

## DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL SUELO A PARTIR DE LA MEDIDA DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA HUMEDAD A DIFERENTES PROFUNDIDADES EN CONDICIONES HOMOGÉNEAS DE PERFIL DEL SUELO

D. Moret<sup>1</sup>, Z. Saâdi<sup>2</sup>, R. Haverkamp<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Suelo y Agua, Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), PO Box 202, 50080 Zaragoza, Spain, david@eead.csic.es

<sup>2</sup> Laboratoire d'Études des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), 1025, rue de la piscine, Domaine Universitaire, 38 400 - Saint Martin d'Hères, France.

**RESUMEN.** Las medidas de las propiedades hidráulicas del suelo son fundamentales para numerosos estudios relacionados con la agronomía, hidrología y ciencias ambientales. Este trabajo presenta un método para la determinación de las propiedades hidráulicas (curva de retención de agua y conductividad hidráulica del suelo) a diferentes intervalos de profundidad en condiciones de suelo homogéneo basado en el ajuste entre la variación temporal del contenido de agua en el suelo a diferentes profundidades simulada a partir de la ecuación diferencial del flujo de agua en el suelo (Ecuación de Richards) y las correspondientes medidas de humedad utilizando la técnica TDR (Reflectometría de Dominio Temporal). Una sonda TDR de tres electrodos y 40 cm de longitud fue instalada en la base de una columna de 40 cm de altura y 23 cm de diámetro interno, la cual fue rellena con una arena de granulometría homogénea y con un contenido de humedad volumétrico inicial inferior a  $0.03 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ . El perfil de humedad del suelo fue determinado por TDR a 0-10, 0-20, 0-30, y 0-40 cm de profundidad utilizando el método del "nomograma". La columna de arena fue saturada por la superficie con agua destilada utilizando un infiltrómetro de tensión con un disco de 200 mm de diámetro. Los valores de los parámetros de las curvas de retención de agua y conductividad hidráulica del suelo que permitieron un mejor ajuste ( $R^2 = 0.99$ ,  $P < 0.05$ ) entre los valores simulados de la variación temporal del contenido de humedad volumétrico del suelo y los medidos por TDR a las mismas profundidades fueron similares a los medidos con el infiltrómetro de disco y estuvieron dentro del rango de valores correspondientes a la arena utilizada. Sin embargo, nuevos trabajos son necesarios para el desarrollo de métodos numéricos que permitan aplicar dicho método en suelos estratificados.

**ABSTRACT.** Measurements of soil hydraulic properties are crucial for many studies in agronomy, hydrology and environmental sciences. This paper presents a quick and precise method for estimating the soil hydraulic properties, i.e. soil water retention and hydraulic conductivity curves, for homogeneous soil profile conditions. The method relies on the best-fit between modeled and measured transient soil water content at four different depths of the soil profile. The modeled ones are derived from analytic integration of the Richards' flow

equation and the measured ones from a TDR probe device. A 40 cm long three-rod TDR probe was installed at the bottom of a clear plastic column (40 cm high and 23 cm internal diameter), which was packed twice with homogeneous sand. The initial soil water content was less than  $0.03 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ . The "nomogram TDR method" (Moret et al., 2005) was used to determine the soil water content for 0-10, 0-20, 0-30, and 0-40 cm layers. The sand column was water-saturated through the top using a tension disc infiltrometer with a base diameter of 200 mm. The values of the parameters for the water retention and hydraulic conductivity functions that best-fit ( $R^2 = 0.99$ ,  $P < 0.05$ ) the modeled time-course soil water content to measured ones at the same soil depths were similar to those measured with the disc infiltrometer and within the range of the values for the corresponding sand. However, further research is needed to develop numerical methods to apply this method to heterogeneous soil conditions

### 1.- Introducción

La solución analítica de la ecuación de Richard para suelos homogéneos es una herramienta muy útil para evaluar la precisión de métodos numéricos para la estimación de propiedades hidráulicas del suelo por procedimientos de inversión (Varado, 2004).

