

DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE HUMEDAD DEL SUELO UTILIZANDO UNA SOLA SONDA TDR: EL MÉTODO DEL NOMOGRAMA

D. Moret, J.L. Arrúe, M.V. López, R. Gracia, J. Álvaro-Fuentes, M.J. Salvador.

Departamento de Suelo y Agua, Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Apdo. 202, 50080 Zaragoza (david@eead.csic.es)

RESUMEN. El objetivo de este trabajo es presentar el método del “nomoograma” para la medida por reflectometría de dominio temporal (TDR) del perfil de constante dieléctrica (K) del suelo, y, por tanto, del perfil del contenido de humedad volumétrico (θ), utilizando una única sonda TDR. El método está basado en un nuevo análisis gráfico de la onda TDR en medios no conductivos. Este análisis consiste en representar la función $\rho(t)$, que define la relación entre K , el coeficiente de reflexión (ρ) y el tiempo de transmisión (t), para una longitud de sonda $l = 10$ cm frente a la onda TDR de una sonda de longitud $L = nl$. La intersección entre ambas curvas define el tiempo t_{1l} que, a su vez, sirve de punto de referencia para la representación de una segunda función $\rho(t)$ que corta la onda TDR en t_{2l} y así sucesivamente. Las funciones $\rho(t)$ que cortan a la onda TDR en los puntos t_{1l} , t_{2l} ,..., y t_{nl} permiten determinar el perfil de K para las longitudes $1l$, $2l$,..., y nl . Este método fue validado utilizando una única sonda TDR de 3 electrodos y 60 cm de longitud insertada verticalmente en una columna de arena de 75 cm de altura. Simultáneamente, y durante un ciclo de humectación-deseccación, se efectuaron, mediante el método clásico de la doble reflexión (método de las tangentes), 86 medidas de K hasta 10, 20, 40 y 60 cm de profundidad utilizando sondas TDR verticales de 10, 20, 40 y 60 cm de longitud. La correlación entre los valores de K obtenidos por el método las tangentes y los obtenidos con el nuevo procedimiento aplicado a la sonda de 60 cm de longitud fue altamente satisfactoria ($R^2 = 0.992$). Asimismo, se observó una excelente relación entre los perfiles de θ determinados con el nuevo procedimiento y los obtenidos utilizando cuatro sondas TDR de tres electrodos y 10 cm de longitud insertadas horizontalmente en la columna de arena a 10, 20, 30 y 50 cm de profundidad.

ABSTRACT. This work is aimed at presenting the “nomograph” method, a graphical interpretation of the TDR (Time Domain Reflectometry) waveform for determining the variation of the apparent dielectric constant (K) along a single TDR probe in non-conducting media and its application for profiling the volumetric moisture content (θ) in soils. The method is based on the relationship between K , the reflection coefficient (ρ) and the travel time (t) of the TDR signal along a transmission

line. A $\rho(t)$ function is initially defined for a length l of 10 cm and plotted together with the TDR waveform for a three-rod probe of length L ($L = nl$). The interception point of both lines defines t_{1l} as the reference time to build a second $\rho(t)$ line that intercepts the waveform at time t_{2l} . By repeating this process iteratively, a series of $\rho(t)$ lines intercepting the TDR trace at times t_{3l} , t_{4l} ,..., and t_{nl} is obtained, making it possible to calculate K for apparent probe lengths equal to l , $2l$, $3l$,..., and nl . The method was tested for a 60-cm long TDR probe inserted in a sand column 75 cm high. A total of 86 values of K were measured during a wetting and draining cycle of the sand column with vertical 10-, 20-, 40- and 60-cm long coated TDR probes using the standard double reflection waveform analysis. A satisfactory relationship ($R^2 = 0.992$) was found between these K values and those obtained for the same depths by the proposed method applied to the 60-cm long probe. Furthermore, an excellent match was found between the θ profiles measured in the sand column applying the new approach to the 60-cm long probe and the θ profiles measured with horizontal probes placed at 10, 20, 30 and 50 cm depth.

1.- Introducción

El contenido volumétrico de agua en el suelo (θ) es un parámetro fundamental en agricultura, hidrología y en todos aquellos estudios relacionados con la dinámica del agua del suelo.

