

Impacto en los flujos hídricos por la presencia de horizontes petrocálcicos en parcelas forestadas en ambientes de llanura

MUJICA, C.R.¹; MILIONE, G.M.²; BEA, S.A.³; GYENGE, J.E.⁴

RESUMEN

Alrededor del mundo existen numerosos paisajes con presencia de horizontes petrocálcicos, como en el caso de la llanura Pampeana en Sudamérica. En muchos casos, estos horizontes constituyen una barrera física al flujo de agua, e incluso un reservorio de agua para consumo de las plantas. La llanura Pampeana es uno de los paisajes económicamente más productivos de Argentina, y tal como en otras regiones que naturalmente estuvieron cubiertas con pastizales, estos han sido reemplazados por otros usos. En muchos casos, estos cambios en el uso del suelo han modificado los flujos hídricos y de solutos de estos sistemas, y el ejemplo más drástico es el de la forestación por su gran consumo de agua y la toma selectiva de solutos. Sin embargo, el impacto de esta práctica sobre suelos con presencia de horizontes petrocálcicos no ha sido suficientemente estudiado. Dentro de esta región se han monitoreado variables hidrológicas de un conjunto de parcelas de pastizal y forestación apareadas, con niveles de horizontes petrocálcicos. Se desarrolló un modelo numérico basado en procesos físicos/biológicos y condiciones de contorno atmosféricas, con el objetivo de cuantificar los flujos hídricos y el agua disponible para el consumo de la forestación. Los resultados del modelo sugieren desconexión hidráulica entre la forestación y el freático debido a la presencia del horizonte petrocálcico, con solo un ~ 13% de agua adquirida a través del horizonte petrocálcico. Se predicen largos períodos de estrés hídrico durante los momentos de gran demanda atmosférica, y el consumo de agua por parte de la forestación está restringido a las porciones por encima del horizonte petrocálcico. Las tasas de transpiración fueron de (~700-723 mm año⁻¹) similar, o aun mayor a lo reportado en la zona. El horizonte petrocálcico retiene agua y reduce el drenaje profundo.

Palabras clave: cambios en el uso del suelo, ecohidrología, horizonte petrocálcico.

¹Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rca de Italia 780, Azul, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: cmujica@ihlla.org.ar

²Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Cátedra de Dasonomía (UNCPBA). Av. Rep. de Italia 780, Azul, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: gmilione@faa.unicen.edu.ar

³Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), Av. Rep. de Italia 780, Azul, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: sabea@ihlla.org.ar

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Balcarce, Agencia de Extensión Rural (AER) Tandil, Gral. Rodríguez 370 (7000), Tandil, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: javier_gyenge@yahoo.com

Recibido 15 de febrero de 2019 // Aceptado 11 de abril de 2019 // Publicado online 11 de diciembre de 2019

ABSTRACT

Around the world there are a lot of landscapes with presence of petrocalcic horizon, as well as in Pampas in South America. Usually these horizons constitute a barrier to the water flows, and even a reservoir of water for plant consumption. It is one of the most economically productive landscapes and, as in other regions that were naturally covered with pastures, these have been replaced by other uses. In many cases, these changes in land use have modified the water and solute flows and the most drastic example is afforestation due to its high water consumption and the selective uptake of solutes. However, the effect of this practice on soils with the presence of a petrocalcic horizon has not been sufficiently studied. Within this region, hydrological variables of a paired grassland and afforestation plot with levels of petrocalcic horizons have been monitored, and a numerical model based on physical/biological processes and atmospheric contour conditions was developed, with the objective of quantifying water flows and the water available for the consumption of afforestation. The results of the model suggest hydraulic disconnection between afforestation and the water table due to the presence of the petrocalcic horizon, with only ~ 13% of total groundwater usage. Long periods of water stress are predicted during times of high atmospheric demand, and forest water consumption is restricted to that soil portions above the petrocalcic horizon. Transpiratory rates were similar (~ 700-723 mm year⁻¹), or even higher than reported in the area. The petrocalcic horizon retains water and reduces deep drainage.

Keywords: changes in land use, ecohydrology, petrocalcic horizon.

INTRODUCCIÓN

Numerosos ambientes geológicos naturales tienen la presencia de horizontes petrocálcicos con diferentes espesores, profundidades y grados de cementación (Duniway *et al.*, 2010; Kuznetsova y Khokhlova, 2015). Los horizontes petrocálcicos (conocidos también en la llanura Chaco-Pampeana como "tosca") son considerados habitualmente como una barrera física para el desarrollo de las raíces, y al flujo de agua (Shreve y Mallery, 1932; Pazos y Mestelan, 2002; Dietrich *et al.*, 2014). A pesar de que la tosca es capaz de almacenar grandes volúmenes de agua disponible para ciertas especies vegetales (, Duniway *et al.*, 2007; Gibbens y Lenz, 2001; Gile, 1961; Hennessy *et al.*, 1983), la dinámica del flujo de agua en estos ambientes ha sido poco estudiada (Duniway *et al.*, 2007, 2010). De hecho, algunos autores sugieren que la presencia de tosca incrementa la resistencia a la sequía de determinadas comunidades vegetales naturales (Herbel *et al.*, 1972; Duniway *et al.*, 2010). Sin embargo, esos trabajos se limitan solo a sitios áridos o semiáridos (Duniway *et al.*, 2010; Georgen *et al.*, 1991; Mengel, 1994; Monger *et al.*, 2005), y ninguno incluye la presencia de freatófitas.

Los ambientes de llanura albergan importantes actividades económicas como es el caso de la región Pampeana, donde el horizonte petrocálcico es una característica recurrente en toda la región. Esta llanura es uno de los paisajes más importantes de Argentina, con un producto bruto anual de aproximadamente 146 U\$D ha año⁻¹ en 2001-2005. (Carreño *et al.*, 2012). El reemplazo de los pastizales por cultivos es una práctica globalizada, pero el reemplazo por forestaciones ha tenido un efecto dramático (Fuchs *et al.* 2015; Herron *et al.*, 2002; Jobbágy y Jackson, 2007;

Nosetto *et al.*, 2012; Paruelo *et al.*, 2006; Ramankutty *et al.* 2018). Esto ha ganado importancia en los últimos años debido a la gran demanda de productos forestales, al mercado de secuestro de carbono y, en particular en la región Pampeana, a los incentivos fiscales y financieros nacionales y provinciales (Wright *et al.*, 2000). La distribución global, la importancia económica y el riesgo de degradación de los suelos en ambientes de llanura hacen que comprender su funcionamiento ecohidrológico sea crucial.

