

EVALUACIÓN DE 24 SONDAS DE HUMEDAD: CALIBRACIÓN Y VOLUMEN DE INFLUENCIA

I. Iturria¹, I., M.A. Campo-Bescós^{1*}, U. Gómez¹, M. López¹, R. Giménez¹

¹Departamento de Ingeniería, Ed. Los Olivos, Universidad Pública de Navarra, 31006 Pamplona, miguel.campo@unavarra.es

RESUMEN. La monitorización del contenido de humedad del suelo en continuo es clave para comprender la dinámica del agua en la zona no saturada. A día de hoy, existen diferentes sensores electromagnéticos para la estimación del contenido volumétrico en aplicaciones agrícolas o ambientales. Disponibles bajo diferentes formas y nombres comerciales. Cada sonda posee una función de calibración genérica proporcionada, en la mayoría de los casos, por el fabricante, así como una estimación del volumen de influencia que explora el sensor. El objetivo de este trabajo ha sido evaluar el funcionamiento de 24 sondas comerciales y sondas procedentes del mundo aficionado (maker), en 3 suelos de textura contrastante y analizar el volumen de influencia de cada una de las sondas. Los primeros resultados muestran variaciones de error 2-8% RMSE. El volumen de influencia de las zonas analizadas se encuentra en el rango de 0,09-1509cm³.

ABSTRACT. Continuous soil moisture content monitoring is key to understand the soil water dynamics in the vadose zone. There are a wide variety of electromagnetic sensors for estimating soil volumetric content for agricultural or environmental applications. For each sensor the manufacturer usually provides both a calibration function and an estimation of the reading volume of the device. The objective of this work is to evaluate the performance – regarding accuracy and effective reading volume– of a wide variety of soil water sensors and to compare these results with those provided by the respective manufacturer. Twenty four different electromagnetic sensors representative of the current best known commercial brands and the so-called makers (amateurs) also were analyzed in the lab using 3 soils of contrasting texture. The Root Mean Square Errors of the reading ranged from 2 to 8%. The reading volume of the different probes ranged from 0.5 to 1520.8 cm³.

1.- Introducción

La medición continua de la humedad del suelo es una variable importante debido a que permite conocer la disponibilidad del agua por cultivos (Mzezewa et al., 2011), y permite realizar una gestión integral del riego (Kizito et al., 2008), siendo una variable hidrológica y climática fundamental (Mittelbach et al., 2012).

Los sensores de humedad del suelo se pueden clasificar por las diferentes tecnologías que utilizan (Muñoz-Carpena et al., 2005). Así nos encontramos los métodos más tradicionales

como el método gravimétrico/volumétrico, hasta la aparición de sondas de neutrones (Jorapur et al., 2015; Susha Lekshmi et al, 2014), sondas que miden la constante dieléctrica del suelo como las Time Domain Reflectometry (TDR) (Clarke Topp y Reynolds, 1998; Walker et al, 2004), sondas capacitivas (Bello et al., 2019; Bogen et al., 2007) o las que estiman la resistencia del medio al paso eléctrico como las sondas resistivas (Kalita et al., 2016). La tecnología ha ido evolucionando con la aparición de otras tecnologías como Dual-Probe Heat-Pulse (DPHP) (Ravazzani, 2017), Time Domain Transmission (TDT) (Blonquist et al., 2005) o Coaxial Impedance Dielectric Reflectometry. Además, los métodos pueden ser destructivos (por ej. el método gravimétrico) o no destructivos: TDR, TDT (Time Domain Transmission), FDR (Frequency Domain Reflectometry) ADR (Amplitude Domain Reflectometry) (Muñoz-Carpena et al., 2005).

