

Ecohidrología en cuencas de montaña sometidas a diferentes usos del suelo: presentación de un estudio que se está desarrollando en las Sierras de Córdoba

*Cortés, Samia**, *Piovano, Eduardo** y *Gurvich, Diego E.***

*Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA): UNC-CONICET. Cátedra de Hidrología General, Fac. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales: Universidad Nacional de Córdoba.

**Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (IMBIV): UNC-CONICET. Cátedra de Biogeografía, Fac. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales: Universidad Nacional de Córdoba.

E-mail: samia_solange@yahoo.com.ar

RESUMEN: En climas semiáridos, con una disponibilidad hídrica limitada, resulta crítico el entendimiento del balance hidrológico a nivel de cuencas pequeñas, para comprender los procesos actuantes y conocer la distribución espacial y temporal de la cantidad del agua; información que en su conjunto es fundamental para realizar un adecuado manejo del recurso.

Las Sierras de Córdoba son de importancia estratégica porque proveen de agua a gran parte de los habitantes de la provincia. Allí, la flora nativa brinda importantes bienes y servicios ecosistémicos, impactando en el almacenamiento y calidad del recurso agua. En las últimas décadas, las sierras han experimentado importantes cambios en el uso del suelo, como la pérdida de bosques nativos y aumento de bosques dominados por especies exóticas, como pinos (*Pinus* spp.), lo que traería aparejado una importante disminución del rendimiento hídrico, profundizando la crisis hídrica que experimenta la provincia durante períodos de sequía y en estación seca. Sin embargo, en climas semiáridos -en particular en el centro de Argentina-, los estudios con enfoque ecohidrológico son escasos.

En este contexto, en este trabajo se presenta un estudio ecohidrológico comparativo que se está desarrollando en dos cuencas serranas con litología, geomorfología, clima, estructura y suelos equivalentes, diferenciándose entre sí por el uso del suelo asociado al manejo forestal. Se definieron parcelas experimentales representativas de las fisionomías dominantes dentro de las mismas (vegetación nativa: *Lithraea molleoides* vs. exótica: *Pinus* spp.). Se determinará el Balance hídrico mediante medición y tratamiento estadístico de variables intervinientes en el ciclo: precipitación incidente, directa y fustal, interceptación, escurrimiento superficial, evapotranspiración, infiltración. Por otra parte, se cuantificará la producción de sedimentos y determinarán las propiedades geohidrológicas. Esta información será útil para elaborar modelos conceptuales del funcionamiento hídrico de las principales unidades fisionómicas de las cuencas. Asimismo, la cuantificación de servicios ecosistémicos constituirá una herramienta fundamental para lograr una Gestión Integrada del Recurso Hídrico.

INTRODUCCIÓN

Las cuencas hídricas constituyen un marco apropiado para el análisis de los procesos ambientales generados como consecuencia de las decisiones en materia de uso y manejo de los recursos suelo, agua y vegetación (Cotler y Priego, 2004). Las Sierras de Córdoba constituyen una de las principales fuentes de