La técnica de Reflectometría de Dominio Temporal (TDR) es un método ampliamente aceptado para la medida, de forma no destructiva, del contenido de humedad volumétrico del suelo ( $\theta$ ). Entre sus ventajas, cabe destacar la precisión en la medida de la humedad del suelo y sus reducidas necesidades de calibración (Ferre y Topp, 2002). Parkin et al. (1995) utilizó sondas TDR verticalmente insertadas en el suelo para estimar, por procedimiento inverso, las propiedades hidráulicas del suelo durante un proceso de humectación del mismo con una lluvia simulada. Aunque este método permitió determinar la conductividad hidráulica insaturada del suelo, los autores concluyeron que el procedimiento no permitía estimaciones de curvas de conductividad hidráulica y retención de agua del suelo a partir de una única medida de la variación temporal de la humedad del suelo. Medidas adicionales de tensión de agua eran necesarias para solucionar la limitación del método. Posteriormente, Si et al. (1999)

extendió el método de Parkin (1995) para la estimación de las curvas de retención y conductividad hidráulica del suelo durante un proceso de infiltración a flujo constante mediante la medida adicional de la tensión del suelo.

El objetivo de este trabajo es demostrar que es posible estimar el perfil de las propiedades hidráulicas a diferentes intervalos de profundidad en condiciones de suelo homogéneo a partir del análisis de la variación temporal del contenido de humedad volumétrico de agua del suelo a diferentes profundidades utilizando una sola sonda TDR vertical y una sola humectación. El desarrollo de dicho método en condiciones homogéneas de perfil del suelo abre la puerta a posteriores trabajos orientado al desarrollo de métodos numéricos para la medida del perfil de las propiedades hidráulicas en suelos estratificados.

## 2.- Teoría

2.1. Ecuación general del perfil del contenido de humedad volumétrico de agua del suelo (Haverkamp, comunicación personal)

El flujo insaturado unidimensional del agua en el suelo está descrito por la clásica ecuación diferencial de transferencia de agua en medios porosos, también conocida como ecuación de Richards

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

donde  $\theta$  es el contenido de humedad volumétrico del suelo ( $L^3.L^{-3}$ ),  $K$  es la conductividad hidráulica ( $L.T^{-1}$ ),  $D$  es la difusividad de la fase suelo-agua ( $L^2.T^{-1}$ ) definida como  $K(dh/d\theta)$  donde  $h$  es la tensión del agua del suelo (L), y  $z$  y  $t$  son la distancia (positiva en sentido descendente) (L) y el tiempo (T), respectivamente. Las condiciones límites necesarias para resolver la Ec. (1) son:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_0 & t \leq 0 \text{ y } z \geq 0 \\ \theta &= \theta_s & z = 0 \text{ y } t > 0 \\ h &= h_{surf} & z = 0 \text{ y } t > 0 \end{aligned} \quad (2)$$

donde  $\theta_0$  es el contenido de humedad inicial del suelo ( $L^3.L^{-3}$ ) constante en profundidad,  $\theta_s$  es el contenido de humedad volumétrico a saturación ( $L^3.L^{-3}$ ) y  $h_{surf}$  es tensión en la superficie del suelo ( $h_{surf} \geq 0$ ) (L). La solución analítica de la ecuación de Richards exige además unas condiciones homogéneas de propiedades hidráulicas y un contenido inicial de humedad cero y una humedad final a saturación en todo el perfil del suelo.

El objetivo de este trabajo es resolver la Ec. (1) para encontrar la ecuación general que describe la variación temporal del perfil de contenido de humedad volumétrico para una profundidad finita de suelo. La resolución de

dicha ecuación requiere el conocimiento de los parámetros de curva de retención,  $h(\theta)$ , y conductividad hidráulica,  $K(\theta)$ , del suelo, que para nuestro caso están descritos por los modelos de Brooks y Corey (1964) según:

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left( \frac{h_{bc}}{h} \right)^\lambda \quad \text{para } h \leq h_{bc} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_s & \text{para } h_{bc} \leq h < 0 \\ \frac{K}{K_s} &= \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta & \end{aligned} \quad (4)$$

donde  $\lambda$  y  $\eta$  son parámetros adimensionales de pendiente y  $h_{bc}$  (L) y  $K_s$  ( $L.T^{-1}$ ) son parámetros de escala llamados, respectivamente, presión de entrada de aire y conductividad hidráulica saturada.

