

CÁMARA DE PRESIÓN POR TDR PARA LA MEDIDA DE LA CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA EN MUESTRAS INALTERADAS DE SUELO

D. Moret-Fernández¹, J. Vicente², B. Latorre¹, C. Castañeda¹, E. Paracuellos¹, F. Lera³

¹ Departamento de Suelo y Agua, Estación Experimental de Aula Dei, (CSIC), PO Box 13034, 50080 Zaragoza, España, david@eead.csic.es, borja.latorre@eead.csic.es, ccastaneda@eead.csic.es, eparacuellos@eead.csic.es

² Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, Universidad de Zaragoza, I3A - Edificio I+D, C/ Mariano Esquillor S/N, Despacho 4.0.05, 50018 Zaragoza, España, pepovicente@hotmail.com.

³ Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, (ICMA-CSIC) - Universidad de Zaragoza, C/ María de Luna 1, 50018 Zaragoza, España, lera@unizar.es

RESUMEN. La curva de retención de agua en el suelo, $\theta(\psi)$, definida como la relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo (θ) y el potencial mátrico (ψ), es una propiedad fundamental para caracterizar el comportamiento hidráulico del suelo. Este trabajo presenta un diseño de cámara de presión por TDR (Celda-TDR) para la medida de $\theta(\psi)$ en muestras intactas de suelo. Esta cámara consiste en un cilindro de acero inoxidable de 50 mm de longitud y 50 mm diámetro interno, que reposa sobre un disco cerámico y cerrado por los dos extremos con dos tapas de aluminio perforadas. La tapa superior tiene insertada una varilla de acero inoxidable de 49 mm de longitud y 3 mm de diámetro que cruza longitudinalmente el centro del cilindro. Ambos elementos, cilindro y varilla, conforman una sonda coaxial cilíndrica que permite medir la humedad del suelo contenido en la cámara de presión. Se efectuó un primer experimento de laboratorio para comprobar la fiabilidad el método TDR para la medida de θ . Posteriormente se estimó, utilizando la Celda-TDR, la curva de retención de siete muestras de suelo inalterado procedentes de los horizontes genéticos de tres calicatas. Las curvas $\theta(\psi)$ obtenidas con la Celda-TDR fueron posteriormente comparadas con las obtenidas sobre las mismas muestras de suelo tamizadas a 2 mm de diámetro utilizando el método clásico de las ollas de presión. La correlación entre θ medida por TDR y el método gravimétrico fue excelente ($R^2 = 0.988$). Las curvas $\theta(\psi)$ obtenidas con la Celda-TDR en las muestras de suelo inalterado muestran un claro comportamiento bimodal. Sin embargo, se observaron grandes diferencias entre $\theta(\psi)$ medida en las muestras inalteradas de suelo y las obtenidas en el suelo tamizado, dando estas últimas una clara sobreestimación de θ en condiciones próximas a saturación.

ABSTRACT. The water retention curve ($\theta(\psi)$), which defines the relationship between soil volumetric water content (θ) and matric potential (ψ), is of paramount importance in characterizing the hydraulic behavior of soils. We present a design of TDR-pressure cell (TDR-Cell) for estimating $\theta(\psi)$ in undisturbed soil samples. The TDR-Cell consists of a 50-mm-long and 50-mm internal diameter stainless steel cylinder attached to a porous ceramic disc and closed at the ends with two aluminum lids. A 49-mm-long and 3-mm-diameter stainless steel rod,

which runs longitudinally through the centre of the cylinder, constitutes the inner rod of a coaxial TDR probe. The TDR-Cell was used to determine the $\theta(\psi)$ curves of packed sand and seven undisturbed soil samples from three profiles of agricultural soils. These $\theta(\psi)$ curves were subsequently compared to those obtained from the corresponding 2-mm sieved soils using the pressure plate method. An excellent correlation ($R^2 = 0.988$) was found between the θ values measured by TDR on the different undisturbed soils and the corresponding θ obtained from the soil gravimetric water content. A typical bimodal $\theta(\psi)$ function was found for most of the undisturbed soil samples. Comparison between the $\theta(\psi)$ curves measured with the TDR-Cell and those obtained from the 2-mm sieved soils showed that the pressure plate method overestimates θ at low ψ values.