aprovisionamiento de agua de la provincia (Cingolani *et al.*, 2011). Allí, los bosques de montaña controlan gran parte del clima de la región debido principalmente a la captura de la niebla, disminución de la pérdida de humedad del suelo, absorción de la radiación solar, presencia de musgos y hojarasca -que capturan el agua que ingresa al sistema y la liberan lentamente- y reducción de la velocidad de los vientos (Tobon, 2009). En particular, la flora nativa brinda importantes bienes y servicios ecosistémicos, desempeñando un importante papel no sólo en el control de la erosión, sino también en el almacenamiento y calidad del recurso agua (Fjeldså y Kessler, 1996, Renison y Cingolani, 2002, Lara *et al.*, 2009, Jobbágy *et al.*, 2013). Además, la presencia de estos bosques en clima semiárido, como es el clima de la región, es fundamental para la regulación del recurso hídrico, debido a su alta eficiencia en el consumo de agua. El clima de la región está controlado por el sistema monzónico sudamericano (Vera *et al.*, 2006), presentando una estacionalidad climática marcada (desde 550 mm en la estación húmeda octubre-marzo, a 100 mm en la estación seca abril-septiembre (Estación Villa Dolores, serie 1930-2012)), repercutiendo en el caudal de los ríos. Sumado al efecto estacional, el aprovisionamiento de agua se ve profundamente afectado durante fases de sequía, como la experimentada durante el período 2002-2005, a lo que debe sumarse el aumento en la demanda del recurso debido al crecimiento poblacional (incremento del 74,2% de habitantes en el período 2001-2010, en la localidad de estudio, Censo Indec, 2010). La actual tendencia negativa del balance hidrológico, experimentada desde el 2003 en el centro de Argentina (Piovano *et al.*, 2012), pone aún más en riesgo la disponibilidad hídrica en esta región. Existen otros factores que podrían agravar esta situación, tales como el fuego recurrente y la implantación e invasión de especies de árboles exóticos (Jobbágy *et al.*, 2013), las cuales consumen gran cantidad de agua y registran una importante pérdida por interceptación del dosel y posterior evaporación (Brown *et al.*, 2005, Huber *et al.*, 2008). Estudios recientes indican que el manejo forestal modifica significativamente las propiedades hidrológicas de los suelos (tasas de infiltración, conductividad hidráulica saturada, permeabilidad de aire e índice de continuidad de poros), con la consecuente aceleración de los procesos erosivos y aportes de sedimento a la cuenca (Ward y Trimble, 2004, Oyarzún *et al.*, 2011). Además, producen la modificación de la temperatura, humedad y acidez de los suelos (Jobbágy *et al.*, 2006). Se ha comprobado que el cambio de bosques nativos por forestación de exóticas, principalmente especies de pinos (*Pinus spp.*) y eucaliptos (*Eucalyptus spp.*) trae aparejado una importante disminución sobre el rendimiento hídrico (Waterloo, 1994, Lara *et al.*, 2009, Little *et al.*, 2009), con efectos negativos sobre las reservas de agua del suelo (Oyarzún y Huber, 1999).

Las forestaciones pueden considerarse un factor adicional en la profundización de la crisis hídrica que experimenta la provincia de Córdoba durante períodos de sequía y en la estación seca (Cingolani *et al.*, 2011). En consecuencia, en este trabajo se presenta un estudio ecohidrológico a nivel de parcela, que se realizará en cuencas de montaña de las Sierras Grandes de Córdoba, con el propósito de evaluar el efecto del cambio de la vegetación sobre los procesos hidrológicos y edáficos en una cuenca.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia geológica denominada Sierras Pampeanas Orientales, en el flanco occidental de las Sierras Grandes-Sierra de Comechingones (latitud 31° 55' S, longitud 64° 59' O). La precipitación media anual del área es de 637mm (Estación meteorológica Villa Dolores, serie 1930-2011).

Se seleccionaron dos cuencas serranas (cuenca El Medio, arroyo El Medio, y cuenca Los Hornillos, arroyo Los Hornillos, en adelante EM y LH, respectivamente, Figura 1), las cuales presentan características físicas (hidrología y geomorfología, ver Tabla 1) y fisiográficas (clima, suelos, litología y estructura) equivalentes, diferenciándose entre sí por el uso del suelo asociado con el manejo forestal. Ambas cuencas se ubican próximas a la localidad de Los Hornillos, provincia de Córdoba, Argentina, y abastecen de agua a dicha población (de unos 1.250 habitantes aproximadamente). Dentro de éstas, se definieron parcelas experimentales de 25 m x 25 m (entre los 1100 y 1200 m s.n.m), representativas de las fisionomías dominantes dentro de cada cuenca (vegetación nativa: bosque de *Lithraea molleoides* vs. vegetación exótica: bosque de *Pinus spp.*) (Figura 1). Las parcelas experimentales se eligieron teniendo en cuenta no sólo la representatividad de ambos bosques, sino también características equivalentes en lo que respecta a pendiente, orientación de ladera, posicionamiento en el relieve, proximidad a cursos de agua y altura.