Los cambios en el uso del suelo tales como transiciones entre pastizales y forestaciones alteran el balance hídrico, el agua disponible para las plantas (PAW), y como consecuencia de esto, el flujo de sales (Jobbágy y Jackson, 2004). En este sentido, los árboles aumentan la demanda de agua por su mayor rugosidad aerodinámica, área foliar, intercepción de lluvia y desarrollo de raíces, y menor albedo (Calder, 1998; Jackson *et al.*, 2001; Nosetto *et al.*, 2012). En estos ambientes con escasas pendientes topográficas, los flujos de agua son preferentemente verticales, y el escurrimiento es casi nulo (Varni y Usunoff, 1999; Nosetto *et al.*, 2007; Devito *et al.*, 2012).

Los modelos numéricos son una herramienta capaz de capturar los procesos físicos/biológicos en el continuo suelo-planta-atmósfera, que controlan el flujo de agua, y PAW en estos ambientes (ej., modelo MIN3P, Bea *et al.*, 2012; Mayer *et al.*, 2002). Ellos resuelven las ecuaciones que controlan el flujo de agua y vapor, y el transporte de energía. El objetivo de este trabajo es comprender, utilizando estas herramientas numéricas, cómo modifica la presencia de horizontes petrocálcicos el funcionamiento ecohidrológico de una parcela de pastizal forestada en ambientes de llanura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de estudio

Este estudio se localizó en la subcuenca sur del arroyo Azul, entre 36°49'39" y 37°21'6" S, y entre 60° 9'10" y 59°45'53" W (figura 1). Las pendientes topográficas rondan entre 5%, 0,5-0,8%, y 0,2% en cuenca alta, media y baja, respectivamente (Varni y Usunoff, 1999). El clima es templado húmedo a subhúmedo (Burgos y Vidal, 1951), las temperaturas rondan los 24 y 10 °C en verano e invierno, respectivamente. El suelo fue clasificado como Argiudol petrocálcico (Soil Survey Staff, 2014, figura 2a).

Características del pastizal y de la forestación

La forestación consiste de 7,8 ha plantadas con *Eucalyptus viminalis* (figura 1) en 1999 con un marco de plantación de 2,5 por 3 m. Actualmente el 33% de los árboles se perdió por su alta densidad de plantación inicial, y por la ausencia de manejo, permaneciendo vivos actualmente ~893 árboles ha⁻¹. El sotobosque es escaso, casi totalmente

compuesto por *Cynodon dactylon*. Adyacente a la forestación está la parcela de pastizal (figura 1a y b), dominada por matas monoespecíficas de poáceas (*Paspalum quadrifarium*, *Stipa brachychaeta*, *Pithochaetium spp.*, *Mellica spp.*, *Bothriochloa laguroides*), y apiáceas (*Eryngium paniculatum*).

Parámetros climáticos y del suelo monitoreados

Por un lado, respecto de las variables atmosféricas se midió la temperatura del aire (T_{atm}) y la humedad relativa (RH) en intervalos de una hora con sensor Cavadevices (modelo TC1047A, HIH4000 y 2K14; Cavadevices.com, Inc., CABA, Bs. As., AR). Las precipitaciones (P) y el flujo fustal se recolectaron con pluviómetro y embudo instalado en el tronco, respectivamente con intervalos de un mes. Esta información se complementó con datos de dos estaciones meteorológicas cercanas (ver "La Chiquita" y "La Germania" en figura 1a), localizadas a 4.3 y 8.2 km, respectivamente (BDH, 2016).

Por otro lado, se midió el contenido de agua (VWC, m³ m⁻³) y temperatura (T, °C) del suelo; y temperatura (T_{wt}) y temperatura (T_{wt}) y nivel del freático, a intervalos de una hora con sensores Decagon (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EUA.), desde el 10 de diciembre del 2015 al 23 de febrero del 2017. El VWC se midió a 0,2 y 0,5 m de profundidad por duplicado en ambas parcelas y se validaron por el método gravimétrico una vez por mes durante todo el período. Las mediciones en el freático se hicieron en pozos encamisados con PVC de 6 m de profundidad (figura 1b).

Medición de la transpiración de la forestación

Se midió el flujo de savia en 9 árboles mediante sensores de disipación de calor tipo Granier (Granier, 1987, figura 1c). Estos consisten de dos termocuplas instaladas en contacto con el xilema del árbol y separadas a 10 cm entre sí y a 1 m de altura en el tronco, solo una de ellas se calienta, y el flujo de savia se calcula en base a la diferencia de temperaturas entre ellas. Así, la velocidad de flujo de savia (v , mm s⁻¹) se calculó con la fórmula establecida por Granier (1987):

$$v = 0,119k^{1,231} \quad (1)$$

Donde k es función de la diferencia de temperatura entre los dos sensores instalados (ΔT):

$$k = \frac{(\Delta T_m - \Delta T)}{\Delta T} \quad (2)$$

donde ΔT_m es la diferencia de temperatura cuando $v=0$. Finalmente, para calcular la transpiración de un árbol (F) se relacionó v con el área proporcional de xilema activo de un árbol (f_A) y para conocer la transpiración de todo el rodal ($Q_{T,SP}$, mm s⁻¹) se relacionó el área trasversal de un árbol con el área basal del rodal (B_A , m² ha⁻¹). El área basal se obtuvo por el método de Bitterlich (Bitterlich, 1948).

$$F = v f_A \quad (3)$$

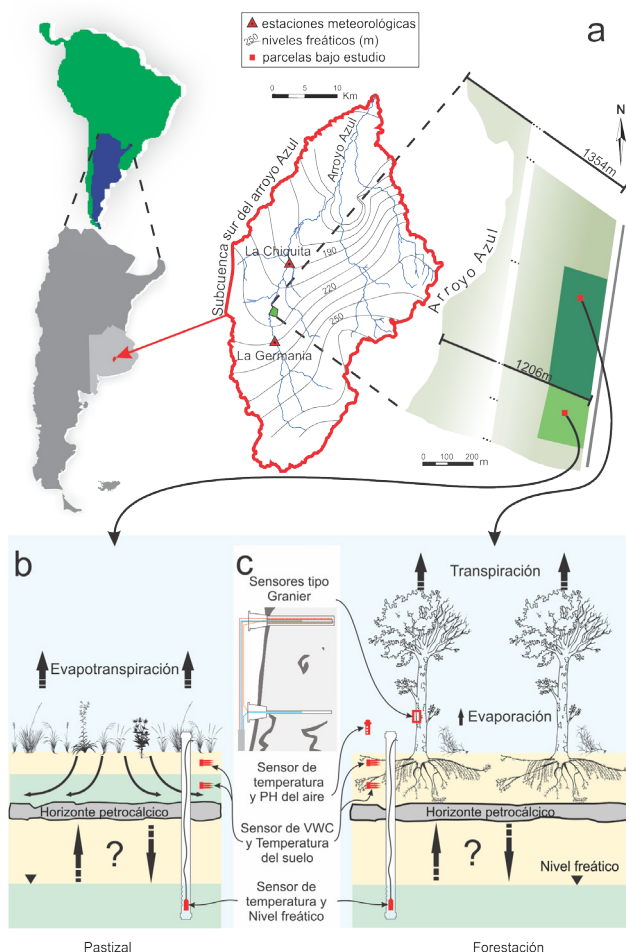


Figura 1. (a) Localización del sitio de estudio, (b) y (c) principales variables medidas.

