

## Calibración de sondas capacitivas para estimar la humedad del suelo en condiciones de campo: efecto de la pedregosidad

Vera, J.<sup>1,3</sup>, Abrisqueta, J.M.<sup>1,3</sup>, Quezada, R.<sup>2</sup>, Munguía, J.<sup>2</sup>, Callejas, R.<sup>4</sup>, Gálvez, R.A.<sup>4</sup>,  
Abrisqueta, I.<sup>1</sup>, Ruiz-Sánchez, M.C.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Dto. Riego, CEBAS-CSIC, Apdo. 164, 30100 Espinardo Murcia (jvera@cebas.csic.es)

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Química Aplicada. (CONACYT) Saltillo, Coah., México.

<sup>3</sup>Unidad Asociada al CSIC de Horticultura Sostenible en Zonas Áridas (UPCT-CEBAS)

<sup>4</sup>Dpto. Fruticultura, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago de Chile, Chile

### Abstract

Soil water content monitored with multicapacitance probe is one of the methods commonly used in advanced irrigated agriculture. In this paper we calibrated we calibrated Envirosmart, C-probe series I and Cprobe series II under field condition at the CEBAS-CSIC experimental farm, in a stony clay loam soil. Six PVC 0.8 m long access tube were installed at a distance of 1 x 1 m. Three wetness conditions were generated in order to get saturated condition, medium and dry environments around the access tube corresponding to a range of 0.08 to 0.33 m<sup>3</sup> m<sup>3</sup> soil water content. A non linear model was adjusted for Envirosmart with R<sup>2</sup> = 0,754, whereas for the C-probe that value was for C-probe I R<sup>2</sup> = 0,665 and for C-probe II R<sup>2</sup> = 0,595. Those relatively low values compared to the ones found in the literature can be attributed to the air trap generated around the access tube when pushing away the stones.

### Resumen

La programación del riego basada en el monitoreo con sensores de capacitancia del contenido de humedad del suelo es uno de los métodos que se está extendiendo en zonas con agricultura avanzada debido a que muestra una "radiografía en continuo" del estado hídrico del suelo. Si además, ello tiene lugar en la zona de máxima densidad radicular se convierten en "sensores biológicos". Existen varios diseños, pero todos ellos requieren un proceso de normalización y calibración para cada tipo de suelo. El objetivo de este estudio fue normalizar y calibrar 3 de las sondas de capacitancia más utilizadas comercialmente, en condiciones de campo para un suelo franco-arcilloso con 10% de pedregosidad, perteneciente a la finca experimental del CEBAS-CSIC en Murcia, España (38° 6' 31" N; 1° 2' 13.7" W). Se instalaron 6 tubos de acceso de PVC de 0.8 m de longitud en una malla de 1 x 1 m. Se generaron 3 condiciones de humedad del suelo: saturación, húmedo y seco. En el rango de humedad de las condiciones experimentales (0,08 a 0,33 m<sup>3</sup> m<sup>3</sup>) para la sonda Envirosmart se realizó un ajuste no lineal de la forma  $\theta_v = aSF^b + C$ , mientras que para las sondas C-probe el modelo que mejor se ajustó fue un modelo lineal de la forma  $\theta_v = aSV + b$ . De las tres sondas capacitivas, el Envirosmart mostró un mejor ajuste y mayor sensibilidad a las variaciones de humedad del suelo, (R<sup>2</sup> = 0,754), frente a C-probe I (R<sup>2</sup> = 0,665) y el C-probe II

( $R^2 = 0,595$ ), además de poseer un menor error (RMSE = 0,036) en los valores de  $\theta_v$  estimados por la sensores con respecto a  $\theta_v$  real. Estos valores relativamente bajos comparados con los encontrados en la literatura pueden atribuirse a bolsas de aire producidas por desplazamiento de la pedregosidad al insertar el tubo de PVC.

## INTRODUCCIÓN

La programación de riego basado en el monitoreo del contenido de humedad del suelo es uno de los métodos que se esta extendiendo en zonas con agricultura avanzada debido a que muestra una “radiografía en continuo” del estado hídrico del suelo. La práctica de un riego eficiente y de precisión requiere un conocimiento de las características del suelo tales como contenido y retención de agua y conductividad hidráulica. Para ello, se necesitan técnicas para la medida cuantitativa, precisa y continua que determinen el contenido de humedad del suelo a profundidades específicas con alteración mínima del suelo (Morgan et al., 1999). Si además, ello tiene lugar en la zona de máxima densidad radicular, los sensores usados en estas técnicas se convierten en “sensores biológicos”

