

Comparación del funcionamiento de las sondas Diviner 2000, EC-5 y CS620 para determinar el contenido de agua en el suelo

Blasón, A.D.; Barrios, M.B. y Mollá Kralj, A.

RESUMEN

En la agricultura de secano es fundamental conocer la disponibilidad y variación espacio-temporal del contenido de agua en los suelos para evaluar la productividad de los cultivos. El presente trabajo presenta una metodología exploratoria de estandarización en laboratorio para caracterizar, calibrar y comparar los registros de tres tipos de sonda para medir humedad, en relación al contenido volumétrico de agua (θ_v) medido en el suelo por gravimetría. Se describe el volumen captado por la medición de las sondas, respuestas a la variación de temperatura, calibración particular, entre otros aspectos. Las sondas evaluadas fueron: Diviner 2000 Sentek (FDR), ECH₂O EC-5 Decagon Devices (FDR), CS620 Campbell Scientific (TDR). Las lecturas de las sondas resultaron notoriamente sensibles a la tensión de trabajo, lo cual hace necesario la incorporación de un regulador de voltaje que permita garantizar la calidad de las medidas. La temperatura de la electrónica de los sensores no afectó sensiblemente las lecturas de la sonda. El pequeño volumen medido permite el estudio detallado de microambientes; razón por la cual se debe elegir con cuidado el lugar de medición, ya que los resultados pueden verse afectados por materiales extraños al suelo o cavidades cercanas.

Palabras claves: humedad edáfica; sonda capacitiva; TDR; FDR

Blasón, A.D.; Barrios, M.B. and Mollá Kralj, A., 2022. Comparison of the performance of the Diviner 2000, EC-5 y CS620 probes to determine soil water content. RADA XIII: 15-22

SUMMARY

In rainfed agriculture it is fundamental to know the availability and spatio-temporal variation of the water content in the soil to evaluate the productivity of the crops. The present work presents an exploratory standardization methodology in the laboratory to characterize, calibrate and compare the records of three types of probes to measure humidity, in relation to the volumetric water content (θ_v) measured in the soil by gravimetry. The volume captured by the measurement of the probes, responses to temperature variation, particular calibration, among other aspects, are described. The probes evaluated were: Diviner 2000 Sentek (FDR), ECH₂O EC-5 Decagon Devices (FDR), CS620 Campbell Scientific (TDR). The readings of the probes were notoriously sensitive to the working voltage, which makes it necessary to incorporate a voltage regulator

to ensure the quality of the measurements. The temperature of the electronics of the sensors did not significantly affect the readings of the probe. The small volume measured allows the detailed study of microenvironments; this is why the measurement site must be chosen carefully, because the results may be affected by foreign materials in the soil or nearby cavities.

Key words: Soil moisture; capacitive probe; TDR; FDR

Blasón, A.D.: Cátedra de Agrometeorología, Barrios, M.B.: Cátedra de Edafología, Mollá Kralj, A.: Cátedra de Ecología y Fitogeografía; Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Ruta 4, km 2, Llavallol (1836), Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina. Tel. 0114 2826263/7905. Correspondencia a: adblason@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

En la agricultura es fundamental conocer la disponibilidad y variación espacio-temporal del contenido de agua en los suelos; y en especial el balance hídrico del horizonte explorado por las raíces. A la hora de evaluar ese contenido, la mayor dificultad radica en elegir los puntos más representativos del terreno para ubicar los sensores (Feres, 1997). Su variabilidad intrínseca hace necesario realizar muchas mediciones para inferir con exactitud el contenido de agua, por medio de sistemas portátiles de medición rápida y confiable para realizar el balance de agua en el suelo (Hidalgo *et al.*, 2003).

Existen diferentes métodos de medición de la humedad en el suelo: gravimetría, sonda de neutrones, reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) y en el de la frecuencia (FDR), entre otros; cada uno con ventajas e inconvenientes. La gravimetría es un método sencillo y muy fiable, su mayor inconveniente radica en ser destructivo, complicando el seguimiento exhaustivo de la humedad edáfica a lo largo del tiempo (Hidalgo *et al.*, 2003), y operativamente limitado por el número de muestras simultáneas a procesar. Entre los métodos de medición alternativos no destructivos más utilizados los: radioactivos, resistivos y capacitivos. La sonda de neutrones permite el seguimiento temporal con buen resultado, pero requiere de la calibración local de la misma. Además, es un equipo oneroso y con cierta peligrosidad de operación, requiriendo para ello una capacitación técnica especializada.