1.- Introducción

La curva de retención de agua en el suelo ($\theta(\psi)$), definida como la relación entre la humedad volumétrica (θ) y potencial mátrico (ψ) del suelo, es una propiedad fundamental para la planificación y manejo de nuevos sistemas de riego. La forma de $\theta(\psi)$ depende de la textura y la estructura del suelo, así como del contenido de materia orgánica (Dane y Hopmans, 2002) y el manejo del suelo (Green et al., 2003).

La determinación de la curva $\theta(\psi)$ requiere medidas simultáneas de θ y ψ . El potencial mátrico se obtiene utilizando una cámara de presión que, aplicando una presión de aire constante sobre una muestra de suelo, extrae el exceso de agua contenida en el suelo para una tensión deseada (Dane y Hopmans, 2002). La humedad volumétrica suele calcularse como el producto entre el contenido de humedad gravimétrica y la densidad aparente de la muestra de suelo. En muestras inalteradas de suelo suelen utilizarse las denominadas "Celdas Tempe" que trabajan entre 0 y 100 kPa de succión. Para tensiones superiores se emplea las denominadas ollas de presión que, suelen alcanzar tensiones de 1500 kPa (Ward y Benson, 2004). La determinación de $\theta(\psi)$ sobre muestras inalteradas de suelo es preferible a las obtenidas sobre

muestras alteradas, debido a que los cambios de porosidad producidas durante el tamizado de la muestra de suelo provocan cambios sustanciales en $\theta(\psi)$ con respecto a su forma original.

La técnica de Reflectometría de Dominio Temporal (TDR) es un método no destructivo que permite medidas precisas del contenido de humedad volumétrica del suelo. (Topp y Ferré, 2002). La versatilidad de esta técnica, permite desarrollar nuevos diseños de sondas TDR que combinadas con un sistema de ollas de presión permiten determinar $\theta(\psi)$ (Wraith y Or, 2001). Jones et al. (2005) diseñaron una cámara de presión coaxial que, incorporando un electrodo de 19.6 cm de longitud, permitía determinar la curva $\theta(\psi)$ sobre una misma muestra de arena. Sin embargo, este diseño restringía su aplicación a muestras alteradas de suelo, ya que la excesiva longitud de la cámara utilizada aumenta los riesgos de compactación de suelo durante su extracción en campo (Grossman y Reinsch, 2002). Moret-Fernández et al. (2008) diseñaron un nuevo tipo de cámara de presión asociada a una sonda TDR en zig-zag para la medida de curvas $\theta(\psi)$ en muestras de suelo de 4 cm de espesor. Este tipo de sonda, sin embargo, restringía nuevamente su aplicación a muestras de suelo previamente tamizadas.

Este trabajo presenta un nuevo diseño de cámara de presión por TDR (Celda-TDR) para la determinación de la curva de retención de agua en muestras inalteradas de suelo de 5 cm de espesor. La Celda-TDR fue calibrada en arena y suelos con diferentes contenidos de humedad, y utilizada para determinar las curvas $\theta(\psi)$ en arena y siete muestras de suelo inalterado. Las curvas $\theta(\psi)$ determinadas con la Celda-TDR fueron finalmente comparadas con las obtenidas utilizando ollas de presión para las correspondientes muestras de suelo tamizadas a 2 mm. Los resultados obtenidos permitirán valorar las fortalezas de la Celda-TDR con respecto al método de ollas de presión sobre muestras de suelo tamizado que, de forma incorrecta, es utilizado en numerosos centros de investigación para estimar, por ejemplo, curvas de retención de agua del suelo o la capacidad de agua disponible para las plantas.