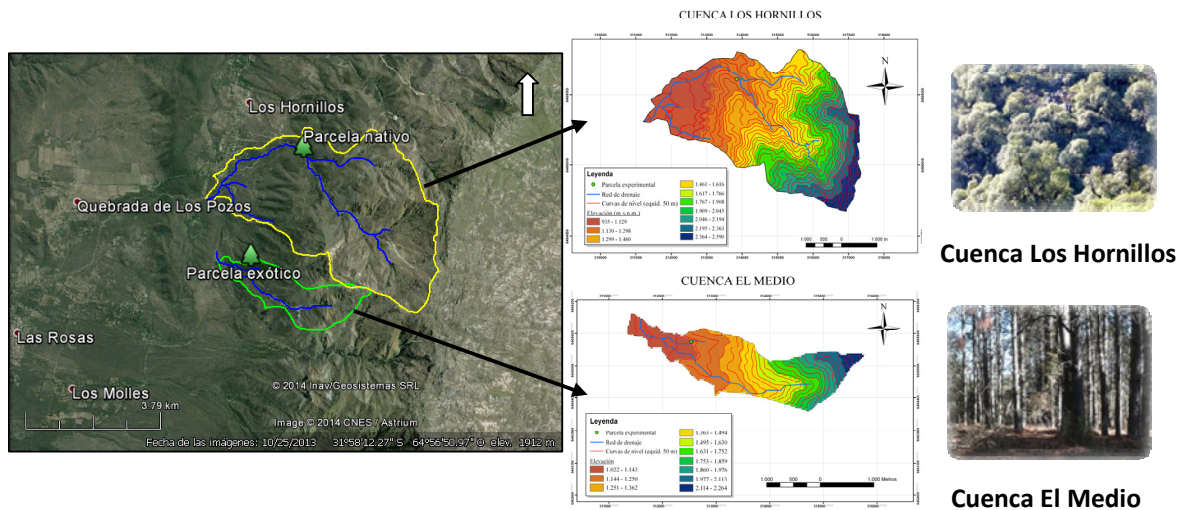


Figura 1- Ubicación de las cuencas en estudio (LH y EM), sobre el faldeo occidental abrupto de las Sierras Grandes-Sierra de Comechingones. Dentro de éstas, las parcelas experimentales seleccionadas (marcadas con un punto), y las fotografías representativas de los bosques dominantes dentro de cada cuenca.

Tabla 1. Parámetros físicos.

Descripción	Símbolo	Fórmula	Unidades	Cuenca LH	Cuenca EM
Geometría					
Área	A		km ²	16,27	3,18
Morfometría lineal					
Longitud del curso principal	Lc		km	7,59	5,18
Longitud máxima entre los extremos de la cuenca	Lm		km	6,36	4,45
Longitud máxima entre los extremos de la cuenca y el desagüe	L		km	6,27	4,22
Ancho máximo de la cuenca	AM		km	3,74	1,17
Ancho medio de la cuenca	Am	A/Lm	km	2,56	0,71
Longitud total de la red hídrica	Lt	Σlong cursos	km	12,93	4,75
Perímetro	P		km	18,97	10,7
Forma de la cuenca					
Factor de forma	Rf	A/L ²	adimens	0,41	0,18
Radio de circularidad	Rc	$4\sqrt{A/P^2}$	adimens	0,57	0,35
Radio de elongación	Re	$(2\sqrt{A/P})/L$	adimens	0,73	0,48
Índice de compacidad	Ic	$0,28*(P/\sqrt{A})$	adimens	1,32	1,68
Amplitud de la cuenca	W	A/L	km	2,6	0,75
Índice de alargamiento	Ia	Lm/AM	adimens	1,7	3,8
Relieve					
Altitud máxima	Amáx		m s.n.m.	2590,09	2264
Altitud mínima	Amín		m s.n.m.	934,63	1022
Altitud media			m s.n.m.	1762,37	0
Altitud más frecuente			m s.n.m.	1417,42	1208,5
Altitud de frecuencia media			m s.n.m.	1690	1542,9
Desnivel	D	Amáx-Amín	m s.n.m.	1655,46	1242
Pendiente media de la cuenca			%	39,62	47,58
Pendiente de los cursos principales		$((Amáx-Amín)/Lc)*100$	%	0,22	0,24
Parámetros que relacionan área de la cuenca con la longitud de los cursos					
Densidad de drenaje	Dd	Lt/A	km/km ²	0,79	1,5
Frecuencia de cursos	Fc	NTC/A	ríos/Km	1,11	0,94
Otros parámetros					
Número total de cursos	NTC		ríos	18	3
Orden de la red hídrica	Ω		UNID	3	2

