

VALIDACIÓN DE UNA SONDA TDR PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE SUELOS FERRALÍTICOS ROJOS DE LA PROVINCIA CIEGO DE AVILA

TDR PROBE VALIDATION FOR THE ESTIMATE OF FERRALITIC RED SOIL MOISTURE CONTENT OF THE CIEGO DE AVILA PROVINCE

Autores: Santiago Cabrera Moreira

Néstor Concepción Bonachea

Alexander Rodríguez Leguen

Institución: Universidad de Ciego de Ávila, Máximo Gómez Báez, Cuba

Correo electrónico: santiagoc@unica.cu; scmoreira53@gmail.com

RESUMEN

El método dieléctrico de estimación de la humedad de los suelos se fundamenta en la relación estrecha existente entre ésta y la permitividad dieléctrica de los mismos. La reflectometría del dominio del tiempo (TDR por sus siglas en inglés) es una técnica indirecta de estimación de la humedad del suelo basada en la relación mencionada dada por polinomios de diferentes rangos e insertados en estos equipos. Sin embargo, la ausencia de generalización de estos modelos para convertir los datos de los sensores en lecturas de humedad de suelos diferentes hace necesaria la obtención de curvas de calibración sitio-específicas. El objetivo del presente trabajo consiste en la obtención de las curvas calibración y su validación para una sonda TDR 300 modelo 6430FS para su uso en suelos ferralíticos rojos de la provincia Ciego de Ávila, Cuba.

Palabras clave: Ecuación empírica de calibración, Humedad gravimétrica, Método dieléctrico, Reflectometría en el dominio del tiempo.

ABSTRACT

The dielectric method to estimate the soil moisture content is based in the existent closed relationship between the dielectric permittivity and the water content. The time-domain reflectometry (TDR) is an indirect technique to estimate the soil water content based on the mentioned relationship given by different ranges polynomials inserted in the equipment. However, the absence of generalization of these models to transform the sensor data into readings of moisture content of different soils makes necessary the obtaining of the place-specific calibration curves. The objective of the present work consists on the obtaining of the calibration curves and its

validation for a probe TDR 300 model 6430FS for its use in red ferralitic soils of Ciego de Ávila, Cuba.

Keywords: Dielectric method, Empirical calibration equation, Gravimetric moisture, Time domain reflectometry.

INTRODUCCIÓN.

Actualmente alrededor del 70 % del agua potable total de la Tierra se utiliza en labores agrícolas, 20 % en la industria y un 10 % en labores domésticas (Baroni et al., 2007). En Cuba, según (González et al. 2015), el 59,7 % del volumen total del líquido es utilizado por la agricultura. Siendo un recurso limitado a escala local y planetaria, resulta evidente la necesidad de su uso eficiente, con énfasis en la agricultura.

La mayor parte de los usos agrícolas del agua parte de la determinación de su contenido en el suelo. Su medición debería ser uno de los indicadores en la evaluación de la necesidad de aplicar agua para el riego (FAO, 2015). Desde el punto de vista hidrológico, sólo es posible establecer balances de agua en el suelo si se tiene información fiable de la variación de la humedad y de la variación del almacenamiento en el perfil considerado (Lin et al., 2016; Wenjuan et al., 2016; Cornelissen et al., 2014). Además, la determinación de la variación de este parámetro es necesaria para el cálculo de la recarga y del flujo tanto saturado como no saturado, a través del suelo y la zona no saturada y permite conocer los mecanismos principales de transporte de solutos (Miller y Chanasyk, 2014; Vereecken et al., 2014).

Con sólo estas consideraciones resulta obvia la importancia de la aplicación de métodos fiables, económicos y respetuosos del medio ambiente para la medición del contenido de agua de los suelos y sus variaciones, así como la respuesta de estas variaciones a diferentes condiciones del contorno.