2.- Material y métodos

2.1.- Teoría

El sistema TDR lanza un pulso electromagnético (EM) a lo largo de una línea de transmisión y registra una onda TDR que se expresa como voltaje o coeficiente de reflexión en función del tiempo. El tiempo de propagación (t_L) del pulso EM a lo largo de una línea de transmisión de longitud L se expresa como (Topp y Ferré, 2002)

$$t_L = \frac{2L\sqrt{\epsilon_a}}{c} \quad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío ($3 \cdot 10^8$ m s⁻¹) y ϵ_a es la permitividad relativa del medio que rodea a la línea de transmisión. El contenido de humedad volumétrica del

suelo (θ) puede calcularse a partir de ϵ_a utilizando la ecuación (Topp et al., 1980)

$$\theta = -53 \cdot 10^{-2} + 292 \cdot 10^{-2} \epsilon_a - 55 \cdot 10^{-4} \epsilon_a^2 + 43 \cdot 10^{-6} \epsilon_a^3 \quad (2)$$

La curva $\theta(\psi)$ obtenida a partir de medidas experimentales de θ y ψ puede describirse siguiendo el modelo unimodal descrito por van Genuchten (1980)

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (3)$$

donde Θ es la humedad efectiva del suelo, n y m ($m = 1 - 1/n$) son parámetros de forma, α es un factor de escala, θ_r y θ_{sat} son la humedad residual y a saturación del suelo, respectivamente. La curva $\theta(\psi)$ para suelos con múltiple porosidad puede modelarse utilizando la función bimodal propuesta por Durner (1994), la cual, definida como una superposición de varias subcurvas unimodales de van Genuchten (1980), se expresa como

$$\theta = \theta_r + (\theta_{sat} - \theta_r) \sum_{i=1}^k w_i \left[\frac{1}{1 + (\alpha_i \psi)^{n_i}} \right]^{m_i} \quad (4)$$

$$0 < w_i < 1$$

$$\sum w_i = 1$$

$$\alpha_i > 0, m_i > 0, n_i > 1$$

donde k es el número total de i subsistemas que forman la porosidad del suelo y w_i es el factor de peso de las subcurvas.

2.2.- Descripción de la cámara de presión

La cámara de presión por TDR consiste en un cilindro de acero inoxidable (50 mm longitud y 50 mm diámetro interno) colocado sobre una placa cerámica (7 mm de espesor y 50 mm de diámetro) y cerrada por los extremos con dos tapas de aluminio perforadas (Fig. 1). Una varilla de acero inoxidable de 49 mm de longitud y 3 mm de diámetro, insertada verticalmente en la tapa superior de la cámara, atraviesa longitudinalmente el eje central del cilindro. Esta varilla está conectada al electrodo interno de un conector BNC hembra que a su vez está soldado a la tapa superior de la cámara de presión. Ambos elementos, la varilla central y el cilindro de acero, forman una línea coaxial de 49 mm de longitud y 50 mm de diámetro interno. Dos anillos de aluminio asociados a unas juntas tóricas cierran herméticamente las tapas de la Celda-TDR contra el cilindro de acero (Fig. 1). La Celda-TDR se conectó a un ecómetro (Campbell TDR100) a través de un cable coaxial de 1.2 m de longitud RG 58 (50 Ω) y las señales EM fueron transferidas a un ordenador que analizó las ondas TDR utilizando el programa TDR-Lab V.1.0 (Moret-Fernández et al., 2010). La humedad volumétrica por TDR (θ_{TDR}) se estima a partir de (2).

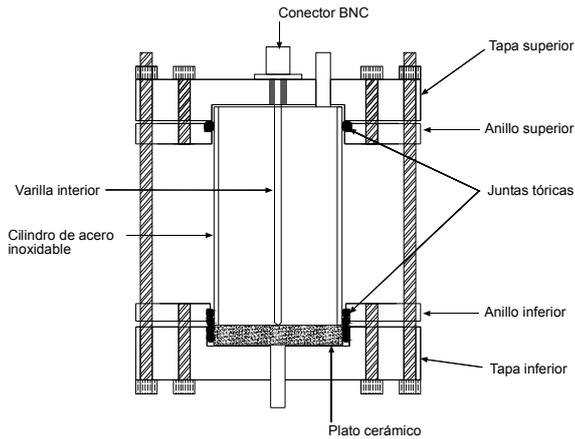


Fig. 1. Esquema de la cámara de presión por TDR.

