

Nota técnica

## CALIBRACIÓN DE SENSORES DE REFLECTOMETRÍA DE DOMINIO DE FRECUENCIA PARA ESTIMAR LA HUMEDAD EN UN SUELO GERIC XANTHIC FERRALSOL

Carlos Abanto-Rodríguez<sup>1</sup>, Wellington Farias Araújo<sup>2</sup>, Pollyana Cardoso Chagas<sup>2</sup>, Edvan Alves Chagas<sup>3</sup>, João Lopes Monteiro N.<sup>4</sup>, Raphael Da Silva Siqueira<sup>5</sup>, Samara Martins Barbosa<sup>6</sup>, Valdinar Ferreira Melo<sup>2</sup> y Miguel A. Maffei Valero<sup>4</sup>

### RESUMEN

El uso del riego es esencial para aumentar la productividad de los cultivos, sin embargo, para el manejo eficiente del agua, es necesario estimar con mayor precisión la humedad del suelo. Por esta razón, el objetivo en este trabajo fue calibrar sensores de reflectometría de dominio de frecuencia FDR modelo 10HS (Decagon Devices) para ser utilizados en un suelo Geric Xanthic Ferralsol. Para la calibración fueron utilizadas muestras no disturbadas de suelo colectadas a dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm) en cilindros de PVC, con cuatro repeticiones cada una. Las muestras, dentro de cilindros de PVC, fueron colocadas en bandejas con agua destilada hasta alcanzar la saturación y los sensores fueron introducidos en las muestras para obtener la humedad en el punto de saturación. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en estufa a 60 °C, hasta llegar aproximadamente a 10 % de humedad. Los resultados muestran que los datos de humedad volumétrica registrados antes de la calibración no coincidieron con la recta 1:1 y presentaron comportamiento divergente, evidenciando así la necesidad de calibración. Se concluye que las ecuaciones generadas antes de la calibración sobreestimaron la humedad volumétrica y las ecuaciones obtenidas después de la calibración miden satisfactoriamente la humedad del suelo Geric Xanthic Ferralsol

**Palabras clave adicionales:** Capacitancia, constante dieléctrica, métodos no destructivos

### ABSTRACT

#### Calibration of frequency domain reflectometry sensors to estimate soil moisture in a Geric Xanthic Ferralsol

The use of irrigation is essential to increase crop productivity; however, for efficient water management, it is necessary to more accurately estimate soil moisture. For this reason, the objective in this work was to calibrate FDR model 10HS frequency domain reflectometry sensors (Decagon Devices) for use in a Geric Xanthic Ferralsol type soil. For the calibration, non disturbed soil samples were collected in PVC pipes at two depths (0-20 and 20-40 cm), with four repetitions each and they were placed in trays with distilled water until saturation. Subsequently the sensors were introduced in the sample to obtain the moisture at the saturation point. Then, the samples were placed in an oven at 60 °C, until they reached approximately 10 % humidity. The results showed that the gross volumetric moisture data recorded before calibration did not coincide with the 1:1 line, presenting divergent behavior, thus demonstrating the need for calibration. According to the results, it is concluded that the equations generated with the data before the calibration overestimated the volumetric soil moisture, and the equations obtained after the calibration satisfactorily measure the moisture of the Geric Xanthic Ferralsol type soil.

**Additional keywords:** Capacitance, dielectric constant, non-destructive methods

---

Recibido: Agosto 22, 2019

Aceptado: Abril 2, 2020

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Rede BIONORTE, Universidade Federal de Roraima- UFRR, Brasil. e-mail: carforestal24@gmail.com (autor de correspondencia)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Roraima-UFRR, Brasil. e-mail: wellington.araujo@ufr.br, pollyana.chagas@ufr.br, valdinar@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria-EMBRAPA Roraima, Brasil. e-mail: edvan.chagas@embrapa.br

<sup>4</sup> Programa de Pós-Graduação em Agronomia (POSAGRO), Universidade Federal de Roraima-UFRR. Brasil. e-mail: joao.monteiro.neto@hotmail.com, migmaffi@ula.ve