El avance en electrónica hizo posible dispositivos que basan su utilidad en la relación existente entre la constante dieléctrica de un medio, y la medición generada con campos electromagnéticos

a diferentes frecuencias (Smith-Rose, 1933). Tanto la técnica de reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR) (Hoeskstra y Delaney, 1974; Wobschall, 1978; Dean *et al.*, 1987; Hook *et al.*, 1992; Watson *et al.*, 1995; Nadler y Lapid, 1996) como en el dominio del tiempo (TDR) (Topp *et al.*, 1980; Topp y Davis, 1985; Green y Topp, 1992), utilizan la medición de la constante dieléctrica (K_s) del suelo (característica intrínseca de la mezcla suelo-agua-aire) que rodea a los sensores, para estimar de forma fiable el contenido de agua. La constante dieléctrica del agua pura (K_w) a 20 °C y 1 atm fue determinada en 80,4; siendo inversamente proporcional a la temperatura (West, 1980). En el suelo seco, la misma (K_{ss}) quedó comprendida entre 3 y 7; y para el aire (K_a) el valor resulta igual a 1.

Un sensor capacitivo actúa como parte de un acumulador, en el cual, los dipolos permanentes de las moléculas de agua en un medio dieléctrico se polarizan y alinean en un campo electromagnético. Esta propiedad resulta particularmente útil ya que el suelo se caracteriza por distinguir claramente los valores dieléctricos de cuatro componentes destacables: fase sólida, aire, agua disponible y no disponible para las plantas (Hallikainen *et al.*, 1985; Vaz, 2008).

Basados en la disimilitud de K_w respecto al K_{ss} de la fase sólida y al K_a del aire, los mencionados métodos captan el efecto que produce el contenido de agua retenida en el suelo de manera más lábil (en general meso y macroporos de flujo lento) o agua disponible, sobre la velocidad de propagación de una señal. Ésta es emitida sobre una guía de onda que se introduce en el suelo a modo de sensor o sonda, resultando la medición electromagnética proporcional al contenido de agua. Las lecturas deben ser luego corregidas

mediante ecuaciones que resultan en modelos de calibración, ya sean generales o particulares. Es así que, determinando la capacitancia, se obtiene la constante dieléctrica del medio y, en consecuencia, una correcta estimación del contenido de agua disponible en el suelo (Dean *et al.*, 1987).

La baja potencia del sistema FDR explora un pequeño volumen de suelo al realizar la medición. Esta particularidad limita su confiabilidad a la correcta instalación de la sonda, ya que no tolera separación alguna con el suelo, porque el aire extra circundante malogra la calidad de su medida (Hidalgo *et al.*, 2003). La sonda FDR Diviner 2000 (Sentek, 1999) consiste en un único sensor portátil capaz de determinar el contenido de agua en el suelo a intervalos regulares, desde los 10 cm hasta una profundidad de 1,6 m. Esta sonda es suministrada de fábrica con una calibración estándar, realizada para suelos ligeros de Australia. Por este motivo, se recomienda realizar una calibración local para cada suelo puesto que, de no hacerse, las mediciones resultan solo relativas y comparables entre ellas, perdiendo exactitud en los valores absolutos.

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología de estandarización en laboratorio para caracterizar, calibrar y comparar mediciones electromagnéticas arrojadas por tres tipos de sondas capacitivas, en relación al contenido volumétrico de agua (θ_v) medido en el suelo. Se analiza en particular la influencia del volumen captado por la medición de las sondas, el efecto de la variación de temperatura sobre las lecturas y la calibración general de grupo o particular para cada sonda cuando se cuenta con más de una del mismo tipo midiendo en un mismo suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las sondas evaluadas fueron: FDR modelo Diviner 2000 (Sentek, 1999), EcH₂O EC-5 (Decagon Devices Inc., 2006) y TDR modelo CS620 (Campbell Scientific Inc., 2001). La sonda Diviner 2000 fue alimentada, operada y leída mediante el adquisidor original provisto por el fabricante, en modo de lectura continua, para obtener en forma directa el valor de frecuencia observado (Raw count). La EC-5 fue alimentada, registrada y leída en forma directa mediante un adquisidor comercial de desarrollo local (Cavadevices), de similar prestación al adquisidor Em5 (data logger) recomendado por la firma Decagon Devices para realizar medidas con las EC-5. Se alimentó la sonda con una tensión regulada constante de 2,5

V y se evaluó su medición a través de la tensión de salida en mV, mediante una PC conectada al adquisidor con un programa de soporte lógico (firmware) diseñado para tal fin.