En la práctica internacional y en Cuba, el método gravimétrico sigue siendo el de referencia y más usado en la práctica agrícola e ingeniera a pesar de sus insuficiencias evidentes (Zhao et al., 2016). Es un método directo laborioso, alto consumidor de tiempo y energía además de ser destructivo. Otros métodos resultan altamente costosos o poco fiables y no han sido ampliamente extendidos en la práctica agrícola e investigativa. Sin embargo, el método dieléctrico, basado en la relación directa existente entre el volumen de agua en este medio y el valor de su

permitividad dieléctrica, últimamente destaca por su divulgación y potencialidades para la determinación de la humedad del suelo y la descripción de su estado físico (Lin et al., 2016; Suchorab et al., 2014). Las sondas reflectométricas de dominio en el tiempo (TDR) constituyen un ejemplo práctico de dicho método. Es una técnica indirecta, rápida y no destructiva para estimar el contenido de agua basada en su relación directa con la permitividad dieléctrica relativa del suelo (Zhao et al., 2016; Chen, 2014). Sin embargo, su aplicabilidad en suelos específicos ha sido cuestionada en varias investigaciones (Bravo-Espinosa et al., 2009; Ponizovski et al., 1999) dado que este tipo de equipamiento utiliza modelos matemáticos (Topp et al., 1980) de relación humedad-permitividad dieléctrica del suelo que privilegian el papel del contenido de agua en el sistema en detrimento de la influencia de otras propiedades del mismo tales como la composición mecánica y de agregados, contenido de materia orgánica, densidad, etc. Es por ello que varios autores subrayan la necesidad de modelos de calibración de estos equipos para cada suelo (Pereira et al., 2006; Cichota, 2003).

En la literatura extranjera se reporta un gran número de trabajos que investigan el tema. Sin embargo, en Cuba han sido poco divulgadas investigaciones análogas. El presente trabajo tiene como objetivo la obtención y validación de los modelos de calibración de la sonda TDR 300 Modelo 6430FS de la firma Spectrum Technologies para suelos ferralíticos rojos de la provincia Ciego de Ávila.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación entre los meses septiembre y diciembre del 2016 se tomaron muestras de suelo ferralítico rojo en cuatro campos diferentes de la provincia Ciego de Ávila: Jardín Botánico y Estación Experimental "Juan Tomás Roig", de la Universidad de Ciego de Ávila "Máximo Gómez Báez", ubicada en el Km. 9 1/2 de la carretera a Morón, municipio Ciego de Ávila y las Cooperativas de Producción Agropecuaria "El Tezón", ubicada en Ceballos y "La Carolina", municipio Venezuela.

Para el estudio de campo del suelo ferralítico rojo (SFR) fue utilizada la sonda TDR 300 Modelo 6430FS de la firma estadounidense Spectrum Technologies mostrada en la figura 1.



Figura1: Sonda TDR 300 utilizada en la determinación del contenido de agua del suelo

Las mediciones simultáneas de contenido de agua *in situ* con ayuda de la sonda TDR (θ_T) y las muestras de suelo para el método gravimétrico fueron realizadas en las capas de suelo 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 y 0,40-0,60 m.

La densidad del suelo para el cálculo del contenido de humedad volumétrico del mismo fue obtenida con ayuda de cilindros de 10^{-4} m^3 (100 cm^3) en tanto el método picnométrico fue aplicado en el cálculo de la densidad de la fase sólida. La fracción mecánica menor de 0,02 mm se obtuvo por el método de Bouyoucos modificado, usando pirofosfato para la eliminación de los microagregados e hidróxido de sodio como dispersante.

Durante la validación de los modelos obtenidos, se repitió el muestreo y las determinaciones de contenido de agua entre los meses de octubre del 2017 a enero de 2018 en los mismos campos ya investigados. De esta forma, a partir de las lecturas de la sonda TDR(θ_T)y aplicando el modelo correspondiente, se obtuvieron los valores corregidos de contenido volumétrico del agua del suelo (θ_M). Para la comparación de los resultados finales, se diseñaron los gráficos de θ_T y θ_M en función de θ_g . Se incluye el gráfico de referencia (ideal) $\theta_g = f(\theta_g)$.