<sup>5</sup> Instituto Federal de Roraima-IFRR, Brasil. e-mail: raphael\_manajosolo@hotmail.com

<sup>6</sup> Universidade Estadual Paulista-UNESP. Jaboticabal, Brasil. e-mail: samarambar2014@gmail.com

## INTRODUCCIÓN

La extensa planicie en el estado de Roraima-Brasil está predominantemente representada por suelos del orden Ferralsol y con menor expresión geográfica por Gleysols, Arenosols, Cambisols, Plinthosols, Planosols, Solonets, Nitosols y Vertisols. De éstos, los Ferralsols ocupan 22 % de la superficie, y se caracterizan por ser suelos muy intemperizados, profundos y bien drenados (Melo et al., 2010; Benedetti et al., 2011; Anjos y Schad, 2018). Actualmente, en este estado, los Ferralsols son utilizados para cultivos anuales, perennes, pastos y frutales.

En zonas con poca agua disponible, como Roraima, el riego es una alternativa esencial para garantizar la disponibilidad hídrica a los cultivos en los meses con mayor déficit pluvial. Ahora bien, esta actividad debe estar siempre asociada con la conservación y gestión de los recursos hídricos disponibles, pues la agricultura es considerada la principal usuaria y consumidora de agua (FAO, 2017; Sanches et al., 2019). En ese sentido, la determinación de la humedad en suelos destinados a la producción agrícola es de vital importancia una vez que el crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas dependen de forma significativa del contenido de agua en el suelo. Kitić y Crnojević-Bengin (2013) y Gravalos et al. (2012) citan que, la medición de la humedad es utilizada en la toma de decisiones sobre el momento oportuno y la cantidad de agua a ser aplicada en el cultivo.

La humedad del suelo puede ser medida mediante métodos directos e indirectos. Entre los primeros, el gravimétrico es el más utilizado, consiste en remover el agua de una muestra de suelo por evaporación, y posteriormente el contenido de agua es determinado por la diferencia de masa de la muestra al inicio y al término del proceso. Los métodos indirectos se fundamentan en respuestas a las propiedades electromagnéticas del suelo, como la moderación de neutrones, la resistencia eléctrica, la constante dieléctrica y la tensión del agua en el suelo (Paltineanu y Starr, 1997). Algunos métodos se basan en la emisión de señales eléctricas y en la medición de la respuesta a estas señales en función de los cambios en la permitividad aparente y/o en la constante dieléctrica del suelo (Evelt et al., 2006).

Con base en lo anterior, uno de los métodos indirectos para la determinación de la humedad del suelo consiste en la utilización de la técnica FDR (reflectometría en el dominio de frecuencia), el cual es un método basado en la propiedad de permitividad dieléctrica del suelo, la cual está relacionada con la cantidad de agua en el perfil (Lekshmi et al., 2014).

La propiedad de permitividad dieléctrica se refiere a la capacidad de un material para retener cargas eléctricas. Así, cuanto mayor es la constante dieléctrica mejor capacitor será el material y, por tanto, más cargas eléctricas podrá almacenar. Por ejemplo, en una escala de 1 a 80, el aire, la materia orgánica, el suelo mineral y el agua tienen una permitividad dieléctrica de 1, 5, 7 y 80, respectivamente. Por esta razón, los sensores logran medir el contenido de agua, por ser el componente en el suelo que más varía en volumen y en pequeños espacios de tiempo (Giraldi y Iannelli, 2009; Markevicius et al., 2012).

La medición del contenido de agua en el suelo por medio de sensores de capacitancia está en creciente uso debido a que no son métodos destructivos, proporcionan mediciones casi instantáneas (fracción de segundos), requieren poco o ningún mantenimiento, pueden permanecer en el suelo durante un largo periodo de tiempo, son capaces de proporcionar lecturas continuas y no emplean radiación, lo que permite mediciones precisas próximas a la superficie del suelo (Stacheder et al., 2009; Silva et al., 2012).