La cuenca LH o cuenca con bosque nativo, tiene una superficie aproximada de 16,27 Km², mientras que EM o cuenca con forestación, presenta 3,18 Km². El arroyo Hondo, transversal al arroyo EM, recolecta y drena La vegetación de estas cuencas pertenece a la provincia fitogeográfica Chaqueña, Distrito Chaco Serrano, subdistrito fitogeográfico Sierras Pampeanas, dominio del molle de beber (*Lithraea molleoides*) (Cabrera, 1976, Cabido *et al.*, 2003). La cuenca LH presenta un bosque nativo mixto maduro, con escasa intervención

antrópica y carga moderada de ganado, dominado por *Lithraea molleoides*, mientras que en la cuenca EM, está dominada por *Pinus spp.*, y al igual que LH presenta escasa intervención del hombre y una carga de ganado moderada. La forestación ocupa una superficie aproximada de 1 Km², representando un 30 % aproximadamente de la superficie total de la cuenca. Actualmente conviven individuos de más de 35 años, con renovales ubicados principalmente en las márgenes del arroyo. Estas forestaciones fueron fomentadas por la Provincia de Córdoba en la década del '70, asegurando que tendrían efectos positivos sobre “el ambiente”, la industria maderera y el turismo (Gurvich, *et al.*, 2009).

DISEÑO EXPERIMENTAL Y METODOLOGIA

En la Figura 2 se presenta el diseño de las parcelas experimentales, representando las dimensiones de las mismas y las diferentes metodologías empleadas (detalladas más adelante) para la medición de los componentes y variables intervinientes en el ciclo hidrológico, la producción de sedimentos y la determinación de las propiedades hidrológicas de los suelos.

