

USO DEL TDR EN ENSAYOS DE MOVIMIENTO DE AGUA SOBRE COLUMNAS DE SUELO INALTERADO

A. López¹, P. Crende² y A. Castelao³

¹ Escuela Politécnica Superior, Univ. Santiago de Compostela, Campus Universitario 27002-LUGO; lfabal@lugo.usc.es

² Escuela Politécnica Superior, Univ. Santiago de Compostela, Campus Universitario 27002-LUGO; pcrende@mixmail.com

³ Facultad de Veterinaria, Univ. Santiago de Compostela, Campus Universitario 27002-LUGO; anacas@lugo.usc.es

RESUMEN. Para el estudio del movimiento de agua en dos suelos de baja permeabilidad se utilizaron columnas de suelo inalterado. La humedad del suelo se midió a distintos niveles de estas columnas por medio de la técnica de TDR, usando sondas de dos varillas insertadas horizontalmente. Previamente se hizo una calibración de la relación entre la constante dieléctrica (K_a) y el contenido volumétrico de humedad (H_v) para cada uno de los dos horizontes principales de ambos suelos. Se estudió la calidad de las mediciones y se compararon las calibraciones obtenidas con dos de las habitualmente propuestas como “universales”. Durante un proceso de secado, partiendo de la saturación, se siguió la evolución de los perfiles tensiométricos y de humedad de las columnas de suelo. De ellos se derivaron las características de retención de humedad y la conductividad hidráulica insaturada en cada nivel de medida.

ABSTRACT. Water movement was studied in two low permeability soils using undisturbed soil columns. Soil moisture was measured in several layers of the columns using the TDR technique with two parallel rods horizontally installed as wave guides. Previously to the test, the relationship between dielectric constant (K_a) and volumetric water content (H_v) was calibrated for each horizon of the two soils. Quality of measurements was tested and the calibrations obtained were compared with those often proposed as standard. Profiles of pressure head and water content were measured simultaneously and repeatedly while soils were dried from saturation. Unsaturated hydraulic characteristics (water retention curves and unsaturated hydraulic conductivity) of each layer of soils were determined from them.

saturadas. Se han desarrollado diferentes técnicas para la determinación tanto de la conductividad hidráulica insaturada como de las características de retención de humedad. Los métodos con mayores posibilidades son aquellos que se basan en el análisis de los perfiles instantáneos de potencial hídrico y humedad, si bien exigen disponer de medidas simultáneas de ambos parámetros a lo largo del tiempo (Wind, 1968; Boels et al. 1978). La medida del potencial hídrico se resuelve habitualmente con tensiómetros, que resultan instrumentos sencillos y precisos, aunque su rango de medida es limitado. Habitualmente la medición de humedad era el factor más limitante, por la falta de un método no destructivo, repetible y suficientemente preciso. Wind (1968) propuso un proceso optimizado para determinar simultáneamente la curva de retención de humedad y la conductividad hidráulica no saturada ($K(\theta)$) de un suelo, basado en la medida de la variación de peso de una muestra en un proceso de evaporación. El método, sin embargo, presenta limitaciones en cuanto al volumen de la muestra utilizable, al asumir la homogeneidad de la misma. La sonda de neutrones fue muy útil durante años para la obtención de perfiles de humedad de forma relativamente sencilla, precisa y rápida (Valles et al. 1982); si bien el amplio volumen de medición daba lugar a una baja resolución espacial, imponía el uso de muestras de gran diámetro y limitaba las medidas cercanas a la superficie. La necesidad de instalación de un tubo de acceso y de calibración para cada situación supone otros inconvenientes a su uso; aunque el más serio en los últimos tiempos fue el uso de una fuente radioactiva. La introducción y puesta a punto en las últimas dos décadas de la medida de humedad usando la técnica de TDR (Time Domain Reflectometry) (Topp, 1980; Goldstein, 1980; Topp et al. 1985; Dalton et al. 1986) representa nuevas oportunidades para la medida de perfiles de humedad en ensayos de laboratorio con columnas de suelo.

