

EFICACIA DE UN SENSOR DE CAPACITANCIA PARA MEDIR SIMULTÁNEAMENTE SALINIDAD Y CONTENIDO HÍDRICO

A. Ritter, C. M. Regalado.

Instituto Canario Inv. Agrarias (ICIA), Dep. Suelos y Riegos, Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife, aritter@icia.es.

RESUMEN. Los sensores dieléctricos de capacitancia constituyen un método alternativo para determinar el contenido hídrico en la zona no saturada, por ser instrumentos no contaminantes, de fácil manejo y de coste relativamente bajo que proporcionan medidas instantáneas y de forma poco destructiva. Algunos de estos sensores comerciales han sido adaptados para realizar lecturas simultáneas del contenido volumétrico de agua (θ) y de la conductividad eléctrica aparente del suelo (σ) en el mismo volumen de muestra. Sin embargo, como consecuencia de la baja frecuencia de trabajo que usan estos sensores, se plantean dudas sobre la exactitud con la que estas variables pueden determinarse simultáneamente. Estudios previos han evaluado la eficacia del sensor comercial WET Sensor (Delta-T Devices Ltd., Burwell, Gran Bretaña) en suelos forestales de origen volcánico, encontrando que mientras que el WET Sensor estima de forma correcta la conductividad eléctrica del medio, la lectura de permitividad relativa, y por tanto del contenido de humedad se ve alterada por σ de forma importante. La estimación de la conductividad eléctrica de la solución (σ_w) a partir θ y σ según el modelo que utiliza el fabricante, tampoco es satisfactoria. En este trabajo se estudia si estos resultados obtenidos para suelos volcánicos, para los cuales es conocido su carácter dieléctrico atípico, se producen también en un medio homogéneo tal como una arena gruesa. Los resultados indican que además de en los suelos volcánicos ya estudiados, en la arena, la estimación de θ y σ_w , a partir de las lecturas del WET Sensor y de los modelos que propone el fabricante, no es exacta. Sin embargo, en la arena estos errores son inferiores a los que se observan en los suelos volcánicos. Tanto para la arena, como para los suelos volcánicos estudiados, se proponen modelos alternativos a los que utiliza el fabricante para la determinación de θ y σ_w : uno para la estimación de σ_w y otro para determinar θ teniendo en cuenta la influencia de σ sobre la medida de permitividad que se obtiene con el WET Sensor.

ABSTRACT. Dielectric capacitance sensors are a popular alternative to other soil moisture sensors, because they provide low cost, un-disturbing, non-contaminant and instantaneous readings of volumetric water content (θ). Additionally, they can be adapted to provide simultaneous measurements of θ and the bulk electrical conductivity in the same sample volume. However, due to the low

frequency signal they operate at, and also because of soil electrical conductivity effects on water content estimations, their reliability may be questioned. Previous studies evaluated the performance of the commercial capacitive WET Sensor (Delta-T Devices Ltd., Burwell, UK) in three forest soils of a volcanic origin finding that the sensor provides a good estimation of the bulk electrical conductivity, but its measurement of soil permittivity is biased, and, thereby, the water content estimation is incorrect. This study evaluates if the latter effect may be solely due to the well-known atypical dielectric behaviour of volcanic soils, or if, by contrast, this may also occur in a homogeneous medium such as coarse sand. Results indicate that the models internally used by the WET Sensor for predicting the pore water electrical conductivity (σ_w) and soil moisture are inappropriate, especially for the volcanic soils studied. Although for the sand θ and σ_w determinations with the WET Sensor are less biased, alternative empirical models accounting for the permittivity dependence on σ are proposed for improving θ and σ_w estimations from the WET Sensor readings.

1.- Introducción

Los sensores dieléctricos de tipo capacitivo presentan importantes ventajas frente a otros métodos a la hora de determinar el contenido volumétrico de humedad (θ) del suelo. Son métodos muy poco destructivos, no contaminantes y de fácil manejo que proporcionan medidas instantáneas de θ . Además, algunos de ellos pueden determinar de forma simultánea θ y la conductividad eléctrica aparente del suelo (σ) en el mismo volumen de muestra. No precisan de un análisis complejo de la señal, como es el caso del TDR (Time Domain Reflectometry), por lo que su multiplexado y conexión a la mayoría de registradores de datos existentes en el mercado resulta posible. Todo esto, unido a su reducido coste, hace que se les considere una alternativa a otros métodos dieléctricos más caros como el TDR, lo que ha propiciado su estudio y desarrollo (Dean et al., 1987; Evett y Steiner, 1995; Paltineanu y Starr, 1997; Seyfried y Murdock, 2001; Kelleners et al., 2004). Sin embargo, diversos autores han demostrado que las medidas de θ con estos sensores pueden

verse afectadas por otras variables, tales como la frecuencia de la onda electromagnética empleada (Kelleners et al., 2005) y la conductividad eléctrica del medio (Campbell, 2002; Seyfried y Murdock, 2004).