Utilizando las Ecs. (1)-(5) se obtiene, a través de una serie de complejas transformaciones (Parlange et al., 1985, Haverkamp et al., 1990; Haverkamp et al., 1998), la ecuación adimensional de infiltración acumulada de agua en el suelo,  $I^*$ , en función del valor adimensional de la tasa de infiltración de agua en la superficie del suelo,  $q_1^*$ , ( $I^*(q_1^*)$ )

$$I^*(q_1^*) = \frac{1}{q_1^* - 1} + \frac{Cp_0}{2q_1^*} \left\{ 1 + B \ln \left[ 1 + \frac{1}{q_1^* - 1} \right] \right\} \quad (5)$$

con

$$I^* = \frac{I}{\gamma_l} = \frac{Cp_0 K_s}{S_0^2} I \quad (6)$$

$$q_1^* = \frac{q_1}{\gamma_q} = \frac{q_1}{K_s} \quad (7)$$

$$B = \frac{2}{4 + Cp_0(1 - \lambda)} \quad (8)$$

$$S_0^2 = Cp_0 \theta_s |h_{bc}| K_s \quad (9)$$

$$Cp_0 = \frac{2}{\lambda \eta - \alpha_0 \lambda + \lambda - 1} \quad (10)$$

$$\alpha_0 = 1 - \frac{\eta \lambda - 1}{2\eta \lambda + \lambda - 2} \quad (11)$$

donde  $S_0$  es la sorptividad ( $L.T^{-1/2}$ ) para  $\theta_0 = 0$  (Philip, 1957) y  $Cp_0$  y  $\alpha_0$  son parámetros adimensionales.

De forma similar y tras una serie de transformaciones, se obtiene la ecuación que define el tiempo adimensional,  $t^*$ , en función  $q_1^*$

$$t^*(q_1^*) = \frac{1}{q_1^* - 1} - \ln \left[ 1 + \frac{1}{q_1^* - 1} \right] + \frac{C_p}{4q_1^{*2}} \left\{ 1 + B \ln \left[ 1 + \frac{1}{q_1^* - 1} \right] \right\} + \frac{C_z}{4 + C_z} \frac{\ln \left( 1 + \frac{1}{q_1^* - 1} \right)}{q_1^*} \left[ 1 - \theta^{* \frac{4+C_z}{4C_z}} \right] \quad (12)$$

donde

$$t^* = \frac{t}{\gamma_t} = \frac{K_s}{\theta_s |h_{bc}|} t \quad (13)$$

Finalmente, y tras otra serie de complejas transformaciones se obtiene, para el caso de  $\theta_0 = 0$  y  $h_{surf} = 0$ , la ecuación adimensional del perfil del contenido de humedad del suelo,  $z^*$ , en función de  $q_1^*$

$$z^*(\theta^*, q_1^*) = \frac{1}{q_1^* - 1} + \frac{C_z}{2q_1^*} \left( 1 - \theta^{* \frac{2}{4C_z}} \right) + \frac{C_z}{4 + C_z} \frac{\ln \left( 1 + \frac{1}{q_1^* - 1} \right)}{q_1^*} \left[ 1 - \theta^{* \frac{4+C_z}{4C_z}} \right] \quad (14)$$

donde

$$z^* = \frac{z}{|h_{bc}|} \quad (15)$$

$$\theta^* = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (16)$$

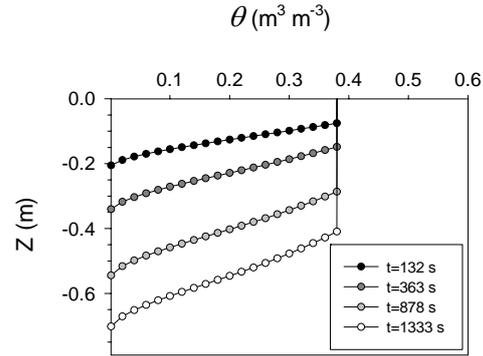
$$C_z = \frac{2}{\lambda \eta - \alpha_0 \lambda - 1} \quad (17)$$

Cabe destacar el correcto sentido físico de la Ec. (14) puesto que ésta depende exclusivamente de parámetros de textura y estructura de suelo.