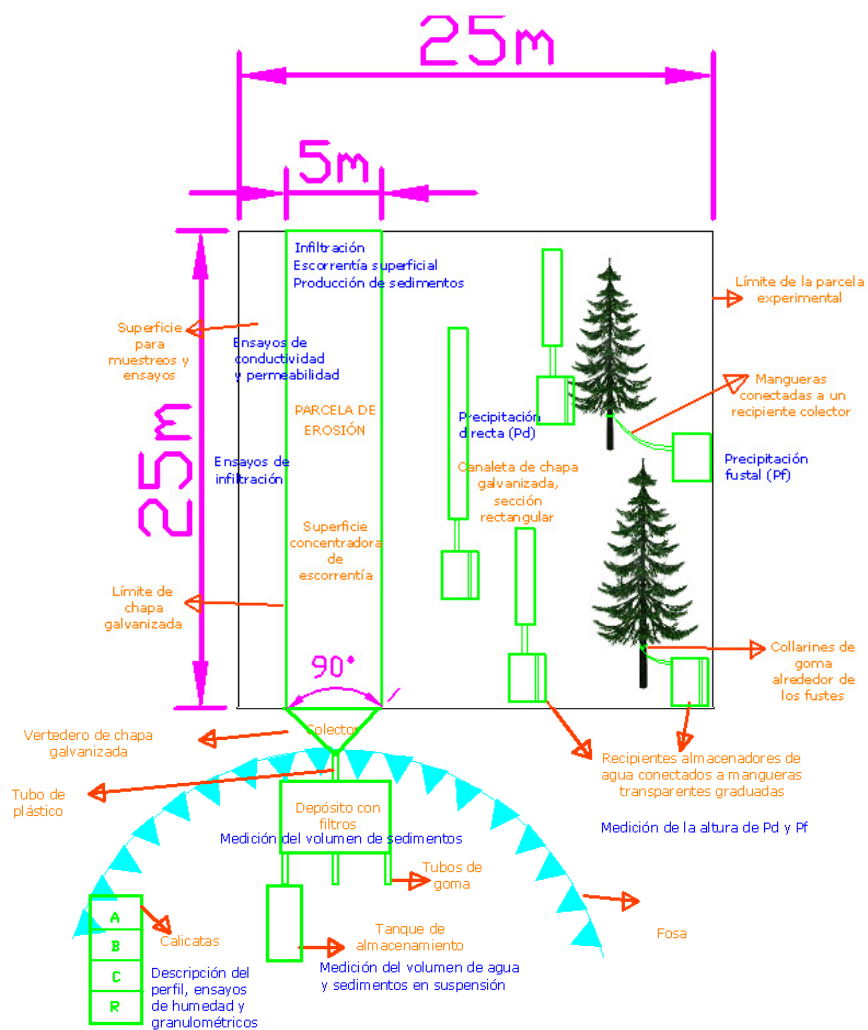


Figura 2- Esquema de las parcelas experimentales.

La instalación de las parcelas ha sido finalizada recientemente. Las actividades realizadas hasta el momento y las previstas para el comienzo de la próxima estación húmeda incluyen:

- 1) Instalación de dos estaciones meteorológicas de registro continuo (Davis Instrument), próximas a las parcelas, para determinar variables tales como precipitación total (Pt), temperatura, humedad, radiación solar, velocidad y dirección de vientos.
- 2) Medición de los tres principales componentes de redistribución de las precipitaciones sobre cubierta forestal: Precipitación directa (Pd), Precipitación fustal (Pf) y pérdida de agua por interceptación (Ic); siguiendo las metodologías propuestas por Huber *et al.* (2010) y Huber y Oyarzún (1984). Se diseñaron e instalaron canaletas metálicas para la determinación de la Pd, y anillos de goma colocados alrededor de troncos de los árboles, para determinar la Pf (Figuras 3 y 4). El agua de Pd y Pf recolectada se conduce a su respectivo registrador. Cálculo de Ic como la diferencia entre Pt y Pn (Precipitación neta= Pd + Pf). Mediante prueba Mann-Whitney se establecerán las diferencias en el valor de estas pérdidas, entre ambas cuencas.
- 3)



Figura 3- Medición de la Precipitación directa (Pd).



Figura 4- Medición de la Precipitación fustal (Pf).

- 4) Instalación de parcelas permanentes de erosión (25 m x 5 m, Figura 5) dentro de las parcelas experimentales, para determinar tasas de escorrentía superficial, tasas de erosión (producción de sedimentos) y tasas de infiltración (de Alba, 1997, de Alba *et al.*, 2002). Los sedimentos recolectados serán separados por filtrado y posteriormente secados para determinar su concentración. Asimismo, se implementará el método de las “estacas de erosión” según lo propuesto por Hudson, 1997.



Figura 5.- Parcela de erosión para determinación de tasas de escorrentía, infiltración y erosión.

Complementariamente, se planean realizar ensayos puntuales de las tasas de infiltración utilizando el método del infiltrómetro de doble anillo (Gabriels *et al.*, 2011), a fin de evaluar las variaciones espaciales y temporales dentro de las parcelas experimentales. Para ello, se tomarán cinco puntos de muestreo en cada una de las parcelas y se medirá la infiltración bajo diferentes condiciones de humedad del suelo.

- 5) Determinación de la variación del contenido de agua edáfica a lo largo de los perfiles de suelo (ΔW) a partir de mediciones estacionales en campo utilizando un equipo TDR. Con estos datos, se procederá al cálculo de la cantidad de agua involucrada en la evapotranspiración (EvTr), utilizando la ecuación empleada por Huber *et al.* (2010). $EvTr = P_n - Q - \Delta W$, siendo P_n la Precipitación neta, Q la escorrentía y ΔW la variación del contenido de humedad del suelo.
- 6) Estudio morfológico y descriptivo de perfiles de suelo (calicatas). Determinación de parámetros texturales, a diferentes profundidades, utilizando el Particle Size Distribution Analyzer LA-950 VZ HORIBA.
- 7) Ensayos in situ de carga hidráulica constante, para determinar la conductividad hidráulica y el coeficiente de permeabilidad, en tres perforaciones ubicadas en cada una de las parcelas, utilizando el método de Lefranc (Dhouib *et al.*, 1998). Las perforaciones se distribuyen aleatoriamente dentro de las parcelas, realizando dichos ensayos en la capa superficial de suelo, debido a la presencia de material de derrubio.
- 8) Determinación del Balance hídrico teniendo en cuenta las variables intervinientes en el ciclo hidrológico, de acuerdo a lineamientos seguidos por Echeverría *et al.* (2007) y Huber *et al.* (2010).