La permitividad (ϵ) indica la habilidad de un material para polarizarse como consecuencia de la aplicación de un campo eléctrico, y de esa forma, cancelar parcialmente este campo eléctrico dentro del material. Esta propiedad se expresa generalmente como permitividad relativa (para simplificar, referida sólo como permitividad), es decir la relación entre la permitividad absoluta del material y la del vacío ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$), y por lo tanto se trata de un valor adimensional. La permitividad de un medio es un número complejo ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$) donde la parte real, ϵ' , está relacionada con la energía almacenada y la parte imaginaria, ϵ'' , con la energía total perdida o absorbida por el material. La componente real, ϵ' , (conocida también como constante dieléctrica) proporciona una estimación del contenido en agua del suelo, mientras que la parte imaginaria, ϵ'' , depende de la conductividad eléctrica aparente del suelo (σ) y de la frecuencia efectiva del campo eléctrico aplicado, f (Hz), tal que:

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \quad (1)$$

El WET Sensor (Delta-T Devices Ltd., Burwell, Gran Bretaña) es un sensor dieléctrico de tipo capacitivo que permite obtener lecturas simultáneas de θ y σ . Su principio de funcionamiento consiste en determinar ambas componentes, real e imaginaria, de la permitividad basándose en que el suelo, que actúa como material dieléctrico, situado entre dos electrodos (guías paralelas de la sonda), se comporta como un condensador con pérdidas. La impedancia de un condensador con permitividad compleja está formada por un término real que corresponde a un condensador con dieléctrico sin pérdidas; y otro término imaginario que está relacionado con las pérdidas dentro del dieléctrico. Esta impedancia es equivalente a la de un circuito formado por un condensador con capacitancia, C , conectado en paralelo con una resistencia, de conductancia G . Así, C representa la capacidad del suelo para almacenar energía, y está relacionada con ϵ' , mientras que G representa la energía perdida y está relacionada con σ . Esto sugiere que tanto ϵ' como σ se pueden obtener midiendo la impedancia del suelo y separando las partes real e imaginaria. La impedancia, Z , que encuentra la onda electromagnética al desplazarse por el suelo es un número complejo que depende de f y ϵ , pudiendo escribirse también en términos de C y G tal que:

$$Z^{-1} = j2\pi f \epsilon_0 \epsilon k = C + j2\pi f G \quad (2)$$

donde k (m) es un factor geométrico determinado por la distancia entre los electrodos y sus superficies de contacto con el suelo.

Conocidos los valores de ϵ' y σ , el fabricante del WET Sensor proporciona las siguientes ecuaciones para estimar

por un lado el contenido de humedad (θ) y por otro lado la conductividad eléctrica de la solución del suelo (σ_w), (Delta-T Devices Ltd., 2002):

$$\theta = \frac{\sqrt{\epsilon'_a - b_0}}{b_1} \quad (3)$$

$$\sigma_w = \frac{\epsilon'_w \sigma}{\epsilon'_a - \epsilon'_{\sigma=0}} \quad (4)$$

donde ϵ'_a es el valor de ϵ' que proporciona el sensor; b_0 y b_1 son parámetros que dependen del tipo de suelo. El fabricante proporciona valores de estos dos parámetros para cuatro tipos de suelos (mineral, orgánico, arenoso y arcilloso). Indicando, que en determinados casos es conveniente realizar una calibración específica. La Ec. (4) corresponde al modelo de Hilhorst (2000), donde ϵ'_w es la constante dieléctrica de la solución del suelo, que si se asume igual a la del agua pura es de 78.5 a 25°C, mientras que $\epsilon'_{\sigma=0}$ es un parámetro específico del suelo que toma por defecto el valor de 4.1.

Sin embargo, dependiendo de la frecuencia del campo eléctrico que utilice el sensor, la exactitud de θ y σ puede verse afectada, no siendo extensibles las Ecs. (3) y (4) a todos los suelos. La dependencia de ϵ'' con la frecuencia efectiva, f , es bien conocida (Kraszewski, 1996; Kelleners et al., 2005), sin embargo, y aunque en ocasiones obviada, ϵ' puede también verse afectada por f de forma importante. Este fenómeno se conoce como el efecto Maxwell-Wagner (Wagner, 1914; Campbell, 1990). Recientemente Kelleners et al. (2005) estudiaron este efecto en un medio con dispersión dieléctrica severa (bentonita) encontrando una dependencia fuerte de ϵ' para $f < 500$ MHz, por lo que recomiendan mejorar la técnica de capacitancia usando un campo eléctrico con una frecuencia superior a este valor ($f > 500$ MHz). En suelos de textura fina, con minerales de arcilla, esta dependencia de f puede ser particularmente significativa (Kelleners et al., 2005). Por otro lado, ϵ está afectada por la conductividad eléctrica del medio como consecuencia de la influencia de ésta sobre ϵ'' (Ec. 1), lo cual se observa incluso a frecuencias de 1 GHz en medios muy salinos ($\sigma \geq 10 \text{ dS m}^{-1}$) (Campbell, 2002). Este efecto de la salinidad se puede considerar despreciable a frecuencias mayores, como por ejemplo las utilizadas por el TDR (1-3 GHz) debido a la relación inversa existente entre σ y f mostrada en la Ec. (1). Motivados por el comportamiento dieléctrico atípico que en general exhiben los suelos de origen volcánico (Regalado et al., 2003), Regalado et al. (2007) evaluaron la exactitud del WET Sensor para determinar el contenido de humedad y la conductividad eléctrica de tres suelos forestales de origen volcánico con diferente textura. Sus resultados demuestran que en los suelos volcánicos estudiados, los valores de ϵ'_a , que proporciona el WET Sensor, son incorrectos, lo que afecta a la exactitud de los valores resultantes de θ y σ_w . Estos autores recomiendan además el uso de modelos