Las sondas capacitivas determinan el contenido de humedad del suelo en forma continua con la mínima perturbación del suelo. Se fundamentan en las propiedades electromagnéticas del suelo permitiendo una medida rápida, no destructiva y fácilmente automatizable (Topp and Davies, 1985; Dean, et al., 1987; Starr and Platineau, 1997; Robinson, et al., 1998) y se utilizan sólo no para investigación, sino también en explotaciones agrícolas comerciales (Dean et al., 1987; y Paltineanu Starr, 1997; Starr y Paltineanu, 1998; Kelleners et al., 2004). La información proporcionada por los sensores es útil para evaluar la dinámica de absorción de agua por la planta, que no era tan sencillo de determinar con otros dispositivos (Lukangu et al., 1999).

En el mercado existen sensores basados en la capacitancia (FDR, frequency domain reflectometry), la impedancia y (TDT, time domain transmission) y la (TDR time domain reflectometry), capaces de hacer mediciones de forma continua y en tiempo real, lo que hace más fácil la toma de decisiones para una precisa programación del riego (Starr y Paltineanu, 2002; Thompson, et al., 2007; Mounzer, et al., 2008), para el análisis del balance hídrico (Starr and Platineau, 1998; Vera et al., 2009) y para estudios de lixiviación de nitrógeno (Arregui and Quemada, 2006).

Entre estos, la capacitancia es el método electromagnético más utilizado para el monitoreo del contenido de humedad del suelo (Gardner et al., 2000). El principio básico de operación es la incorporación del suelo como parte de su capacitor, utilizando las variaciones de la constante dieléctrica del conjunto suelo, agua y aire para la estimación del contenido de humedad del suelo. La constante dieléctrica del agua pura a 20 °C es de 80,4, mientras que la de un suelo seco oscila entre 3 y 7, siendo la del aire es igual a 1 (Fares y Polyakos, 2006). Por lo tanto, al aumentar el contenido de humedad del suelo la constante dieléctrica del suelo aumenta y en el caso opuesto disminuye.

Existen varios diseños de sensores de capacitancia que se diferencian en la geometría de las placas del condensador, frecuencia de trabajo (7-150 MHz), método de instalación, exactitud y precisión de la medida.

Las sondas de capacitancias requieren un proceso de normalización y otro de calibración para cada tipo de suelo, debido a la variabilidad de la constante dieléctrica de los minerales que componen el suelo (Robinson, 2004), así como la temperatura y salinidad del suelo (Paltineanu and Starr, 1997).

El objetivo de este estudio fue normalizar y calibrar 3 de las sondas de capacitancia más utilizadas comercialmente, en condiciones de campo para un suelo franco arcilloso.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Parcela experimental

El ensayo se llevó a cabo en una parcela de la finca experimental Tres Caminos del CEBAS (CSIC), situada en el campo de la Matanza, Santomera, Murcia, España (38° 6' 31" N; 1° 2' 13.7" W) con 3 sondas de capacitancia comerciales (Cprobe serie I y II, Agrilink Pty Ltd, Thebarton, SA. y Envirosmart SDI-12, Sentek Pty Ltd, Adelaide, SA).

El suelo presenta de textura franco arcilloso, con 10% de pedregosidad y arcillas tipo 2:1. La densidad aparente del suelo ( $\rho_a$ ) se determinó por gravimetría a partir de muestras de suelo inalterado recogidas en cada 10 cm a lo largo de un perfil 80 cm de profundidad y luego secada en estufa a 105 °C por 48 horas.

Se instalaron 6 tubos de acceso de PVC de 0.8 m de longitud y 56.5 mm de diámetro interior, con una distancia entre ellos de 2 x 1 m (Figura 1a). La instalación se realizó con una barrena especial, extrayendo el suelo desde el interior del tubo a fin de garantizar un contacto adecuado entre la sonda y el suelo siguiendo las instrucciones del fabricante. En la parte inferior del tubo de acceso se instaló un tapón de caucho de doble anillo para evitar la entrada de agua y/o vapor de agua al tubo de acceso. Como la geometría de los sensores de ambos fabricantes es la misma se pudo utilizar los mismos tubos durante el ensayo de calibración.

En cada sonda se dispusieron 6 sensores separados 0.10 m entre sí para monitorizar los horizontes 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 y 0.6 m.

Antes de la calibración se procedió a realizar la normalización de los sensores para obtener la frecuencia escalada o normalizada (SF), en el caso de los sensores del Envirosmart. Se determinaron las frecuencias correspondientes al sensor en contacto con el aire ( $F_a$ ), y en contacto con el agua ( $F_w$ ), 36151 y 24433, respectivamente.