El TDR es uno de los métodos de medida de la constante dieléctrica del suelo, que se ha demostrado en íntima relación con su contenido de agua. Fellner-Feldegg (1969) utilizó el TDR para la medida de la constante dieléctrica de líquidos usando guías de onda coaxiales. Topp et al. (1980, 1985), usando guías paralelas, demostraron la utilidad del

1. Introducción

La medida de las propiedades hidrodinámicas de los suelos no saturados es de importancia primordial para la elaboración y aplicación de modelos que describan el movimiento de agua en el suelo en condiciones no

método para la determinación del contenido volumétrico de agua líquida en suelos no saturados; así como la práctica independencia de otros factores como la textura, la densidad, la temperatura o el contenido de sales; lo que permitía el uso de una misma calibración en un amplio rango de suelos con un error estimado menor de $0.013 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Desde entonces el uso del TDR se ha desarrollado con rapidez, sustituyendo progresivamente a los métodos utilizados antes. La precisión de las medidas sin necesidad de calibración en cada suelo e independientemente de la distribución de humedad, la rapidez y facilidad de uso, así como la posibilidad de hacer medidas bastante localizadas por lo reducido del volumen de medida son sus principales ventajas.

Numerosos autores han constatado la utilidad de este método en el seguimiento de los perfiles de humedad de columnas de suelo en laboratorio, así como la posibilidad de automatizar la obtención de mediciones (Boels et al. 1978; Heimovaara et al. 1990; Herkelrath et al. 1991), lo que permite un seguimiento continuo en intervalos cortos.

En este trabajo se aplica la técnica de TDR sobre muestras inalteradas de suelos de baja permeabilidad del NO de España. Inicialmente se realiza una calibración del TDR en los suelos estudiados, haciendo una estimación de los errores y comparándola con la que se propone como calibración única. Luego, en un proceso de secado del suelo partiendo de la saturación, se determinan las características de retención de humedad y la conductividad hidráulica insaturada a diferentes niveles de cada muestra.

2. Material y métodos

2.1. Toma y preparación de muestras

Se trabajó sobre suelos de baja permeabilidad del interior de la provincia de Lugo (NO de España), caracterizados por su deficiente drenaje y las situaciones de encharcamiento invernal. Se trata de suelos de origen sedimentario, en los que se distingue un horizonte superficial de 35 - 40 cm de espesor, rico en materia orgánica y de buenas propiedades hidrodinámicas; bajo el que se encuentra un estrato subyacente, de textura fina y pobre estructura, que resulta ser el limitante de la circulación de agua en el perfil.

Para el estudio del movimiento del agua en estos suelos de baja permeabilidad se seleccionaron dos perfiles representativos en las localidades de Pumar (Pu) y Triabá (Tr). De ellos se extrajeron muestras de suelo inalterado en el interior de tuberías de PVC de 40 cm de diámetro. De cada perfil se tomaron muestras por duplicado, y separando además los dos horizontes principales: el superficial (A) de entorno a 35 cm de espesor, y el subyacente (B) del que se tomaron 75-80 cm de longitud. Ya en laboratorio a estas columnas de suelo se les colocó en su base una capa de grava silíceas y una tapa provista de un orificio de desagüe.

El seguimiento de los procesos de infiltración y secado para la caracterización de las propiedades hidrodinámicas se hizo siguiendo la evolución de los perfiles instantáneos de humedad y potencial hídrico en las columnas de suelo (Heimovaara et al. 1993). Ello requiere la medición

simultánea del potencial hídrico y de la humedad volumétrica cada cierto intervalo de profundidad, que se fijó en 10 cm. El potencial se midió con tensiómetros de mercurio instalados lateralmente. Las medidas de humedad se hicieron mediante la técnica de TDR, con un equipo TRASE modelo 6050X1, que mediante el conector previsto para ello se acoplaba a parejas de varillas de acero inoxidable de 0.6 cm de diámetro separadas 4.5 cm.

Para permitir la medida a las distintas profundidades, se optó por colocar parejas de varillas cada 10 cm de profundidad, insertadas horizontalmente en sentido radial perforando la pared plástica de la columna. De esta forma es posible una instalación precisa, al tiempo que se reduce la alteración del suelo y se mejora la precisión de las medidas respecto de la instalación vertical. Dada la curvatura de la columna las dos varillas de cada pareja debieron colocarse en disposición vertical para permitir una correcta colocación del conector. De esta forma todas las varillas de una columna se dispusieron en un plano radial, que además formaba 120° con el de los tensiómetros para evitar contacto entre ambos tipos de sondas e interferencia en las mediciones (Fig. 1).