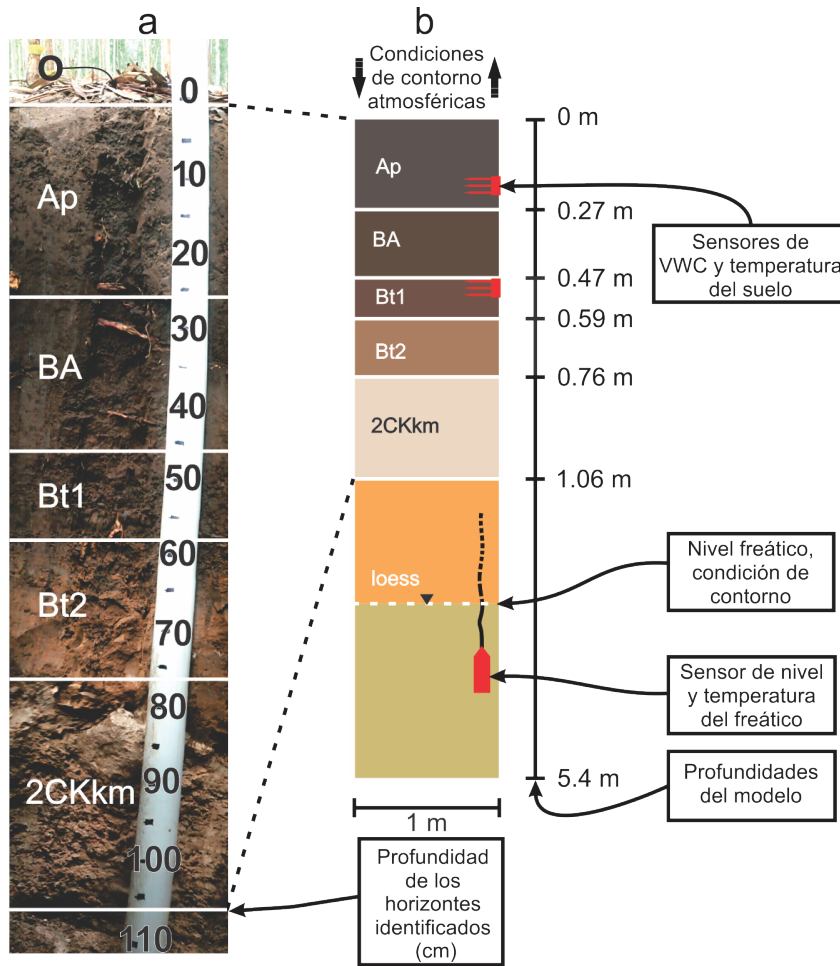


Figura 2. (a) Horizontes identificados en el perfil, (b) dominio del modelo y condiciones de contorno.

$$Q_{T,SF} = FB_A \quad (4)$$

Ecuaciones del modelo numérico

El modelo numérico utilizado fue MIN3P (para más detalle ver Bea *et al.*, 2012 y Mayer *et al.*, 2002), y aquí se describen las ecuaciones relevantes para el análisis de los resultados.

El flujo se resuelve con la ecuación de Richards expandida (Bea *et al.*, 2012):

$$\frac{\delta\phi S_l \rho_l}{\delta t} + \frac{\delta\phi S_v \rho_v}{\delta t} = \nabla \cdot q_l + \nabla \cdot q_v + f_w \zeta \quad (5)$$

donde ϕ es la porosidad ($L^3 L^{-3}$), S_l y S_v son las saturaciones en líquido y vapor (calculadas con el modelo de van Genuchten, 1980), respectivamente (-), ρ_l y ρ_v son las densidades en fase líquida y vapor ($M L^{-3}$), respectivamente, t es el tiempo (T), q_l y q_v son los flujos en fase líquida y vapor ($M L^{-2} T^{-1}$), respectivamente, f_w es el término fuente/sumidero ($M L^{-2} T^{-1}$), mientras que ζ es una constante que

relaciona la superficie en el contorno con el volumen del medio poroso. ($L^2 L^{-3}$).

Evaporación (E , $M L^{-2} T^{-1}$), lluvia (P , $M L^{-2} T^{-1}$), escorrentía (J_{sr} , $M L^{-2} T^{-1}$), y transpiración (Q_T , $M L^{-2} T^{-1}$), son consideradas en el término fuente/sumidero f_w (ecuación 5), definido como:

$$f_w = P + F_i I + E + J_{sr} + Q_T \quad (6)$$

El cálculo de la transpiración (Q_T en ecuación 6) depende de la humedad del suelo, y está limitada por la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (ET_c). Esta última es calculada con la ecuación de Penman-Monteith actualizada por Allen *et al.* (2006), y además incluye el coeficiente de cultivo (K_c) para *E. viminialis* extraído de Besteiro (2014). Así, en MIN3P, Q_T se calcula como la suma de la transpiración de cada volumen discreto de suelo representando la rizósfera de acuerdo a:

$$Q_T = ET_c \sum_i \frac{\alpha_i V_i R_{k(i)} S_{a,i}}{\sigma_{j \in l} V_j R_{k(j)} S_{a,j}} \quad (7)$$

donde α_i es el factor de estrés (es la relación entre la transpiración real y la potencial), $R_{k(i)}$ es la densidad longitudinal de

raíces ($L L^{-3}$), V_i es el volumen discreto de suelo (L^3). Así, el factor de estrés del i -ésimo volumen discreto de suelo (α_i) es calculado con la expresión dada por Battaglia y Sands (1997):

$$\alpha_i = \frac{w_i^2 \exp(a_w w_i)}{w_0^2 \exp(a_w w_0) + w_i^2 \exp(a_w w_i)} \quad (8)$$

$$w_i = \frac{S_{a,i}^{avg} - S_a^{lim}}{S_a^f - S_a^{lim}} \quad (9)$$

donde w_i define la reserva de agua extractable, w_0 es el valor de w para el cual $=1/2$, a_w es la pendiente de la porción lineal de la curva de factor de estrés y agua disponible en el suelo, $S_{a,i}^{avg}$ es la saturación del suelo en la rizósfera, S_a^f es la saturación a capacidad de campo, y S_a^{lim} es la saturación en punto de marchitez permanente. Ambos, w_0 y a_w , fueron extraídos de Battaglia y Sands (1997). Nótese que este método es más riguroso desde la perspectiva del medio poroso, porque tiene en cuenta la variación espacial de los parámetros físicos del suelo. Sin embargo, es menos riguroso desde el punto de vista de la fisiología del árbol, ya que se asume que la apertura estomática está controlada por el valor de w_i (Mayer *et al.*, 2012).