En el caso de la sonda TDR CS620 no se contó con su adquisidor asociado, motivo por el cual fue necesario confeccionar un dispositivo que permitiera su operación y lectura; detalles de su construcción y prestación se describen en un trabajo previo (Fernández *et al.*, 2008). A diferencia de otras similares, este modelo mide un punto sobre la señal reflejada en el final de la guía de onda antes de disparar un nuevo evento, y poder generar así, una salida que varía en frecuencia en lugar de analizar la onda entera, como en los TDR convencionales.

Con el fin de evaluar y comparar características del funcionamiento y medición de las sondas consideradas, se procedió a ordenar su análisis de acuerdo con los siguientes pasos:

Influencia de la tensión de alimentación

Dado el diseño de alimentación, lectura y registro de las sondas evaluadas, el presente análisis se pudo realizar sólo para la CS620 y la EC-5. No resultó posible llevarlo a cabo sobre la Diviner 2000, ya que la misma fue observada y alimentada con su adquisidor original con celdas recargables y función de batería baja, que impidieron su análisis.

Para el análisis se observaron lecturas pareadas, de tensión de alimentación de las sondas y sus respectivos registros tanto en frecuencia para la CS620, como en tensión para la EC-5. Las mediciones se realizaron sobre medios de constante dieléctrica conocida, aire y agua, en función de la variación de tensión de entrada utilizando una fuente variable regulada.

Influencia de la temperatura

Para evaluar si la temperatura del medio posee algún efecto sobre estas sondas, se procedió a generar un conjunto de lecturas con las mismas inmersas en agua en agitación a distintas temperaturas. Se controló la variación en la temperatura con un termómetro de uso oficial marca Siap de una décima de apreciación contraste 057/04 con corrección 0,2 °C a restar, dentro de un recipiente aislante en el rango de 0 a 50 °C, considerándolo suficiente para la mayoría de las mediciones posibles de ser realizadas con este instrumental.

Volumen captado por el sensor

Basado en antecedentes que mencionan la baja potencia, y por ende de medición puntual generada con este tipo de sondas, se diseñó un conjunto de experimentos para evaluar posibles cambios en las lecturas. Se estudiaron distintas respuestas: en el agua, a la variación de la distancia entre el extremo de las sondas y una superficie libre de agua y el extremo de las guías (axial); y con respecto a la distancia de la cara más externa de las varillas y el borde de recipiente (radial).

Calibración en laboratorio

La imposibilidad de realizar mediciones sobre lisímetros convencionales, nos condujo a readecuar las calibraciones del instrumental para la medición del agua edáfica. Se utilizó un microlisímetro para medir correctamente la evaporación del suelo según concluyó Flumignan *et al.* (2012). Por lo tanto, se readecó un recipiente a modo de microlisímetro conteniendo suelo del horizonte A superficial de un Argiacuol vértico con 39% arcilla, 53% limo y 8% arena muy fina, disponible experimentalmente en el sitio. Se comparó de forma pareada la variación de peso, con los valores de las sondas en función del contenido de agua dentro del mismo; exponiendo al suelo al secado natural por evaporación, desde capacidad de campo hasta peso constante.

Para el ensamblado y operación del microlisímetro, se utilizó un recipiente plástico cilíndrico de 10 litros de capacidad y una balanza digital de hasta 20 kg y 1 g de resolución, previamente calibrada. En su fondo se colocó una capa de grava (1-2 cm. Ø aprox.), hasta una altura de 3 cm desde su base. Coincidente con la base de la capa de grava, se instaló un pico de drenaje con filtro para percolación, previniendo así la pérdida de suelo. Se completó el recipiente con una muestra de suelo secada al aire y tamizada a 2850 μm , dejando un borde de aproximadamente 5 cm para evitar derrames durante las recargas. Conjuntamente con el suelo, fueron instalados tres sensores EC-5 y un tubo de acceso para la sonda Diviner 2000. Asimismo, se dispuso el tubo de acceso para la sonda Diviner 2000 en el centro del balde; y las EC-5 a 4,5 cm del mismo, formando un triángulo equilátero. Equidistantemente a 30 grados de las EC-5, se realizaron repetidamente las mediciones con la sonda CS620, pinchando cuidadosamente en los mismos orificios dejados en la primera lectura. La Figura 1 presenta detalles de la disposición de las sondas.