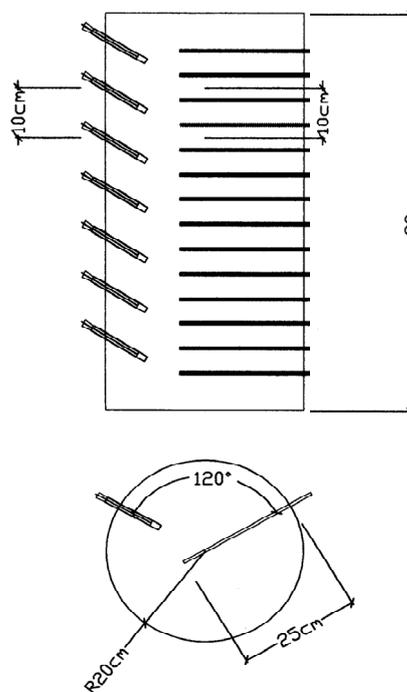


Fig. 1. Esquema de las columnas de suelo utilizadas (caso de las de horizonte B), detallándose la disposición de las sondas.

La precisión de las mediciones de humedad con el tipo de sonda utilizado es pequeña cuando se reduce su longitud (Soil Moisture Equipment Corp., 1990; Topp et al. 1984; Zegelin et al. 1989) debido a la reducción del tiempo de tránsito de la onda electromagnética en relación a la precisión de la medida de tiempo y al ruido de la señal. Para evitar este extremo, y dado que las dimensiones de las muestras no representaban una importante limitación, se utilizaron varillas de 27.8 cm de longitud total, de los que 25 cm se introdujeron en el suelo, 0.8 cm correspondieron

al espesor de la pared de la tubería de PVC y los 2 cm restantes sobresalían al exterior para permitir la unión al conector.

El volumen de medida de las sondas de TDR es bastante definido y afecta sobre todo al suelo inmediatamente en contacto con las varillas (Knight, 1992); si bien es variable en función de la geometría de la sonda y el contenido de humedad del medio (Zegelin et al. 1989). Para disminuir la alteración de la porosidad del suelo por la compactación que supone introducir las varillas, que podría afectar a la precisión de las mediciones cuando la humedad es alta, las sondas se insertaron en un orificio de 0.5 cm de diámetro previamente practicado. Por otra parte, se comprobó el volumen máximo afectado realizando series de mediciones en medios con distinto contenido de humedad, mientras se iba reduciendo el volumen entorno a las sondas en direcciones perpendiculares entre sí hasta la alteración de la medida de humedad. De esta forma se llegó a que el volumen máximo de medida corresponde a bajos contenidos de humedad y viene a ser un cilindro de 7.5 cm de diámetro, lo cual está en consonancia con lo indicado por otros autores para este tipo de sondas (Castelao et al. 1995). Esta comprobación permitió descartar interacciones de las varillas colindantes sobre la medición de una sonda.

2.2. Calibración del TDR

El valor de la K_a del suelo es muy poco dependiente de otros factores aparte de la humedad volumétrica, lo cual permite el uso de una misma calibración de forma "universal" con un error estimado de $0.013 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Topp et al. 1980). Sin embargo pueden mejorarse la fiabilidad de los valores de contenido de agua en un suelo determinado obteniendo previamente una curva de calibración (Heimovaara et al. 1993). Además el uso de esta técnica en columnas de suelo comporta variaciones respecto de las condiciones habituales de medición, en las que se llevan a cabo las mediciones y calibraciones. Por una parte, las varillas insertadas en el suelo atraviesan también la pared de la columna, lo que significa un medio compuesto, cuya K_a depende de las propiedades de ambas fases y la geometría de la composición (Roth et al. 1990). Por otro lado, la curvatura de pared de la columna respecto de la dirección de inserción de la varilla representa una modificación del volumen de suelo alrededor de la misma respecto de las condiciones de utilización en una superficie de suelo plana.

Por ello previamente a la realización de los ensayos se llevó a cabo una calibración de la relación de la K_a con el contenido de agua del suelo en las mismas condiciones en que se iba a llevar a cabo la medida. Esta relación se obtuvo inicialmente para cada uno de los dos horizontes de ambos suelos utilizados, y sólo para el rango de humedades en el que estaba previsto trabajar.