A partir de las series de valores de θ_g y θ_M se calculó el coeficiente de desigualdad (CD) mediante la expresión:

$$CD = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_1^n (\theta_g - \theta_M)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{1}{n} \sum_1^n (\theta_g)_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{1}{n} \sum_1^n (\theta_M)_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Este parámetro mide la desviación entre las tendencias de los valores observados θ_g y los predichos por el modelo θ_m (Bravo-Espinosa et al., 2009) y su valor oscila entre cero y uno.

Los modelos matemáticos fueron obtenidos con ayuda del programa Microsoft Office Excel 2003.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Algunas características del suelo investigado.

La tabla 1 muestra los valores numéricos que caracterizan algunas de las propiedades físicas del SFR investigado. La densidad del suelo en la capa superficial es baja y se mantiene alrededor de la unidad en todo el perfil hasta la profundidad de 60 cm.

Tabla 1: Algunas características físicas del SFR investigado.

Profundidad, m	Densidad aparente, (Mg/m ³)	Densidad de la fase sólida (Mg/m ³)	Porosidad Total, (% V)	Fracción, d < 0,002 mm
0,00-0,10	0,97	2,62	62,97	71
0,10-0,20	1,01	2,67	62,17	70
0,20-0,40	1,10	2,71	59,40	73
0,40-0,60	1,08	2,72	55,37	78

Con valores típicos de densidad de la fase sólida el volumen total de poros es alto y propio de suelos muy arcillosos. La porosidad se mantiene alta en todo el perfil hasta los 60 cm con valores por encima de 60 % en las dos primeras capas. Destacan en este suelo los valores significativos de la fracción mecánica menor de 0,02 mm, por encima de 70 % que indica un alto grado de despersionabilidad en él. En resumen, los valores que caracterizan estas propiedades físicas son típicos para suelos que han sido expuestos a labores agrotécnicas de cierta intensidad.

Modelos de calibración de la sonda TDR 300 Modelo 6430FS para SFR de la provincia Ciego de Ávila

La figura 2 muestra modelos de calibración de una sonda TDR 300 de la firma estadounidense Spectrum Technologies obtenidos en suelos ferralíticos rojos no

disturbados de la provincia Ciego de Ávila para capas de suelo de 0,00-0,10, 0,00-20,00-0,40 y 0,00-0,60m de profundidad.

Como se observa, todos los modelos responden a polinomios de segundo grado con buenos ajustes de acuerdo a los coeficientes de determinación que se sitúan por encima de 0,93. Modelos del mismo orden reportan Vargas et al. (2011) en suelos agrícolas del estado de Portuguesa, Venezuela, al utilizar un equipo similar al usado en este trabajo.