Dominio del modelo y condiciones de contorno

El dominio del modelo consistió de un bloque de 5,4 m de profundidad con 6 capas correspondientes a los horizontes de suelo observados, sin tener en cuenta el orgánico (O, figura 2b). En cada uno de estos horizontes, la textura se determinó por medio del método de Bouyoucos (1936), la densidad aparente se obtuvo de cilindros sin disturbar de 169,65 cm³ que se pesaron después de secar durante 24 horas a 105 °C en horno. Por un lado, los parámetros del modelo de van Genuchten se obtuvieron usando el software Rosetta Lite v.1.1 (Schaap *et al.*, 2001) basado en la textura y en la densidad aparente (Van Genuchten, 1980). Por otro lado, las densidades de raíces se calibraron usando el modelo PEST (Doherty, 2016) acoplado a MIN3P, utilizando los valores observados de VWC y $Q_{T,SF}$ como punto de referencia.

Por un lado, en la parte superior del modelo se impusieron condiciones atmosféricas medidas, mientras que los límites laterales se consideraron impermeables al flujo de agua y calor (figura 2b). Por otro lado, la radiación solar se calculó utilizando los datos de la estación meteorológica, y se escaló por un factor dado por cobertura forestal del suelo. Esta se obtuvo a través de análisis de imágenes tomadas desde abajo del dosel, utilizando el software Image J. Finalmente, la velocidad del viento de alrededor de 2,75 m s⁻¹ se redujo un 50% de acuerdo a lo hallado por otros autores en rodales similares (ej., Souza *et al.*, 2010). El nivel freático se impuso como nivel variable en el tiempo en el contorno inferior del dominio de acuerdo a las mediciones (figura 2b). Se plantearon un modelo base y un escenario alternativo para evaluar la sensibilidad del modelo y potenciales modelos conceptuales. Los parámetros usados en el caso base y alternativos se detallan en la tabla 1.

RESULTADOS

Evolución del contenido de agua VWC en el suelo

En el pastizal a 0,2 m (figura 3b), el VWC responde rápidamente a las lluvias tanto a 0,2 m como a 0,5m (figura 3). En la forestación, VWC también respondió a los eventos de precipitación a 0,2 m, pero los valores alcanzados rápidamente decrecieron hasta el punto de marchitez permanente (WP, figura 3b). A 0,5 m prácticamente los VWC no son perturbados por los eventos de lluvia en la forestación (figura 3c).

Evolución del nivel freático

Los niveles freáticos evolucionaron de manera similar en ambas parcelas, partiendo de ~3,8 m de profundidad al inicio y descendió durante todo el período monitoreado hasta ~5,4m de profundidad. Cabe destacar que no se observó una relación directa entre los niveles freáticos y la presencia de la forestación.

Evolución de la transpiración de la forestación

Debido al malfuncionamiento del equipo, las mediciones de flujo de savia solamente solo se pudieron llevar a cabo en dos intervalos de tiempo. En el primer intervalo fluctuó entre 1,95 y 4,87 mm día⁻¹ (promedios diarios) con un promedio general de 3,38 mm día⁻¹. Mientras que, en el segundo intervalo, el promedio fue de 2,69 mm día⁻¹ y varió entre 0,97 y 5,38 mm día⁻¹. Cabe destacar que no se encontró correlación entre la radiación y el déficit de presión de vapor (resultados no mostrados), como sí ha sido encontrado en otros sitios de la región Pampeana (Engel *et al.*, 2005, figura 4c).

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Caso base

Como resultado de la calibración de la distribución de raíces se obtuvo una mayor distribución en la superficie: 93,23% en Ap (tabla 1) estos resultados son similares a los observados por otros autores en especies similares (Lambais *et al.*, 2017).

En general se obtuvo una buena correlación entre los valores de VWC y T modelados, con las observaciones, el error estadístico de la media (MAE) varió entre 0,86 y 0,52 °C para ρ , y 0,023 y 0,013 para VWC, respectivamente.

El modelo base logró capturar los rápidos incrementos en el VWC posterior a las lluvias, así como, la rápida toma de agua por las raíces hasta llegar al WP (figura 4a y b). Sin embargo, hubo ciertas diferencias entre lo modelado y lo medido, ver punto 1 y 2 en figura 4a. Además, por un lado, el modelo predice una mayor Q_T respecto de los valores medidos (ver punto 2 en figura 4c). La Q_T predicha por la simulación fue en promedio 2,08 mm día⁻¹ (1,97 mm día⁻¹ en 2016, tabla 2). Por otro lado, las tasas mínimas se predicen durante el invierno (entre el día ~100 y ~300, figura 4) cuando VWC alcanza los valores de WP, ~0,51 mm día⁻¹ (punto 1