La técnica de Reflectometría de Dominio Temporal (TDR, Time Domain Reflectometry) es en estos momentos un método mundialmente aceptado para la medida de θ en suelos. Dicha técnica se basa en la medida de la velocidad de transmisión de una onda electromagnética (EM) a lo largo de una sonda inmersa en el suelo cuya constante dieléctrica K está directamente relacionada con θ .

Tal como describen Ferré y Topp (2002), las medidas del perfil de θ por TDR pueden realizarse utilizando: (i) sondas verticales de diferente longitud; (ii) sondas horizontales enterradas en el suelo a diferentes profundidades; y (iii) sondas TDR simples insertadas verticalmente en el suelo. De entre estas tres modalidades, los sistemas de sondas verticales presentan mayores ventajas con respecto al sistema de sondas horizontales ya que permiten la realización de medidas con

una alteración mínima del suelo. El sistema de sondas múltiples verticales implica, sin embargo, la instalación de varias sondas, lo que incrementa los errores asociados a la variabilidad espacial del suelo. Así, pues, se puede concluir que el sistema óptimo de medida del perfil de humedad del suelo por TDR pasaría por el uso de una única sonda vertical TDR que abarque todo el perfil del suelo. Los primeros diseños de sondas TDR para medida de perfiles de humedad del suelo fueron desarrollados por Topp y Davis (1985), quienes utilizaron como sondas TDR varillas de diferente diámetro. Posteriormente, Hook et al. (1992) diseñaron un tipo de sonda que incorporaba una serie de diodos a lo largo de la misma, lo que permitía estimar perfiles de constante dieléctrica del suelo. La principal limitación de este tipo de diseño estriba en el escaso número de intervalos de profundidad que permiten para la medida de θ .

Como alternativa a los métodos anteriormente descritos, Pereira do Santos (1997) propuso un método de medida del perfil de humedad del suelo basado en la inversión de una única señal TDR. Sin embargo, los resultados de este método no fueron del todo satisfactorios ya que mostraban limitaciones en cuanto a la calidad de la reconversión de la señal TDR. Estas limitaciones han sido recientemente superadas por Greco (2006) al optimizar el procedimiento de análisis de la onda TDR.

El objetivo de este trabajo es presentar el método del "nomograma" (Moret et al., 2006) para el análisis gráfico de una onda TDR y su aplicación en la medida del perfil de constante dieléctrica (K) de un medio poroso no conductivo utilizando una única sonda TDR, insertada verticalmente en el mismo. El fin último de este análisis de onda es desarrollar un método TDR para la medida del perfil del contenido de humedad volumétrico del suelo.

2.- Materiales y métodos

2.1. Teoría

2.1.1. Fundamentos básicos de la técnica TDR

El sistema TDR emite una onda EM que se propaga a lo largo de una línea de transmisión. La forma de la onda TDR queda representada en un plano por el tiempo, t (s), en el eje de ordenadas y el voltaje (V) o el coeficiente de reflexión (ρ) en el eje de las abscisas.

El tiempo que tarda una onda EM en ir y volver a lo largo de una línea de transmisión de longitud L (m) se define según la ecuación:

$$t = \frac{2L\sqrt{K}}{c} \quad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío ($3 \cdot 10^8$ m s⁻¹) y K la constante dieléctrica aparente del medio (Dalton et

al., 1984).

La impedancia de una línea de transmisión (Z_s) viene expresada por la ecuación:

$$Z_s = \frac{Z_0}{\sqrt{K}} \quad (2)$$

donde Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión que, para el caso de un cable coaxial ideal, viene expresado por la ecuación (Kraus, 1984):

$$Z_0 = 60 \ln(s/d) \quad (3)$$

donde s y d son el diámetro de los conductores externos e internos, respectivamente. Alternativamente, Z_0 puede calcularse a partir de ρ según la expresión (Zegelin et al., 1989):

$$Z_0 = Z_r \sqrt{K} \left(\frac{1+\rho}{1-\rho} \right) \quad (4)$$

donde Z_r es la impedancia de salida del ecómetro TDR.

El coeficiente de reflexión, ρ , de un onda TDR para una línea de transmisión inmersa en un medio de constante dieléctrica K se expresa como una función de impedancias según

$$\rho = \frac{Z_s - Z_r}{Z_s + Z_r} \quad -1 \leq \rho \leq +1 \quad (5)$$

o también como una relación de voltajes según:

$$\rho = \left(\frac{V_1}{V_0} \right) - 1 \quad (6)$$

donde V_0 es la amplitud de la señal a la salida el aparato TDR y V_1 la amplitud de la onda tras una reflexión parcial de la señal TDR.