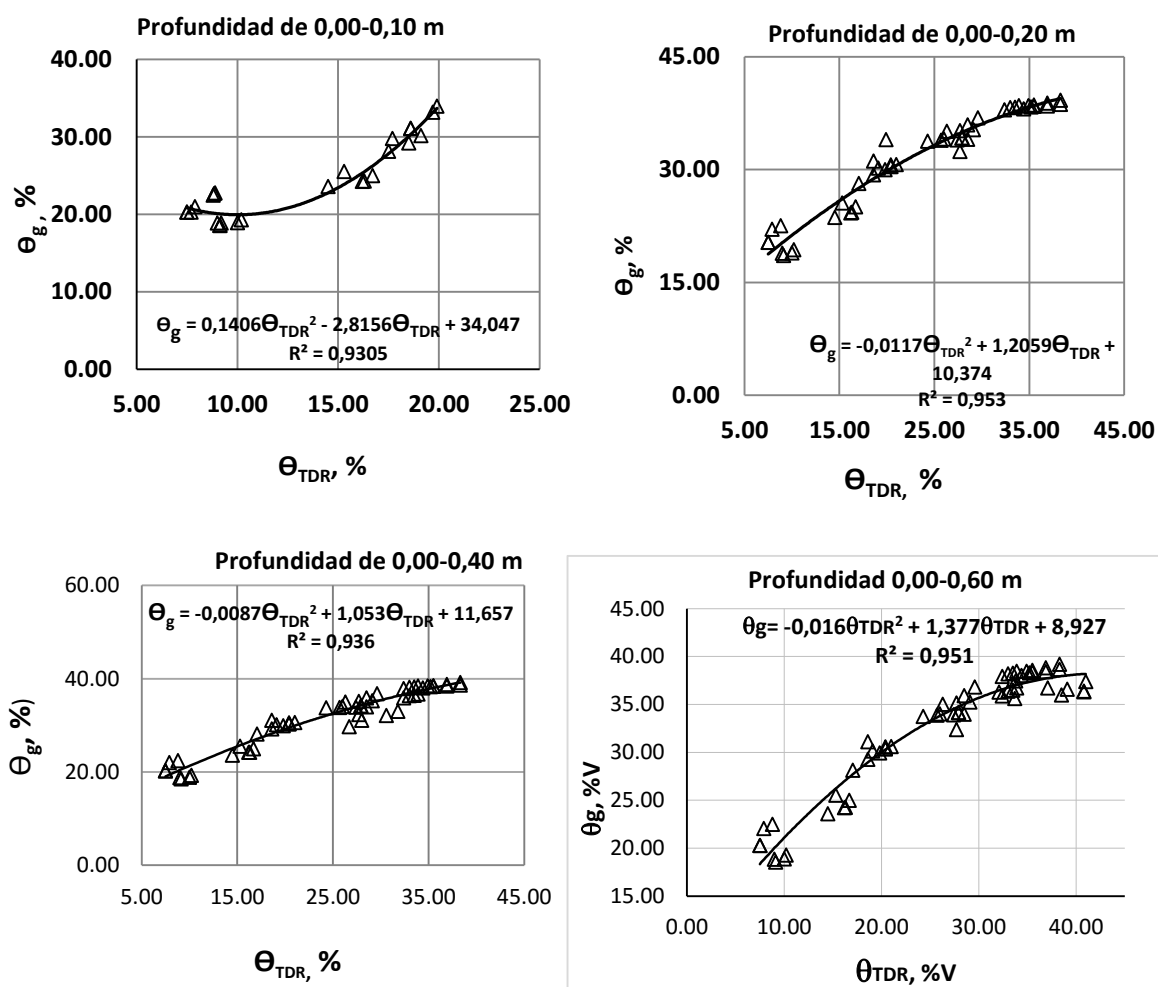


Figura 2: Modelos de calibración de la sonda TDR 300 para el SFR investigado.

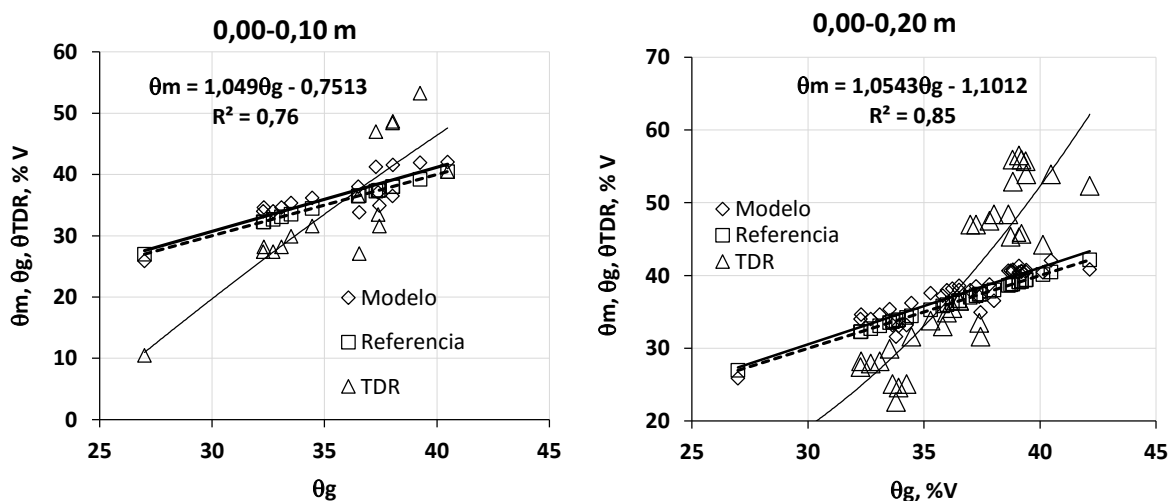
Estos autores aconsejan utilizar la sonda en los suelos investigados cuando presentan valores de humedad en su rango útil en tanto no es recomendable cuando esta alcanza valores extremos y se requiere alta precisión en las mediciones realizadas. Por su parte, Quichimbo et al.(2016), al utilizar una sonda TDR modelo CS655 de la Campbell Scientific Inc. encontraron ajuste estadístico significativo sólo cuando incluyó las tres capas de un suelo agrícola arcilloso (0,00-0,20, 0,20-0,40 y