Para la calibración se utilizaron muestras de suelo inalterado recogidas en tubos de PVC, abiertos por un extremo y tapados con una porción de la tubería de PVC de 40 cm de diámetro por el extremo de inserción de las sondas, con lo que se reprodujeron exactamente las condiciones de uso en las columnas de suelo. Las muestras

tuvieron un diámetro de 15 cm y una longitud 1 cm mayor que la de las sondas insertadas (Fig. 2), lo que representa un volumen suficiente según lo determinado anteriormente. Se utilizaron tres réplicas por cada horizonte y suelo.

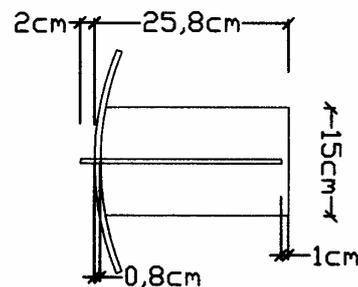


Fig. 2. Esquema de las muestras de suelo utilizadas en la calibración.

Para la calibración se partió de las muestras de suelo en estado de saturación de humedad, dejándolas secar por evaporación durante el día y tapándolas durante toda la noche para favorecer la homogeneización del contenido de humedad. Varias veces al día se midió la K_a y se pesaron las muestras de suelo, lo que al final de la prueba permitió conocer la humedad volumétrica una vez extraído el suelo para su secado en estufa y estimada la densidad aparente.

2.3. Ensayos de movimiento de agua

El estudio de las características hidrodinámicas de los suelos se llevó a cabo mediante un ensayo de movimiento de agua en régimen transitorio, midiendo de forma continuada los flujos de agua y la variación de los perfiles tensiométricos. Se partió de las columnas en riego saturado y en condiciones de flujo estacionario. Se cortó el riego y se permitió que los suelos perdieran humedad, inicialmente sólo por drenaje, tapando la parte superior de las columnas, hasta que el equilibrio tensiométrico y la estabilización del perfil de humedad indicaron el cese de los flujos internos. Entonces se destaparon las columnas para permitir la continuación del secado por evaporación, creando nuevos flujos verticales de humedad, ahora hacia arriba. Dada la lentitud del proceso de secado por evaporación, éste fue acelerado renovando el aire en contacto con el suelo de la superficie de la columna mediante un sistema de ventilación.

A lo largo del proceso de secado se midieron repetidamente los perfiles de potencial y de humedad volumétrica, a intervalos de tiempo diferentes en función de la velocidad de cambio de los mismos (10 minutos al inicio, diariamente al final). El ensayo en cada columna duró hasta que la mayoría de sus tensiómetros alcanzaron su límite de succión y dejaron de medir, situación en la que parte de los flujos de agua en el interior de la columna se producen ya en forma de vapor y no de agua líquida.

La conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) como no saturada como función del contenido de humedad ($K(\theta)$) se determinó para cada nivel de la columna i donde se habían colocado instrumentos de medición, utilizando para ello la ecuación de Darcy

$$q = -K(\theta) \frac{\Delta H}{\Delta z} \Rightarrow K(\theta) = -q / \left(\frac{\Delta H}{\Delta z} \right) \quad (1)$$

donde $K(\theta)$ es la conductividad hidráulica función del contenido volumétrico de humedad, $\Delta H/\Delta z$ es el gradiente hidráulico y q la densidad de flujo.

En condiciones de saturación y con flujo estacionario la densidad de flujo q es igual en todos los niveles de una columna y equivalente a la infiltración y al drenaje.

En condiciones insaturadas, la reserva de agua para un nivel i y un tiempo j dados ($r_{i,j}$), es la cantidad de agua acumulada por unidad de superficie en el suelo por encima o por debajo de ese nivel (según la dirección del movimiento del agua). De modo que la variación de la misma sólo pueda deberse al movimiento de agua a través de la sección i . Entre los instantes j y $j+1$ (intervalo $j \rightarrow j+1 \equiv j+1/2$) la densidad de flujo ($q_{i,j+1/2}$) será la variación de las reservas de humedad en el nivel " i " entre los instantes j y $j+1$.