2.1.2. Relación entre el coeficiente de reflexión y el tiempo de propagación de la onda TDR

Combinando las Ecs. (1), (2) y (5) y resolviéndolas para una sección de longitud aparente l de un cable coaxial ideal de longitud $L = nl$, se obtiene la siguiente relación:

$$\rho = \frac{Z_0 2l - Z_r c t_l}{Z_0 2l + Z_r c t_l} \quad (7)$$

que describe la variación de ρ en función de t para una longitud aparente l (Fig. 1). Cuando esta función, que tiene como punto de inicio $t_0 = 0$, se representa junto a una onda TDR, el punto de corte entre ambas curvas (t_{II}) representa el tiempo que la onda EM necesita para recorrer una distancia l (Fig. 1). Del mismo modo, la función definida por la Ec. (7) para un tiempo de inicio t_{II} intercepta a la onda TDR en el

tiempo t_{2i} que representa el tiempo que necesita la onda TDR para recorrer una distancia $2l$. Repitiendo esta operación de forma iterativa se obtiene una serie de funciones $\rho(t)_i$ que cortan a la onda TDR en los tiempos t_{3l}, t_{4l}, \dots y t_{nl} . Estos valores de t representan el tiempo que tarda el pulso EM en propagarse a lo largo de la línea de transmisión una distancia $3l, 4l,$ y nl , respectivamente. Este método, que hemos denominado método del “nomograma” (NG), permite, a partir de la Ec. 1, y utilizando una sola onda TDR, calcular valores de K a diferentes profundidades del medio utilizando la ecuación:

$$K_i = \left(\frac{ct_{il}}{2(il)} \right)^2 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (8)$$

donde K_i es el valor de la constante dieléctrica del medio para la longitud aparente il de una sonda TDR de longitud total $L = nl$.

Los valores de K a diferentes intervalos de profundidad, $K_{\Delta i}$, pueden ser calculados según la expresión

$$K_{\Delta i} = \left(\frac{c(t_{il} - t_{(i-1)l})}{2l} \right)^2 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (9)$$

donde $t_{(i-1)l}$ es el tiempo de propagación para una longitud aparente $(i-1)l$.

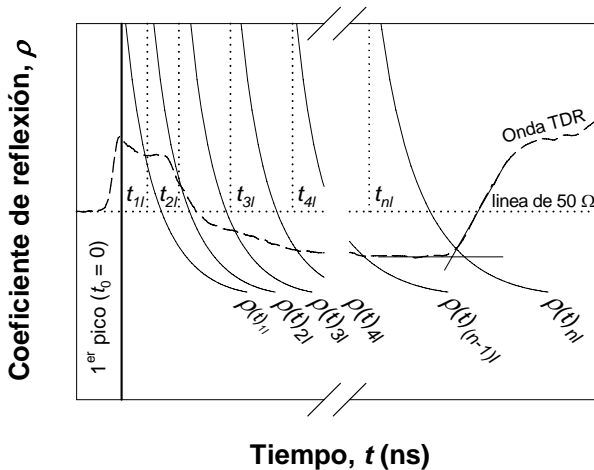


Fig. 1. Representación gráfica de una onda TDR ideal para una sonda de longitud L ($L = nl$) junto con las funciones $\rho(t)$ que cruzan la onda TDR en los tiempos $t_{1l}, t_{2l}, t_{3l}, \dots$ y t_{nl} (Moret et al., 2006).

2.2. Diseño experimental

Los experimentos que seguidamente se describen ilustran el procedimiento seguido para evaluar la bondad del método NG. Las medidas de TDR se realizaron utilizando un ecómetro de la marca Tektronix, modelo

1502C. Las sondas TDR se conectaban al ecómetro a través de un cable coaxial de 1.5 m de longitud, transfiriéndose las señales EM a un ordenador que registraba y analizaba las ondas TDR utilizando el programa WinTDR98 (Or et al., 1998).

En una primera fase se estudió el efecto de la K del medio sobre la impedancia característica (Z_0) de la sonda TDR utilizada (sonda de 3 electrodos con varillas de 10 mm de diámetro y una separación entre electrodos exteriores de 83 mm). Para ello, la sonda se sumergió en once fluidos no conductivos con valores de K que variaban entre 1 y 80 (Tabla 1).