Las frecuencias de los sensores rodeados de suelo ( $F_s$ ) se normalizaron mediante la siguiente ecuación;

$$SF = \frac{F_a - F_s}{F_a - F_w}$$

La normalización de los sensores del Cprobe I y II se determinaron las lecturas del sensor en aire,  $V_a=0$ , y en agua,  $V_w= 100$ , que se graban en el PCB printed circuit board de la sonda para cada sensor de manera que las lecturas en suelo ya vienen normalizadas según la ecuación:

$$SV = \frac{V_s - V_a}{V_w - V_a}$$

Para la obtención de las curvas de calibración de estas sondas, se relacionaron las unidades de SF o SV con valores de humedad volumétrica ( $\theta_v$ ) a partir de muestreos de suelo realizados simultáneamente a las lecturas de las sondas.

Para ello se generaron 3 condiciones de humedad del suelo; saturación, húmedo y seco, con dos repeticiones, para obtener el rango completo de humedad del suelo. Para el nivel de saturación se utilizó un cilindro insertado en el suelo 0.15 m agregando cantidades de agua necesaria hasta saturar 0.60 m de profundidad (Figura 1b). Para el nivel húmedo se aplicó la mitad del agua del nivel saturado y el nivel seco no se aplicó agua en todo el periodo experimental. Posteriormente una vez logrados los tres niveles de humedad del suelo se excavo una zanja de 0,9 x 3.0 x 1.0 m mediante una retroexcavadora (Figura 1c). De esta forma los tubos de acceso quedaron alineados a cada lado de la zanja y 0.10 m del borde.

Posteriormente se realizaron las mediciones con las tres sondas y se tomaron muestras de suelo inalterado a cada lado del tubo y cada 0.1 m de profundidad. (Figura 1 d). Para las muestras de suelo se utilizaron cilindros de 0.05 m de diámetro por 0.051 m de altura. Con estas muestras se determinó el perfil de densidad aparente,  $D_a$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) y la humedad volumétrica  $\theta_v$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) del suelo utilizando el método gravimétrico.



Figura 1. a) Tubos de acceso, b) Cilindro para saturar el suelo, c) Zanja y d) Muestreo de suelo.

## RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los resultados del ajuste de calibración de cada una de las sondas. En el rango de humedad de las condiciones experimentales (0,08 a 0,33 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), para la sonda Envirosmart se realizó un ajuste no lineal de la forma  $\theta_v = aSF_b + C$ , siguiendo el Manual de Calibración del fabricante (Sentek, 2001), mientras que para las sondas C-probe el modelo que mejor se ajustó fue un modelo lineal de la forma  $\theta_v = aSV + b$

En cuanto a la densidad aparente, el suelo mostró un valor medio de  $D_a$  de 1,53 kg m<sup>-3</sup> constante en el perfil del suelo (CV < 3.3%).

Equipo	a	b	R <sup>2</sup>	RMSE	N
Enviroscan	0,385	2,795	0,754***	0,036	30
C-Probe I	0,513	0,012	0,665***	0,042	34
C-Probe II	0,555	0,007	0,595***	0,048	30

Tabla 1. Los coeficiente a y b corresponden a la ecuación de calibración  $\theta_v = aSF_b$ , para el caso del Envirosmart y  $\theta_v = aSV + b$  para el C-probe I y II, en donde R<sup>2</sup> es el coeficiente de

correlacion y n el tamaño muestral. RMSE es la raíz del cuadrado medio del error. (\*\*\*,  $p < 0.001$ )

Con la ecuación de calibración por defecto de la sonda EnviroSMART ( $A=0.1957$   $B=0.404$   $C=0.02852$ ) se sobreestimó el contenido de humedad del suelo en un 200% de media (Figura 2), mientras que las sondas C-probe I y II sólo sobreestimaron el contenido de humedad en un 55,5% y un 53,1%, respectivamente (Figura 3).

De las tres sondas capacitivas, el EnviroSMART mostro un mejor ajuste y mayor sensibilidad a las variaciones de humedad del suelo, ( $R^2 = 0,754$ ), frente a C-probe I ( $R^2 = 0,665$ ) y el C-probe II ( $R^2 = 0,595$ ), además de poseer un menor error (RMSE = 0,036) en los valores de  $\theta_v$  estimados por la sensores con respecto a  $\theta_v$  real (Cuadro 1).