Una vez montado el dispositivo, se procedió

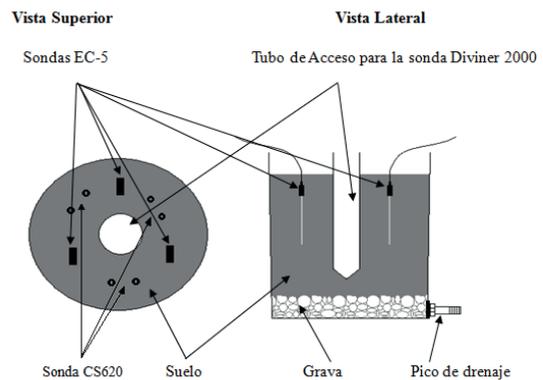


Figura 1. Esquema de construcción de un microlisímetro e instalación de sondas para la medición de la humedad edáfica.

a regar el mismo con una cantidad de agua suficiente para saturar el suelo, cuatro litros en este caso. Posteriormente, se lo dejó drenar durante 48 horas, recolectando y midiendo el exceso para calcular el contenido de agua aproximado al valor de capacidad de campo. Partiendo de esta condición, se procedió a cerrar el pico de drenaje y observar el periodo de desecación natural por evaporación hasta peso constante. Durante este lapso, se registraron de manera sistemática valores pareados del peso del microlisímetro y de las sondas testeadas. Dicho procedimiento fue repetido consecutivamente cuatro veces para su análisis y calibración en laboratorio. La Figura 2 presenta una fotografía del microlisímetro montado y en operación.



Figura 2. Microlisímetro en operación para la calibración de sondas a fin de medir la humedad edáfica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia de la tensión de alimentación

En la sonda Campbell CS620, el descenso de la frecuencia con la disminución de la tensión resultó lineal hasta los 4,7 V, como puede apreciarse en la Figura 3. Para mantener la precisión de medición, la caída de tensión de alimentación no debe superar los 20 mV por debajo de la tensión nominal de trabajo. Para conseguir y sostener la precisión en la medición, es necesario asegurar una tensión de alimentación del regulador de al menos 7,5 V; esto se consigue utilizando baterías de 9 a 12 V. Los presentes resultados se encuentran en concordancia con el alerta por batería baja que disponen los sistemas comerciales para garantizar la precisión de la medición.

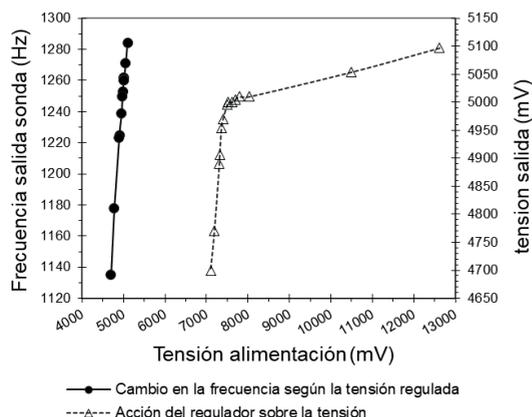


Figura 3. Variación de las lecturas de la sonda CS-620 al modificarse la tensión de alimentación sobre el regulador de suministro eléctrico, y curva de la acción del mismo en el rango de 4000 a 13000 mV

Con respecto a la sonda EC-5, la Figura 4 muestra como la caída de tensión de salida es prácticamente lineal en el rango de tensión de alimentación explorado (2100 mV – 3100 mV). Según el fabricante, la tensión nominal de alimentación es de 2500 mV. Un descenso en la tensión de alimentación de 100 mV (2400 mV) produce una lectura por defecto de unos 50 mV, lo que en términos de porcentaje de humedad edáfica representaría un error del 6 %. Por otra parte, un aumento en la tensión de alimentación de 100 mV produce una lectura por exceso de unos 70 mV, lo que en términos de porcentaje de humedad edáfica representaría un error del 8 %. A pesar de ser un sistema que mide con gran precisión, es altamente dependiente de la tensión

de alimentación, razón por la cual esta debe ser debidamente regulada.