Tabla 1. Fluidos no conductivos utilizados para estudiar el efecto de la constante dieléctrica (K) del medio sobre la impedancia característica (Z_0) de una sonda TDR (Moret et al., 2006).

Fluidos	K
Aire	1.05
Aceite de girasol	2.42
Ácido acético	9.22
Solución acuosa de ácido acético (60:40, v/v)	15.76
Etanol	21.39
Solución acuosa de etanol (90:10, v/v)	26.62
Solución acuosa de etanol (85:15, v/v)	31.53
Solución acuosa de etanol (70:30, v/v)	40.65
Solución acuosa de etanol (50:50, v/v)	51.41
Solución acuosa de etanol (35:65, v/v)	61.23
Agua destilada	80.22

En un segundo experimento se validó el método del NG comparando los valores de K medidos con este método con los obtenidos según el procedimiento estándar de análisis de la onda TDR, método de la “doble reflexión” o método de las tangentes. Para ello, se preparó una columna de arena en un contenedor de plástico (de 40 cm de diámetro y 75 cm de altura) en la que se insertaron cuatro sondas verticales de 10, 20, 40 y 60 cm de longitud, con la geometría antes descrita. Los cabezales de las sondas yacían sobre la superficie de la columna de arena y los electrodos se separaron como mínimo 8 cm de la pared de la columna para evitar posibles interferencias del aire exterior. Cuatro sondas de tres electrodos y 10 cm de longitud fueron también instaladas horizontalmente en la columna de arena a 10, 20, 40 y 50 cm de profundidad. Los electrodos de todas las sondas se aislaron con macarrón termorretráctil de 0.2 mm de grosor de pared. La densidad aparente y el contenido de humedad volumétrico (θ) iniciales de la columna de arena fueron 1.42 g cm^{-3} y $0.084 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. La columna fue saturada con agua por capilaridad desde la base del contenedor a través de un conducto de drenaje. Durante el proceso de humectación se efectuaron 22 medidas de K con las cuatro sondas verticales. Los tiempos de corte entre las diferentes curvas $\rho(t)$ y la onda TDR de la sonda de 60 cm de longitud fueron automáticamente determinados como la mínima distancia entre ambas curvas.

Con el fin de estimar θ a partir de las medidas de K obtenidas con las sondas TDR recubiertas con material aislante, se estableció experimentalmente la relación entre los valores de K medidos con una sonda aislada (K_{aisl}) de 10 cm

de longitud inmersa en un contenedor de arena con diferentes contenidos de humedad y los respectivos valores de K obtenidos con la misma sonda sin aislante ($K_{no-aisl}$). Dicha relación queda definida con la ecuación:

$$K_{no-aisl} = 0.0108 (K_{aisl})^2 + 1.4942 K_{aisl} - 0.8297 \quad (10)$$

con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.981. Finalmente, θ fue calculado tras aplicar la ecuación de Topp et al. (1980) a los valores de $K_{no-aisl}$.

3.- Resultados y discusión

3.1. Influencia de K sobre Z_0 en medios no conductivos

La Fig. 2a representa la relación entre la Z_0 experimentalmente obtenida con la Ec. 4 y la K de los diferentes fluidos no conductivos (Tabla 1). Los resultados muestran que, a diferencia de una línea coaxial ideal (Ec. 3), la Z_0 de una sonda de tres electrodos aumenta con la K del medio, en consonancia con los resultados obtenidos por Zegelin et al. (1989). El efecto de la geometría de la sonda sobre Z_0 queda ilustrado en la Fig. 2b, en la que se observa cómo la diferencia entre la Z_0 de la sonda de tres electrodos y la de un coaxial ideal (línea discontinua) se reduce cuando Z_0 se divide por el factor de geometría de la sonda, $\ln(s/d)$.