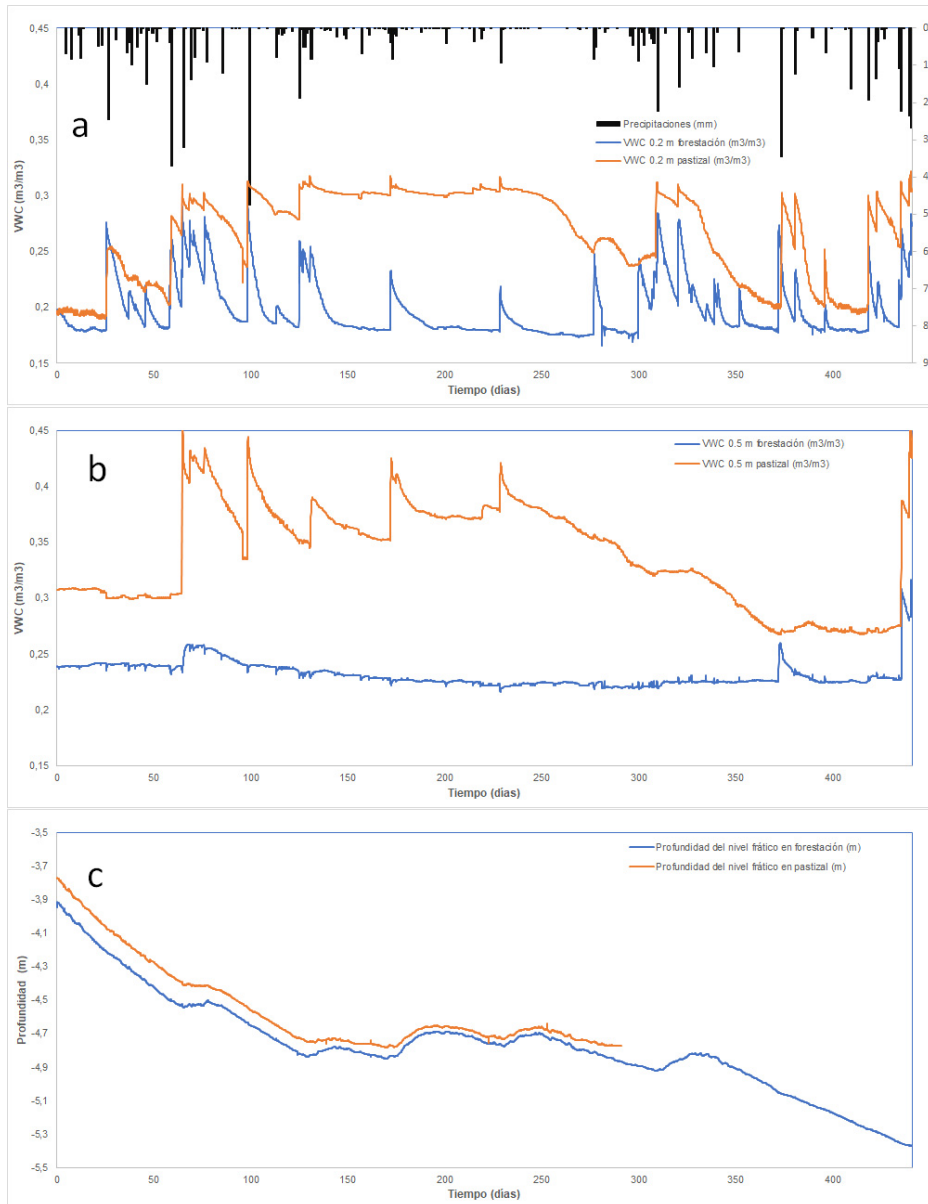


Figura 3. Evolución temporal de contenido volumétrico de agua del suelo (VWC) en la parcela herbácea y forestal a (a) 0,2 y (b) 0,5 m de profundidad, y (c) nivel freático.

en figura 4a y c). El volumen total de agua traspirada fue de ~918 mm (~723 mm en 2016), con un ~13% de agua proveniente del freático. Las tasas de transpiración calculadas son consistentes con otras estimadas en la misma región para *E. camaldulensis* (por ejemplo, 250-500 mm año⁻¹, 500-700 árboles ha⁻¹, Engel *et al.*, 2005) y *E. viminalis* (922-976 mm año⁻¹, 822-1440 árboles ha⁻¹, Besteiro, 2014).

Análisis de sensibilidad del modelo

En líneas generales el caso base captura el comportamiento global del sistema estudiado; sin embargo, algunas

de las discrepancias con las observaciones en la evolución de VWC y Q_T (figura 4) podrían ser atribuidas a una respuesta fisiológica de la forestación, no contemplada en el enfoque de Battaglia y Sands (1997) implementado en MIN3P. Estas respuestas han sido observadas previamente y se espera una disminución en Q_T después de los períodos de estrés hídrico debido a una reducción en la relación crecimiento/envejecimiento de las raíces (Bartsch, 1987; Hendrick y Pregitzer, 1993; Kuhns *et al.*, 1985; Gill y Jackson, 2000). Para abordar esto, se simuló un escenario alternativo donde se evaluó la sensibilidad a los parámetros

Parámetro	Ap	BA	Bt1	Bt2	2CKkm	loess
porosidad (-)	0,4874	0,4512	0,4944	0,4603	0,498	0,662
Conductividad hídrica (m s ⁻¹)	3,10E-06	1,05E-06	1,90E-06	1,03E-06	2,893E-7 ^a	5,787E-7 ^a
Curva de retención						
α_{VG} (m ⁻¹)	1,42	1,61	1,58	1,38	0,65 ^a	1,00 ^a
n_{VG} (-)	1,41	1,34	1,38	1,39	1,50 ^a	1,70 ^a
S^{lim} (-)	0,34	0,44	0,4	0,52	0,23	0,23
S^f (-)	0,51	0,62	0,57	0,58	0,36	0,37
Rugosidad (m)	1					
Distribución de raíces (%) ^b	93,23	0,31	2,96	2,96	0,02	0,51
Caso base						
a_w ^c				2,5		
W_0 ^c				0,3		
SC_STRESS						
a_w ^c				2,5 (0,5 en períodos de estrés ^b)		
W_0 ^c				0,3 (0,6 en períodos de estrés ^b)		

Tabla 1. Parámetros físicos del modelo.

^aExtraído de (Dietrich, 2013). ^b Calibrado con PEST (Parameter ESTimation, Doherty, 2008). ^c Extraído de Battaglia y Sands (1997).

α_{VG}

n_{VG} coeficiente relacionado con la inversa de la succión del aire de entrada (ver van Genuchten, 1980 model, m⁻¹) distribución del tamaño de poros (-)

S^{lim} saturación en el punto de marchitez permanente (-)

S^f saturación a capacidad de campo (-)

Escenario	Caso base		SC_STRESSED	
	total	anual	total	anual
Precipitaciones (mm)	912,2	695	912,2	695
Intercepción (mm)	141,96	133,64	141,96	133,64
Transpiración total (mm)	918,44	722,64	891,75	700,49
Tasa transpiratoria (mm/día)	2,08	1,97	2,02	1,91
Evaporación (mm)	195,89	149,55	206	155,17
Condensación (mm)	105,52	78,09	112,97	81,54
Uso del freático (mm)	122,94	91,52	119,05	88,58
Flujo en el límite inferior ^a (mm)	-229,47	-139,85	-209,89	-120,44
Cambio en el almacenamiento del suelo ^a (mm)	-421,7	-372,6	-373,6	-333,2

Tabla 2. Balance hídrico para todo el período simulado y durante el 2016, para los casos base y alternativos.

a(+) = entrada; (-) = salida.