La Fig. 1 muestra un ejemplo de perfil del contenido de humedad del suelo simulado utilizando las Ecs. (13) y (14) para una arena con las propiedades hidráulicas expuestas en la Tabla 1. En dicha figura se observa cómo las curvas del perfil del contenido de humedad volumétrico del suelo tienen un típico comportamiento Green & Ampt, ya que el agua se infiltra en el suelo en forma de frentes de humectación.

**Tabla 1.** Valor medio de los parámetros hidráulicos de las curvas de retención y conductividad hidráulica según el modelo de Brooks y Corey (1964) ( $\lambda$ ,  $\eta$ ,  $h_{bc}$ ,  $\theta_s$ ,  $K_s$ ) (Ecs. 3 y 4) así como el valor de densidad aparente ( $\rho_b$ ) para una arena.

$\rho_b$ (g cm <sup>-3</sup> )	$K_s$ (m s <sup>-1</sup> )	$-h_{bc}$ (m)	$\lambda$	$\eta$	$\theta_s$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )
1.63	6.32 10 <sup>-5</sup>	0.18	2.59	3.23	0.29



**Fig. 1.** Perfiles del contenido de humedad volumétrico de agua para una arena, de características hidráulicas definidas en la Tabla 1 en cuatro tiempos diferentes, simulados utilizando la ecuación general del perfil del contenido de humedad volumétrico de agua en el suelo (Ec. 13 y 14) derivada de la ecuación de Richards

La variación temporal del contenido de humedad volumétrico de agua en el suelo para un intervalo finito de profundidad  $L$ ,  $\bar{\theta}(L, t)$ , fue numéricamente calculado para cada tiempo  $t_i$  según:

$$\bar{\theta}(L, t_i) = \frac{\int_0^{\theta} z(\theta, q_1^*) d\theta}{L} \quad z \leq L \quad (18)$$

## 2.2. Función unidimensional de la curva de infiltración acumulada de agua en el suelo

La curva de infiltración acumulada sobre una superficie circular del suelo de radio  $r_d$  viene descrita por la ecuación (Smettem et al., 1994)

$$I_{3-D} = I_{1-D} + \left( \frac{\gamma_c S_0^2}{(\theta_0 - \theta_n) r_d} \right) t \quad (19)$$

donde los subíndices 3-D y 1-D hacen referencia a los procesos de infiltración tridimensionales y unidimensional, respectivamente, y  $\gamma$  es un parámetro adimensional relacionado con las condiciones físicas del suelo cuyo valor se sitúa en torno a 0.75. Haverkamp et al. (1994) estableció una ecuación física que describe la infiltración acumulada tridimensional en superficies circulares según

$$I_{3-D} = S_0 \sqrt{t} + \left[ K_n + \frac{\gamma S_0^2}{r_d (\theta_0 - \theta_n)} + \frac{1}{3} (K_0 - K_n) (2 - \beta) \right] t \quad (20)$$

donde  $\beta \approx 0.6$ . Combinando las Ec. (19) y (20) se obtiene la curva de infiltración acumulada unidimensional

$$I_{1-D} = S_0 \sqrt{t} + \left[ K_n + \frac{1}{3}(K_0 - K_n)(2 - \beta) \right] t \quad (21)$$

que puede simplificarse en la forma propuesta por Philip (1957) según

$$I_{1-D} = C_1 \sqrt{t} + C_2 t \quad (22)$$

Aplicando el método de diferenciación de la curva de infiltración acumulada con respecto a la raíz cuadrada del tiempo (Vandervaere et al., 2000) a las Ecs. (21 y 22) se obtiene que la sorptividad y conductividad hidráulica en condiciones unidimensionales pueden calcularse según:

$$S_0 = C_1 \quad (23)$$

$$K_0 = \frac{C_2}{2 - \beta} C_2 \quad (24)$$

### 3.- Materiales y métodos

Con el fin de validar la solución analítica de la ecuación de Richards para la medida de perfiles de propiedades hidráulicas del suelo por TDR, se construyó una columna de arena sobre contenedor de metacrilato de 23 cm de diámetro y 45 cm de altura. En la zona central y externa de la base del contenedor se instaló una sonda TDR vertical de tres electrodos (varillas de 4 mm de diámetro y 40 mm de separación entre las varillas externas) y 40 cm de longitud. La sonda se conectó a través de un cable coaxial de 1.2 m de longitud a un aparato TDR (Tektronix modelo 1502C) que transfería la información a un ordenador. El contenedor, con un drenaje en la base, fue relleno con una arena (diámetro medio de partícula igual a 120  $\mu\text{m}$ ) hasta una altura de 40.5 cm. La densidad aparente y el contenido de humedad volumétrico de agua inicial de la columna de arena fue de 1.58  $\text{g cm}^{-3}$  y 0.01  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , respectivamente. La columna fue saturada por la superficie con agua destilada a una tensión de -0.5 cm utilizando un infiltrómetro de discos modificado (Moret y Arrúe, 2005), con un disco de 20 cm de diámetro. El nivel de agua del reservorio del infiltrómetro fue registrado manualmente a intervalos irregulares en función del tiempo. El contenido de humedad volumétrico de agua en el suelo fue medido cada 30 segundos por la sonda TDR a 0-10, 0-20, 0-30 y 0-40 cm de profundidad utilizando el método de *nomograma* (Moret et al., 2006). Las ondas TDR fueron registradas utilizando el programa WinTDR98 (Or et al. 1998). El experimento finalizó cuando el agua comenzó a drenar por la base de la columna de arena.

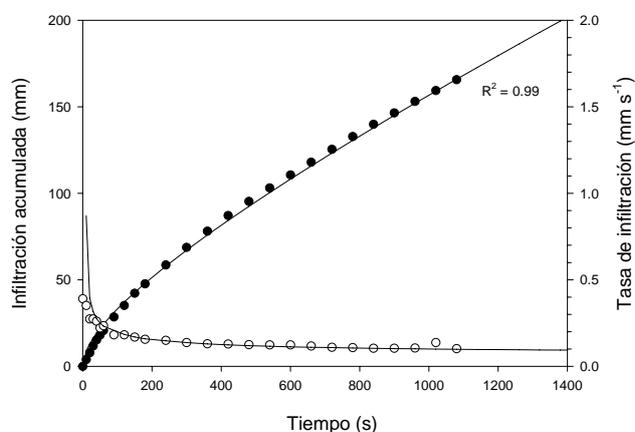
La sorptividad y la conductividad hidráulica del suelo a saturación fueron calculados a partir del análisis de la curva de infiltración acumulada del agua en el suelo medida por el infiltrómetro de discos según el procedimiento descrito por Vandervaere et al. (2000)

(Ecs. 23 y 24).

Los valores de  $S_0$ ,  $K_0$ ,  $h_{bc}$ ,  $\lambda$  y  $\eta$  fueron paralelamente estimados por la búsqueda del mejor ajuste entre las curvas unidimensionales de infiltración acumulada y la variación temporal del contenido de humedad volumétrico de agua en el suelo a diferentes profundidades medidas con el infiltrómetro de disco y la sonda TDR, respectivamente, y las correspondientes funciones derivadas de la solución analítica de la ecuación de Richards (Ecs. 5, 12 y 14).

### 4.- Resultados y discusión

La Fig. 2 muestra las curvas de infiltración acumulada y tasa de infiltración medida con el infiltrómetro de discos a una tensión de -0.5 cm.



**Fig. 2.** Curva de infiltración acumulada (●) y tasa de infiltración (○) medida con el infiltrómetro de discos a una tensión de -0.5 cm sobre una columna de arena de 40 cm de altura, y sus correspondientes curvas (líneas continuas) estimadas según el modelo de Haverkamp (1994) para flujos de agua desde superficies circulares (Ec. 21).