2.3.- Calibración de la Celda-TDR y diseño experimental

Se realizó un primer experimento de laboratorio para calcular, utilizando el programa TDR-Lab, la longitud efectiva de la sonda coaxial de la Celda-TDR. En un segundo experimento de laboratorio realizado sobre arena calibrada (tamaño partícula de 80-160 μm) y siete muestras inalteradas de suelo, se testó la precisión de la sonda coaxial TDR para la estimación del contenido de humedad volumétrica del suelo. Utilizando el método del cilindro (Grossman y Reinsch, 2002), se tomaron siete muestras inalteradas de suelo procedentes de tres calicatas diferentes, todas ellas con un alto contenido en yeso, abiertas para un estudio del perfil de suelo (Tabla 1). Las superficies de las muestras de suelo, previamente secado al aire, fueron niveladas con una espátula. A continuación, sobre la base del cilindro, se insertó un semi-anillo de acero cuya superficie tenía pegada una malla de nailon 20 μm de luz. Utilizando un taladro se perforó a lo largo del eje central del cilindro de suelo un agujero de 3 mm de diámetro y 45 mm de longitud, en cuyo interior se insertó la varilla de

acero inoxidable de la Celda-TDR. La parte superior de la Celda-TDR fue herméticamente cerrada tras atornillar el anillo superior de la Celda-TDR a la tapa de la cámara (Fig. 1). El sistema cilindro+tapa superior de la Celda-TDR se dispuso sobre el disco cerámico ubicado en la tapa inferior de la Celda-TDR (Fig. 1), la cual quedó finalmente cerrada tras atornillar el anillo inferior de aluminio a la base de la cámara. Se realizó una primera medida de humedad en condiciones de suelo seco al aire, que según estimaciones equivale a una tensión de -166 MPa (Munkholm y Kay, 2002). A continuación, por la base de la Celda-TDR, se humectó la muestra de suelo con agua destilada hasta que el agua comenzó a salir por la parte superior de la cámara. Una vez saturada la muestra de suelo, se aplicó de forma secuencial y a través la tapa superior de la Celda-TDR presiones de 1.7, 3, 5, 10, 50, 100, 500 y 1500 kPa. El drenaje de agua para los rangos de presiones de 0-50, 50-100 y 100-500 kPa fueron regulados utilizando discos cerámicos de 50, 300 y 500 kPa de presión de burbujeo (Soil Moisture Inc., Reino Unido), respectivamente. El drenaje de agua para la presión de 1500 kPa fue regulado con una membrana de celofán superpuesta sobre un plato cerámico de 50 kPa. Se efectuaron medidas de θ_{TDR} a saturación y transcurridas 24 (entre 0 y 100 kPa), 48 (500 kPa) y 72 (1500 kPa) horas del inicio de cada uno de los drenajes. Experimentos previos de laboratorio realizados sobre muestras de suelo procedentes del mismo campo demostraron que los intervalos tiempo de drenaje escogidos para cada tensión fueron suficientes para permitir que el agua del suelo alcanzara su equilibrio. Se utilizó el programa SWRC Fit Version 1.2 (<http://seki.webmasters.gr.jp/swrc/>) (Seki, 2007) para ajustar los pares de valores $\theta-\psi$ a sus respectivas curvas de retención uni- o bimodales. Paralelamente, se midió la humedad gravimétrica (W) de las diferentes muestras de suelo inalterado para condiciones de suelo seco, saturación

Tabla 1. Características de los suelos inalterados y tamizados a 2 mm utilizados para calibrar y testar la Celda-TDR

Calicata	Horizonte genético	Profundidad cm	Densidad aparente suelo tamizado a 2-mm	Densidad aparente suelo inalterado	Yesos	Arena	Limo	Arcilla	Textura
			Kg m ⁻³						
BU-7	A _P	0-30	1070	1230	5.0	6.6	30.1	63.3	Franco arcillo limosa
	R ₁	40-60	1220	1590	10.5	35.8	23.3	40.9	Franco
	R ₂	60-160	1150	1700	20.0	1.7	28.2	70.1	Franco arcillo limosa
BU-9	A _P	0-30	1030	1210	6.1	7.4	35.8	56.9	Franco arcillo limosa
	C _y	30-160	1110	1680	22.2	1.7	34.4	63.9	Franco arcillo limosa
BU-10	A _P	0-30	1000	1240	17.3	7.4	35.7	56.9	Franco arcillo limosa
	B _y	30-100	1000	1520	26.8	3.1	36.7	60.3	Franco arcillo limosa