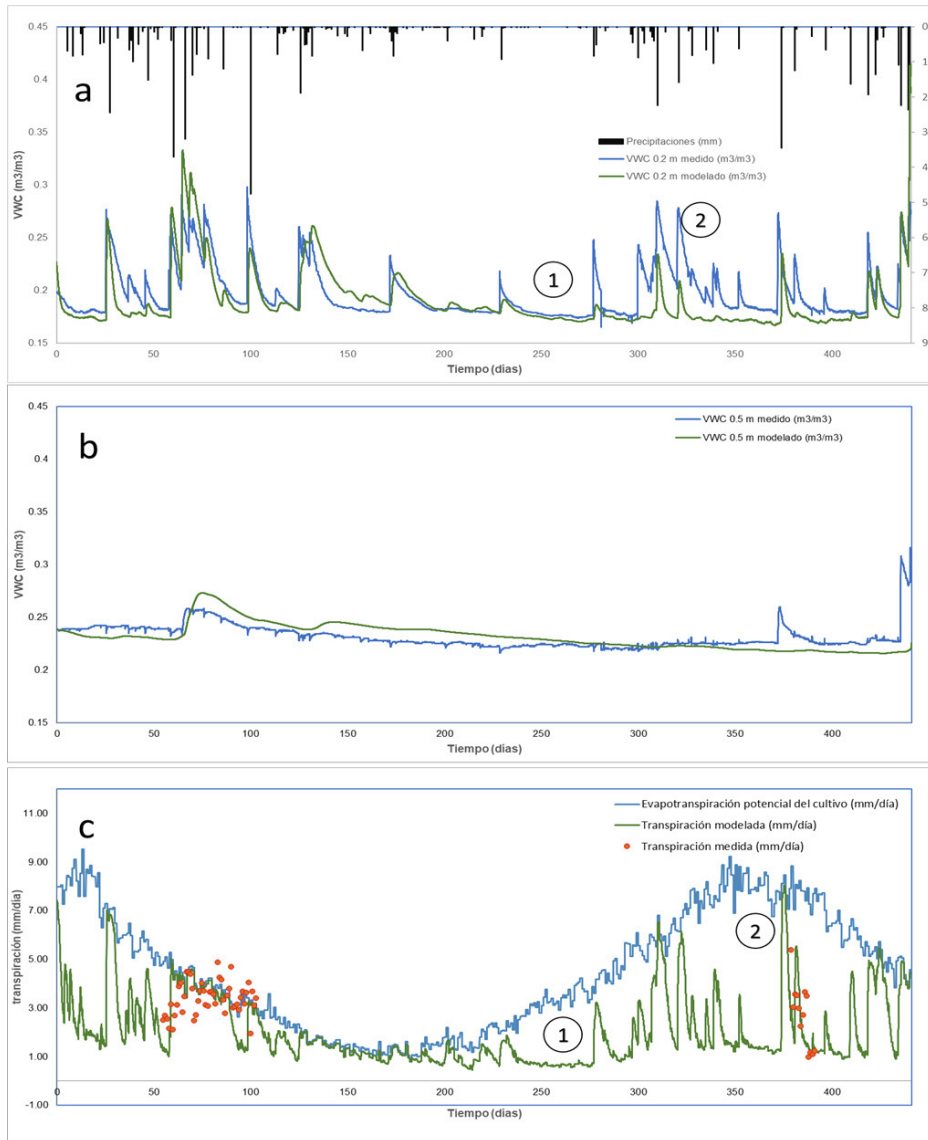


Figura 4. Resultados del modelo base. Evolución temporal de VWC medidos y simulados (a) 0,2 m (b) 0,5 m de profundidad, y (c) , transpiraciones medidas y simuladas.

empíricos que controlan la transpiración (SC_STRESSED), donde los parámetros w_0 y a_w se calibraron por separado en períodos posteriores al período de estrés hídrico. Esto mejoró el ajuste del modelo con los datos medidos de VWC y transpiración (figura 5). La transpiración total de la forestación prevista para este escenario fue de ~891 mm durante todo el período de tiempo simulado, con un uso de aguas subterráneas de ~ 13% (tabla 2).

DISCUSIÓN

Los horizontes petrocálcicos constituyen una barrera física para el flujo de agua y el crecimiento de las raíces disminuyendo (e incluso impidiendo) su acceso al acuífero

freático. Sugerimos que en estos sistemas forestados con presencia de tosca el agua disponible para la forestación (PAW) y la transpiración (Q_T) está limitada a las porciones de suelo por encima de la tosca, de hecho, se pudo observar que el almacenamiento de agua aumenta por encima de este horizonte en la parcela de pastizales, mientras que en la parcela forestada es consumida inmediatamente, llegando el suelo al punto de marchitez (WP). Cabe aclarar que distribuciones de raíces que alcancen el nivel freático darían como resultado, por un lado, mayores tasas de transpiración que las medidas, y por el otro, mayores VWC. Los valores calibrados con PEST son los que más se aproximan a reproducir los VWC y Q_{T-SF} observados. En este sitio, a diferencia de lo que han encontrado otros autores

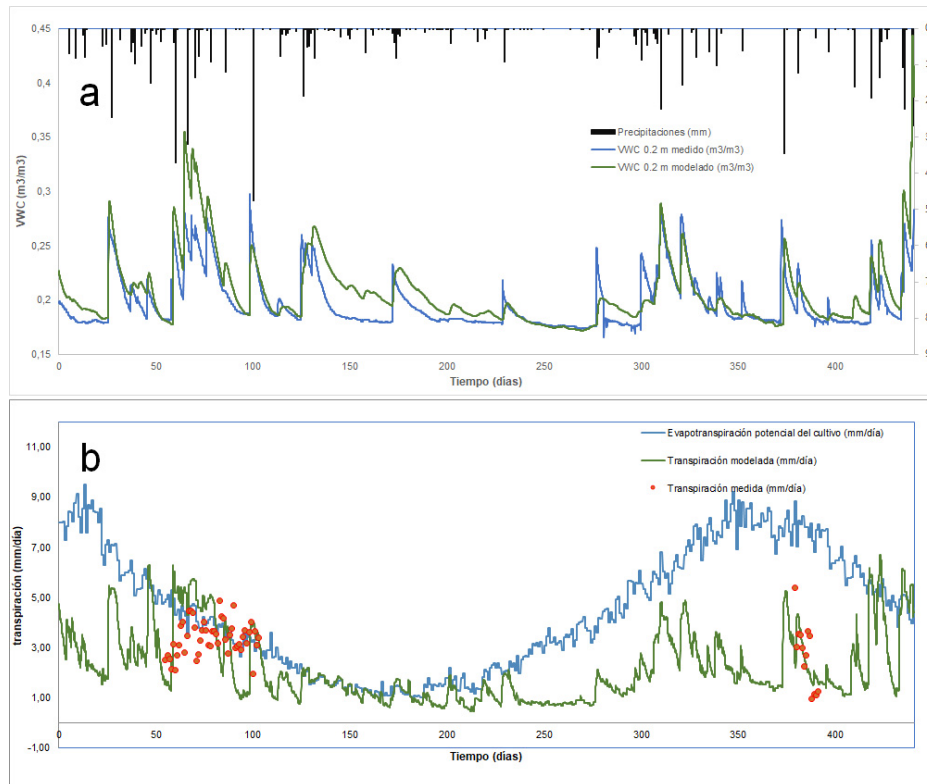


Figura 5. Resultados del escenario alternativo SC_STRESSED. Evolución temporal de (a) VWC a 0,2 m de profundidad y (b) ET_c , transpiración medida y modelada.

en la región (Engel *et al.*, 2005; Jobbágy y Jackson, 2007), no se pudo asociar las variaciones del nivel freático con la transpiración de la forestación. Los escenarios simulados sugieren un uso máximo de transpiración total de agua subterránea de ~ 13%, mientras que en otros trabajos se habla de ~ 50-70% (p. ej., Cramer *et al.*, 1999; Engel *et al.*, 2005).