alternativos a las Ecs. (3) y (4). Como complemento de estos resultados, este estudio busca comprobar si las Ecs. (3) y (4) son inadecuadas como consecuencia del carácter dieléctrico particular de los suelos volcánicos o bien por el contrario son independientes del tipo de suelo. Para ello, se evalúa en conjunto la eficacia del WET Sensor para determinar θ y σ_w en los tres suelos volcánicos ya estudiados por Regalado et al. (2007) y en una arena gruesa. Los objetivos concretos de este trabajo son i) comprobar la exactitud de las lecturas de permitividad que proporciona el WET Sensor y ii) en el caso de que las medidas del sensor no sean exactas, plantear la corrección de las lecturas de θ y σ_w mediante modelos alternativos a los utilizados por el fabricante.

2.- Materiales y métodos

2.1. WET Sensor

El WET Sensor consiste en una sonda de tres varillas de 6.5 cm de longitud y separadas entre sí 1.5 cm, que se conecta a un lector (HH2 Moisture meter, Delta-T Devices Ltd., Burwell, Gran Bretaña) encargado de generar una onda electromagnética y de mostrar y almacenar los valores medidos. La onda electromagnética de 20 MHz generada por el HH2 produce un campo electromagnético entre las varillas. El comportamiento dieléctrico e iónico del material situado entre ellas, produce cambios en la onda de 20 MHz. A partir de la frecuencia resultante el sensor mide la capacitancia (C) y la conductancia (G) del suelo que se encuentra entre las varillas. Mediante un sensor situado en la varilla central de la sonda, el WET Sensor proporciona también la temperatura del suelo (lo que permite referir el valor de σ_w a 25°C).



Fig. 1. Imagen del lector HH2 y del WET Sensor.

2.2. Diseño experimental

Se realizaron varios experimentos para verificar el funcionamiento del WET Sensor. En una primera fase se evaluó la influencia de la salinidad sobre la lectura de permitividad que proporciona el sensor para lo cual se

obtuvieron lecturas de ϵ'_a en distintas soluciones acuosas de KBr con conductividades eléctricas en el intervalo de 0 a 9 dS m⁻¹, medidas con un conductivímetro de laboratorio Crisol GLP32 (Crisol Instruments SA, Alella, España).

En una segunda etapa se realizaron ensayos para verificar el comportamiento del WET Sensor en medios porosos. Se utilizaron cuatro materiales: tres suelos forestales de origen volcánico (A, B y C) y una arena gruesa (D). De acuerdo con Regalado et al. (2007), los tres suelos se secaron al aire, se tamizaron (<2 mm) y se empaquetaron por capas a la densidad de campo en cilindros de PVC de 1.94 litros de capacidad. Para cada suelo se prepararon 30 columnas resultantes de la combinación de cinco contenidos de humedad correspondientes a fracciones de la porosidad, η ($\theta = 0.5\eta, 0.6\eta, 0.7\eta, 0.8\eta, 0.9\eta$) y 6 niveles de salinidad resultantes de mezclar el suelo con soluciones de KBr (0, 1, 2, 4, 6.5 y 9 dS m⁻¹). Únicamente en el suelo C, las humedades correspondientes a 0.8 η y 0.9 η dieron lugar a la formación de un sobrenadante que no se mezclaba de forma homogénea con el suelo, por lo que estas columnas se rechazaron y se preparó una columna adicional con humedad inferior, $\theta = 0.4\eta$. La arena gruesa se empaquetó a una densidad de 1.59 g cm⁻³ en seis cilindros metálicos de 0.345 litros que se saturaron con seis soluciones de distintas conductividades eléctricas (0, 1, 2, 3.7, 6.8, 9.4 dS m⁻¹). Introduciendo estos cilindros en células de presión Tempe sobre una placa cerámica porosa se redujo progresivamente el contenido de humedad aplicando distintas presiones (<100 kPa). Para los cuatro materiales, se realizaron medidas en cada cilindro de ϵ'_a , σ y temperatura con el WET Sensor, determinando θ y σ_w a partir de las Ecs. (3) y (4). Para contrastar estas lecturas se utilizó, en los suelos volcánicos, un equipo TDR Trase System I 6050X1 (Soilmoisture, Santa Bárbara, EEUU) estimando σ según el procedimiento descrito en Muñoz-Carpena et al. (2005). El contenido hídrico se determinó por gravimetría, mientras que σ_w se obtuvo con un conductivímetro de laboratorio Crison 525 en la solución de suelo obtenida mediante extractores de solución Rhizon (Eijkelkamp, Giesbeek, Holanda), según se describe en Regalado et al. (2005).