Las curvas $\theta(\psi)$ estimadas con la Celda-TDR fueron finalmente comparadas con las correspondientes curvas medidas sobre muestras alteradas de suelo utilizando el método clásico de ollas de presión. Las muestras de suelo secas al aire fueron tamizadas a 2 mm y colocadas dentro de unos anillos de goma (50 mm diámetro interno y 4 mm de altura) ubicados sobre el plato cerámico de una cámara de presión convencional. Las muestras de suelo fueron humectadas hasta saturación y posteriormente drenadas tras aplicar, cada 24 h, presiones de 1.7, 3, 5, 10, 50, 100, 500, y 1500 kPa. En este caso, se utilizó una muestra nueva de suelo para cada tensión. El contenido de humedad volumétrico (θ_w) de las muestras de suelo tamizadas se calculó como el valor de W multiplicado por la densidad aparente de la muestra tamizada (Tabla 1). Se efectuaron dos repeticiones por presión y tipo de suelo.

3.- Resultados y discusión

La longitud efectiva de la sonda coaxial utilizada en la Celda-TDR fue 5.14 cm. La excelente correlación entre θ_{TDR} y θ_w medida tanto en la muestra de arena como en las diferentes muestras de suelo inalterado y presiones aplicadas (en suelo seco y rango de tensiones entre 0 y 500 kPa) (Fig. 2) indica que la cámara de presión permite estimar de forma precisa el contenido de humedad volumétrica del suelo.

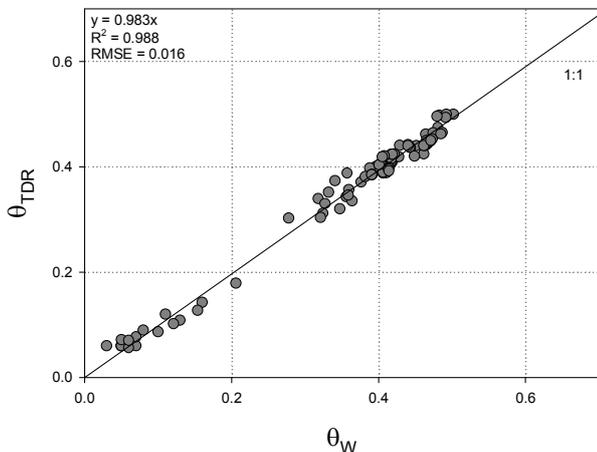


Fig. 2. Correlación entre la humedad volumétrica del suelo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) medida con el método gravimétrico (θ_w) y la obtenida con la técnica TDR (θ_{TDR})

La densidad aparente (ρ_b) de la muestra de arena fue 1470 kg m^{-3} y la función $\theta(\psi)$ obtenida mostró la típica forma unimodal ($R^2 = 0.99$) (Fig. 3). La textura de las muestras de suelo inalteradas utilizadas en el experimento varía entre franco y franco arcillo limosa, y la ρ_b osciló entre 1210 kg m^{-3} de los horizontes superficiales y 1700 kg m^{-3} para los horizontes profundos de suelo (Tabla 1). En estos casos, las

curvas $\theta(\psi)$ obtenidas para las diferentes muestras de suelo inalteradas mostraron una clara forma bimodal, que indica que los suelos presentaban una significativa doble porosidad. La Fig. 3 muestra un ejemplo de la función bimodal obtenida ($R^2 = 0.99$) para la muestra inalterada de suelo BU 7-R2.