0,40-0,60 m) y concluye que es necesario ser cuidadosos con las estimaciones brindadas por el equipo.

Los autores coinciden con el primer autor al establecer los rangos de humedad en que la sonda es más efectiva sobre todo cuando el contenido de agua en el suelo es escaso puesto que en tales condiciones se dificulta la entrada de las varillas a la misma razón por la cual se hace difícil mantener su paralelismo. Por otra parte, en ausencia del líquido en el medio, la posibilidad de bolsas de aire alrededor de las varillas aumenta lo que limita el contacto del suelo con los electrodos.

Validación de los resultados

Los gráficos de la figura 3 muestran los resultados obtenidos durante la validación de las curvas de calibración anteriormente expuestas. En los gráficos se muestra el comportamiento del contenido de agua en el suelo obtenido por los modelos de calibración de la sonda θ_m y los propios valores de este parámetro θ_T reportados por el aparato en función de lo valores gravimétricos del mismo parámetro. Se incluye, además, la recta de referencia θ_g con pendiente de valor uno.



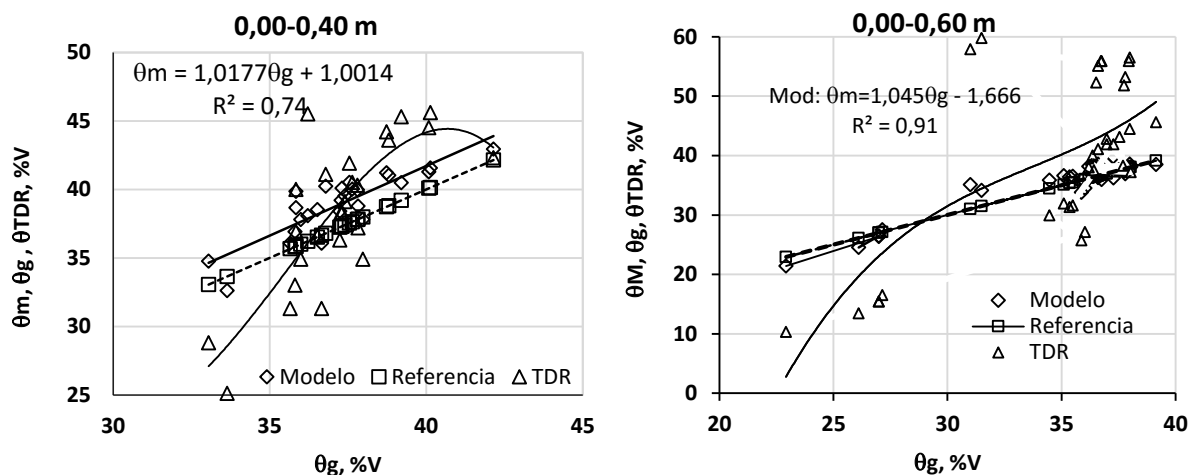


Figura 3: Comportamiento de los contenidos de agua reportados por el análisis gravimétrico, los modelos de calibración y la sonda TDR.