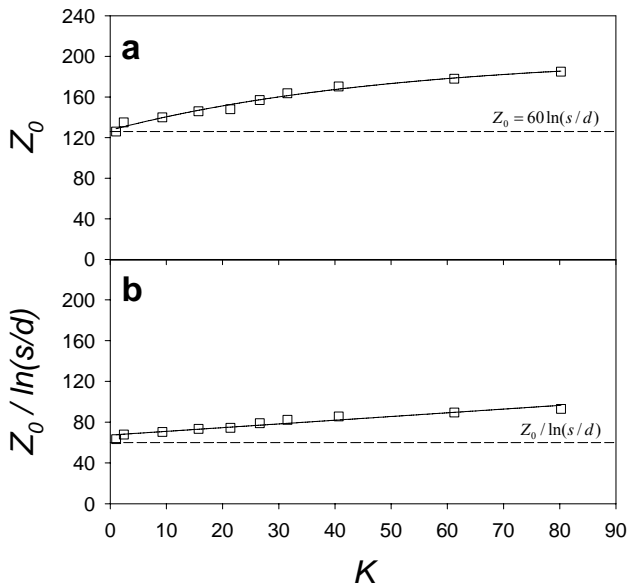


Fig. 2. Relación entre la constante dieléctrica (K) de diferentes fluidos (véase Tabla 1) y la impedancia característica (Z_0) de una sonda TDR de tres electrodos (Moret et al., 2006).

Examinada la variación de Z_0 en la Fig. 2a para el rango de valores de K entre 1 y 80, la función de mejor ajuste la

relación entre ambos parámetros es del tipo:

$$Z_{0(p)} = (66 + 1.2 \ln(K)) \ln\left(\frac{s}{d}\right); \quad (R^2 = 0,972) \quad (11)$$

3.2. Validación del método del nomograma para el análisis de la onda TDR

La Fig. 3 muestra un ejemplo de ondas TDR obtenidas con las cuatro sondas verticales de tres electrodos y 10, 20, 40 y 60 cm de longitud en un momento concreto del proceso de humectación de la columna de arena y sus intersecciones con las funciones $\rho(t)$ para la sonda experimental de tres electrodos, a 10, 20, 30, 40, 50 y 60 cm de profundidad, obtenidas tras sustituir en la Ec. 7 el parámetro Z_0 (Ec. 3) por el parámetro $Z_{0(p)}$ calculado para sondas de tres electrodos (Ec. 11).

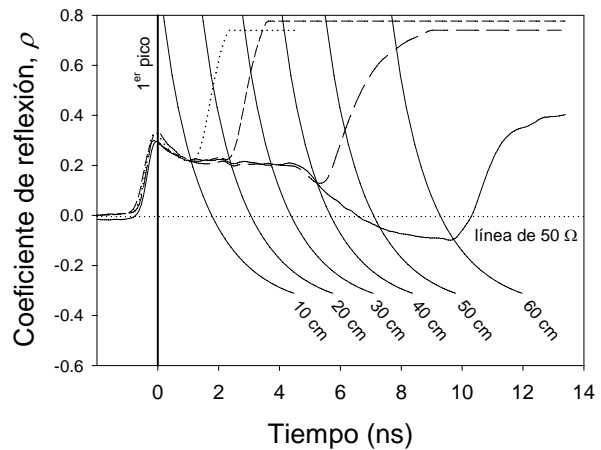


Fig. 3. Ejemplo de ondas TDR medidas con sondas TDR de tres electrodos de 10, 20, 40 y 60 cm de longitud insertadas verticalmente en una columna de arena durante un proceso de humectación, junto con las líneas $\rho(t)$ de la sonda de tres electrodos estudiada para longitudes aparentes de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 cm (Moret et al., 2006).

La Fig. 3 muestra cómo las ondas de las sondas TDR más cortas se solapan con las obtenidas con sondas de mayor longitud. Por otro lado, las funciones $\rho(t)$ para las longitudes aparentes de 10, 20, 40 y 60 cm cortan en los puntos de inflexión (2^a reflexión) de las ondas TDR correspondientes a las sondas de igual longitud. Estos resultados indican que el método NG es consistente y que permite, utilizando la Ec. (8), calcular K a diferentes profundidades utilizando una única sonda TDR insertada verticalmente en el medio (suelo).

Con el fin de validar la robustez del método del NG , se compararon 86 medidas de K obtenidas con las sondas verticales de 10, 20, 40 y 60 cm de longitud, durante un ciclo de humectación-deseccación, utilizando el método de las tangentes, con los obtenidos por el método del NG aplicado a la onda TDR de la sonda de 60 cm de longitud. La Fig. 4

muestra una estrecha correlación entre los valores de K obtenidos con ambos métodos ($R^2 = 0.992$). El bajo valor de la desviación estándar (SD) de la regresión indica que el método del NG es suficientemente robusto para medidas de perfiles de K .