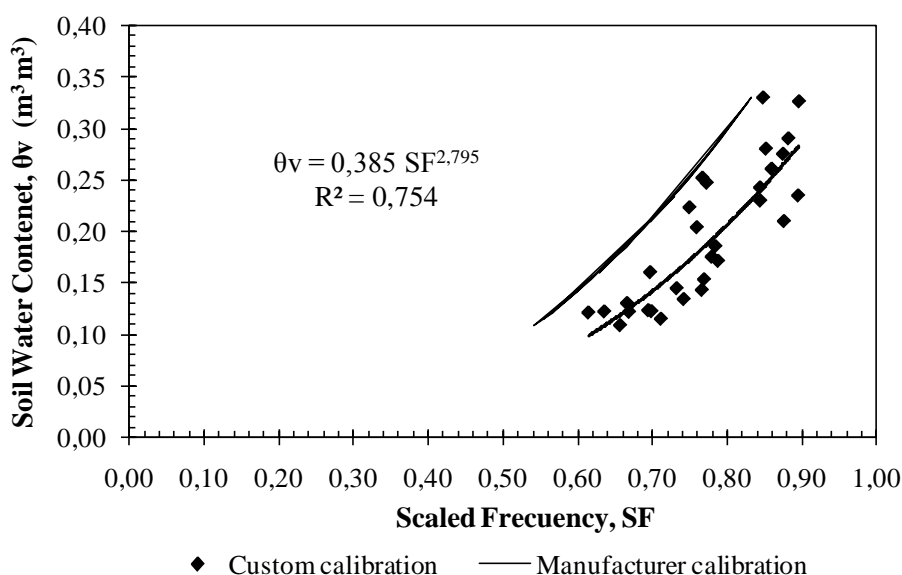


Figura 2. Comparación entre calibración obtenida para el EnviroSMART y la del fabricante.

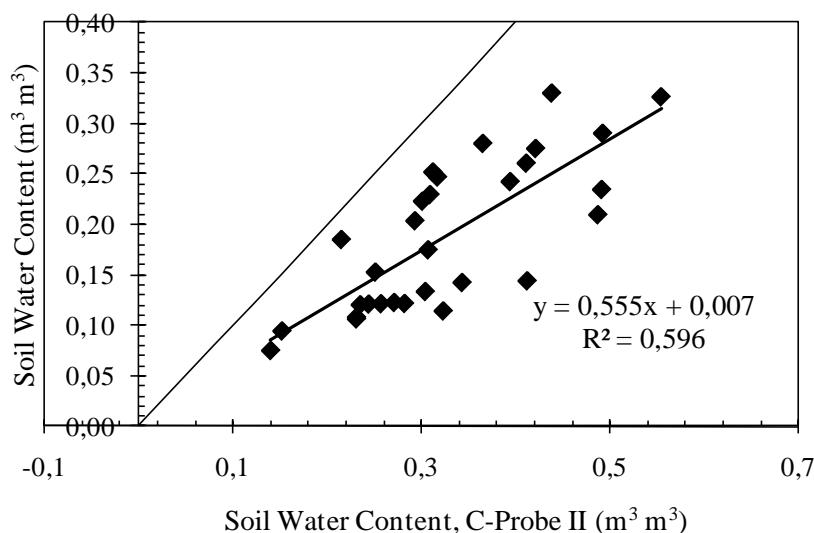
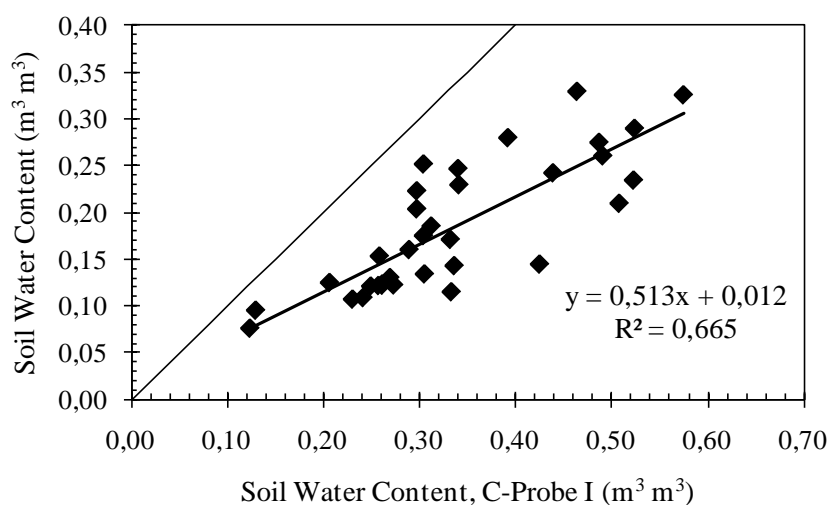


Figura 3. Calibración con sondas C-probe I y II.