No obstante, para obtener mediciones más precisas, es necesario realizar la calibración de los sensores de acuerdo al tipo de suelo donde se va a utilizar, en virtud de las propiedades electromagnéticas inherentes a cada tipo de suelo, dado que la salinidad, temperatura, densidad y contenido de arcilla en el suelo pueden limitar su utilización (Evelt, 2006; Prevedello et al., 2007). La calibración se puede realizar en condiciones de laboratorio, utilizando muestras no disturbadas de suelo, ya que éstas preservan las características de estructura, densidad y aireación como en su forma original (Lima et al., 2018).

En función de la importancia de la determinación de la humedad del suelo con mayor precisión para el manejo eficiente del riego en los cultivos y la existencia de escasos estudios de calibración de sensores de humedad en suelos de clima tropical y de sabana, fue desarrollada esta

investigación con el objetivo de calibrar sensores FDR-10HS para ser utilizados en la medición de la humedad en suelos Geric Xanthic Ferralsol en el estado de Roraima, Brasil.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio.** El experimento fue conducido durante los meses de marzo a junio de 2018, en el laboratorio de Física y Agua del Suelo del Centro de Ciencias Agrarias de la Universidad Federal de Roraima, Campo Cauamé, ubicado en el municipio de Boa Vista-RR. El suelo utilizado presentó pH ácido, bajo contenido de nutrientes y alto contenido de aluminio y hierro, características típicas de los suelos de la región de sabana en Roraima. Los atributos físicos mostraron una textura franco arcillosa (49,1 % de arena y 35,8 % de arcilla).

**Colecta de muestras de suelo.** Para la calibración de los sensores fueron colectadas muestras no disturbadas de suelo en cilindros rígidos de PVC de dimensiones 20 cm de altura y 15 cm de diámetro interno, en el área experimental del Centro de Ciencias Agrarias. Antes de la colecta, la superficie del suelo fue limpiada de restos vegetales. Seguidamente, fueron tomadas las muestras a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm) con cuatro repeticiones cada una.

**Saturación de las muestras de suelo.** Inmediatamente, después del muestreo fue determinado el peso inicial. En seguida la base de los cilindros fue protegida con paños permeables para evitar la pérdida de suelo y también para facilitar la entrada de agua por capilaridad para provocar que el agua desplace la mayor cantidad de aire de los poros; luego las muestras fueron colocadas en bandejas con agua destilada hasta 2/3 de la altura de los cilindros. Después de 12 días, las muestras llegaron al punto de saturación, periodo en que fue observado un brillo uniforme en la superficie de cada muestra de suelo dentro de los cilindros.

En este punto de saturación, muestra por muestra fue retirada de las bandejas e inmediatamente fue pesada, seguidamente los sensores capacitivos FDR-10HS (Decagon Devices) fueron introducidos totalmente hasta 10 cm de profundidad (mitad del cilindro), obteniéndose inmediatamente la lectura de la humedad volumétrica en el punto de saturación en

ambas profundidades establecidas. La lectura de los datos de humedad volumétrica fue almacenada en un equipo Datalogger Em5b.

**Calibración de los sensores.** En seguida, las muestras fueron colocadas en estufa de aire de circulación forzada a 60 °C, cada cuatro días las muestras fueron retiradas de la estufa, se dejaban enfriar a temperatura ambiente y en seguida los sensores eran introducidos en una superficie no perturbada para la obtención de la lectura del contenido de humedad, proceso que fue repetido hasta que las muestras llegaron aproximadamente a 10 % de humedad. Posteriormente las muestras fueron colocadas nuevamente en estufa a 105 °C, para la determinación del peso seco.