$$q_{i,j+1/2} = \frac{r_{i,j} - r_{i,j+1}}{t_{j+1} - t_j} \quad (2)$$

Para un nivel genérico i el gradiente hidráulico en un instante j es el cociente entre las diferencias de potencial y profundidad de los niveles inmediatamente inferior y superior a i

$$\left(\frac{\Delta H}{\Delta z} \right)_{i,j} = \frac{H_{i+1,j} - H_{i-1,j}}{z_{i+1} - z_{i-1}} \quad (3)$$

Para un intervalo de tiempo $j \rightarrow j+1$ ($j+1/2$), el gradiente hidráulico, representado por $(\Delta H/\Delta z)_{i,j+1/2}$, será la media de los gradientes al principio y final del intervalo (j y $j+1$)

$$\left(\frac{\Delta H}{\Delta z} \right)_{i,j+1/2} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\Delta H}{\Delta z} \right)_{i,j} + \left(\frac{\Delta H}{\Delta z} \right)_{i,j+1} \right] \quad (4)$$

Con los cálculos anteriores utilizando la ley de Buckingham-Darcy se calcula, aplicándolos a los diferentes casos, la conductividad hidráulica buscada para cada nivel i

$$K_i \left(\theta_{i,j+1/2} \right) = -q_{i,j+1/2} / \left(\frac{\Delta H}{\Delta z} \right)_{i,j+1/2} \quad (5)$$

La humedad media del periodo $j \rightarrow j+1$ ($\theta_{i,j+1/2}$) se toma como la media de las humedades en los momentos j y $j+1$.

$$\theta_{i,j+1/2} = \frac{\theta_{i,j} + \theta_{i,j+1}}{2} \quad (6)$$

3. Resultados y discusión

3.1. Calibración del TDR

En la Fig. 3 se muestran los resultados de la calibración realizada en cada uno de los dos horizontes de los dos suelos estudiados. La relación entre la constante dieléctrica (Ka) y el contenido volumétrico de humedad (Hv) se ajustó en todos los casos mediante una aproximación lineal, ya

que en el rango de humedades ensayado las ecuaciones de 2º o 3º grado no mejoraron significativamente el ajuste.

A nivel de cada una de las muestras ensayadas (datos no mostrados) se observa una oscilación entre medidas sucesivas con máximos de $0.004 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, lo que no impide obtener un buen ajuste de los datos experimentales. En todos los casos se obtienen coeficientes de regresión (r^2) por encima de 0.99, aunque en parte de las muestras el ajuste debe hacerse con polinomios de 2º o 3º grado. Al combinar las tres muestras de un mismo suelo, la heterogeneidad de las propiedades físicas aumenta el error experimental. La mayor dispersión de las medidas reduce los coeficientes de regresión y entonces el ajuste lineal presentado (Fig.3) es comparable a los que podrían obtenerse mediante curvas.