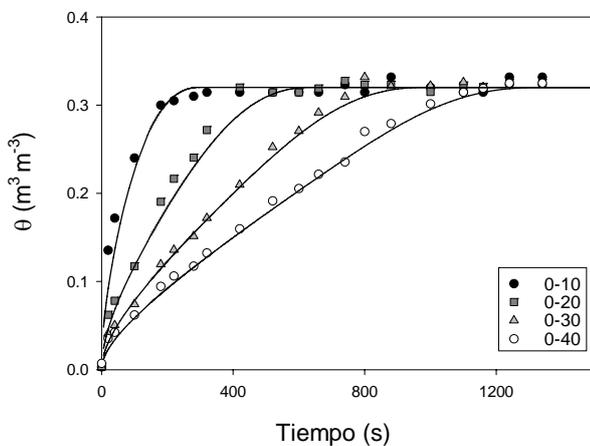
Los valores de sorptividad y conductividad hidráulica del suelo estimados por el método de Vandervaere et al. (2000) a partir de la curva de infiltración acumulada de agua en el suelo medida por el infiltrómetro de disco fueron de  $1.62 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  y  $2.56 \text{ m s}^{-0.5}$ , respectivamente. La  $K_s$  medida en este experimento fue ligeramente inferior a la tasa de infiltración de agua en el suelo al final del proceso de infiltración ( $0.101 \text{ mm s}^{-1}$ ).

La Tabla 2 muestra los valores de las propiedades hidráulicas estimadas a partir de la búsqueda del mejor ajuste entre las curvas de la variación temporal del contenido de humedad volumétrica de agua en el suelo medidas por TDR a diferentes profundidades y las correspondientes funciones derivadas de la solución analítica de la ecuación de Richards. El valor de la sorptividad estimada a partir de la ecuación de Richards es muy similar a la calculada a partir de la curva de infiltración acumulada de agua en el suelo medida con el infiltrómetro de discos. La conductividad hidráulica del suelo a saturación estimada a partir de la variación temporal de la

humedad volumétrica del agua en el suelo a diferentes profundidades tiene, sin embargo, un valor ligeramente inferior al medido con el infiltrómetro de discos. Los parámetros estimados para las curvas de conductividad hidráulica ( $\eta$ ) y curva de retención ( $h_{bc}$  y  $\lambda$ ) están dentro del rango de valores aceptables para arenas (Tabla 1)

**Tabla 2.** Valores de las propiedades hidráulicas estimadas a partir del mejor ajuste entre las curvas de variación temporal de humedad volumétrica de agua en el suelo medidas por TDR a diferentes profundidades y las correspondientes funciones derivadas de la solución analítica de la ecuación de Richards

$K_s$ ( $m\ s^{-1}$ )	$S_o$ ( $mm\ s^{-0.5}$ )	$h_{bc}$ (m)	$\lambda$	$\eta$
$1.10\ 10^{-4}$	$2.70\ 10^{-3}$	0.026	0.85	1.35



**Fig. 3.** Curvas de la variación temporal de humedad volumétrica del suelo medidas por TDR a 0-10, 0-20, 0-30 y 0-40 cm de profundidad (símbolos) y las correspondientes funciones derivadas de la solución analítica de la ecuación de Richards (líneas continuas).

La Fig. 3 muestra las curvas de la variación temporal del contenido de humedad volumétrico de agua en el suelo medidas por TDR a 0-10, 0-20, 0-30 y 0-40 cm de profundidad y las correspondientes funciones derivadas de la solución analítica de la ecuación de Richards para los parámetros de suelo presentados en la Tabla 2. En general, una muy satisfactoria correlación fue observada entre los valores del contenido de humedad de agua en el suelo medidos y simulados ( $R^2 = 0.99$ ).

