mayores EUA que las nativas. Se han observado EUA similares entre individuos de pino ponderosa en comparación con ciprés de la cordillera (Gyenge 2005). En el caso de la zona más húmeda, la plantación de pino oregón mostró una EUA 1.8 veces mayor que la del bosque nativo (matorral mixto de ñire) (Gyenge et al. 2008a). Incluso, analizando la productividad y el uso del agua mediante el análisis de imágenes satelitales en un gradiente de precipitación, Rivero et al (2006) estimaron mayores productividades, uso de agua y EUA en bosques de pino ponderosa que en pastizales naturales. Esto implica que si bien las forestaciones con exóticas aumentan la productividad forestal de los sitios, el aumento del uso de recursos hídricos no es proporcional, sino que por el contrario, la producción de una unidad de biomasa de madera de pino ponderosa u oregón consume menos agua que la producción de la misma biomasa por parte de cualquier leñosa o herbácea nativa. Asimismo, dentro de los sistemas existen diferencias en EUA entre individuos (dominantes vs. suprimidos de la misma especie en pinares; individuos de distintas especies nativas dentro de un sistema mixto de vegetación), a favor de una mayor

EUA en aquellos que hacen un mayor uso del agua. A partir de estos resultados surgen evidencias interesantes a favor de la hipótesis de que tanto los sistemas como los individuos que más recursos usan y más producen, son aquellos que además son más eficientes en el uso del agua (Binkley et al. 2004; Gyenge et al. 2008a; Fernández & Gyenge 2009b). Estas evidencias son contrarias a la tesis por lo general aceptada de que la eficiencia aumenta ante la restricción en la disponibilidad de recursos, ya que los sistemas y/o individuos dentro de un sistema, que más producen y más agua utilizan son en general aquellos que están accediendo a una mayor fuente de este recurso. Investigaciones en curso están explorando los procesos y mecanismos que explican estos patrones.

## CONCLUSIONES

La introducción de árboles en zona de pastizales produciría un incremento en la evapotranspiración del agua del sitio, y la magnitud de este incremento depende de la especie forestal y el área foliar del sistema. Este uso incrementado de recursos hídricos puede valorarse como positivo o negativo en función de los usos o destinos alternativos posibles para dichos recursos (e.g., producción aguas abajo, conservación, evaporación, etc.). Por un lado, las forestaciones pueden brindar una herramienta de manejo con el objetivo de regular o aprovechar los excedentes de agua para producir bienes (e.g., madera), haciendo un uso eficiente de los recursos disponibles en el ambiente. Sin embargo, si lo que se quiere es no hacer un uso exhaustivo de los recursos hídricos disponibles, en especial en las zonas más xéricas del NO de la Patagonia (donde esos recursos son más limitantes), las plantaciones de baja densidad arbórea de pino ponderosa demostraron que, por su evapotranspiración similar a la de los pastizales y su alta productividad, son una opción productiva de bajo impacto sobre los recursos hídricos. En este sentido, sugerimos que dado que las plantaciones densas de esta especie poseen un consumo de agua bastante mayor que el de los pastizales, su ubicación y extensión en superficie deberían ser consideradas previamente a fin de evitar

impactos negativos en posibles economías hídricas aguas abajo de las forestaciones. Por otro lado, en la zona productiva del NO de la Patagonia de mayor precipitación media anual se vislumbra que la introducción de especies exóticas de rápido crecimiento no produciría impactos negativos en los excedentes de agua, y se demuestra también una mayor productividad que las especies nativas. De esta manera, y si se considera sólo el impacto sobre los recursos hídricos (ver Gyenge et al. 2010b, para un análisis de múltiples impactos de las forestaciones), las forestaciones en esta zona constituirían un uso de la tierra de bajo impacto, lo que permitiría producir madera de forma más o menos rápida y económica en términos de uso de agua, en comparación con las especies nativas presentes allí naturalmente.

## AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a aquellos que colaboraron en la toma y elaboración de la información: D. Rivero, S. Varela, G. Caballé, M. Sarasola. También a los Organismos Nacionales e Internacionales que financiaron oportunamente las tareas: CONICET, INTA, SAGPyA, NSF, SECyT. Se agradece también a dos revisores anónimos que aportaron valiosos comentarios para mejorar el artículo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANDRÉASSIAN, V. 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *J. Hydrol.* **291**:1-27.
- BINKLEY, D; JL STAPE & MG RYAN. 2004. Thinking about efficiency of resource use in forests. *For. Ecol. Manage.* **193**:5-16.
- BONVISSUTO, GL & RC SOMLO. 1998. *Guías de condición para los campos naturales de "Precordillera" y "Sierras y Mesetas" de Patagonia.* EEA Bariloche INTA.
- CERDA, A. 1998. The Influence of Geomorphological Position and Vegetation Cover on the Erosional and Hydrological Processes on a Mediterranean Hillslope. *Hydrol. Proc.* **12**:661-671.
- FARLEY, KA; EG JOBBÁGY & RB JACKSON. 2005. Effects of afforestation on water yield: a global síntesis with implications for policy. *Glob. Change Biol.* **11**: 1565-1576.

- FERNÁNDEZ, ME; JE GYENGE & TM SCHLICHTER. 2006. Growth of *Festuca pallescens* in silvopastoral systems in Patagonia, part 1: positive balance between competition and facilitation. *Agrof. Syst.* **66**:259-269.
- FERNÁNDEZ, ME; JE GYENGE & TM SCHLICHTER. 2007. Balance of competitive and facilitative effects of exotic trees on a native Patagonian grass. *Plant Ecol.* **88**:67-76.
- FERNÁNDEZ, ME; JE GYENGE; J LICATA; TM SCHLICHTER & B BOND. 2007b. El uso de isótopos del H y O para determinar fuentes de agua e interacciones ecológicas entre especies en el N.O. de la Patagonia. En: Lazzari, MA & C Videla (eds.). *Empleo de Isótopos Estables en Agroecosistemas*. Univ. Nac. de Bahía Blanca. ISBN 978-987-1171-68-2. Pp. 137-143.
- FERNÁNDEZ, ME; JE GYENGE; J LICATA; TM SCHLICHTER & B BOND. 2008. Belowground interaction between trees and grasses in a temperate semi-arid agroforestry systems. *Agrof. Syst.* **74**:185-197.
- FERNÁNDEZ, ME; JE GYENGE & TM SCHLICHTER. 2009a. Water flux and canopy conductance of natural vs. planted forests in Patagonia, South-America. *Trees* **23**:415-427.
- FERNÁNDEZ, ME & JE GYENGE. 2009b. Testing Binkley's hypothesis about the interaction of individual tree water use efficiency and growth efficiency with dominance patterns in open and close canopy stands. *For. Ecol. Manage.* **257**:1859-1865.
- FERNÁNDEZ, ME; JE GYENGE & M DE URQUIZA. 2010. Improving adaptability to climate change in forestry species: differential drought effects on ponderosa pines growing at different competition levels in NW Patagonia. *Trees* (en revision).
- FERRANDO, JJ; JF GOYA; MD BARRERA; PF YAPURA & JL FRANGI. 1999. Biomasa y productividad aérea de bosques de *Austrocedrus chilensis* en Río Negro, Argentina. *Rev. Fac. Agron. La Plata* **104**:85-95.