El enfoque de la toma de agua (Battaglia y Sands, 1997) implementado en MIN3P es más riguroso desde una perspectiva de medios porosos, pero es menos riguroso desde el punto de vista de la fisiología de los árboles. Sin embargo, esta limitación también está presente en otras formulaciones de respuesta al estrés hídrico comúnmente utilizadas (por ejemplo, Šimůnek y Hopmans, 2009; Cai *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES

Los horizontes petrocálcicos son unidades recurrentes en ambientes de llanura en todo el mundo, y en particular aquellas que albergan importantes actividades económicas como la región Pampeana. Estos niveles de suelo altamente cementados constituyen una barrera de flujo de agua y tienen capacidad de almacenarla, la forestación probablemente utiliza este recurso dado el caso de que no puede acceder libremente a recursos hídricos más profundos. La metodología numérica propuesta aquí nos permitió cuantificar los flujos de agua a través de la tosca en un sistema productivo de alta demanda hídrica, también permitirá ha-

cer cálculos precisos para cultivos de menor demanda. Se estableció y validó un modelo conceptual de funcionamiento hídrico para pastizales forestados en paisajes de llanura con la presencia de un horizonte petrocálcico. La disponibilidad de agua y la improbable ocurrencia del proceso de salinización permitirían el uso de estas áreas para la agricultura, pasturas e incluso la producción aceptable de madera. En futuros estudios se podrá evaluar el impacto de los horizontes petrocálcicos a nivel de cuenca hidrográfica, teniendo en cuenta los diferentes usos del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los miembros del Instituto de Hidrología de Llanuras "Eduardo Jorge Usunoff" (IHLLA) por su apoyo en las mediciones de campo y laboratorio. Este trabajo fue financiado por FONCYT-MINCYT (PICT-2013-1223 y PICT-2015-0744) e INTA (PNFOR 1104073), Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, G.R.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 2006. Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and drainage. Water Resources, Development and Management Service, Roma, Italia, 1998, paper 56, 323 p.
- BARTSCH, N. 1987. Responses of root systems of young *Pinus sylvestris* and *Picea abies* plants to water deficits and soil acidity. Can. J. For. Res., 17, 805-812. <https://doi.org/10.1139/x87-128>

- BATTAGLIA, M.; SANDS, P. 1997. Modelling site productivity of *Eucalyptus globulus* in response to climatic and site factors. *Functional Plant Biology*, 24(6), 831-850. <https://doi.org/10.1071/PP97065>
- BDH. 2016. Base de Datos Hidrológicos. (Disponible: <http://www.azul.bdh.org.ar> verificado: marzo de 2017).
- BEA, S.A.; WILSON, S.A.; MAYER, K.U.; DIPPLE, G.M.; POWER, I.M.; GAMAZO, P. 2012. Reactive Transport Modeling of Natural Carbon Sequestration in Ultramafic Mine Tailings. *Vadose Zone Journal*, 11(2), 0. <https://doi.org/10.2136/vzj2011.0053>
- BESTEIRO, S. 2014. Evaluación de la influencia hidrológica de forestaciones en la llanura pampeana. (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Buenos Aires. (Disponible: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/33806> verificado: junio de 2018).
- BITTERLICH, W. 1948. Die Winkelzahlprobe. *Allg. forst- u. holzw. Ztg* 59, 4-5.
- BOUYOUCOS, G.J. 1936. Directions for making mechanical analyses of soils by the hydrometer method. *Michigan Agricultural & Experimental Station*, 269, 225-229.
- BURGOS, J.J.; Vidal, A.L. 1951. Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thornthwaite. *Meteoros* 1, 1-32.
- CAI, G.; VANDERBORGHT, J.; COUVREUR, V.; MBOH, C.M.; VERECKEN, H. 2017. Parameterization of root water uptake models considering dynamic root distributions and water uptake compensation. *Vadose Zone Journal*. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.12.0125>
- CALDER, I.R. 1998. Water use by forests, limits and controls. *Tree Physiology*, 18(8_9), 625-631. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.8-9.625>
- CARREÑO, L.; FRANK, F.C.; VIGLIZZO, E.F. 2012. Tradeoffs between economic and ecosystem services in Argentina during 50 years of land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 154, 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.019>
- CRAMER, V.A.; THORBURN, P.J.; FRASER, G.W. 1999. Transpiration and groundwater uptake from farm forest plots of *Casuarina glauca* and *Eucalyptus camaldulensis* in saline areas of southeast Queensland, Australia. *Agricultural Water Management*, 39(2-3), 187-204. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00078-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00078-X)
- DE SOUZA, W.; BARBOSA, O.R.; DE ARAUJO MARQUES, J.; TEIXEIRA COSTA, M.A.; GASPARINO, E.; LIMBERGER, E. 2010. Microclimate in silvopastoral systems with eucalyptus in rank with different heights. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39(3), 685-694. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010000300030>
- DEVITO, K.; MENDOZA, C.; QUALIZZA, C. 2012. Conceptualizing water movement in the Boreal Plains. Implications for watershed reconstruction. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- DIETRICH, S.; WEINZETTEL, P.A.; VARNI, M. 2014. Infiltration and drainage analysis in a heterogeneous soil by electrical resistivity tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 78(4), 1153-1167. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.02.0062>
- DOHERTY, J.E. 2016. Model-independent Parameter Estimation User Manual Part I: Pest Sensan and Global Optimisers. *Watermark Numerical Computing*, Brisbane, Australia, 390.
- DUNIWAY, M.C.; HERRICK, J.E.; MONGER, H.C. 2007. The high water-holding capacity of petrocalcic horizons. *Soil Sci Soc Am J* 71:812-819. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0267>
- DUNIWAY, M.C.; HERRICK, J.E.; MONGER, H.C. 2010. Spatial and temporal variability of plant-available water in calcium carbonate-cemented soils and consequences for arid ecosystem resilience. *Oecologia*, 163(1), 215-226. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1530-7>
- ENGEL, V.; JOBBÁGY, E.G.; STIEGLITZ, M.; WILLIAMS, M.; JACKSON, R.B. 2005. Hydrological consequences of *Eucalyptus* afforestation in the Argentine Pampas. *Water Resources Research*, 41(10), 1-14. <https://doi.org/10.1029/2004WR003761>
- GEORGE, R.J.; NULSEN, R.A.; FERDOWSIAN, R.; RAPER, G.P. 1999. Interactions between trees and ground waters in recharge and discharge areas - A survey of western Australian sites. *Agricultural Water Management*, 39(2-3), 91-113. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00073-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00073-0)
- GEORGEN, P.G.; DAVIS-CARTER, J.; TAYLOR, H.M. 1991. Root Growth and Water Extraction Patterns from a Calcic Horizon. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 210. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500010036x>
- GIBBENS, R.P.; LENZ, J.M. 2001. Root systems of some Chihuahuan Desert plants. *Journal of Arid Environments*, 49(2), 221-263. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0784>
- GILL, R.A.; JACKSON, R.B. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytol.*, 147, 13-31.
- GRANIER, A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3(4), 309-320. <https://doi.org/10.1093/treephys/3.4.309>
- HENDRICK, R.L.; PREGITZER, K.S. 1993. The dynamics of fine root length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 23(12), 2507-2520. <https://doi.org/10.1139/x93-312>
- HENNESSY, J.T.; GIBBENS, R.P.; TROMBLE, J.M.; CARDENAS, M. 1983. Water properties of caliche. *J Range Manage* 36:723-726.
- HERRON, N.; DAVIS, R.; JONES, R. 2002. The effects of large-scale afforestation and climate change on water allocation in the Macquarie River catchment, NSW, Australia. *Journal of Environmental Management*, 65(4), 369-381. [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(02\)90562-1](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)90562-1)
- HERBEL, C.H.; ARES, F.N.; WRIGHT, R.A. 1972. Drought effects on a semidesert grassland range. *Ecology*, 53(6), 1084-1093. <http://https://doi.org/10.2307/1935420>
- JACKSON, R.B.; CARPENTER, S.R.; DAHM, C.N.; MCK-NIGHT, D.M.; NAIMAN, R.J.; POSTEL, S.L.; RUNNING, S.W. 2001. Water in a changing world. *Ecological Applications*, 11(4), 1027-1045. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1027:WIACW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1027:WIACW]2.0.CO;2)
- JOBBÁGY, E.G.; JACKSON, R.B. 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology*, 10(8), 1299-1312. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00806.x>
- JOBBÁGY, E.G.; JACKSON, R.B. 2007. Groundwater and soil chemical changes under phreatophytic tree plantations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(2), 1-15. <https://doi.org/10.1029/2006JG000246>
- KUHNS, M.R.; GARRETT, H.E.; TESKEY, R.O.; HINCKLEY, T.M. 1985. Root growth of black walnut trees related to soil temperature, soil water potential, and leaf water potential. *Forest Science*, 31(3), 617-629.
- KUZNETSOVA, A.; KHOKHLOVA, O. 2015. Dynamics and genesis of calcic accumulations in soils and sediments of the Argentinean Pampa. *International Journal of Sediment Research*, 30(3), 179-189. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2014.11.002>
- LAMBAIS, G.R.; JOURDAN, C.; DE CÁSSIA PICCOLO, M.; GERMON, A.; COSTA PINHEIRO, R.; NOUVELLON, Y.; STAPE, J.L.; CAMARGO CAMPOE, O.; ROBIN, A.; BOUILLET, J.P.; LE MAIRE, G.; Laclau, J. P. (2017). Contrasting phenology of *Eucalyptus grandis* fine roots in upper and very deep soil layers in Brazil. *Plant and Soil*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3460-1>