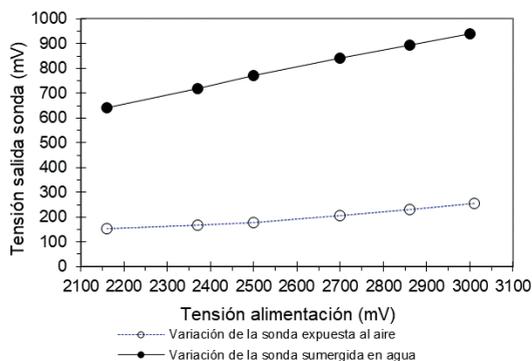


Figura 4. Variación de lecturas de la sonda EC-5 al variar la tensión de alimentación, al aire y sumergida en agua, en el rango de 2000 a 3000 mV

Cabe destacar que cuando se experimenta la variación de tensión de salida según la tensión de alimentación en el aire, la misma no es tan notoria como en el agua debido a su baja constante dieléctrica. Dicho efecto debe ser considerado más particularmente cuanto mayor sea la cantidad de agua que contenga el suelo.

Influencia de la temperatura

El efecto de la temperatura sobre la frecuencia que genera la sonda, resultó en una relación de forma curvilínea. Este comportamiento se debe al calor electrónico que actúa sobre los componentes del sensor, puesto que la constante dieléctrica del aire no cambia con la temperatura (Seyfried y Murdock, 2001).

Influencia de la temperatura en agua

Las Figuras 5, 6 y 7 muestran las relaciones resultantes, causadas por el cambio en la constante dieléctrica del agua con la temperatura, para las distintas sondas evaluadas. En el caso de la sonda EC-5 se aprecia una ligera sobreestimación en las lecturas con temperaturas inferiores a la nominal de trabajo de 20 °C, mientras que las superiores a ésta por el contrario subestiman dichas lecturas. El patrón de dispersión es debido a que se dispuso físicamente de tres dispositivos de este tipo, aunque la variación de lecturas a través del rango térmico es claramente lineal. En el mismo sentido, en la Figura 6 para la sonda Diviner 2000 y en la Figura 7 para la CS620, se observa el mismo patrón

lineal aún más claramente marcado por tratarse de la utilización repetida de solo una sonda. En ambos casos la relación resultó opuesta a la de EC-5, esto es que subestiman sus lecturas con temperaturas inferiores a 20 °C y los sobreestiman cuando la temperatura está por encima.

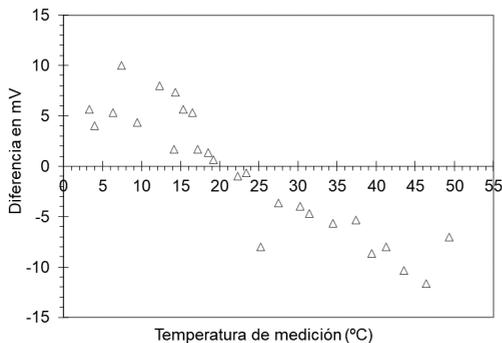


Figura 5. Diferencias entre las lecturas de sondas EC-5 en agua a distintas temperaturas con respecto a un valor de referencia de 20 °C.

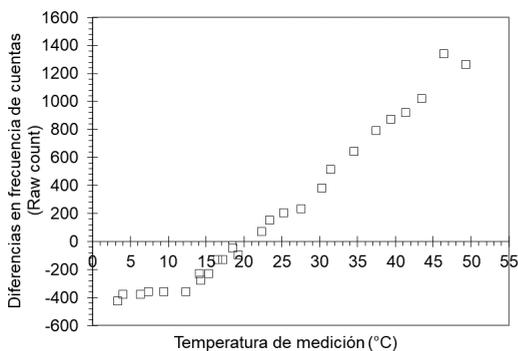


Figura 6. Diferencia entre las lecturas de una sonda Diviner 2000 en agua a distintas temperaturas con respecto a un valor de referencia de 20 °C.