Se propone efectuar dichas mediciones a lo largo de tres años hidrológicos (agosto 2014-julio 2017).

CONCLUSIONES

La evaluación del balance hidrológico a nivel de cuencas pequeñas (en el orden de las decenas de kilómetros cuadrados) resulta crítica para comprender más profundamente los procesos actuantes, la interrelación entre reservorios y flujos, información fundamental para realizar un adecuado manejo del recurso agua.

El estudio ecohidrológico planteado permitirá evaluar el impacto que produce el cambio del uso del suelo sobre el balance hídrico de una cuenca, en particular, el control que ejerce la vegetación (nativa vs. forestal) sobre los componentes de interceptación, escurrimiento superficial, evapotranspiración e infiltración. Asimismo, permitirá analizar la relación existente entre la precipitación total y los componentes de la redistribución de las precipitaciones (directa y fustal), según tipo de cobertura. Finalmente, permitirá la evaluación del control que ejerce la vegetación sobre propiedades geohidrológicas (conductividad hidráulica y permeabilidad del suelo), y los procesos erosivos, con el consecuente aporte de sedimentos a las cuencas. Todo esto, bajo un contexto de cambio climático global, es imprescindible para fundamentar políticas de manejo de los bosques nativos y exóticos. El vacío de información en el campo de la hidrología de los bosques del chaco serrano, es lo que determinó la necesidad de investigación y valoración de los principales servicios ecosistémicos que éstos nos brindan. Este tipo de análisis es inédito en la región central de Argentina y en climas semiáridos en general, por lo cual, la información resultante será de gran utilidad para pronosticar y diagnosticar respuestas ante las diferentes problemáticas socio-ambientales. Esto constituirá una herramienta fundamental para ser aplicada en escenarios similares, contribuyendo a lograr una adecuada Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) (Postel, 1992).

REFERENCIAS

- Bonulami, A., Martino, R., Baldo, E., Zarco, J., Sfragulla, J., Carignano, C., Kraemer, P., Escayola, M. y Tauber, A. 2000. Hoja Geológica 3166-IV: Villa Dolores. Boletín – nº 250. Buenos Aires. Secretaría de Minería, SEGEMAR, Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Brown, A.E., L. Zhang, T.A. y McMahon, A.W. Western. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310:28-61.
- Cabido, D., Cabido, M. y Garré, S. 2003. Regiones Naturales de la provincia de Córdoba. Agencia Córdoba Ambiente, Córdoba.
- Cabrera, A. L. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, Tomo II Fs. 1. Ed. ACME. Bs. As. Argentina, 1:85.
- Cingolani, A. M., Gurvich, D. E., Zeballos, S. y Renison, D. 2011. Sin ecosistemas saludables no hay agua segura. El caso de Córdoba. *Revista Ú-número 111*, 4:48-52.
- Cotler, H. y Priego, A. 2004. El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: caso de la cuenca Lerma-Chapala. SEMARNAT-INE.
- de Alba, S. 1997. Metodología para el estudio de la erosión en parcelas experimentales: relaciones erosión-desertificación a escala de detalle. En J.Ibáñez, B.L. Valero Garcés y C. Machado (Eds.). *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación*. Centro de Ciencias Medioambientales, Geoforma Ediciones. Logroño, 34:259-293.
- de Alba, S., Benito, G. y Gonzáles, A. 2002. Parcelas experimentales para el estudio de erosión hídrica. Finca experimental La Higuera. 1ª Reunión sobre Hidrología Forestal. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.*, 13: 45-53.