Entre los métodos para determinar el contenido volumétrico de agua en el suelo (Θ), destacan los sensores electromagnéticos que permiten estimar la permitividad dieléctrica del suelo (ϵ). Las ventajas de estos sensores son varias, entre ellas como destacan Vaz et al. (2013) i) no usa radiación y se pueden usar cerca de la superficie del suelo, ii) no son invasivos, iii) permiten una medición continua de la humedad del suelo, y iv) se pueden utilizar en la mayoría de suelos y sustratos. Su uso se ha generalizado con la aparición de diversos sensores comerciales debido a que estas tecnologías permiten conocer en tiempo real el estado hídrico del suelo y actuar en consecuencia más rápidamente.

Existe una amplia gama de sondas en el mercado, pero su coste supone una limitación para su uso extensivo (González-Teruel et al., 2019). Por este motivo, debido a su sencillo funcionamiento y facilidad de implementación las sondas capacitivas se presentan como una alternativa cada vez más común y asequible, muchas de ellas procedentes del mundo aficionado (“maker”). Pero estas últimas todavía no han recibido la adecuada evaluación, lo que genera incertidumbre en la calidad de los datos recogidos.

En este trabajo se ha llevado a cabo una evaluación de 24 sondas de humedad de suelo de reconocidas casas comerciales y prototipos de sondas de bajo coste. El objetivo del mismo es, por un lado, evaluar y calibrar cada una de las sondas en materiales de textura contrastante, y por otro lado determinar el volumen explorado por cada una de ellas.

Hasta donde sabemos, este es el primer trabajo donde se realiza una exhaustiva evaluación de un número tan importante de sondas de humedad.

2.- Materiales y métodos

2.1. Materiales

Se emplearon 3 suelos contrastantes (Tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de arena, limo y arcilla para cada suelo utilizado.

	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Arena Gruesa (USDA)	7,5	80,9	27,4
Arena Fina (USDA)	14,6	12,8	20,1
Limos Gruesos (USDA)	18,1	2,3	12,7
Limos Finos (USDA)	29,2	1,0	19,4
Arena	22,1	93,7	47,5
Limo	47,3	3,3	32,1
Arcillas	30,6	3,0	20,4
pH	8,1	8,5	7,8
M.O. (%)	2,18	0,51	3,17
CE (dS/m)	1,18	0,24	2,81
Textura	Franco Arcillosa	Arenosa	Franca

2.2. Sondas de humedad

En el estudio se han utilizado 24 sondas de humedad (Tabla 2), tratando de recoger prácticamente la totalidad de las sondas disponibles a día de hoy. Dada la amplia variedad de sensores ha sido necesario emplear tres modelos de registradores (dataloggers) para recoger los datos.

Los registros de las sondas de humedad de bajo coste I2C Capacitive Soil Moisture, Temperature and EC sensor (TINOVÍ), WaterScout (Spectrum), DF robot (DFrobot), SoilWatch 10 (Pinotech), Vegetronix VH400 y Chirp.) han sido realizados utilizando una placa Arduino UNO.

Las sondas de Decagon han sido utilizadas a través del datalogger em50 que permite obtener las lecturas tanto crudas como transformadas a contenido volumétrico de agua (Θ). En este caso se ha utilizado el software ECH2O Utility para programar el datalogger.

El resto de sondas han sido conectadas a un datalogger CR10X de CampbellScientific mediante el protocolo de comunicación SDI-12. Para programar el datalogger CR10X se han utilizado los programas PC200W y ShortCut.

Debido a que muchas de las sondas disponen de varios sensores de humedad, en este trabajo tan solo se ha evaluado un sensor por sonda.

Tabla 2. Sondas de humedad evaluadas.