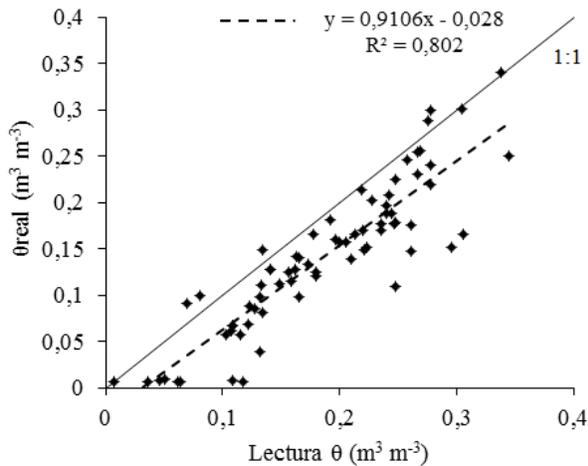
Para verificar el peso con que las muestras de suelo estarían con humedad próxima del valor deseado (aproximadamente 10 % de humedad) fue colectada en la misma área experimental y en las mismas profundidades una muestra adicional para determinar el peso seco, porosidad y densidad del suelo por el método gravimétrico y en seguida estimar el peso seco deseado para las demás muestras conforme lo descrito por Silva et al. (2012) y Barbosa (2015). Posteriormente, fue comprobada la exactitud de los datos de humedad volumétrica obtenidos por las lecturas de los sensores utilizando la recta 1:1 y el cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Después de este análisis, y habiendo la necesidad de calibración se procedió al ajuste de los datos generando modelos matemáticos para toda la serie de datos de ambas profundidades y para cada profundidad, luego fue seleccionado el mejor ajuste o modelo matemático en función del mayor coeficiente de determinación  $R^2$  y menor RMSE calculado con el programa Excel. Finalmente fue realizada una nueva verificación de la exactitud con el modelo seleccionado en la calibración con el objetivo de aproximar los datos para la recta 1:1.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En relación a las propiedades físicas de porosidad y densidad del suelo, fue determinado en la muestra superficial (0-20 cm) una porosidad total de 40 % (25 % de macroporos y 15 % de microporos) y densidad aparente de 1,6 g·m<sup>-3</sup>, respectivamente. Por su parte, en la muestra más profunda (20-40 cm) fue determinado 33 % de

porosidad total (23 % de macroporos y 10 % de microporos), y una densidad de  $1,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , corroborando que a mayor espacio poroso menor es la densidad del suelo. Adicionalmente, altos contenidos de materia orgánica pueden hacer disminuir la densidad aparente (Silva y Mendoça, 2007).

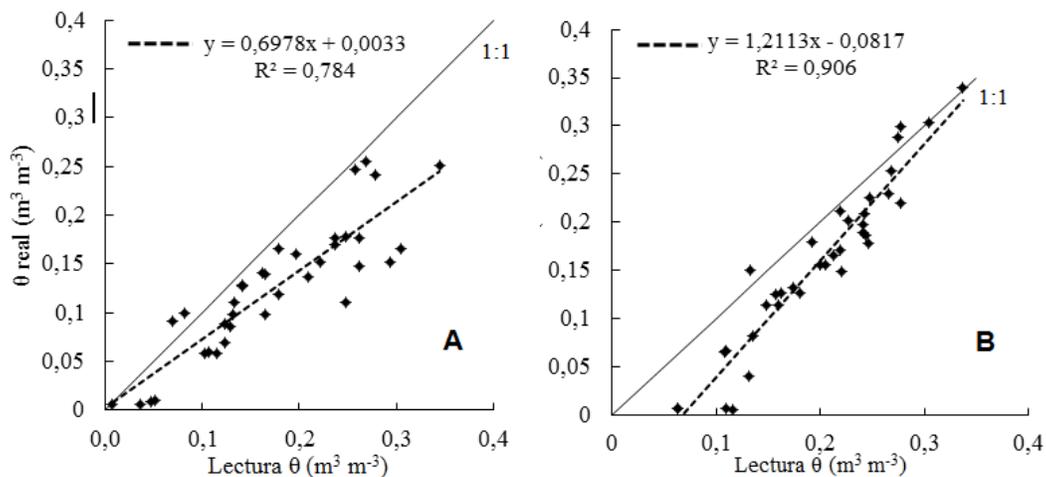
En la Figura 1 se presenta la dispersión de toda la serie de datos de humedad volumétrica real y medida, en ambas profundidades (0 a 40 cm) antes de la calibración de los sensores FDR-10HS.