3.- Resultados y discusión

Según los resultados obtenidos por Regalado et al. (2007), el WET Sensor determina correctamente la conductividad eléctrica del medio, siendo la fiabilidad de esta lectura muy buena teniendo en cuenta el alto coeficiente de eficiencia (Nash y Sutcliffe, 1970) resultante ($C_{\text{eff}} = 0.999$) y el bajo error, expresado como raíz del error cuadrático medio (RMSE = 0.09 dS m⁻¹). Por otro lado, Regalado et al. (2007) demuestran que el sensor capacitivo mide también satisfactoriamente ($C_{\text{eff}} = 0.992$, RMSE = 2.49) la permitividad de determinadas soluciones no salinas de los líquidos con permitividad conocida. Sin embargo, las lecturas de permitividad del WET Sensor se ven afectadas por la conductividad eléctrica de la solución a partir de valores superiores a aproximadamente 3 dS m⁻¹ (Fig. 2).

Esta figura muestra además como la tendencia de la variación de ε'_a con la salinidad obtenida en este trabajo es distinta de la indicada por Regalado et al. (2007), llegando a obtenerse valores de $\varepsilon'_a < 0$ a partir de salinidades superiores a 14 dS m^{-1} . En ambos casos, este fenómeno se explica, por el hecho de que la componente real de la permitividad de un electrolito, determinada a baja frecuencia, disminuye a medida que aumenta la conductividad eléctrica de éste (Robinson y Stokes, 1959). En este caso, a conductividades altas, la disminución de ε'_a resulta incluso en valores negativos.

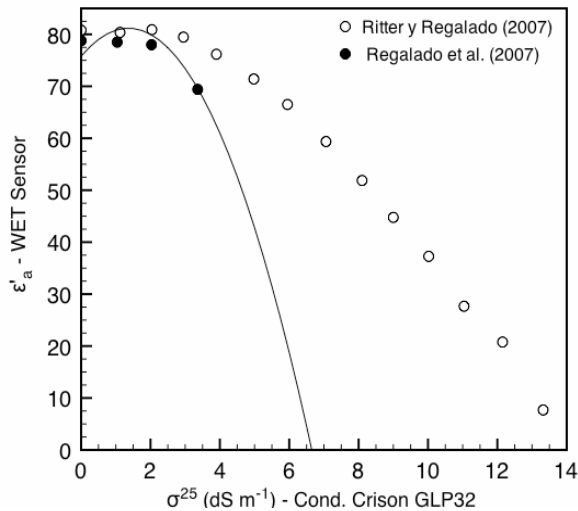


Fig. 2. Variación de la lectura de permitividad obtenida con el WET Sensor (ε'_a) en soluciones acuosas de KBr con distinta conductividad eléctrica. Con símbolos huecos se muestran los resultados obtenidos en este estudio, mientras que con símbolos sólidos los obtenidos por Regalado et al. (2007).

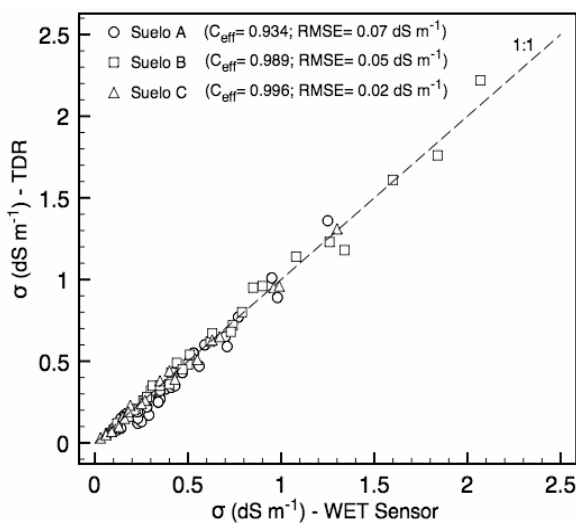


Fig. 3. Comparación entre los valores de σ estimados con el WET Sensor y con el equipo TDR.

Estos resultados indican que la medida de la constante dieléctrica, o componente real de la permitividad, con el WET Sensor se ve afectada por la salinidad. No obstante, el sensor determina de forma adecuada la conductividad eléctrica aparente, no sólo en líquidos, sino también en suelos. La Fig. 3 reproduce los resultados de Regalado et al. (2007) correspondientes a los valores de σ medidos con el WET Sensor y con el equipo TDR para los tres suelos volcánicos estudiados, siendo satisfactoria la concordancia