Nombre	Casa	Tipo	Precios	Forma*
Soil Watch 10	Pino-Tech	Capacitiva	<50€	1P
10HS	Decagon	Capacitiva	50-150€	2P
5TE	Decagon	Capacitiva	>250€	3P
EC 5	Decagon	Capacitiva	150-250€	2P
TEROS 12	Decagon	Capacitiva	150-250€	3C
GS 1	Decagon	Capacitiva	50-150€	2C
Vegetronix VH400	Vegetronix	Capacitiva	<50€	1P
Chirp	Wemakethings	Capacitiva	<50€	1P
DF robot	DF robot	Capacitiva	<50€	1P
Hydra-Probe II	Stevens	Capacitiva	>250€	4C
Drill & Drop Probe, 60cm TriSCAN	Sentek	Capacitiva	150-250€	1C
Drill & Drop Probe, 60 cm Moisture	Sentek	Capacitiva	50-150€	1C
HydraSCOUT 700mm	HSTI	Capacitiva	50-150€	1C
Sub-Surface Probe	Aquacheck	Capacitiva	50-150€	1C
Classic Probe	Aquacheck	Capacitiva	50-150€	1C
I2C Capacitive Soil Moisture sensor	Tinovi	Capacitiva	<50€	1P
TEROS 10	Decagon	Capacitiva	50-150€	2C
CS655	Campbell Scientific	Capacitiva	150-250€	2C
HD3910.1	Delta ohm	Capacitiva	150-250€	2P
HD3910.2	Delta ohm	Capacitiva	150-250€	3P
GroPoint Profile	GroPoint	TDT	150-250€	1P
GroPoint Lite	GroPoint	TDT	150-250€	1P
GroPoint Pro	GroPoint	TDT	>250€	1P
WaterScout	Spectrum	Capacitiva	<50€	1P

*El número indica la cantidad de elementos a introducir en el suelo y las letras la forma del elemento, C: cilíndrico y P: planar.

2.3. Diseño experimental

Calibración de sondas

Cada suelo utilizado se seca al aire y luego se tamiza (4 mm). A continuación, se lleva a estufa (105°, 24h), para asegurar un contenido de humedad de referencia que llamaremos cero. Este material se vuelca sobre un contenedor hasta ocupar 10 litros. Luego se agrega un

volumen de agua, fracción del total (10 litros), de tal manera de definir un cierto contenido hídrico volumétrico (ej, 10% de contenido hídrico se lograría agregando 1 litro de agua a los 10 litros) y se mezcla. Se almacena en un depósito estanco por 24h para que el agua se redistribuya por capilaridad, por todo el volumen de suelo. A continuación, parte de este suelo se retira para rellenar un recipiente graduado. El relleno se hace de tal manera de que una determinada cantidad (peso) de suelo termine ocupando un cierto volumen del recipiente; para esto el suelo se compacta gradualmente a medida que el recipiente se rellena. Se busca, en definitiva, asegurar un valor constante de densidad aparente, y próximo al que presentaría el suelo en condiciones naturales.

Sobre este suelo se coloca la sonda de humedad a evaluar y se extrae con un pequeño cilindro –lejos de la zona de lectura de la sonda– un volumen constante de suelo. Esta muestra será secada en estufa para poder determinar así, con exactitud, el contenido hídrico volumétrico del suelo al momento del ensayo (valor de referencia). A continuación, se realizan lecturas con la sonda. Una vez finalizado el ensayo, todo el suelo es devuelto al recipiente original de 10 litros, donde es mezclado con el suelo remanente; quedando así listo para repetir la operación, esta vez, con una sonda distinta.

Toda esta experimentación se repite con cada material/suelo (3), cada una de las sondas (24) y bajo 5-6 diferentes contenidos de humedad (entre un rango de 0 a 30%), resultando así un total de más de 350 tratamientos.

Con los datos de humedad y las lecturas crudas de las sondas se ha obtenido una ecuación de calibración para cada sonda. Debido a que la cantidad de mediciones/muestras obtenidas en cada tipo de material es reducida, como primer paso se ha procedido a realizar un ajuste lineal.

$$y = ax + b \quad (1)$$

Donde:

y = contenido volumétrico real

x = lectura de la sonda

a = pendiente

b = punto de intersección en la ordenada o intercepto

El objetivo de la calibración es obtener los valores de pendiente e intercepto de la ecuación de tal forma que se obtenga una recta capaz de relacionar los valores de las lecturas con la humedad del suelo determinada.