**Figura 1.** Datos brutos de humedad volumétrica obtenidos por las lecturas de los sensores de humedad para toda serie de datos de ambas profundidades (0 hasta 40 cm)

Se observa que los datos brutos de humedad volumétrica no coincidieron con la recta 1:1, es decir, presentaron comportamiento divergente, indicando que había necesidad de calibración de los sensores. La misma tendencia fue encontrada al utilizar los datos registrados individualmente para cada una de las profundidades (Figuras 2A y 2B). Resultados similares fueron reportados por Silva et al. (2012) y Silva Junior et al. (2013), en la determinación de la exactitud y calibración de sonda de capacitancia en un suelo Rhodic Ferralsol, donde los valores medidos antes de la calibración siempre quedaron debajo de la recta 1:1. Del mismo modo, Barbosa (2015) al realizar la calibración de los datos obtenidos por sensores TDR observó que los datos registrados no se ajustaron con la recta 1:1.

En la Figura 2 es necesario destacar que, en la muestra superficial (0-20 cm) hubo mayor retención de agua, puesto que la línea de tendencia tendió a separarse de la recta 1:1, sin embargo, en la muestra de suelo más profunda (20-40 cm) ocurrió lo contrario. Esto probablemente sucedió debido a que en la superficie hubo mayor contenido de materia orgánica y la diferencia pudo influir en la respuesta de los sensores. Al respecto, Santos y Pereira (2013) refieren que la materia orgánica permite mayor agregación y cohesión entre las partículas, haciendo un suelo más poroso y con mayor retención de agua, lo que pudiera asociarse con los resultados encontrados en este trabajo.



**Figura 2.** Datos brutos de humedad volumétrica obtenidos en las profundidades de 0-20 cm (A) y 20-40 cm (B).

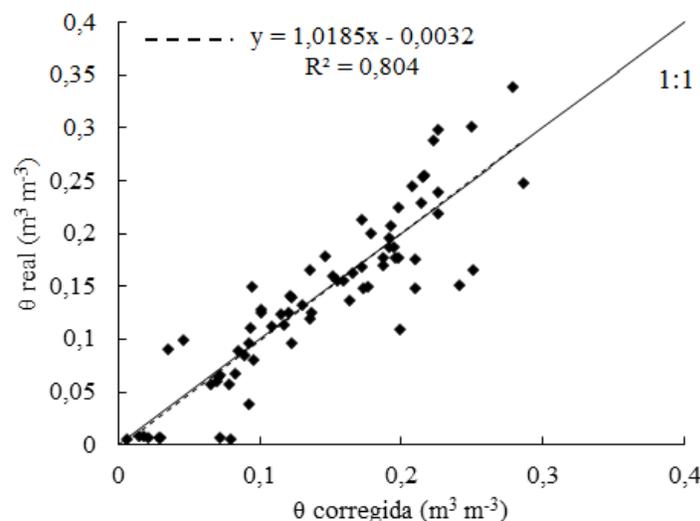
Seguidamente, después de haber comprobado la necesidad de calibración, fueron generados modelos matemáticos (lineal y cuadrático), calculando el error cuadrático medio y el coeficiente de determinación. Después de la calibración fue calculado un segundo RMSE para toda la serie de datos y para cada una de las profundidades, y se observa que el nuevo RMSE fue considerablemente menor luego de la calibración (Cuadro 1). Resultados semejantes con relación a los valores de RMSE para la calibración específica en campo fueron reportados por Qi y Helmers (2010), quienes encontraron valores de 0,037 a 0,069. Del mismo modo, Irmak y Irmak (2005), calibrando una sonda PR2/6 para cuatro suelos de diferentes texturas obtuvieron valores de RMSE entre 0,040 y 0,050.