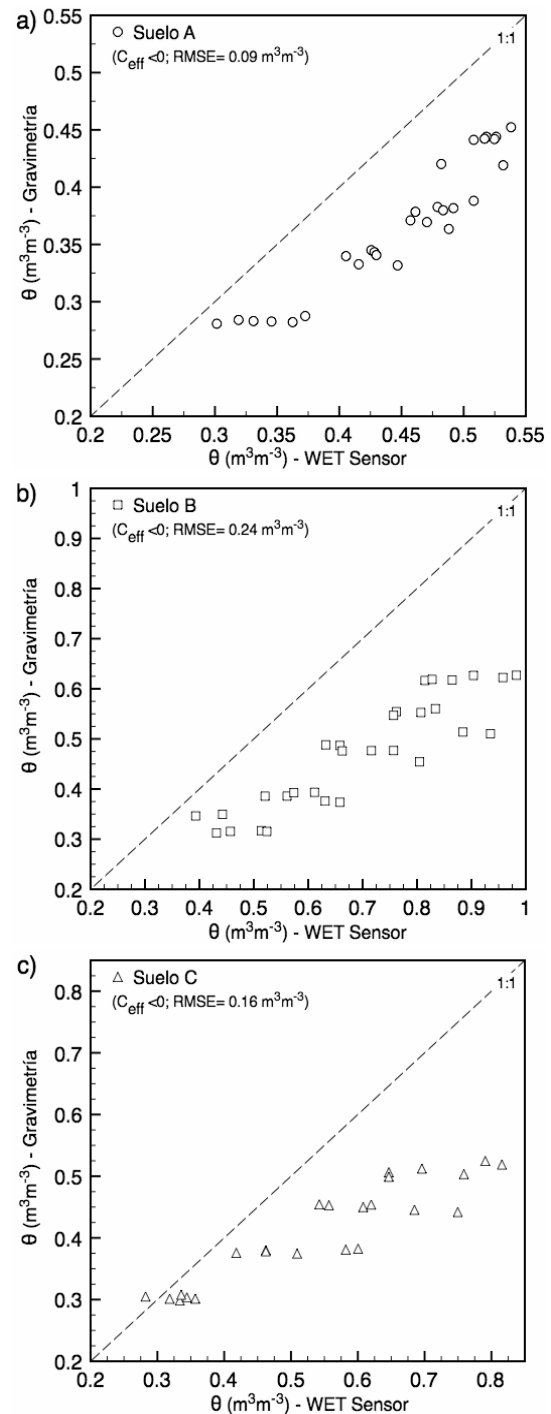


Fig. 4. Comparación entre los valores de θ determinados por gravimetría y los estimados con el WET Sensor.

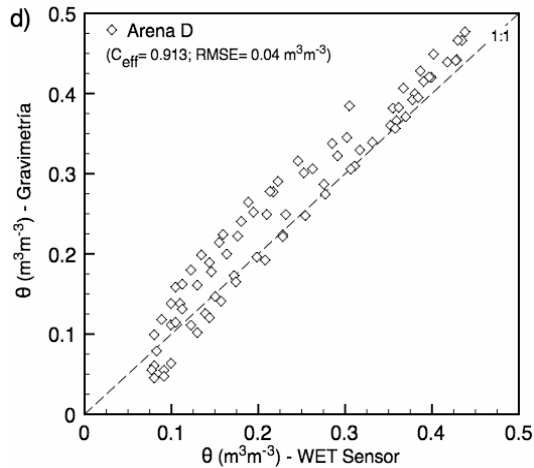


Fig. 4 (Continuación). Comparación entre los valores de θ determinados por gravimetría y los estimados con el WET Sensor.

entre ambos. En este sentido, estos resultados sugieren recomendar el WET Sensor frente al TDR, puesto que el uso de TDR requiere un análisis complejo de la onda para la estimación de σ .

La Fig. 4 muestra, para los cuatro materiales (suelos volcánicos y la arena), los valores de θ determinados por gravimetría frente a los obtenidos con el sensor a partir de la Ec. (3), donde los coeficientes b_0 y b_1 se han estimado mediante calibración específica. Los resultados indican una pobre predicción de θ con el sensor en los suelos volcánicos, sobre todo teniendo en cuenta que un C_{eff} negativo implica que los valores de θ observados se predicen mejor con el promedio de éstos que con la ecuación utilizada por el sensor.

Estos resultados no sorprenden teniendo en cuenta lo observado anteriormente en cuanto a la alteración que experimenta ϵ'_a como consecuencia de la conductividad eléctrica del medio. Aún así, en la arena se obtiene una predicción de θ mucho mejor que en los suelos volcánicos estudiados. Esto sugiere un análisis en conjunto de las tres variables ϵ'_a , σ y θ que permita establecer una ecuación empírica que las relacione. Evett et al. (2005) proponen el siguiente modelo:

$$\theta = a + b\rho^d \sqrt{\epsilon'_a} + c \sqrt{\frac{\sigma}{f_e}} \quad (5)$$

donde a , b , c y d son parámetros de ajuste; ρ es la densidad aparente (g cm^{-3}) y f_e es la frecuencia estandarizada del campo eléctrico resultante que mide el sensor y que está relacionada con θ . De acuerdo con Paltineanu y Starr (1997), existe una relación potencial tal que θ es proporcional a $(f_e)^\gamma$, tomando γ un valor próximo a 2.