- MAYER, K.U.; AMOS, R.T.; MOLINS, S.; GERARD, F. 2012. Reactive Transport Modeling in Variably Saturated Media with MIN3P: Basic Model Formulation and Model Enhancements. *Groundwater Reactive Transport Models*, 186-211. <https://doi.org/10.2174/97816080530631120101>
- MAYER, K.U.; FRIND, E.O.; BLOWES, D.W. 2002. Multicomponent reactive transport modeling in variably saturated porous media using a generalized formulation for kinetically controlled reactions. *Water Resources Research*, 38(9), 1174. <https://doi.org/10.1029/2001WR000862>
- MONGER, H.C.; MARTINEZ-RIOS, J.J.; KHRESAT, S.A. 2005. Arid and semiarid soils. En: HILLEL, D. (Ed.). *Encyclopedia of soil in the environment*. Elsevier, Oxford, 182-187 pp.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- NOSETTO, M.D.; JOBBÁGY, E.G.; BRIZUELA, A.B.; JACKSON, R.B. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 154, 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.008>
- NOSETTO, M.D.; JOBBÁGY, E.G.; TÓTH, T.; DI BELLA, C.M. 2007. The effects of tree establishment on water and salt dynamics in naturally salt-affected grasslands. *Oecologia*, 152(4), 695-705. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0694-2>
- PARUELO, J.M.; GUERSCHMAN, J.P.; PIÑEIRO, G.; JOBBÁGY, E.G.; VERÓN, S.R.; BALDI, G.; BAEZA, S. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*, 10(2), 47-61. <https://doi.org/10.2307/2577037>
- PAZOS, S.M.; MESTELAN, A.S. 2002. Variability of depth to tosca in udoll sand soil classification, Buenos Aires Province, Argentina. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1256-1264. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1256>
- PHILIP, J.; DE VRIES, D.A. 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(2), 222-232. <https://doi.org/10.1029/TR038i002p00222>
- SAITO, H.; SIMUNEK, J.; MOHANTY, B. 2006. Numerical Analysis of Coupled Water, Vapor, and Heat Transport in the Vadose Zone. *Vadose Zone Journal*, 5, 784-800. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0007>
- SCHAAP, M.G.; LEIJ, F.J.; VAN GENUCHTEN, M.T. 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3-4), 163-176. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)
- SHREVE, F.; MALLERY, T.D. 1932. The relations of caliche to desert plants. *Soil Sci* 35:99-113.
- ŠIMŮNEK, J.; HOPMANS, J.W. 2009. Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecological Modelling*, 220(4), 505-521. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.004>
- SOIL SURVEY STAFF, 2014. *Keys to Soil Taxonomy* (12th Ed.). United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service.
- VAN GENUCHTEN, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898. <http://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- VARNI, M.R.; USUNOFF, E.J. 1999. Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 7(2), 180-187. <https://doi.org/10.1007/s100400050190>
- VOSS, C.; PROVOST, A. 2008. SUTRA—A model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport (Version 2.1). USGS Water Resour. Invest. Rep. 02-4231.
- WRIGHT, J.A.; DINICOLA, A.; GAITAN, E. 2000. Latin American forest plantations: opportunities for carbon sequestration, economic development, and financial returns. *Journal of Forestry*, 98(9), 20-23. <https://doi.org/10.1093/jof/98.9.20>