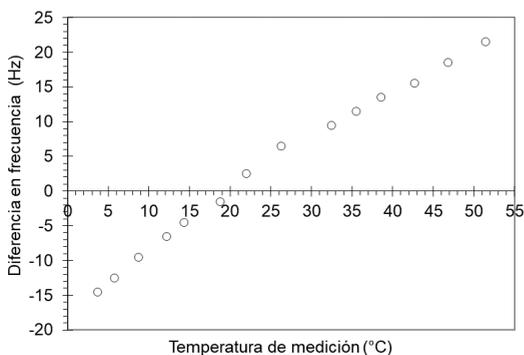


Figura 7. Diferencia entre las lecturas de una sonda CS620 Campbell en agua a distintas temperaturas con respecto a un valor de referencia de 20 °C.

La Tabla 1 presenta los resultados más destacados de las características funcionales de las sondas estudiadas. De las tres sondas experimentadas, la que mayor error arrojó por influencia de la temperatura fue la sonda CS620 (6,8 %). Dicho error se distribuyó más hacia temperaturas altas (4,1 %), que hacia temperaturas bajas (2,7 %). En este aspecto, la sonda que se comportó más simétricamente fue la EC-5, con un error del 3,7%, distribuido 1,7 % hacia temperaturas altas y un 2,0 % hacia temperaturas bajas. Sin embargo, esta sonda es la que mayor variabilidad presentó en sus lecturas a medida que variaba la temperatura, posiblemente producto de la evaluación de tres dispositivos de este tipo; observándose para las otras dos sondas con un único dispositivo evaluado de cada una, un comportamiento prácticamente invariable. Por último, la sonda Diviner 2000 presenta el menor error de las tres (2,4%), en su mayor parte debido a temperaturas altas. Se observa en la Figura 6 que por debajo de los 15 °C, la variación debida a temperatura es mínima.

Tabla 1. Rangos de medición, diferencias de lecturas respecto a referencia de temperatura de trabajo a 20 °C y estadísticos de error para cada tipo de sonda.

Parámetros de evaluación	Sonda		
	EC-5	Diviner	CS-620
Rango medición aire-agua a 20 °C (Ran)	580,0	75266,0	530,5
Diferencia máxima absoluta a 20 °C (DMA)	11,7	1343,0	21,5
DMA /Ran (%)	2,0	1,8	4,1
Raíz de la diferencia cuadrática media a 20 °C (RMSD)	6,2	578,7	12,0
RMSD / Ran (%)	1,1	0,8	2,3
Mayor diferencia (+)	10,0	1343,0	21,5
Mayor diferencia (-)	-11,7	-427,0	-14,5
Error positivo (%)	1,7	1,8	4,1
Error negativo (%)	-2,0	-0,6	-2,7
Máximo error (%) de lectura posible entre 3 y 55 °C	3,7	2,4	6,8
Máximo error de lámina (mm) por temperatura a CC			0,99

Volumen captado por las sondas

La sonda CS620 no responde a una distancia axial mayor a 4 cm (Figura 8) y a una distancia radial mayor a 3 cm (Figura 9). Esto resulta en un volumen de medición aproximado de 1 dm³, asumiendo una distribución esferoidal del campo generado por el sensor.

La sonda Diviner 2000 presenta varios aspectos

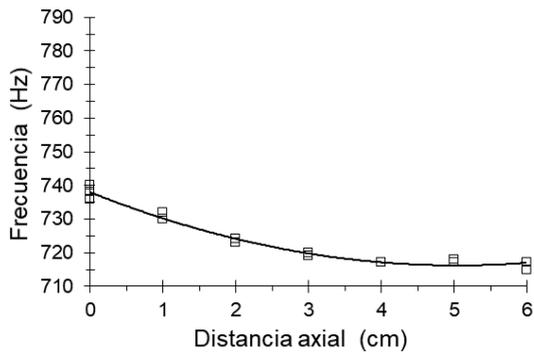


Figura 8. Relación entre la distancia axial y la frecuencia de la sonda CS620.

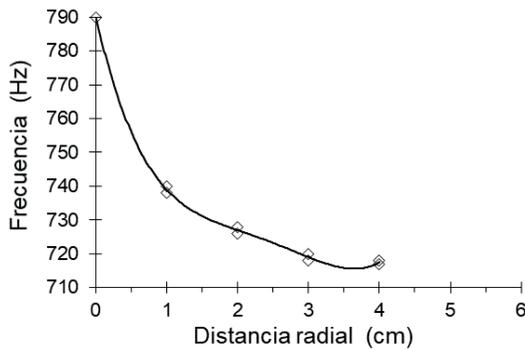


Figura 9. Relación entre la distancia radial y la frecuencia de la sonda CS620.