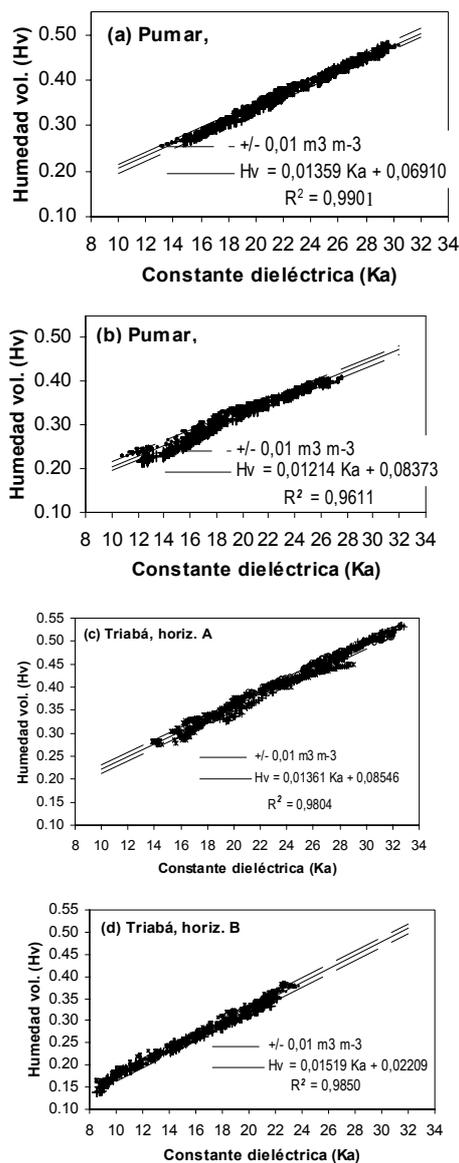


Fig. 3. Resultados de la calibración del TDR en ambos horizontes de los dos suelos estudiados. La nube de puntos corresponde a los datos experimentales de las 3 muestras utilizadas en cada caso (con distintos símbolos). Ajuste lineal y desvío de $\pm 0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Un factor crítico para la buena correlación entre las repeticiones del mismo suelo es la medida de densidad realizada en cada una de las muestras, necesaria para referir a volumen la serie de datos de humedad medidos en peso. Variaciones en este valor afectan a toda la serie de medidas, desplazando verticalmente la función Hv (Ka).

En la Fig. 4 se muestra la comparación, para el rango de humedades ensayado, entre estas cuatro curvas obtenidas y las propuestas como ecuaciones universales por Topp et al. (1980) y por los fabricantes del aparato utilizado (Soil Moisture Corp., 1990). Existe una clara proximidad entre todas ellas, agrupándose en una banda correspondiente a una variación de humedad de no más de $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En los niveles de humedad más altos las rectas de calibración elaboradas se desvían de la tendencia curvilínea propuesta por Topp. Con respecto a la calibración “de fábrica” del TRASE, hay bastante similitud en la tendencia, pero no se reproduce el marcado cambio de pendiente en el rango de humedades de 0.375 – 0.45. Las rectas correspondientes a ambos horizontes A son prácticamente paralelas, con una diferencia de aproximadamente 0.015 de Hv; mientras que las de horizontes B tienen menor similitud. A los horizontes A les corresponden valores más altos de Hv en relación a la Ka, lo que puede ser debido al efecto de la diferente superficie específica apuntado por Wang y Schmutge (1978) y Topp et al. (1980); ya que los horizontes inferiores son de textura más fina que los superficiales, los cuales además tienen mayor contenido de materia orgánica.

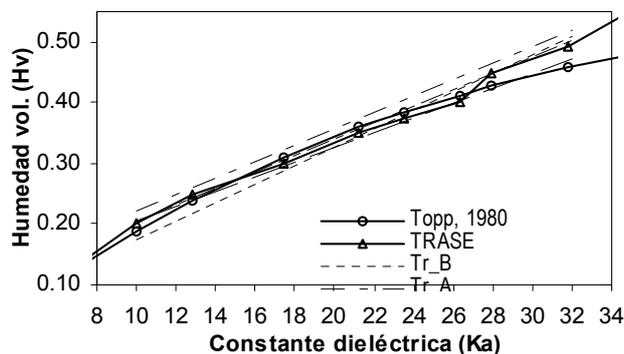


Fig. 4. Comparación entre calibraciones obtenidas para cada horizonte de ambos suelos estudiados, en relación a las propuestas como universales por Topp (1980) y por Soil Moisture Corp. (1990).

Como índice de calidad del ajuste y de la dispersión de los datos se contabilizó la fracción de los datos experimentales que se agrupan en diferentes márgenes de error respecto de los valores de humedad previstos por la regresión lineal (Tabla 1). Este índice se utilizó también para estimar la conveniencia de utilizar la misma calibración para más de un horizonte o suelo. Al agrupar los valores obtenidos para un mismo horizonte de ambos suelos la dispersión es mayor, reduciéndose sobre todo la fracción de puntos que mejor se ajusta (± 0.005); por lo que utilizar la misma calibración para más de una situación representa una simplificación del trabajo pero disminuye la precisión.

Tabla 1. Fracción (%) de los valores experimentales que se desvían del ajuste lineal propuesto menos de un cierto rango

Suelo	Horiz	± 0.02	± 0.015	± 0.01	± 0.005
Pu	A	100.0	99.5	91.8	51.6
Pu	B	96.0	85.7	72.2	56.1
Tr	A	96.9	91.5	73.4	38.7
Tr	B	99.3	96.1	80.6	47.9
Pu, Tr	A	94.5	85.9	64.4	33.8
Pu, Tr	B	91.4	77.4	54.2	26.8

3.2. Determinación de la K(θ)

La evolución de los valores de humedad obtenidos a lo largo de la prueba de secado es bastante buena (en la Fig. 5, un ejemplo). La dispersión de los datos, tomada como la diferencia de un valor con la media de los inmediatos anterior y posterior, se mantiene por debajo del ± 0.005 .