Para corregir los datos brutos en esta investigación fue seleccionado el modelo lineal por presentar mayor  $R^2$  y menor RMSE (Cuadro 1) tanto para el conjunto de datos de las profundidades como para cada una por separado (Figuras 3 y 4).

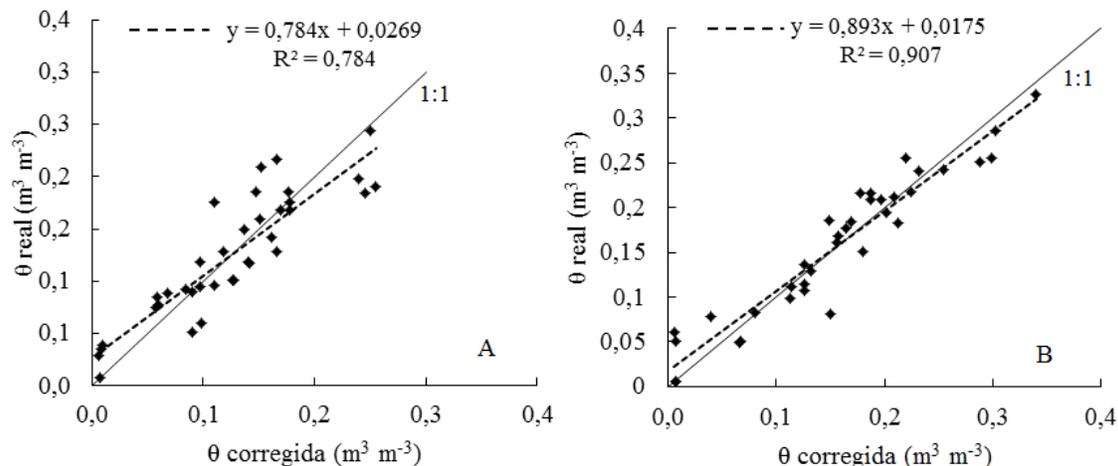
De esta manera, después de haber realizado el ajuste, fue observado que los datos quedaron concentrados cercanos a la recta 1:1, y los coeficientes de determinación se elevaron levemente. Resultados semejantes fueron encontrados por Silva et al. (2012), al mostrar que después de la calibración los datos se ajustaron a la recta 1:1 y disminuyó el RMSE, con lo cual obtuvieron ganancias significativas de precisión en la medición del contenido de la humedad en el suelo.

**Cuadro 1.** Raíz del error cuadrático medio antes y después de la calibración (RMSE 1 y 2, respectivamente), ecuaciones de calibración y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para el monitoreo de la humedad en las profundidades evaluadas

Profundidad	RMSE 1	Ecuación	Modelo	$R^2$	RMSE2
0-40 cm	0,0568	$y = 1,0185x - 0,0032$	Lineal	0,803	0,035
		$y = -0,1547x^2 + 1,0614x - 0,0054$	Polinomial cuadrático	0,803	0,057
0-20 cm	0,0497	$y = 0,784x + 0,0269$	Lineal	0,784	0,033
0-20 cm		$y = -1,005x^2 + 1,0388x + 0,0151$	Polinomial cuadrático	0,793	0,049
20-40 cm	0,0631	$y = 0,893x + 0,0175$	Lineal	0,908	0,036
		$y = -0,0652x^2 + 0,9133x + 0,0164$	Polinomial cuadrático	0,908	0,048



**Figura 3.** Verificación de la exactitud de la humedad volumétrica con el modelo generado por la calibración de toda la serie de datos.