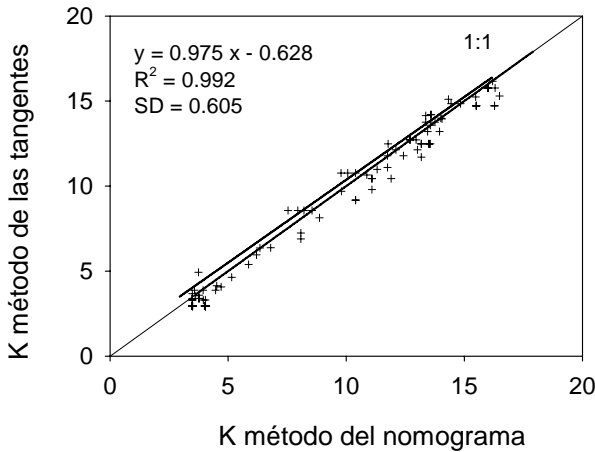


Fig. 4. Relación entre la constante dieléctrica, K , medida en la columna de arena por TDR utilizando el método de las tangentes aplicado a las sondas de 10, 20, 40 y 60 cm de longitud y la K medida para las mismas longitudes utilizando el método del nomograma aplicado a la onda de la sonda TDR de 60 cm de longitud (Moret et al., 2006).

La Fig. 5. muestra el perfil de θ medido a las profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 y 50-60 cm por el método del NG aplicado a la sonda vertical de 60 cm de longitud (Ec. 9) durante el proceso de humectación de la columna de arena y el obtenido con sondas de 10 cm de longitud instaladas horizontalmente a 10, 20, 40 y 50 cm de profundidad. Los resultados indican que el método del NG puede ser utilizado de forma satisfactoria para estimar el perfil de humedad del suelo.

4.- Conclusiones

El método del “nomograma” (NG) propuesto para el análisis de una onda TDR y la medida del perfil de constante dieléctrica (K) del suelo utilizando una sola sonda TDR vertical, es altamente satisfactorio. Sin embargo, es necesario llevar a cabo investigaciones adicionales con el fin de (i) cuantificar el error del método NG en la medida de K en medios heterogéneos y (ii) estudiar el efecto de la geometría de las sondas TDR de tres electrodos sobre la relación entre la impedancia característica de la sonda y la constante dieléctrica del medio.

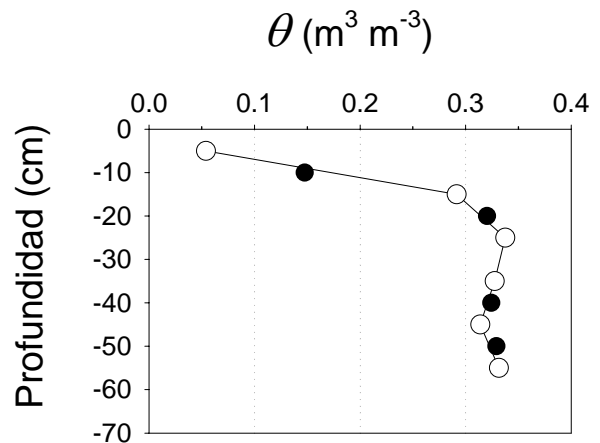


Fig. 5. Comparación del perfil de contenido de humedad volumétrica del suelo (θ) medido a las profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 y 50-60 cm por el método del nomograma, en una columna de arena durante el proceso de humectación (\circ) y el obtenido con sondas de 10 de longitud instaladas horizontalmente a 10, 20, 40 y 50 cm de profundidad (\bullet) (Moret et al., 2006).

Agradecimiento. El presente trabajo ha sido financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (proyecto AGL2004-07763-CO2-02).

Bibliografía

- Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S. y Rhoades, J.D., 1984. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* 224, 989-990.
- Ferré, 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.
- Greco, R. 2006. Soil water content inverse profiling from single TDR waveforms. *J Hydrol.* 317, 325-339.
- Hook, W.R., Livingston, N.J., Sun, Z.J. y Hook, P.B., 1992. Remote diode shorting improves measurement of soil water by time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1384-1391.
- Kraus, J.D., 1984. *Electromagnetics*. 3ª ed., McGraw-Hill, Nueva York.
- Moret, D., Arrúe, J.L., López, M.V., 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.
- Pereira dos Santos, L., 1997. *Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Topp, G.C. y Davis, J.L., 1985. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 19-24.
- Topp, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16, 574-582.
- Zegelin, S.J., White, I. y Jenkins, D.R., 1989. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 25, 2367-2376.