Para evaluar la precisión de cada sonda se ha obtenido el error cuadrático medio (RMSE) y el índice Nash-Sutcliffe (NSE) de cada una de las ecuaciones de calibración.

Volumen explorado por cada sensor

El volumen explorado para cada sonda se ha caracterizado registrando lecturas mientras las sondas se aproximan de un medio con una constante dieléctrica contrastante (Benninga et al., 2018; Paltineanu y Starr, 2010), en este caso aire y agua, realizando las medidas en

las dos direcciones (agua-aire, aire-agua). Se han realizado medidas de forma continua para determinar el punto en el que cambia esta medida (Kuo, 2007; Sakaki et al., 2008) y se ha anotado la distancia desde un punto identificable en la propia sonda (este punto varía de una sonda a otra, por la diferente morfología que tienen). Para limitar el efecto de las variaciones de contenido de humedad cerca de la superficie de agua (capa límite) se ha utilizado un film plástico para asegurar la separación de los dos medios, aire y agua. Este proceso se ha realizado en todas las posiciones posibles con cada sonda, de tal forma que al final del proceso es posible aproximar el volumen explorado por cada una de ellas (Fig. 1).

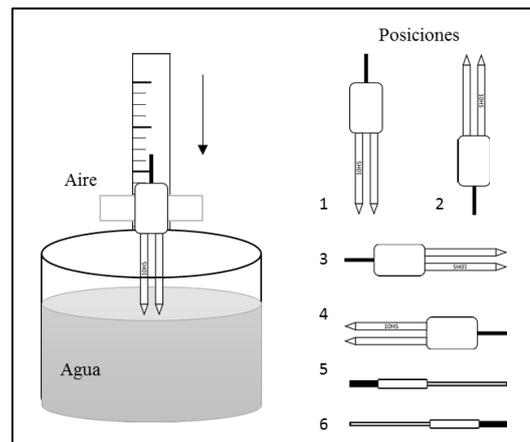


Fig 1. Esquema del método empleado para realizar la caracterización del volumen explorado de las sondas y las posiciones en las que se ha llevado a cabo.

Para poder realizar una medición precisa se ha utilizado una plataforma con un soporte vertical graduado y un mecanismo para controlar el desplazamiento de forma precisa de cada una de las sondas evaluadas. En la base de la plataforma se ha colocado un cubo con agua, de tal forma que se ha tomado como punto de referencia la altura determinada por la lámina de agua.

Algunas de las sondas de bajo coste, no contaban con el aislamiento necesario para ser sumergidas en agua, es por ello que ha sido necesario proporcionarles un aislamiento de forma manual. Para ello se ha utilizado silicona en cinta, cinta aislante y finalmente se ha recubierto de plástico termo retráctil. El correcto funcionamiento de las sondas ha sido verificado después de realizar el proceso de aislamiento, comparando las mediciones de antes y después de ser sumergidas en agua.

La variación de las lecturas se va dando de forma progresiva a medida que la sonda se acerca al medio contrastante (agua en este caso). Este dato es relevante debido a que la medición de la sonda varía para un mismo punto y dificulta a la hora de determinar si la alteración detectada es el resultado de la aproximación al medio o de la propia variabilidad de la sonda.

Este ensayo se ha llevado a cabo teniendo en cuenta la existencia de esta variación y con objetivo de minimizar el posible error de interpretación, se han realizado mediciones por cada cm aproximado hasta detectar un cambio. En ese momento se vuelve al cm anterior, y se repite el proceso en cada mm aproximado. De esta forma se detecta el cambio de medio con una mayor precisión.