**Figura 4.** Verificación de la exactitud de la humedad volumétrica con los modelos generados por la calibración para las profundidades de 0-0,2 m (A) y de 0,2-0,4 m (B)

La utilización de los datos obtenidos directamente con los sensores FDR-10HS sin la necesaria calibración ocasionaría sobreestimación de la humedad del suelo en la planificación del riego en este tipo de suelos. Resultados similares han sido reportados por Silva Junior et al. (2013) quienes encontraron que el contenido de agua en el suelo medido por la sonda de capacitancia fue sobreestimado en comparación al método gravimétrico. Pizetta (2015) menciona que una estimación imprecisa del contenido volumétrico de agua en el suelo puede sobreestimar o subestimar la lámina de riego a ser aplicada en los cultivos, pudiendo causar reducción de la productividad, problemas fitosanitarios, lixiviación de nutrientes y aumento del costo de riego.

Entre los factores que pudieron haber contribuido para la sobreestimación de la humedad volumétrica registrada por los sensores FDR-10HS en esta investigación, se encuentran el elevado grado de intemperización del suelo ( $K_i=2,34$ ), y en consecuencia, alto contenido de hierro ( $270 \text{ g de Fe}_2\text{O}_3 \text{ kg}^{-1}$  de suelo) (Rego et al., 2000). En estas condiciones, la constante dieléctrica puede afectarse, y consecuentemente la humedad medida en virtud de la presencia elevada de cargas positivas en el suelo (Santos et al., 2010). Similarmente, Kaiser et al. (2010) encontraron que las mediciones se afectaban en suelos muy intemperizados con altos contenidos de hierro.

Por tanto, de acuerdo a lo constatado en esta investigación, queda evidenciado que los sensores

FDR-10HS necesitaron ser calibrados previamente antes de ser utilizados en este tipo de suelo, en los cuales se presenta un elevado nivel de intemperización (Benedetti et al., 2011).

## CONCLUSIONES

Los datos brutos de humedad volumétrica obtenidos con los sensores no se aproximaron a la recta 1:1, lo que indicó necesidad de calibración.

Las ecuaciones generadas con los datos antes de la calibración sobreestimaron la humedad volumétrica del suelo.

El modelo matemático seleccionado para la calibración de los sensores FDR-10HS fue el lineal por presentar mayor coeficiente de determinación y menor error cuadrático medio.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico-CNPq, aviso público Universal proceso número: 408673/2016-8, por el apoyo financiero y a la Coordinación de Perfeccionamiento de Personas de Nivel Superior-CAPES por el otorgamiento de la bolsa de estudios para el autor principal.

## LITERATURA CITADA

1. Anjos L. H. C. y P. Schad. 2018. Comparação da Classificação de Solos de acordo com o Sistema Brasileiro e os Sistemas Internacionais