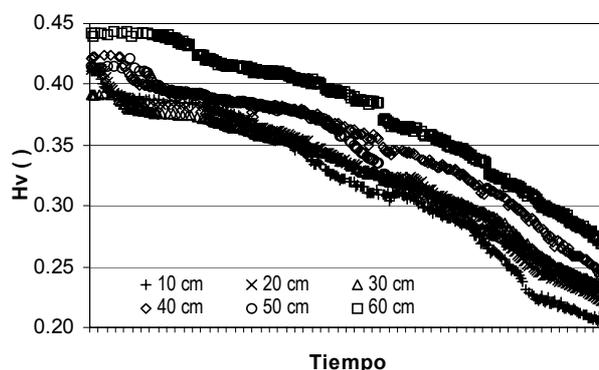


Fig. 5. Medidas de humedad obtenidas a lo largo del secado en los distintos niveles de una de las columnas de suelo de horizonte B.

Ante el problema que la dispersión de las medidas de humedad supone para el cálculo de los balances de agua, no se utilizaron los valores de humedad medidos, sino los estimados a partir de los perfiles tensiométricos, que presentan menor oscilación (Valles et al., 1982). Para ello se elaboraron y ajustaron exactamente las curvas de retención en cada nivel de medida (ejemplo en Fig. 6).

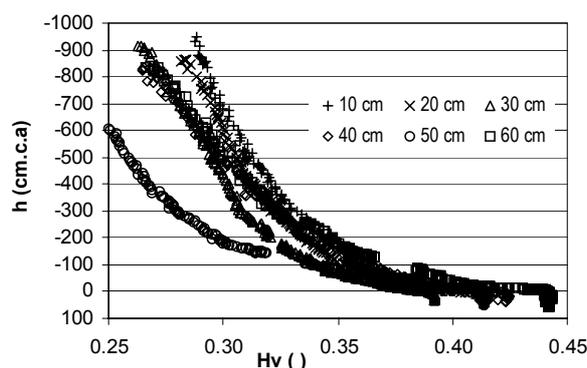


Fig. 6. Curvas de retención de humedad obtenidas durante el secado en los distintos niveles de una de las columnas de horizonte B.

Con respecto a los valores de conductividad hidráulica insaturada calculados a distintos niveles de cada columna, cabe destacar la similitud observada entre ambos suelos,

mostrándose diferencias claras únicamente entre horizontes. En la Fig. 7 se muestran los datos observados y la curva de tendencia ajustada para dos puntos de medida concretos, que representan a ambos horizontes. En los distintos niveles de los horizontes A son más altos los valores máximos (a saturación y a succiones bajas), lo que se relaciona con la presencia de mayor volumen de poroso grandes. Pero también son mayores en el horizonte A los valores mínimos, que corresponden a la máxima succión soportada por los tensiómetros, lo que indica un mayor volumen (mayor H_v) de la poros del tamaño medio correspondiente a esa tensión

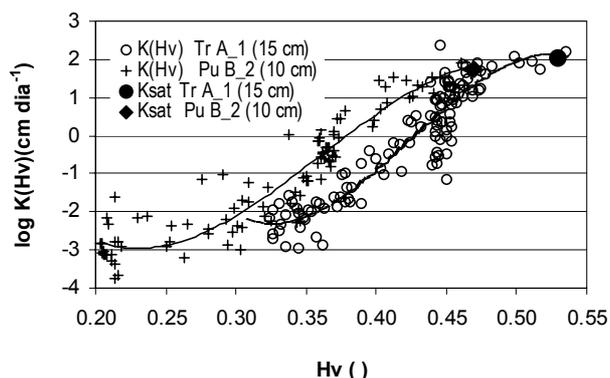


Fig. 7. Valores de K en saturado y evolución de la K insaturada en función de la humedad ($K(\theta)$) representativas de ambos horizontes

La dispersión de los puntos observados respecto del ajuste es bastante elevada, a pesar de la calibración previa del aparato de TDR en el rango de humedades de trabajo y la corrección de los datos de humedad. El gran tamaño de las columnas de horizonte B, compuestas por 6 - 7 niveles de medida, favorece esta dispersión elevada, ya que la reserva de agua en un nivel debe obtenerse sumando los valores de humedad de todos los niveles inferiores, ocasionando un efecto aditivo de los errores. La automatización de la toma de datos de humedad permitiría una medida continuada a intervalos muy cortos, que limitaría estas oscilaciones.