a tener en cuenta (Figura 10). El primero de ellos, es la atenuación que produce el caño de acceso. Cuando se usa la sonda con el caño de acceso suministrado por el fabricante, el rango de lectura es de unas 40.000 cuentas, mientras que con la sonda desnuda este rango aumenta a 75.000. Además, los valores máximos de lectura en cada caso (con y sin caño) al aire son más próximos que dichos valores en agua. Esto es debido a que la atenuación originada por el caño en el agua se ve multiplicado por su elevada constante dieléctrica, que es unas 80 veces mayor que la del aire. Por último, definimos que la distancia axial que capta el sensor con caño es de aproximadamente 40 mm, y la distancia radial de 15 mm (Figura 11). Cabe destacar que la mayor intensidad del campo magnético se encuentra en los primeros 5 mm. Este fenómeno se puede juzgar, por el cambio de pendiente en la curva entre los 5 mm iniciales y los siguientes 10 mm.

En la Figura 12 y 13, se aprecia que la sonda EC-5 no responde a una distancia mayor de 70 mm en sentido axial y a 30 mm en sentido radial.

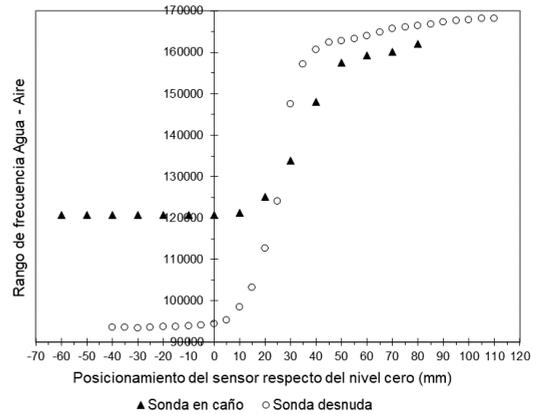


Figura 10. Distancia axial captada por la sonda Diviner 2000 y la atenuación causada por el tubo de acceso.

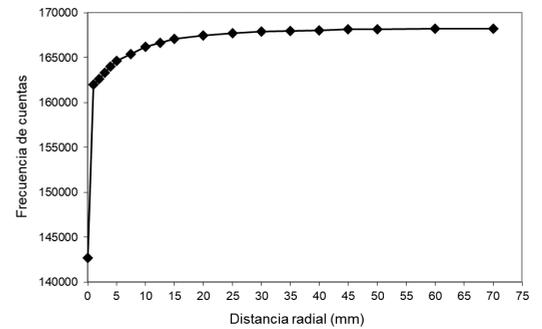


Figura 11. Distancia radial captada por la sonda Diviner 2000.

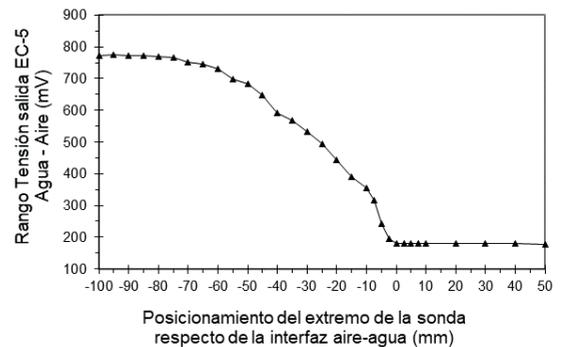


Figura 12. Distancia axial captada por la sonda EC-5.

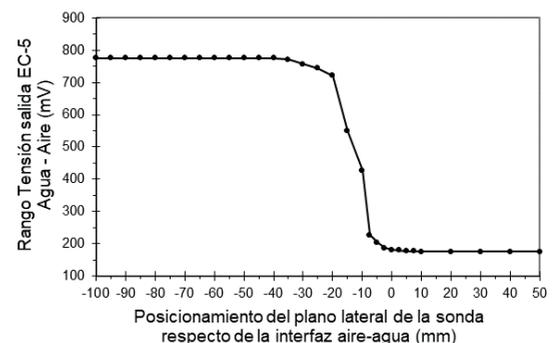


Figura 13. Distancia radial captada por la sonda EC-5.