- GALLOPIN, GC. 1978. Estudio ecológico integrado de la cuenca del Río Manso superior (Río Negro, Argentina). *Anales de Parques Nacionales* **XIV**: 161-230.
- GRANIER, A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.* **42**:193-200.
- GRANIER, A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.* **3**:309-320.
- GYENGE, JE. 2005. *Uso de agua y resistencia a la sequía de las principales especies forestales del noroeste patagónico, pino ponderosa y ciprés de la cordillera*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Comahue, San Carlos de Bariloche, Argentina. Pp. 364.
- GYENGE, JE; ME FERNÁNDEZ; G DALLA SALDA & TM SCHLICHTER. 2002. Silvopastoral systems in northwestern Patagonia II: water balance and water potential in a stand of *Pinus ponderosa* and native grassland. *Agrof. Syst.* **55**:27-35.
- GYENGE, JE; ME FERNÁNDEZ & TM SCHLICHTER. 2003. Water relations of ponderosa pines in Patagonia Argentina: implications for local water resources and individual growth. *Trees* **17**:417-423.
- GYENGE, JE; ME FERNÁNDEZ; G DALLA SALDA & TM SCHLICHTER. 2005. Leaf and whole-plant water relations of the Patagonian conifer *Austrocedrus chilensis*: implications on its drought resistance capacity. *Ann. For. Sci.* **62**:297-302.
- GYENGE, JE; ME FERNÁNDEZ & TM SCHLICHTER. 2007. Influence of radiation and drought on gas exchange of *Austrocedrus chilensis* saplings. *Bosque* **28**:220-225.
- GYENGE, JE; ME FERNÁNDEZ; M SARASOLA & TM SCHLICHTER. 2008a. Testing a hypothesis of the relationship between productivity and water use efficiency in Patagonian forests with native and exotic species. *For. Ecol. Manage.* **255**:3281-3287.
- GYENGE, JE; ME FERNÁNDEZ & TM SCHLICHTER. 2008b. Are differences in productivity between native and exotic trees in N.W. Patagonia related to differences in hydraulic conductance? *Trees* **22**: 483-490.
- GYENGE, JE; ME FERNÁNDEZ; M SARASOLA; M DE URQUIZA & TM SCHLICHTER. 2009a. Ecuaciones para la estimación de biomasa aérea y volumen de fuste de algunas especies leñosas nativas en el valle del río Foyel, NO de la Patagonia argentina. *Bosque* **30**:95-101.
- GYENGE, JE; ME FERNÁNDEZ & TM SCHLICHTER. 2009b. Effects on site water balance of conversion from native mixed forest to Douglas-fir plantation in N.W. Patagonia. *New For.* **36**:67-80.
- GYENGE, JE; ME FERNÁNDEZ & TM SCHLICHTER. 2009c. Effect of pruning on branch production and water relations in widely spaced ponderosa pines. *Agrof. Syst.* **77**:223-235.
- GYENGE, JE; ME FERNÁNDEZ & TM SCHLICHTER. 2010a. Effect of stand density and pruning on growth of ponderosa pines in NW Patagonia, Argentina. *Agrof. Syst.* **78**:233-241.
- GYENGE, JE; ME FERNÁNDEZ; V RUSCH; M SARASOLA & TM SCHLICHTER. 2010b. Towards a sustainable forestry development in Patagonia: truths and myths of environmental impacts of plantations with fast growing conifers. Invited Paper. *Am. J. Plant Sci. Biotech.* (special issue Argentinean Plant Science and Biotechnology) **3**:9-22
- GYENGE, JE & ME FERNÁNDEZ. 2010c. Desentrañando los mecanismos ecofisiológicos involucrados en la relación positiva entre la productividad, la