Teniendo en cuenta la densidad aparente de cada material ($\rho_A = 0.98 \text{ g cm}^{-3}$; $\rho_B = 0.60 \text{ g cm}^{-3}$; $\rho_C = 0.65 \text{ g cm}^{-3}$ y $\rho_D = 1.60 \text{ g cm}^{-3}$), se realizó la calibración del modelo descrito en la Ec. (5) para los tres suelos volcánicos en conjunto ($C_{\text{eff}} = 0.941$, $\text{RMSE} = 0.027 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) y para la arena ($C_{\text{eff}} = 0.944$, $\text{RMSE} = 0.025 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Tabla 1). En cada caso, el conjunto total de datos se dividió en subconjuntos para realizar, por un lado, la calibración y por otro lado, la comprobación del ajuste. En la Fig. 5 se observa la idoneidad del modelo propuesto por Evett et al. (2005) para estimar el contenido de humedad a partir de las lecturas del WET Sensor.

Tabla 1. Parámetros ajustados del modelo descrito en la Ec. (5)

Material	a	b	c	d	C_{eff}	RMSE ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
Suelos volc.	-0.0860	0.0875	-0.1182	-0.4738	0.941	0.027
Arena D	-0.1549	0.1291	-0.0263	0	0.944	0.025

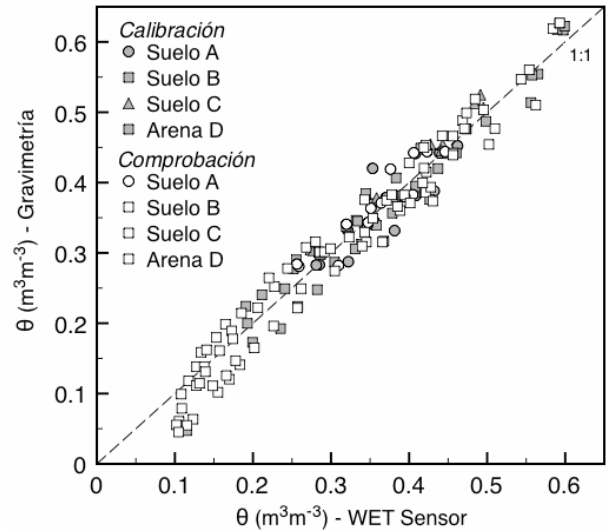


Fig. 5. Comparación entre los valores de θ determinados por gravimetría y los estimados con el WET Sensor usando el modelo propuesto por Evett et al. (2005). En símbolos sólidos los valores usados para calibración y en símbolos huecos aquellos usados para comprobación.

La determinación de la conductividad eléctrica (σ_w) de la solución de suelo a partir de las lecturas del WET Sensor y la Ec. (4) tampoco resulta satisfactoria especialmente en los tres suelos volcánicos (Fig. 6). Para la arena, la predicción de σ_w puede considerarse visualmente buena para valores $< 5 \text{ dS m}^{-1}$. En un intento por mejorar estas predicciones se utiliza el modelo alternativo propuesto por Muñoz-Carpena et al. (2005):

$$\sigma_w = \frac{\sigma - m\theta^2}{(n\theta^2 + r\theta)} \quad (6)$$

donde m , n y r son parámetros de ajuste. Calibrando este modelo para cada suelo y la arena por separado, se obtienen

los parámetros e índices de ajuste que se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros ajustados del modelo descrito en la Ec. (6)

Material	m	n	r	C_{eff}	RMSE (dS m^{-1})
Suelo A	1.9158	-0.0471	0.5050	0.915	0.35
Suelo B	0.4193	1.1108	-0.1206	0.943	0.49
Suelo C	0.1795	1.6573	-0.2964	0.964	0.27
Arena D	0.0458	1.2176	0.0948	0.998	0.08

La Fig. 7 muestra la mejora que supone el modelo propuesto por Muñoz-Carpena et al. (2005) para la predicción de la σ_w en los cuatro materiales estudiados. Incluso para el caso de la arena, la predicción de σ_w usando la Ec. (6) puede considerarse mucho mejor que la obtenida con la Ec. (4) ($C_{\text{eff}} = 0.998$ frente a $C_{\text{eff}} = 0.928$; $\text{RMSE} = 0.08 \text{ dS m}^{-1}$ frente a $\text{RMSE} = 0.51 \text{ dS m}^{-1}$).