4. Conclusiones

El TDR es útil para la medida de humedad en ensayos de movimiento de agua en columnas de suelo, siendo la rapidez, precisión y localización de la medida algunas de sus virtudes. Las sondas de dos varillas colocadas en horizontal resultan más adecuadas que las verticales cuando se requiere medida a múltiples profundidades.

La calibración para cada situación de medida (suelo y horizonte) permite mejorar la precisión de la relación entre constante dieléctrica (K_a) y humedad volumétrica (H_v), frente a relaciones propuestas como "universales"; a pesar de la variabilidad entre repeticiones puede también ser sensible. El uso de una misma calibración para más de una situación siempre representa una pérdida de precisión en la

medida de H_v , pero cuando es reducida puede asumirse en favor de la simplificación del trabajo.

El seguimiento de los perfiles de potencial y humedad durante el secado permiten conocer, para cada nivel de medida, las curvas de retención de humedad y la $K(\theta)$. La dispersión de las sucesivas medidas de humedad con TDR hace poco preciso el cálculo directo del balance de agua, siendo preferible la utilización de los datos tensiométricos transformados a humedad mediante la curva de retención.

La adquisición automática de datos es muy aconsejable para disponer de una alta densidad de medidas que reduzca la dispersión de los datos más puntuales.

Referencias

- Boles, D., Van Gils, J.B.H.M., Veerman, G.J. y Wit, K.E. 1978. Theory and system of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivities. *Soil Sci.* 126, 191-199
- Castelao, A., Neira, X., Benito, E. y Paz, A. 1995. Aplicación de la técnica de reflectometría en el tiempo (TDR) a la medida del contenido hídrico de suelos cultivados. *Riegos y Drenajes XXI* 80, 26-30.
- Dalton, F.N. y Van Genuchten, M. Th. 1986. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, 38: 237-250.
- Fellner-Feldegg, H. 1969. The measurement of dielectrics in the time domain. *J. Phys. Chem.* 73: 616-623.
- Goldstein, M. 1980. *Field evaluation of time domain reflectometry techniques for determination of volumetric soil water contents*. Supply and Services Canada, Ottawa, Ont 65 pp
- Heimovaara, T.J. y Bouten, W. 1990. A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water contents. *Water Resour. Res.* 26, 2311-2316.
- Herkelrath, W.N., Hamburg, S.P. y Murphy, F. 1991. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 27, 857-864.
- Knight, J.H. 1992. Sensitive of time domain reflectometer measurements to lateral variations in soil water content. *Water Resour. Res.* 28, 2345-2352.
- Roth, K., Schulin, R., Flüher, H. y Attinger, W. 1990. Calibration of Time Domain Reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.* 26 (10), 2267-2273.
- Soil Moisture Equipment Corporation 1990. *TRASE System Operation Instructions*, 53 pp
- 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., Bailey, W.G. y Zebchuk, W.D. 1984. The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe. *Can. J. Soil Sci.* 64, 313-321
- Topp, G.C., Davis, J.L., y Annan, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16 (3), 574-582.
- Valles, V y Valles M.A. 1982. Etude méthodologique des transferts d'eau et des sels dans un monolithe de sol argileux. 2ème partie: Caractérisation hydrodynamique et modélisation des transferts d'eau. *Rapport ORSTOM-DRES Tunis, E-S 199*, multigraph., 47 pp.
- Wang, J.R. y Schmugge, T.J. 1978. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. *NASA Tech. Memo.* 79659, 35 pp., Goddard Space Flight Center, Greenbelt.
- Wind, G.P. 1968. Capillary conductivity data estimated by a simple method. En: Rykma, P.E. y Wassink, H. (eds.) *Water in unsaturated zone*. Proc. of the Wageningen Symposium, junio 1966. IASH Genthbrugge/UNESCO Paris, vol.1, 181-191.
- Zegelin, S.J. y White, I. 1989. Improved field probes for Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurement Using Time Domain Reflectometry. *Water Resour. Res.* 25 (11), 2367-2376.