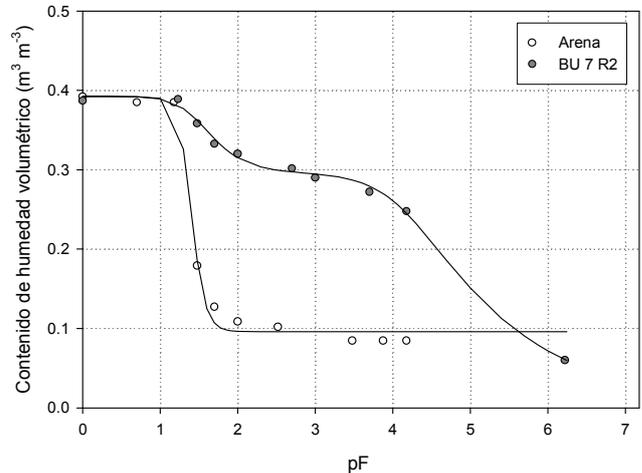


Fig. 3. Curvas de retención de agua del suelo medidas con la Celda-TDR (puntos) en arena y la segunda repetición del punto de muestreo BU 7 (BU 7 R2), y sus correspondientes funciones uni- y bimodales.

Se observaron importantes diferencias entre las curvas de retención de agua obtenidas con la Celda-TDR ($\theta(\psi)_{TDR}$) para muestras inalteradas de suelo y las correspondientes curvas medidas con las ollas de presión para los mismos suelos tamizadas a 2 mm ($\theta(\psi)_{PPM}$) (Fig. 4). En general, las curvas $\theta(\psi)_{PPM}$ presentan un mayor contenido de humedad para el rango tensiones correspondientes a macroporos ($\psi > -10 \text{ kPa}$) (Kay y VandenBygaart, 2002), consecuencia de las diferencias estructurales entre el suelo inalterado y el tamizado a 2 mm. Tal como apunta Ahuja et al. (1998), el mayor contenido de agua en suelos tamizados o suelo sueltos, con una menor ρ_b (Moret y Arrúe, 2007), se asocia a una mayor porosidad para el rango de tensiones próximas a saturación (esto es poros para una $\psi > 6 \text{ kPa}$). Por el contrario, las muestras más compactas (Tabla 1) de los suelos inalterados presentaron un mayor volumen de mesoporos ($10 > \psi > 1400 \text{ kPa}$). Finalmente, la extremadamente alta compactación observada en ciertas muestras de suelo inalteradas (Tabla 1) (la muestra “BU9 Cy” que procede de un horizonte lutítico) hizo que el contenido de agua en el punto de marchitez permanente (-1500 kPa) (Fig.4), que se corresponde con la fracción de volumen de microporos ($\psi < -1400 \text{ kPa}$), fuera, en comparación con las muestras tamizadas, extremadamente alto.