Los coeficientes de correlación obtenidos para la sonda Envirosmart ( $R^2 = 0.754$ ) son sensiblemente inferiores a los obtenidos por otros autores como Paltineanu y Starr ( $R^2 = 0.98$ ) en condiciones de laboratorio y de Quemada ( $R^2 = 0.92$ ) en condiciones de campo. El motivo podría atribuirse a la presencia de piedras encontradas en el momento de realizar la instalación de los tubos de acceso que ha podido originar huecos de aire y/o compactación en el volumen de suelo explorado por el sensor.

Se puede concluir que la exactitud de estas sondas está fuertemente influenciada por las características del suelo y en particular por su pedregosidad y que para fines de investigación resulta imprescindible llevar a cabo un ensayo previo de calibración durante el período donde

el suelo alcance los valores más bajos de humedad con objeto de conseguir un rango mayor de humedad del suelo.

## REFERENCIAS

- Arregui, L. M. and M. Quemada. 2006. Drainage and nitrate leaching under different N fertilization strategies: application of capacitance probes. *Plant and Soil* 288: 57-69.
- Dean, T. J., Bell, J. P., and Baty, A. J. B. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. 1. Sensor design and performance. *J. Hydrol.* 93, 67–78.
- Evet, S.R., Laurent, J.P., Cepuder, P., Hignett, C., 2002a. Neutron scattering, capacitance, and TDR soil water content measurements compared on four continents. In: *Proceedings of the 17th Water Conservation Soil Society Symposium, Thailand*
- Evet, S.R., Ruthardt, B., Kottkamp, S., Howell, T., Scheneider, A., Tolk, J., 2002b. Accuracy and precision of soil water measurements by neutron, capacitance, and TDR methods. In: *Proceedings of the 17th Water Conservation Soil Society Symposium, Thailand.*
- Fares, A., Polyakov, V., 2006. Advances in crop water management using capacitance sensors. *Adv. Agron.* 90, 43–77.
- Gardner, C.M.K., D.A. Robinson, K. Blyth and J.O. Cooper. 2000. Soil water content. p. 1-64. In: K.A. Smith and C.E. Mullins (ed.). *Soil and environment analysis: Physical methods.* Marcel Dekker, New York.
- Kelleners, T.J., Soppe, R.W.O., Robinson, D.A., Schaap, M.G., Ayars, J.E., Skaggs, T.H., 2004. Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 430–439.
- Lukangu, G., Savage, M.J., Johnston, M.A., 1999. Use of sub-hourly soil water content measured with a frequency-domain reflectometry to schedule irrigation of cabbages. *Irrig. Sci.* 19, 7–13.
- Morgan, K. T., Parsons, L. R., Wheaton, T. A., Pitts, D. J., and Obreza, T. A. (1999). Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 987–989.
- Robinson, D. A., C.M.K. Gardner, J. Evans, J.D. Cooper, M.G. Hodnett and J.P. Bell. 1998. The dielectric calibration of capacitance probes for soil hydrology using on oscillation frequency response model. *Hydrol. Earth Sys. Sci.* 2:111-120.



Robinson, D. A. (2004). Calculation of the dielectric properties of temperate and tropical soil minerals from ion polarizabilities using the Clausius-Mosotti equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 1780–1785.

Paltineanu, I.C., Starr, J.L., 1997. Realtime soil water dynamics using multisensory capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1576–1585.

Starr, J. L., and Paltineanu, I. C. 1998. Soil water dynamics using multisensory capacitance probes in non-traYc interrows of corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 114–122.

Starr, J. L., and Paltineanu, I. C. 2002. Capacitance devices. In “Methods of Soil Analysis. Part 4. Book Ser. 5” (J. H. Dane and G. C. Topp, Eds.). SSSA, Madison, WI.

Thompson, R.B., Gallardo, M., Valdez, L.C., Fernández, M.D., 2007. Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors. *Agric. Water Manage.* 92, 13–28.

Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in co-axial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16, 574– 582.

Vera, J., O. Mounzer, M.C. Ruiz-Sanchez, I. Abrisqueta, L.M. Tapia, J.M. Abrisqueta. 2009. Soil water balance trial inducing capacitance and neutrón probes measurement. 98: 905-911.