Las relaciones entre las lecturas de contenido hídrico de la sonda corregidas por los modelos y los valores gravimétricos del mismo parámetro son de tipo lineal, con pendientes alrededor de la unidad y valores aceptables de coeficientes de determinación. Los valores calculados del coeficiente de desigualdad (0,035; 0,022; 0,020 y 0,031 respectivamente), alejados del valor unitario, sugieren similitud en el comportamiento de las rectas modeladas con respecto a la de referencia. En todos los casos se observa el comportamiento irregular de las lecturas de la sonda TDR.

La no coincidencia total de las rectas modeladas con la de referencia puede deberse a varias causas entre las que pueden mencionarse:

- Variaciones puntuales de las propiedades físicas del suelo: en mismo campo incluso en puntos cercanos, el suelo puede reportar diferenciación en sus propiedades físicas (densidad, arcillamiento, contenido de materia orgánica, etc.) que de una u otra forma influyen en las lecturas de la sonda (Vargas et al., 2015; Monteverde, 2014)
- Diferencia en los estados de humedad del suelo durante la toma de muestras para la obtención de las curvas de calibración y su la validación. En esta investigación, la mayor parte de las determinaciones *in situ* con la sonda para la obtención de las curvas de calibración fueron realizadas en condiciones de sequía en tanto las de validación se realizaron, en gran parte, cuando el suelo presentaba altos valores de humedad.

Otros factores que pueden influir en estos resultados pueden ser achacados a los errores sistemáticos que siempre están presentes en todo proceso de medición.

No obstante, las imprecisiones que pueden ser cometidas durante el uso de este instrumento, son innegables sus ventajas sobre el método tradicional que se traducen, esencialmente en:

- Ahorro significativo de tiempo.
- Ahorro significativo de energía.
- Posibilidad de automatización de los sistemas de irrigación.
- Posibilidad de gestión automatizada de los datos obtenidos.
- Protección del medio ambiente.
- Humanización de las labores realizadas.

Estas bondades del método dieléctrico y en específico, de las sondas TDR, hacen que el mismo sea promisorio en la práctica agrícola moderna.

CONCLUSIONES

1. Los modelos matemáticos insertados en la sonda TDR 300 Modelo 6430FS provocan imprecisiones significativas en la estimación de la humedad del suelo ferralítico rojo investigado lo que sugiere la obtención de curvas de calibración de estos dispositivos para estos suelos.
2. En los suelos ferralíticos rojos de la provincia Ciego de Ávila, los modelos de calibración responden a polinomios de segundo grado con ajustes satisfactorios (coeficientes de determinación por encima de 0,90).
3. La validación de los resultados sugieren que los modelos de calibración obtenidos para la sonda TDR 300 Modelo 6430FS pueden ser utilizados en la práctica agrícola de los suelos estudiados aunque para su uso efectivo se recomienda la obtención de la curva sitio-específica aplicando la metodología aquí utilizada.

RECOMENDACIONES

1. Extender un estudio similar al desarrollado en este trabajo a otros tipos de suelo de importancia agrícola de la provincia y el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARONI, L. ...[et al.] (2007). Evaluating the environment impact of various dietary pattern combined with different food production system. *European Journal of clinical nutrition*. Vol. 61, pp.270-286. ISSN: 0954-3007, E-ISSN: 1476-5640,

DOI: 10.1038/sj.ejcn.1602522.