- Dhouib, A., Shahrouh, I., Lafhaj, Z., y Delfaut, A. 1998. Essais Lefranc pour la mesure de la perméabilité in situ: étude théorique et interprétation pratique. *Revue française de géotechnique*, (84), 9:27-36.
- Echeverría, C., Huber, A. y Taberlet, F. 2007. Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile. *BOSQUE* 28(3): 271-280.
- Fjeldså, J. y Kessler, M. 1996. Conserving the Biological Diversity of Polylepis woodlands of the highland of Perú and Bolivia. A Contribution to Sustainable Natural Resource Management in the Andes. NORDECO, Copenhagen, Denmark, 1:250.
- Gabriels, D., Lobo L., D. y Pulido M., M. 2006. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. *Venesuelos*, 14:7-22.
- Gurvich, D.E., Renison, D. y Barri, F. 2009. El rol del ecólogo ante la crisis ambiental actual. *Asociación Argentina de Ecología. Ecología Austral*, 19:233-238.
- Huber, A. y Oyarzún, C. 1984. Factores reguladores de la intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque* 6(2): 74-82.
- Huber, A., Iroume, A., y Bathurst, J. 2008. Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological Processes*, 22, 6:142-148.
- Huber, A., Iroume, A., Mohr, C. y Frene, C. 2010. Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque (Valdivia)*. Vol.31, n.3, 11:219-230.
- Hudson, N. W. (1997). Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía (Vol. 68). Food & Agriculture Org.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Manfred. 2006. Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba: "Los Suelos". Nivel de reconocimiento 1:500.000. Córdoba. Agencia Córdoba Ambiente, Sociedad del Estado.
- Jobbágy, E. G., Vasallo, M., Farley, K. A., Piñeiro, G., Garbulsky, M. F., Noretto, M. D., Jackson, R.B., Paruelo, J. M. 2006. Forestación en pastizales: hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos. *Agrociencia*. Vol. X n.2, 15:109-124.
- Jobbágy, E., Acosta, A. y Noretto, M. 2013. Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina). *Ecología Austral* 23:000-000. Asociación Argentina de Ecología.
- Lara, A., Little, C., Urrutia, R., Mcphee, J., Alvarez-Garretón, C., Oyarzún, C., Soto, D., Donoso, P., Nahuelhual, L., Pino, M. y Arismendi, I. 2009. Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management*, 258:415-424.
- Little, C., Lara, A., Mcphee, J. y Urrutia, R. 2009. Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South- Central Chile. *Journal of Hydrology*. 374: 162-170.
- Oyarzún, C. y Huber, A. 1999. Water balance in young plantations of *Eucalyptus globulus* and *Pinus radiata* in southern Chile. *Terra*, 17: 35-44.
- Oyarzún, C., Frêne, C., Lacrampe, G., Huber, A. y Hervé, P. 2011. Soil hydrological properties and sediment transport in two headwater catchments with different vegetative cover at the Coastal Mountain Range in southern Chile. *BOSQUE* 32(1).
- Piovano, E.L., Guerra, L. y Córdoba, F.E. 2012. Paleoperspectiva del cambio hidroclimático reciente (1970-actualidad) en la región Pampeana. *Acta de resúmenes de la XIII Reunión Argentina de Sedimentología*. 1:169-170.
- Postel, S. 1992. *Last Oasis: Facing Water Scarcity*. W.W. Norton & Co. London & New York.
- Renison, D. y Cingolani, A. M. 2002. Evaluation of *Polylepis australis* (Rosaceae) seedling survival and growth to choose seeding plants. *Agriscientia* XIX, 3:63-66.
- Vera, C., Higgins, W., Amador, T., Ambrizzi, R., Garreaud, D., Gochis, D., Gutzler, D. Lettenmaier, Marengo, J., Mechoso, C. R., Nogues-Paegle, Silva Dias, P. L. y Zhang, C. 2006. Toward a unified view of the american monsoon systems. Boston, Massachusetts. American Meteorological Society.
- Ward, A.D. y Trimble, S.W. 2004. *Environmental Hydrology*. London, UK. Lewis Publishers CRC Press Company, 1:472.
- Waterloo, M.J. 1994. Water and Nutrient Dynamics of *Pinus caribaea* Plantation Forests on Former Grassland Soils in Southwest Viti Levu, Fiji. PhD Thesis. Faculty of Earth Sciences. Vrije Universiteit, Amsterdam.