A la hora de realizar el cálculo de volumen explorado, se ha tenido en cuenta que la superficie generada por los ejes perpendiculares a la sonda forma una elipse (Fig. 1), pudiendo estar desplazado el centro del eje central de la sonda. Obteniendo el producto de dicha superficie y la distancia vertical explorada por las sondas se ha obtenido el volumen explorado (Fig. 2).

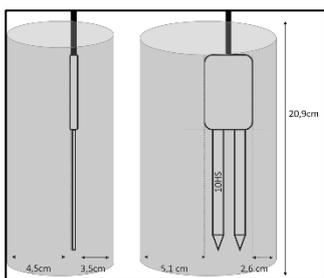


Fig 2. Ejemplo de procedimiento de cálculo del volumen explorado por cada sonda.

3.- Resultados

3.1. Ecuaciones de calibración

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las ecuaciones de calibración de cada sonda. En la Fig. 4 se muestran las raíces de los errores cuadráticos medios (RMSE) para comparar la precisión obtenida por cada una de ellas. En la Fig. 3 se describe por un lado la ecuación particular obtenida para cada tipo de material (arenoso, franco arcilloso y franco) y la ecuación genérica obtenida utilizando todos los datos.

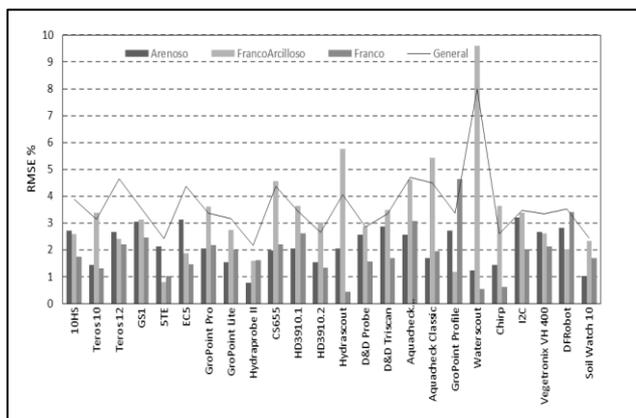


Fig 3. Análisis comparativo del RMSE obtenido para cada ecuación de calibración de las sondas en los diferentes suelos y la ecuación de calibración general.

Como se puede apreciar en la Fig. 3, en la columna correspondiente al suelo arenoso, la sonda cuya calibración obtiene mejores resultados es la Hydraprobe II con un RMSE inferior a 0,6% y un NSE superior al 0,95 siendo seguido por las sondas SoilWatch y Waterscout con un RMSE entre 1-1,5%. Se puede apreciar que las calibraciones realizadas para las sondas de bajo coste (low-cost) tienen buena precisión en suelos arenosos exceptuando la sonda I2C.

En el suelo de textura arcillosa la precisión general de las calibraciones baja, siendo la 5TE la que mejores resultados obtiene, seguido de la GroPoint Profile. Además, se muestra gran variabilidad entre los errores cometidos por unas sondas y otras. Ocurre algo similar en el ensayo realizado por (Varble y Chávez, 2011) apreciando un menor ajuste en suelos con mayor contenido en arcilla frente a suelos de otras clases texturales.

El ajuste de las sondas ha sido superior en el suelo de clase textural franca, se percibe que la precisión general de las calibraciones mejora, exceptuando GroPoint y DFRobot, el RMSE es inferior del 3%. Destacan principalmente la Hydrascout (0,43%) y la Chrip (0,69%).

En la calibración general de las sondas se puede observar que en general la ecuación que mejor se ajusta a cualquier tipo de suelo es la Hydraprobe II de Stevens con un RMSE de 2,17%. Lo que concuerda con lo obtenido en (Mortl et al., 2011) quienes observaron que HydraProbe (Stevens) era la mejor entre las que no son TDR (ya que opera a una frecuencia mucho más alta que las otras económicas, aunque sin llegar al TDR), es robusta y además permite medir salinidad.