- disponibilidad y la eficiencia en el uso de los recursos en *Pinus ponderosa*. XXVIII Reunión Argentina de Fisiología Vegetal. 26 al 29 de septiembre, La Plata, Buenos Aires. Pp. 106.
- KELLIHER, FM; R LEUNING; MR RAUPACH & E-D SCHULZE. 1995. Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agric. For. Meteorol.* **73**:1-16.
- KITZBERGER, T; DF STEINAKER & TT VEBLEN. 2000. Effects of climatic variability on facilitation of tree establishment in Northern Patagonia. *Ecology* **81**: 1914-1924.
- LACLAU, P. 2003. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in Northwestern Patagonia. *For. Ecol. Manage.* **180**:317-333.
- LICATA, J. 2007. *Impact of Exotic Ponderosa Pine (Pinus ponderosa Doug. ex Laws.) Plantations on Water Resources in Northwestern Patagonia, Argentina*. Tesis Doctoral Oregon State University, Corvallis, Oregon, EE.UU. Pp. 151.
- LICATA, J; JE GYENGE; ME FERNANDEZ; TM SCHLICHTER & BJ BOND. 2008. Increased water use by Ponderosa pine plantations in northwestern Patagonia, Argentina compared with native vegetation. *For. Ecol. Manage.* **255**:753-764.
- LICATA, J; TG PYPKER; M WEIGANDT; MH UNSWORTH; JE GYENGE; ET AL. 2011. Decreased rainfall interception balances increased transpiration in exotic ponderosa plantations compared with native cypress stands in Patagonia, Argentina. *Ecophysiol.* **4**:83-93.
- LOGUERCIO, GA; M RAJCHENBERG; N RODRÍGUEZ & P PANTAENIUS. 1999. Informe del curso-taller de actualización en silvicultura de los bosques de ciprés de la cordillera. CIEFAP-GTZ. El Bolsón, 13 y 14 de mayo de 1999. Pp. 104.
- PEREYRA, FX. 2007. Geomorfología Urbana de San Carlos de Bariloche y su Influencia en los Peligros Naturales, Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* **62**:2.
- PÉREZ, A. 1989. Vegetación de importancia hidrológica en relación al potencial erosivo de la lluvia en la zona Andino-Patagónica. *Informe final CONICET*. Pp. 65.
- PIZARRO, R; A BENÍTEZ; C FARÍAS; C JORDÁN; F SANTIBÁÑEZ; ET AL. 2005. Influencia de las masas boscosas en el régimen hídrico de una cuenca semiárida. *Bosque* **26**:77-91.
- PIZARRO, R; S ARAYA; C JORDÁN; C FARÍAS; JP FLORES; ET AL. 2006. The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. *J. Hydrol.* **327**:249-257. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.11.020.
- PUTUHENA, WM & I CORDERY. 1996. Estimation of interception capacity of the forest floor. *J. Hydrol.* **180**:283-299.
- PUTUHENA, WM & I CORDERY. 2000. Some hydrological effects of changing forest cover from eucalyptus to *Pinus radiata*. *Agri. For. Meteorol.* **100**:59-72.
- REQUE, J; M SARASOLA; JE GYENGE & ME FERNÁNDEZ. 2007. Caracterización selvícola de los firantales de la cuenca central del Río Foyel (Río Negro, Patagonia Argentina). *Bosque* **28**:33-45.
- REY, M; E ANDENMATTEN & F LETOURNEAU. 2000. *Tarifa de volumen para Pino Oregón (Pseudotsuga menziesii (Mirb) Franco), en la región Andina de las Provincias de Chubut y Río Negro*. INTA, EEA Bariloche. Pp. 8.
- RIVERO, D; JE GYENGE; ME FERNÁNDEZ; J LICATA; TM SCHLICHTER; ET AL. 2006. Water use efficiency of plant community in NW Patagonia Argentina: Effects of land use change and availability of water resources. Ecology in an Era of Globalization: Challenges and opportunities for environmental scientist in the Americas. *ESA International Conference*. Mérida, Yucatan, México, 8-12 de enero del 2006.
- SAGPYA. 1999. Argentina, oportunidades de inversión en bosques cultivados. *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos*. Pp. 208.
- SAYDS. 2007. Primer Inventario Nacional de Bosque Nativo. Informe Regional Bosque Andino Patagónico. *Secretaría de Ambiente y Desarrollo de la Nación Argentina*. Pp. 61.
- SCHLICHTER, T & P LACLAU. 1998. Ecotono estepa-bosque y plantaciones forestales en la Patagonia norte. *Ecol. Austral* **8**:285-296.
- VEBLEN, TT & DC LORENZ. 1988. Recent Vegetation Changes along the Forest/Steppe Ecotone of Northern Patagonia. *Annals Assoc. Amer. Geogr.* **78**:93-111.
- WEIGANDT, M; J GYENGE; ME FERNÁNDEZ; S VARELA & T SCHLICHTER. 2011. Is forage productivity of wetlands influenced by the afforestation of upstream hillsides? A study in wetlands of NW Patagonia. *For. Syst.* **20**:165-175.
- ZHANG, L; WR DAWES & GR WALKER. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. Technical Report 99/12. *Cooperative Research Center for Catchment Hydrology, Canberra, CSIRO Land and Water*.
- ZHEN, F. 2006. Effect of Vegetation Changes on Soil Erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere* **16**: 420-427.