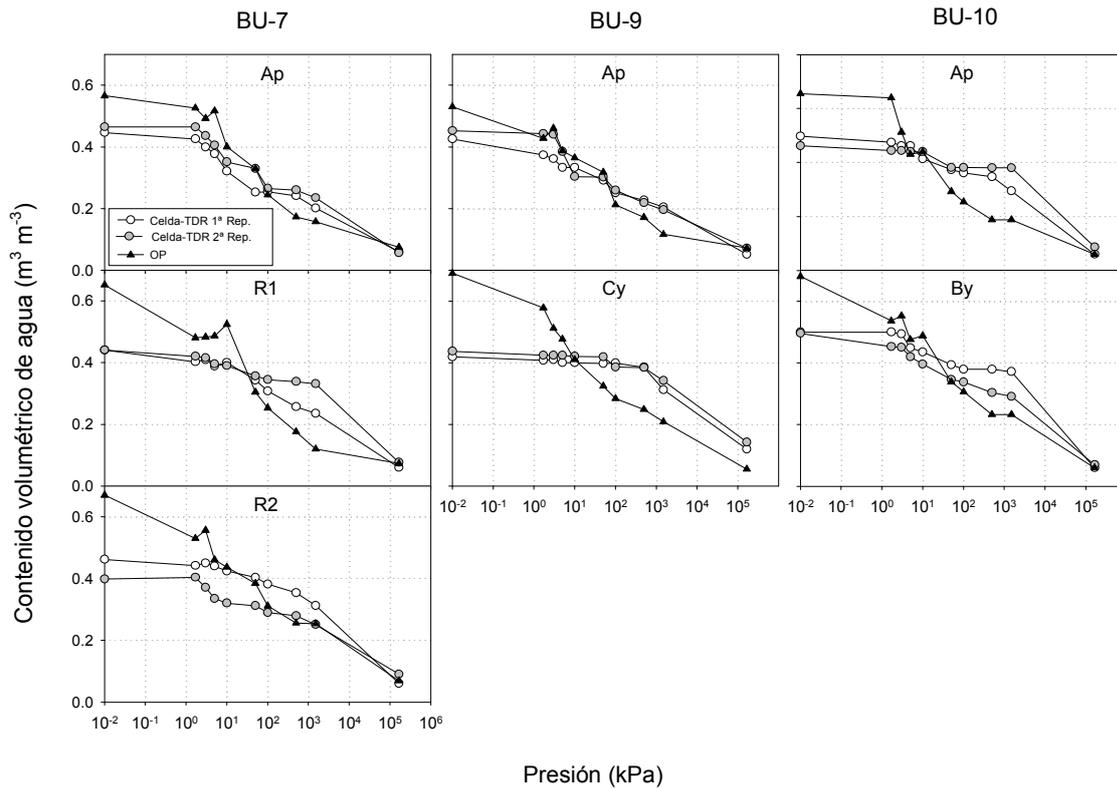


Fig. 4. Comparación entre las curvas de retención medidas con la Celda-TDR sobre muestras inalteradas de suelo (1ª y 2ª repetición) y las correspondientes curvas promedio medidas con las ollas de presión (OP) para las muestras de suelo tamizadas a 2 mm

La semejanza entre los valores promedios y desviación estándar (SD) de θ para el conjunto de muestras de suelo obtenidos a altas presiones (entre 100 y 1500 kPa) con las ollas de presión (WPPM) y las estimadas con la Celda-TDR (WTDR) (calculadas como el cociente entre θ_{TDR} y la p_b de la muestra inalterada de suelo; Tabla 2) indica que

Tabla 2. Promedio y desviación estándar (SD) para el conjunto de muestras de suelo de la humedad gravimétrica a diferentes tensiones obtenidas con las ollas de presión (W_{PPM}) y calculadas con la Celda-TDR (W_{TDR}).

Preston	W_{PPM}		W_{TDR}	
	Promedio	SD	Promedio	SD
kPa	$m^3 m^{-3}$			
0.01	0.615	0.067	0.349	0.085
1.7	0.498	0.063	0.326	0.080
3	0.488	0.048	0.320	0.078
5	0.447	0.044	0.305	0.076
10	0.416	0.050	0.287	0.072
50	0.332	0.056	0.256	0.055
100	0.268	0.057	0.241	0.056
500	0.217	0.048	0.230	0.057
1500	0.192	0.057	0.209	0.057

la Celda-TDR aproxima de forma satisfactoria los valores de la curva de retención de agua del suelo para el rango de tensiones pertenecientes a las características texturales de suelo (Nimo, 1997).

La relación entre humedad efectiva del suelo (Θ_e) medida con las ollas de presión y la Celda-TDR muestra como los suelos inalterados presentan una mayor capacidad de retención de agua efectiva.

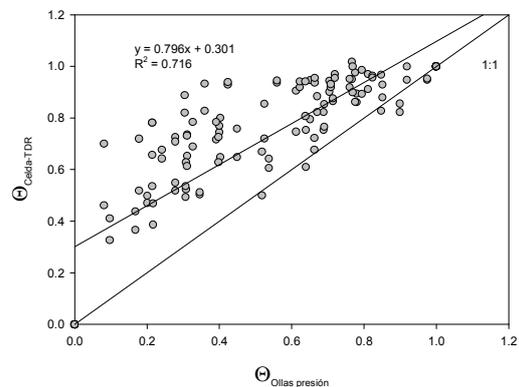


Fig. 5. Relación entre la humedad efectiva medida con la ollas de presión ($\Theta_{Ollas\ presión}$) y las estimadas con Celda-TDR ($\Theta_{Celda-TDR}$) para el conjunto de muestras de suelo mostrados en la Tabla 1.