- BRAVO-ESPINOSA, M. ...[et al.] (2009). Evaluación empírica de la Reflectometría de Dominio Temporal para estimar la humedad en dos suelos de origen volcánico. *Rev. Terra Latinoamericana*. Vol.27(3), pp.171-176, ISSN 2395-8030.
- CHEN, Y.M. (2014). A fundamental theory of environmental geotechnics and its application. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 36(1), pp.1-46, DOI: <http://dx.doi.org/10.11779/CJGE201401001>.
- CICHOTA, R. (2003). Avaliação no campo de um TDR segmentado para determinação da umidade do solo”, 72 pp. Tese de Mestrado em Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Brazil, Piracicaba.
- CORNELISSEN, T., DIEKKRÜGER, B., Y BOGENA, H.R. (2014). Significance of scale and lower boundary condition in the 3D simulation of hydrological processes and soil moisture variability in a forested headwater catchment. *Journal of Hydrology*. Vol. 516, pp.140–153. ISSN: 0022-1694, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.060.
- FAO (2015). Guía de la FAO para la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos. FAO, Agricultureros, Red de especialistas en Agricultura. Roma. Consultada: Enero 14, 2018. Disponible en: <http://agricultureros.com/guia-de-la-fao-para-la-determinacion-de-las-necesidades-de-agua-de-los-cultivos/>
- GONZÁLEZ R. F. ...[et al.] (2015). Uso de las Funciones Agua-Rendimiento y la productividad agronómica del agua en la planificación del agua en cultivos de importancia agrícola en Cuba. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*. Vol. 1 (1), pp. 95-114. ISSN Electrónico 2410-7980. México.
- LIN, G., WANG, T. y ZHENG, X. (2016). Assessing effects of soil hydraulic properties on the temporal stability of absolute soil moisture content and soil moisture anomaly under different climatic conditions. *Environmental Earth Science*. Vol. 75, pp. 143-150 ISSN 1866-6280, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4968>.
- MILLER, J.J. y CHANASYK, D.S. (2015). Unsaturated water flux at mid and lower slope positions within an inclined landscape of the Dark Brown soil zone in southern Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*. VOL 95(1), p. 27-36 DOI: [org/10.4141/cjss-2014-058](http://dx.doi.org/10.4141/cjss-2014-058).

- MONTEVERDE, S. y PINO, B. del (2014). Variabilidad espacial en las propiedades químicas del suelo en un sistema de producción con cerdos en pastoreo. *Ciencias Agronómicas – Revista*. Vol. XXIII - Año 14. p. 37–45.
- PEREIRA, S. ...[et al.]. (2006). Reflectometria no domínio do tempo nadeterminação do conteúdo de água no solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 10 (2), pp.306-314 <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000200009>, ISSN 1415-4366.
- PONIZOVSKY, A.A., CHUDINOVA, S.M. y PACHEPSKY, Y.A. (1999). Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. *Journal of Hydrology*, Vol. 218 (1-2), pp. 35-43. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00017-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00017-7).
- QUICHIMBO, P., GUAMÁN, J. y AGUIRRE, A.J. (2016). Evaluación del contenido de humedad del suelo por gravimetría y reflectometría. *Revista Científica Ecuatoriana*. Vol. 4, pp. 28-33. ISSN: 1390-9223, E-ISSN: 2528-7850.
- SUCHORAB, Z.; ...[et al.]. (2014). Methodology of moisture measurement in porous materials using time domain reflectometry. *ChemDidactEcolMetrol*, Vol. 19 (1-2), pp. 97-107. DOI: 10.1515/cdem-2014-0009.
- TOPP, G.C., DAVIS J.L. y ANNAN, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission. *Water Resour. Research*. No.16, pp. 574-582.
- VARGAS, J.G., ESPAÑA, R. y GUERRERO, J. (2011). Calibración de una sonda TDR-300 para mediciones de humedad del suelo en San Rafael de Onoto, estado de Portuguesa. *Unell Tec*, Vol. 29, pp. 89-93.
- VARGAS, R.P., SERRATO, C.F. y TORRENTE, T.A. (2015). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo FluventicUstropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas – Huila. *Revista Ingeniería y Región*. Vol. 13 (1), p. 113-123.
- VERECKEN, H.; ...[et al.]. (2014). On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Journal of Hydrology*. Vol.5 (16), pp. 76–96. ISSN: 0022-1694, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.060.
- WENJUAN, H. ...[et al.]. (2016). Measurement and Simulation of Soil Water Contents in an Experimental Field in Delta Plain. *Water*, Vol. 9 (12), pp.23-31. EISSN 2073-4441 DOI:10.3390/w9120947.

ZHAO, Y. ...[et al.] (2016). Study on a calibration equation for soil water content in field tests using time domain reflectometry. *Journal of Zhejiang University Science*. Vol.17 (3), p. 240–252. ISSN 1673-565X.