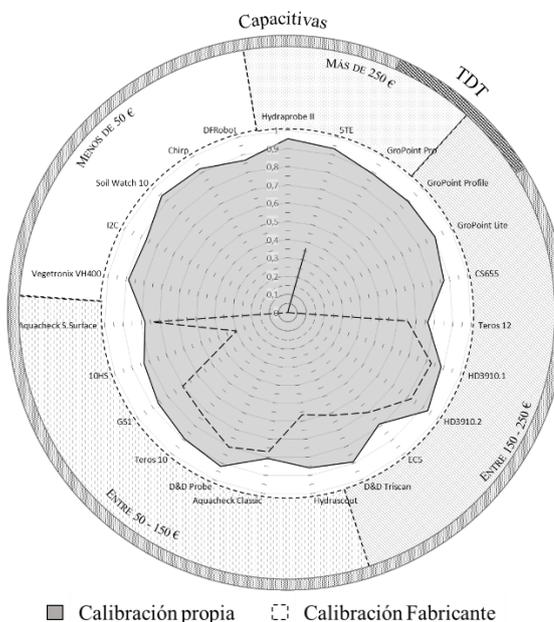


Fig 4. Comparación del NSE para la calibración general, considerando los tres suelos, y la proporcionada por el fabricante (si existe) de cada sonda, agrupados por tipo tecnología utilizada y rangos de precios.

En la Fig. 4 se presenta el NSE obtenido de la ecuación de calibración calculada mediante el ensayo, frente a la ecuación de calibración aportada por el fabricante (solo en las que se conoce la ecuación). Las sondas se muestran agrupadas por rangos de coste económico (en euros) y por la tecnología que utilizan para estimar la humedad.

Observando la Fig. 4, se puede apreciar que la calibración realizada en laboratorio genera unas estimaciones más precisas que las ecuaciones que vienen implementadas por defecto por los fabricantes. Por lo que es muy recomendable realizar calibraciones en el caso de necesitar unas lecturas precisas de la humedad del suelo.

3.2. Volumen explorado por sonda

A modo de ejemplo en la Fig. 5 se presenta la variación de las lecturas en función de la distancia a la superficie del agua en una determinada configuración de la sonda 10HS.

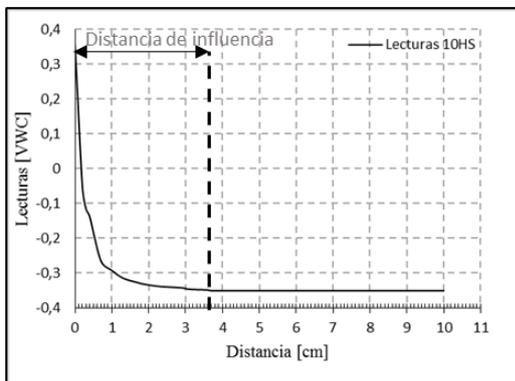


Fig 5. Evolución de las lecturas de la sonda 10HS en función de la distancia [cm] a la lámina de agua.

Se puede apreciar que la distancia de influencia es interpretable, en este caso se ha tomado en cuenta cuando la lectura ha demostrado valores fuera del rango de variabilidad natural para el punto.

En la Fig. 6 se muestra el volumen explorado por cada uno de los sensores de las sondas evaluadas en el estudio. Los resultados muestran que hay diferencias superiores a 1000 cm³ de volumen explorado entre las sondas evaluadas. Según los ensayos realizados se puede apreciar que la sonda que más volumen explora es la 10HS (1509,43 cm³), seguido del resto de sondas de tipo cilíndrico que por su longitud permiten explorar un mayor volumen de suelo. Resulta interesante la observación de que las sondas de bajo coste tienden a explorar un menor volumen que las demás, aun así, la que menor volumen explora es la I2C (0,09 cm³), seguido por las ya comentadas sondas de bajo coste.