Conclusiones

La lectura de las sondas es notoriamente sensible a la tensión nominal de trabajo. Esto hace necesario la incorporación de un regulador de voltaje con capacidad de establecer un corte al menos de la tensión mínima de trabajo que garantice la fiabilidad de los valores observados. Además, la temperatura de la electrónica del sensor no afecta sensiblemente la lectura de las sondas. También es importante destacar, que el pequeño volumen de suelo medido sólo alcanza para conocer en detalle la humedad de microambientes. En este sentido, al explorar poco volumen de suelo se debe elegir con cuidado el lugar de medición, ya que los resultados pueden verse notoriamente afectados por materiales atípicos del suelo o cavidades de aire cercanas.

BIBLIOGRAFÍA

- Campbell Scientific Inc., 2001. HydroSense Instruction manual. Campbell Scientific, Logan, UT. 28 pp.
- Dean, T.J.; J.P. Bell and A.J. Baty, 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. Part I. Senso design and performance. *J. Hydrol.* 93: 67-78.
- Decagon Devices Inc., 2006. ECH2O Probe User's Manual. <http://www.decagon.com/literature/manuals/echomanual.pdf> (Consultada el 15/10/2020).
- Fereres, E., 1997. Irrigation scheduling of horticultural crops. *Proc 2nd Int. Sym. On Irrigation of Hort. Crops*. Ed K.S. Chartzoulakis. *Act Horticulturæ* 449 (1) 253-258.
- Fernández, N.R.; A.D. Blasón y A. Moltoni, 2008. Comportamiento de una sonda (TDR) para medir la humedad edáfica: Evaluación en distintos medios y condiciones. *Actas de la XII Reunión Argentina de Agrometeorología, (AADA)*. San Salvador de Jujuy, Argentina. 8 al 10 de Octubre de 2008. CD.
- Flumignan, D.L.; R.T. Faria and B.P. Lena, 2012. Test of a microlysimeter for measurement of soil evaporation. *Engenharia Agrícola* 32(1) 80-90. <https://www.scielo.br/j/eagri/a/dWpWy8kfszP7C38TVJvTtcm/?format=pdf&lang=en> (Consultada el 12/11/2020).
- Green, R.E. and G.C. Topp, 1992. Survey of use of field methods for measuring soil hydraulic properties. G.C. Topp et al (ed). *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. SSSA Spec. Publ. 30. SSSA. Madison, WI, pp. 281-288.
- Hallikainen, M.T.; F.T. Ulaby, M.C. Dobson, M.A. El-Rayes and L.K. Wu, 1985. Microwave dielectric behavior of wet-soil. Part I: Empirical models and experimental observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 26:2311-2316.
- Hidalgo, J.; M. Pastor y J.C. Hidalgo, 2003. Evaluación de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riegos en olivar. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI*. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero, pp. 171-176.
- Hoekstra, T.J. and A. Delaney, 1974. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *J. Geophys* 79:1699-1708.
- Hook, H.R.; N.J. Livingston, Z.J. Sun and P.B. Hook, 1992. Remote diode shorting improves measurement of soil water by domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1384-1391.
- Nadler, A. and Y. Lapid, 1996. An improved capacitance sensor for in situ monitoring of soil moisture. *Aust. J. Soil* 34:361-368.
- Sentek, 1999. Diviner 2000. User Guide Version 1.5. Sentek, Pty. Australia. 88 pp.
- Seyfried, M.S. and 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.
- Smith-Rose, R.L., 1933. The electrical properties of soils for alternating currents at radio frequencies. *Proc. R. Soc. London* 140-359.
- Topp, G.C. and J.L. Davis, 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.; J.L. Davis and A.P. Annan, 1980. Electromagnetic determination of soil water content using TDR. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:672-678.
- Vaz, C., 2008. Aplicabilidade e limitações da TDR para a medida da umidade em solos brasileiros. In *Embrapa Instrumentação-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. En: II Workshop de aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental. Unitaú de Taubaté, Brasil, pp. 96-116. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/31137/1/proci08.00052.PDF> (Consultada el 08/11/2020).
- Watson, K.; R. Gatto, P. Weir and P. Buss, 1995. Moisture and salinity sensor and method of use. U.S. Patent 5418466. 15 pp.
- West, R.C. (ed.), 1980. *Handbook of chemistry and physics*. 61st ed. CRC Press, Boca Raton. FL. 398 pp.
- Wobschall, D., 1978. A frequency shift dielectric soil moisture sensor. *IEEE Trans. Geosci. Electron* 16:112-118.