## 5.- Conclusión

Este trabajo presenta un método para la medida del perfil de propiedades hidráulicas en condiciones de suelo homogéneo utilizando una sola sonda TDR vertical y una única aplicación de agua. Los valores de sorptividad y conductividad hidráulicas del suelo estimados sobre una columna homogénea de arena de 40 cm de altura a partir de la búsqueda del mejor ajuste entre las curvas de

variación temporal de contenido de humedad volumétrica de agua en el suelo a diferentes profundidades medidas con la técnica TDR y las respectivas funciones derivadas de la solución analítica de la ecuación de Richards fueron similares a las estimadas a partir de la curva de infiltración acumulada de agua en el suelo medidas con un infiltrómetro de disco. Los parámetros de las curvas de conductividad hidráulica ( $\eta$ ) y curva de retención ( $h_{bc}$  y  $\lambda$ ) estimados por el método aquí presentado están dentro del rango de valores aceptables para el tipo de arena utilizado. Estos resultados demuestran que el método presentado es robusto y puede ser utilizado para medidas del perfil de propiedades hidráulicas del suelo utilizando la técnica TDR. Sin embargo nuevos trabajos son necesarios para el desarrollo de métodos numéricos que permitan la aplicación de este método TDR para la determinación del perfil de las propiedades hidráulicas a diferentes intervalos de profundidad en suelo estratificado.

**Agradecimientos.** Este trabajo ha sido realizado con el apoyo de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología de España (beca posdoctoral). Agradecer también la colaboración del técnico de laboratorio Jean-Marc Lapetite y Jean-Mary Miscioscia por su ayuda en los sucesivos experimentos de laboratorio.

## Bibliografía

- Brooks R.H. y Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper, 3, Colorado State University, Fort Collins.
- Haverkamp, R., Parlange, J.-Y., Starr, J.L., Schmitz, G. y Fuentes, C., 1990. Infiltration under ponded conditions: 3. A predictive equation based on physical parameters. *Soil Sci.*, 149(5): 292-300.
- Haverkamp R., Ross P.J., Smettem K.R.J. y Parlange J.-Y. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resour. Res.* 30, 2931-2935
- Haverkamp, R., Parlange, J.-Y., Cuenca, R., Ross, P. J. y Steenhuis, T. S. 1998. Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling. In *Scale Invariance and Scale Dependence in Hydrology*, Ed. G. Sposito, Cambridge University Press, New York, USA., ISBN 0-521-57125-1, chapter 7, pp. 190-223.
- Ferre, P.A. y Topp, G.C., 2002. Time Domain Reflectometry. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds). *Methods of Soil Analysis*. Part 4-Physical Methods, SSSA Book Series No. 5, Madison, WI, USA, pp. 434-446.
- Moret, D. y Arrúe, J.L., 2005. Limitations of tension disc infiltrometers for measuring water flow in freshly tilled soils. In: A. Faz Cano, R. Ortiz & A.R. Mermut (Editores), *Sustainable Use and Management of Soils. Arid and Semiarid Regions*. Advances in Geocology 36, CATENA-VERLAG Series, pp. 198-204.
- Moret, D., Arrúe, J. L., López, M. V. y Gracia, R., 2006. A new TDR waveform analysis approach for soil moisture profiling using a single probe. *J. Hydrol.* 321, 163-172
- Or, D., Fisher, B., Hubscher, R.A. y Wraith, J., 1998. WinTDR 98 V.4.0 – Users Guide-. Department of Plants, Soil and Biometeorology, Utah State University, Logan.
- Parkin, G.W., Kachanosky, R.G., Elrick, D.E. y Gibson, R.G. 1995. Unsaturated hydraulic conductivity measured by time domain reflectometry under a rainfall simulator. *Water Resour. Res.* 31, 447-454.
- Parlange, J.-Y., Haverkamp, R. y Touma, J., 1985. Infiltration under ponded conditions: 1. Optimal analytical solution and comparison with experimental observations. *Soil Sci.*, 139(4): 305-311.
- Philip J.R., 1957. Theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.*, 84 : 257-264.
- Si, B., Kachanoski, R.G., Zhang, F., Parkin, G.W. y Elrick, D.E. 1999. Measurement of hydraulic properties during constant flux infiltration: field average. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 793-799.
- Smettem K.R.J., Parlange J.-Y., Ross P.J. y Haverkamp R. 1994. Three-

- dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 1. A capillary-based theory. *Water Resour. Res.* 30, 2925-2929
- Vandervaere, J.P., Vauclin, M. y Elrick, D.E. 2000. Transient flow from tension infiltrometers: I. The two-parameters equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1263-1272.
- Varado, N., 2004. *Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin.* PhD Thesis, University of Joseph Fourier, Grenoble I..