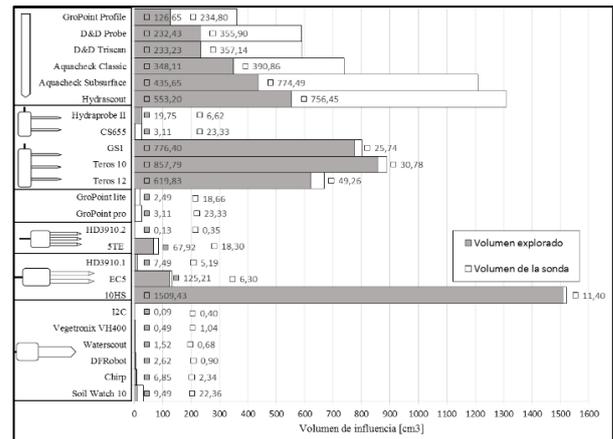


Fig 6. Volumen explorado por cada sonda en cm³.

En cuanto a la bibliografía consultada a la hora de validar los resultados obtenidos, se ha percibido que hay gran variabilidad de volumen para una misma sonda en diferentes ensayos (Sakaki et al., 2008; Vaz et al., 2013) y los datos que aportan los fabricantes. Por ejemplo, el volumen explorado de la sonda EC-5 varía desde 18 cm³ observados en la literatura hasta los 240 cm³ aportado por el fabricante, con un valor de 127,51 estimado en este trabajo.

Cabe mencionar que en las sondas cilíndricas el volumen de suelo explorado supone un volumen en el rango del 53% al 90% del volumen de la propia sonda.

4.- Conclusiones

De forma preliminar, en el presente estudio se puede concluir que las sondas evaluadas en los 3 diferentes materiales poseen calibraciones dispares lo que hace necesario una calibración específica para cada tipo de suelo/material si se desea obtener resultados fiables.

Las sondas evaluadas en condiciones de laboratorio poseen errores por tipo de suelo diferentes. Los resultados preliminares muestran que existen diferencias en la media de los errores cuadráticos medios de las sondas en función del suelo. Así, el suelo franco es la textura que presenta menores errores, seguido del material arenoso y finalmente el arcilloso. Es por ello por lo que se considera el más favorable para determinar el contenido volumétrico de agua. En el caso de desear analizar otro tipo de textura puede ser interesante escoger un tipo de sonda dependiendo del modelo que mejor se adapte a la textura.

No se han detectado diferencias significativas en la precisión de las medidas entre sondas de bajo coste y sondas de un precio más elevado. Los resultados obtenidos con las sondas de bajo coste han presentado unos errores cuadráticos medios muy similares a las sondas de mayor coste, aunque bien es cierto, que estos resultados corresponden a ensayos realizados en laboratorio y es posible que el comportamiento de estas

sondas se vea alterado en condiciones de campo donde variables como la temperatura, presencia de sales y la estructura del suelo puedan afectar la fiabilidad de la lectura.

Del estudio del volumen de suelo explorado se puede concluir que las sondas de bajo coste exploran un volumen más reducido que sus competidoras comerciales de amplia difusión, a excepción de la SoilWatch de Pinotech. Esto último puede ser considerado una desventaja como herramienta para la gestión de riegos, pero una ventaja en ciertos estudios de investigación en campo y/o laboratorio.

Como parte limitante del estudio y en lo que se prevé trabajar como siguiente línea de investigación, es aumentar la cantidad de repeticiones para cada sonda, humedad y suelo. Se pretende poder ver, por un lado, la fiabilidad de cada fabricante (replicabilidad) al fabricar las sondas y por otro lado tener suficientes datos para realizar ajustes más complejos a los lineales a la hora de generar las ecuaciones de calibración.