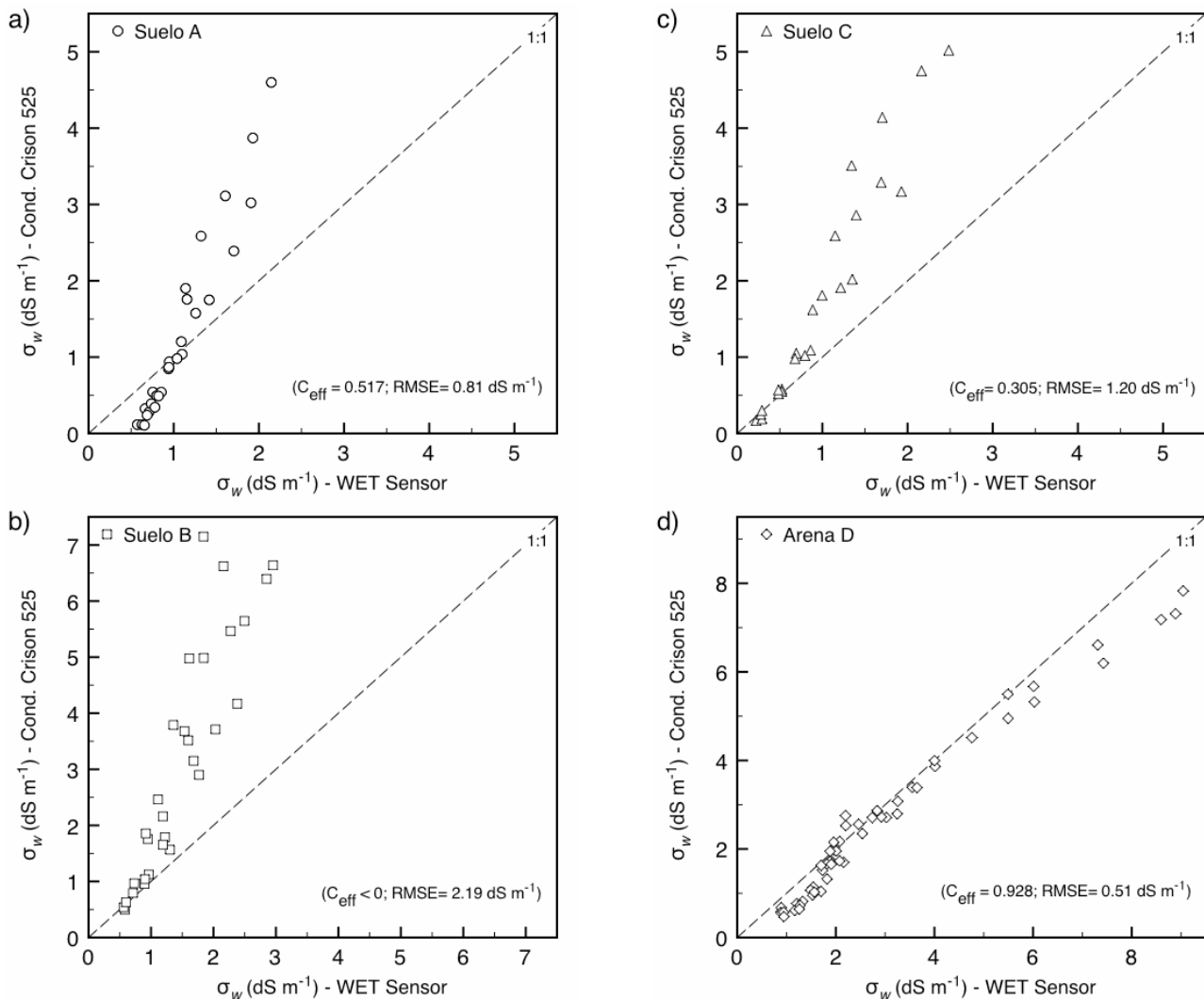


Fig. 6. Comparación entre los valores de σ_w medidos en las muestras de solución extraídas y los estimados con el WET Sensor.

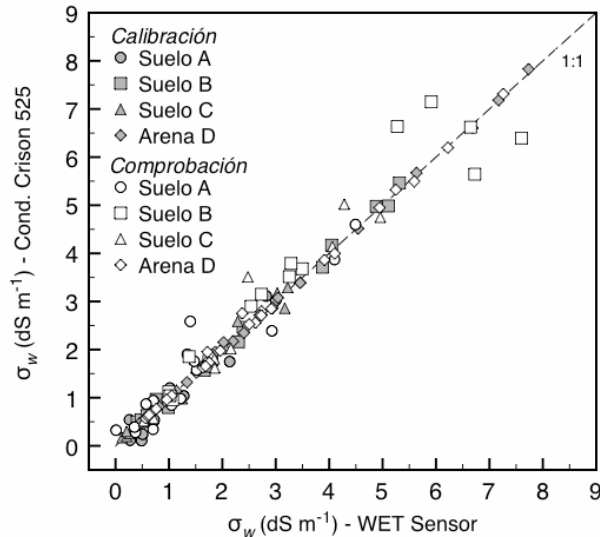


Fig. 7. Comparación entre los valores de σ_w medidos en las muestras de solución extraídas y los estimados con el WET Sensor usando el modelo propuesto por Muñoz-Carpena et al. (2005). En símbolos sólidos los valores usados para calibración y en símbolos huecos aquellos usados para comprobación.