4.- Conclusiones

Este trabajo presenta un nuevo diseño de cámara de presión por TDR (Celda-TDR) para estimar de forma cómoda y precisa la curva $\theta(\psi)$ sobre muestras inalteradas de suelo. Tras ser calibrada en diferentes tipos de suelo, las medidas de $\theta(\psi)$ obtenidas con la Celda-TDR fueron contrastadas con las obtenidas para las mismas muestras de suelo tamizadas a 2 mm utilizando una cámara de presión convencional. Los resultados muestran como las curvas $\theta(\psi)$ obtenidas con las muestras tamizadas de suelo sobreestiman los valores de θ a ψ próximas a saturación. Sin embargo, la necesidad de calibración que exige la técnica TDR para determinados tipos de suelos (por ejemplo, orgánicos o arcillosos) hace que este método deba utilizarse con cierta precaución.

Agradecimientos. El presente trabajo ha sido financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (proyectos: AGL2007-66320-CO2-02/AGR) CSIC (Proyectos: PIE-2008401214 and 2008401246) y DGA- Obra social La Caixa (Proyectos: GA-LC-010/2008; GA-LC-006-2008).

5.- Bibliografía

- Ahuja, L.R., Fiedler, F., Dunn, G. H., Benjamin, J. G., y Garrison, A., 1998. Changes in soil water retention curves due to tillage and natural reconsolidation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1228-1233.
- Dane, J.H., y Hopmans, J.W., 2002. Water retention and storage. En: *Methods of Soil Analysis. Part 4.* (Ed. J.H. Dane and G.C. Topp), SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison WI.
- Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research* 30: 211-223.
- Green, R.T., Ahuja, L.R., y Benjamin, J.G., 2003. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma* 116: 3-27.
- Grossman, R.B., y Reinsch, T.G., 2002. Bulk density and linear extensibility. En: *Methods of Soil Analysis. Part 4.* (Eds. J.H. Dane and G.C. Topp), SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison WI.
- Jones, S.B., Mace, R.W., y Or, D., 2005. A time domain reflectometry coaxial cell for manipulation and monitoring of water content and electrical conductivity in variable saturated porous media. *Vadose Zone J.* 4: 977-982.
- Kay, B.D., y VandenBygaart, A.J., 2002. Conservative tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66: 107-118.
- Lebron, I., Herrero, J., y Robinson, D.A., 2009. Determination of gypsum content in dryland soils exploiting the gypsum-bassanite phase change. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 403-411.
- Moret, D., y Arrúe, J.L., 2007. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. *Soil Till. Res.* 96: 103-113.
- Moret-Fernández, D., Arrúe, J.L., Pérez, V., y López, M.V., 2008. A TDR-pressure cell design for measuring the soil water retention curve. *Soil Till. Res.* 100: 114-119.
- Moret-Fernández, D., Vicente, J., Lera, F., Latorre, B., López, M.V., Blanco, N., González-Cebollada, C., Arrúe, J.L., Gracia, R., Salvador, y M.J., Bielsa, A., 2010. - TDR-Lab Version 1.0 Users Guide. <http://digital.csic.es/handle/10261/35790>.
- Munkholm, L.J., y Kay, B.D., 2002. Effect of water regime on aggregate-tensile strength, rupture energy and friability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 702-709.
- Nimo, J. R., 1997. Predicting soil-water retention and hydraulic conductivity from textural and structural information. En: *Proceedings in International Workshop on Characterization and measurements of hydraulic properties of unsaturated porous media: Part 2.* (Eds, M.Th. van Genuchten, F.J. Leij and L. Wu). pp- 923. Riverside, California
- Seki, K., 2007. SWRC fit – a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrol. Earth System Sci.* 4: 407-437.
- Topp, G.C., y Ferré, T.P.A., 2002. Water content, En: *Methods of Soil Analysis. Part 4.* (Ed. J.H. Dane and G.C. Topp), SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison WI.
- 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.
- Wand, X., y Benson, C.H., 2004. Leak-free pressure plate extractor for measuring the soil water characteristic curve. *Geotechnical Testing J.* 27: 1-9.
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Wraith J.M., y Or, D., 2001. Soil water characteristic determination from concurrent water content measurements in reference porous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1659-1666.