5.- Bibliografía

- Bello, Z. A., Tfwala, C. M., y van Rensburg, L. D. (2019). Evaluation of newly developed capacitance probes for continuous soil water measurement. *Geoderma*, 345(March), 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.030>
- Benninga, H. J. F., Carranza, C. D. U., Peziz, M., Van Santen, P., Van Der Ploeg, M. J., Augustijn, D. C. M., y Van Der Velde, R. (2018). The Raam regional soil moisture monitoring network in the Netherlands. *Earth System Science Data*, 10(1), 61–79. <https://doi.org/10.5194/essd-10-61-2018>
- Blonquist, J. M., Jones, S. B., y Robinson, D. A. (2005). A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. *Journal of Hydrology*, 314(1–4), 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.005>
- Bogena, H. R., Huisman, J. A., Oberdörster, C., y Vereecken, H. (2007). Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology*, 344(1–2), 32–42. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2007.06.032>
- Clarke Topp, G., y Reynolds, W. D. (1998). Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil. *Soil and Tillage Research*, 47(1–2), 125–132. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00083-X)
- González-Teruel, J. D., Torres-Sánchez, R., Blaya-Ros, P. J., Toledo-Moreo, A. B., Jiménez-Buendía, M., y Soto-Valles, F. (2019). Design and Calibration of a Low-Cost SDI-12 Soil Moisture Sensor. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/s19030491>
- Jorapur, N., Palaparthi, V. S., Sarik, S., John, J., Baghini, M. S., y Ananthasuresh, G. K. (2015). A low-power, low-cost soil-moisture sensor using dual-probe heat-pulse technique. *Sensors and Actuators A: Physical*, 233, 108–117. <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2015.06.026>
- Kalita, H., Palaparthi, V. S., Baghini, M. S., y Aslam, M. (2016). Graphene quantum dot soil moisture sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 233, 582–590. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2016.04.131>
- Kizito, F., Campbell, C. S., Campbell, G. S., Cobos, D. R., Teare, B. L., Carter, B., y Hopmans, J. W. (2008). Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 352(3–4), 367–378. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2008.01.021>
- Mittelbach, H., Lehner, I., y Seneviratne, S. I. (2012). Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 430–431, 39–49. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.01.041>
- Munoz-Carpena, R., Ritter, A., y Bosch, D. D. (2004). Field methods for monitoring soil water status. *Soil--Water--Solute Process Characterization. CRC Press, Boca Raton, Fla*, 167–195.
- Mzezewa, J., Gwata, E. T., y van Rensburg, L. D. (2011). Yield and seasonal water productivity of sunflower as affected by tillage and cropping systems under dryland conditions in the Limpopo Province of South Africa. *Agricultural Water Management*, 98(10), 1641–1648. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.06.003>
- Paltineanu, I. C., y Starr, J. L. (2010). Real-time Soil Water Dynamics Using Multisensor Capacitance Probes: Laboratory Calibration. *Soil Science Society of America Journal*, 61(6), 1576. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100060006x>
- Ravazzani, G. (2017). Open hardware portable dual-probe heat-pulse sensor for measuring soil thermal properties and water content. *Computers and Electronics in Agriculture*, 133, 9–14. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2016.12.012>
- Sakaki, T., Limsuwat, A., Smits, K. M., y Illangasekare, T. H. (2008). Empirical two-point α -mixing model for calibrating the ECH 20 EC-5 soil moisture sensor in sands. *Water Resources Research*, 44(4), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2008WR006870>
- Susha Lekshmi, S. U., Singh, D. N., y Shojaei Baghini, M. (2014, August 1). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 54, pp. 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- Varble, J. L., y Chávez, J. L. (2011). Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. *Agricultural Water Management*, 101(1), 93–106. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.09.007>
- Vaz, C. M. P., Jones, S., Meding, M., y Tuller, M. (2013). Evaluation of Standard Calibration Functions for Eight Electromagnetic Soil Moisture Sensors. *Vadose Zone Journal*, 12(2), 0. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0160>
- Walker, J. P., Willgoose, G. R., y Kalma, J. D. (2004). In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal of Hydrology*, 293(1–4), 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.01.008>