- WRB e Soil Taxonomy. *In*: K.D. Batista et al. Guia de Campo da XI Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Roraima. pp. 305-311.
2. Barbosa, S.M. 2015. Condicionamento físico hídrico do solo como potencializador do crescimento inicial do cafeeiro. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras, UFLA, MG. 67 p.
  3. Benedetti, U.G., J.F. Vale Júnior, C.E.G.R. Schaefer, V.F. Melo y S.C.P. Uchôa. 2011. Gênese, química e mineralogia de solos derivados de sedimentos pliopleistocênicos e de rochas vulcânicas básicas em Roraima, norte amazônico. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 35(2): 299-312.
  4. Evett, S.R., J.A. Tolk y T.A. Howell. 2006. Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision. *Vadose Zone Journal* 5(3): 894-907.
  5. FAO. Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura. 2017. Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias. Brasília. 243 p.
  6. Giraldo, D. y R. Iannelli. 2009. Measurements of water content distribution in vertical subsurface flow constructed wetlands using a capacitance probe: benefits and limitations. *Desalination* 243(1-3): 182-194.
  7. Gravalos, I.G., D.M. Moshoub, S.J. Loutridis, T.A. Gialamas, D.L. Kateris, Th. Zisis et al. 2012. Design of a pipeline sensor-based platform for soil water content monitoring. *Biosystems Engineering*, 113(1): 1-10.
  8. Irmak, S. y A. Irmak. 2005. Performance of frequency-domain reflectometer, capacitance, and pseudo-transit time-based soil water content probes in four coarse-textured soils. *Applied Engineering in Agriculture* 21(6): 999-1008.
  9. Kaiser, D.R., D. J. Reinert, J. M. Reichert y J. P.G. Minella. 2010. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 34 (3): 649-658.
  10. Kitić, G. y V.A. Crnojević-Bengin. 2013. Sensor for the measurement of the moisture of undisturbed soil samples. *Sensors* 13(2): 1692-1705.
  11. Lekshmi, S.U., D.N. Singh y M.S. Baghini. 2014. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement* 54: 92-105.
  12. Lima, J.G.A., A.S. de Oliveira, L.S. Souza, N.D. da Silva y P.C. Viana. 2018. Calibration of a soil moisture sensor with disturbed and undisturbed soil samples from Bahia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 22(10): 696-701.
  13. Markevicius, V., D. Navikas, A. Valinevicius, D. Andriukaitis y M. Cepenas. 2012. The soil moisture content determination using interdigital sensor. *Elektronika Ir Elektrotechnika* 18(10): 25-28.
  14. Melo, V.F., C.E. G.R. Schaefer, J.F. Vale Júnior y S.C. P. Uchôa. 2010. Aspectos pedológicos e de manejo dos solos de Roraima. *In*: V.F. Melo y R.I. Barbosa. Roraima: Homem, Ambiente e Ecologia. Boa vista: Femact. pp. 391-408.
  15. Paltineanu, I.C. y J.L. Starr. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61(6): 1576-1585.
  16. Pizetta, S.C. 2015. Calibração de sensores de capacitância (FDR) para estimativa da umidade em diferentes solos. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Lavras-UFV. 67 p.
  17. Prevedello, C.L., S.R. Maggioletto, J.M.T. Loyola, N.L. Dias y G. Beppler Neto. 2007. Balanço de água por aquisição automática de dados em cultura de trigo (*Triticum aestivum* L.). *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 31(1): 2-8.
  18. Qi, Z. y M.J. Helmers. 2010. The conversion of permittivity as measured by a PR2 capacitance probe into soil moisture values for Des Moines loess soils in Iowa. *Soil Use and Management* 26(1): 82-92.
  19. Rego, R.S., T.E. Rodrigues, J.R.N.F. Gama, A.A.C. Lima, J.M.L. Silva y W.O. Barreto. 2000. Caracterização e classificação dos solos do campo Experimental Monte Cristo, da Embrapa Roraima, Boa Vista - Estado de Roraima. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. Documentos 58: 42 p.
  20. Sanches, A.A., D.P. de Souza, F.L. Ferreira de Jesus, F.C. Mendonça, E.P. Gomes y J.R.M. Pezzopane. 2019. Comparison of water

- consumption estimates for tropical and winter forages by FDR probes and weighing lysimeters, *Semina: Ciências Agrárias* 40(3): 1115-1126.
21. Santos, M.R., J.H. Zonta y M.A. Martinez. 2010. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 34(2): 299-307.
22. Santos, J.N. y E.D. Pereira. 2013. Carta de susceptibilidade a infiltração da água no solo na sub-bacia do rio Maracanã-MA. *Cadernos de Pesquisa, São Luís* 20 (especial): 63-71.
23. Silva, I.R. y E.S. Mendonça. 2007. Matéria orgânica do solo. *In: R.F. Novais et al. Fertilidade do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*. 1017 p.
24. Silva, B.M., G.C. Oliveira, M.E. Serafim, J.J. Silva Júnior, A. Colombo y J.M. I. Lima. 2012. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. *Pesq. Agropec. Bras.* 47(2): 277-286.
25. Silva Junior, J.J., A. Colombo, A.S. Scalco, B.M. Silva y P.T. Lima. 2013. Calibração de sondas de capacitância para determinação de umidade em Latossolo Vermelho Distroférico. *Irriga, Botucatu* 18(4): 743-755.
26. Stacheder, M., F. Koeniger y R. Schuhmann. 2009. New dielectric sensors and sensing techniques for soil and snow moisture measurements. *Sensors* 9(4): 2951–2967.