4.- Conclusiones

Los diversos experimentos realizados con el sensor dieléctrico capacitivo estudiado permiten concluir que la determinación de la conductividad eléctrica con el WET Sensor es correcta tanto en líquidos como en suelos, lo que representa una ventaja frente al TDR, ya que el WET Sensor proporciona esta medida de forma instantánea sin la necesidad de realizar un análisis de señal, como ocurre con el TDR. En líquidos, este sensor capacitivo determina la permitividad de forma satisfactoria cuando la salinidad es baja, sin embargo a conductividades eléctricas superiores a 3 dS m^{-1} , esta lectura se ve alterada por la salinidad del medio. Se demuestra que en la arena y en los suelos volcánicos estudiados la alteración de las lecturas del WET Sensor como consecuencia de la baja frecuencia de trabajo que utiliza y de la inadecuación de los modelos que utiliza el fabricante conduce a estimaciones erróneas de θ y σ_w . Como consecuencia del conocido carácter dieléctrico atípico de los suelos volcánicos, el error en la determinación de θ y σ_w mediante el WET Sensor es importante. Sin embargo, esto no sucede para el caso de la arena para la cual los errores son mucho menores, pudiendo considerarse aceptables. Los modelos propuestos por Evett et al. (2005) y por Muñoz-Carpena et al. (2005) calibrados convenientemente constituyen una buena alternativa para la correcta determinación de θ y σ_w , respectivamente, a partir de las lecturas del WET Sensor. Incluso para el caso de la arena, estos modelos proporcionan predicciones de mayor calidad que aquellos utilizados por el fabricante.

Agradecimientos: Los autores quieren dar las gracias a R. M. Rodríguez-González (antigua alumna de la ETSIA-ULL) por su colaboración en la realización de los experimentos, así como a A.R. Socorro (ICIA) por su

ayuda en las determinaciones de laboratorio. También agradecen a los revisores anónimos sus comentarios, que han ayudado a mejorar este trabajo. Este trabajo ha sido financiado con fondos del INIA-Programa Nacional de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias (Proyectos RTA2005-205 y RTA2005-228).

Bibliografía

- Campbell, J.E. 1990. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty Megahertz. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:332-341.
- Campbell, J.E. 2002. Salinity effects in capacitive soil moisture measurement. 12 p. In I.C. Paltineau (ed.) *Transactions first international symposium on soil water measurement using capacitance and impedance*, volume 1.
- Dean, T.J., J.P. Bell y A.J.B. Baty. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. Part I. Sensor design and performance. *J. Hydrol.* 93:67-78.
- Delta-T Devices Ltd. 2002. User manual version: WET-UM-v1.2. Cambridge, UK. Disponible en <http://www.delta-t.co.uk/cgi-bin/attach.cgi?item=faq2007022508317.2> (verificado 4 Junio 2007).
- Evet, S.R. y J.L. Steiner. 1995. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:961-968.
- Evet, S.R., J.A. Tolk y T.A. Howell. 2005. TDR laboratory calibration in travel time, bulk electrical conductivity, and effective frequency. *Vadose Zone J.* 4:1020-1029 (2005). Special Section: Soil Water Sensing. doi:10.2136/vzj2005.0046.
- Hilhorst, M.A. 2000. A pore water conductivity sensor. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1922-1925.
- Kelleners, T.J., R.W.O. Soppe, J.E. Ayars y T.H. Skaggs. 2004. Calibration of capacitance probe sensors in a saline silty clay soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:770-778.
- Kelleners, T.J., D.A. Robinson, P.J. Shouse, J.E. Ayars y T.H. Skaggs. 2005. Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:67-76.
- Kraszewski, A. W., 1996. Microwave Aquametry: Introduction to the workshop. p. 3-34. In A. Kraszewski (ed.) *Microwave Aquametry. Electromagnetic wave interaction with water-containing materials*. TAB-IEEE Press Book Series, Piscataway.
- Muñoz-Carpena, R., C.M. Regalado, A. Ritter, J. Álvarez-Benedí y A.R. Socorro. 2005. TDR estimation of saline solutes concentration in a volcanic soil. *Geoderma* 124:399-413.
- Nash, J.E. y J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1-A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Paltineau, I.C. y J.L. Starr. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1576-1585.
- Regalado, C.M., R. Muñoz-Carpena, A.R. Socorro y J.M. Hernández Moreno. 2003. Time domain reflectometry models as a tool to understand the dielectric response of volcanic soils. *Geoderma* 117: 313-330.
- Regalado, C.M., A. Ritter, R.M. Rodríguez González y A.R. Socorro. 2005. Diseño experimental para la extracción de solución del suelo en régimen de insaturación (<600 kPa). En: J. Samper Calvete y A. Paz González (eds.) pp 95-100. VII Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada del Suelo, Universidad da Coruña.
- Regalado, C.M., A. Ritter y R.M. Rodríguez-González. 2007. Performance of the commercial WET capacitance sensor as compared with Time Domain Reflectometry in volcanic soils. *Vadose Zone J.* 6: 244-254.
- Robinson, R.A. y R.H. Stokes. 1959. *Electrolyte solutions*. 2nd ed. Butterworths, London.
- Seyfried, M.S y M.D. Murdock. 2001. Response of a new soil water sensor to variable soil, water content, and temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:28-34.
- Seyfried, M.S y M.D. Murdock. 2004. Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:394-403.
- Wagner, K.W. 1914. The after effect in dielectrics. *Arch. Electrotech.* 2:378-394.

