

RIEGO Y DRENAJE

ARTÍCULO ORIGINAL

Calibración de sondas electromagnéticas para estudios de riego en diferentes zonas agrícolas

Calibration of electromagnetic probes for irrigation studies in different agricultural zones

Dr.C. Teresa López-Seijas, Ing. Alfredo Ustariz, Dr.C. Enrique Cisnero-Zayas, M.Sc. Amaury Rodríguez-González, Dr.C. Julián Herrera-Puebla, Dr.C. Felicita González-Robaina

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana. Cuba.

RESUMEN. El objetivo de este trabajo fue obtener las curvas de calibración específicas para diferentes tipos de sondas electromagnéticas de medición de humedad en los suelos para su aplicación precisa en estudios de riego de diferentes zonas agrícolas de la región occidental de Cuba. El trabajo se desarrolló en dos zonas (provincias Artemisa y Pinar del Río) y en cada una se evaluaron dos sitios (fincas) con diferentes tipos de suelos: Ferralítico Rojo compactado (Zona 1), Gley Ferralítico y Ferralítico Cuarácico Amarillo lixiviado (Zona 2). Las sondas calibradas incluyen: ML2x ThetaProbe para medición en superficie y PR2 para perfil, ambas con el medidor HH2 (equipos de Delta T Devices Ltd.) y el TDR 300 (equipo de Spectrum Technologies, Inc.). La calibración se realizó a partir de mediciones simultáneas con las sondas y la toma de muestras de suelo para la determinación de la humedad por gravimetría y las curvas de ajuste se definieron a partir de un análisis de regresión. Las ecuaciones de calibración específicas obtenidas para los tres tipos de sondas evaluadas resultaron ajustadas a un modelo lineal con coeficientes de determinación mayores de 0,8 y sus parámetros (pendiente e intercepto) varían en función de las características texturales y estructurales del suelo. La comparación de éstas con las ecuaciones internas de las sondas evidencia que su no aplicación implicaría una subestimación de la humedad del suelo en las condiciones evaluadas entre 2%-30%, lo que conllevaría a errores en los cálculos de las láminas de riego en un rango de 4mm – 60mm.

Palabras clave: medidores TDR, dinámica humedad del suelo, precisión en mediciones.

ABSTRACT. The objective of this work was to obtain the specific calibration curves for different electromagnetic probes to evaluate soil moisture for its application in irrigation studies in different agricultural zones of Western Cuba. It was done evaluations in two zones (Artemisa and Pinar del Río provinces) and in two sites (farms) in each zone, with different soil types: Ferralítico Rojo compactado (Zone 1), Gley Ferralítico and Ferralítico Cuarácico Amarillo lixiviado (Zone 2). The calibrated probes include: ML2x ThetaProbe for soil surface measures and PR2 probe for soil profile, both with the HH2 measurer (Delta T Devices Ltd. equipment) and TDR 300 probe (Spectrum Technologies, Inc. equipment). The calibration was done using simultaneous soil moisture measurements with probes and taking soil samples for the determination of soil moisture by gravimetric method. Calibration curves were defined by a regression analysis. The obtained specific calibration curves for the three types of evaluated soil moisture probes were adjusted to a lineal equation with determination coefficients more than 0.8 and their parameters (slope and intercept) change with textural and structural soils characteristics. The comparative analysis with the internal probe calibration curves shows that not using specific calibration curves imply an underestimation of soil moisture between 2 % to 30 % for evaluated conditions and errors in water depth calculations in a range of 4 mm to 60 mm.

Keywords: TDR probes, soil moisture dynamic, precision measurements.

INTRODUCCIÓN.

En nuestro país, sin riego no es posible obtener rendimientos agrícolas óptimos al menos durante seis meses en el año. Y aunque más del 60% del agua disponible se dedica a esta actividad, aun así resulta insuficiente, en relación con las áreas

potencialmente cultivables (Herrera *et. al.*, 2011).

La labor investigativa que aborda los problemas del uso eficiente del agua para el incremento de los rendimientos agrícolas, ya sea en una agricultura de regadío como en una

de secano, precisa de métodos para medir el contenido de agua del suelo de forma precisa y conveniente. Entre los métodos indirectos más actuales están las sondas electromagnéticas entre las cuales las más utilizadas son las que aplican el método de Reflectometría de Dominio Temporal (TDR, por sus siglas en inglés) y este método permite obtener una respuesta rápida y precisa del contenido de agua de los suelos, facilitando por tanto los estudios relacionados con la determinación de propiedades hidrofísicas, consumo de agua por las plantas y estudios de eficiencia de aplicación de sistemas de riego, entre otros (López, 2015).

No obstante, como ha sido reconocido por diversos autores (SENTEK, 2000; Tapias *et al.*, 2001; Reyna *et al.*, 2011; Vera *et al.*, 2016; y Martínez y Ceballos, 2017; Tommaselli e Bacchi, 2001), la precisión de las mediciones con estas sondas puede mejorar grandemente si se realiza su calibración para cada condición específica donde serán utilizadas, ya que las propiedades físicas de los suelos pueden variar significativamente de las consideradas para su calibración de laboratorio, donde se unifican en dos tipos fundamentales de suelos: minerales y de alto contenido orgánico.

Por estas razones y considerando la disponibilidad actual de estos equipos en el Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), y el interés de su aplicación en proyectos de investigación y servicios de extensión que se ejecutan en distintas áreas agrícolas, es que este trabajo se plantea como objetivo lo siguiente:

Obtener las curvas de calibración específicas para diferentes tipos de sondas electromagnéticas que permitan una mayor precisión de su aplicación en el seguimiento de la dinámica de humedad del suelo para estudios de riego en diferentes zonas agrícolas.

Los datos de la Tabla 1 resumen las propiedades físicas básicas del perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado que por su alto contenido de arcilla clasifica como de textura arcillosa.

TABLA 1. Análisis granulométrico y otras propiedades físicas del perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado (tomado de Cid *et al.*, 2011)

Prof. (cm)	CC (cm ³ /cm ³)	Da a Cc (g/cm ³)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Pt (%)
0-20	0,394	1,18	57,4	21,7	20,9	53,7
20-40	0,431	1,28	61,8	20,5	17,7	49,2
40-60	0,397	1,20	62,8	14,3	28,9	51,6
60-80	0,396	1,20	61,4	18,3	20,3	51,6

Nota: Cc- Humedad a Capacidad de campo, Da- densidad volumétrica o aparente y Pt- porosidad total.

Zona 2. Provincia Pinar del Río. Municipios Los Palacios y Consolación del Sur

Las mediciones en campo para la calibración de las sondas electromagnéticas en esta zona se realizaron en dos sitios con diferentes tipos de suelo que son los siguientes:

Sitio 1. Áreas de la Unidad Empresarial de Base Agrícola (UEBA) Sierra Maestra de la Empresa Agroindustrial de Granos del municipio Los Palacios, ubicada geográficamente a los 22° 31' 15" Latitud Norte y 83° 14' 15" Longitud Oeste. El tipo de

¹ LÓPEZ, T.: Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del Sur de La Habana: Constitución metodológica al procedimiento actual para la determinación de los balances hídricos, 105pp., Tesis (en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas), Instituto de Investigaciones Fundamentales de la Agricultura Tropical (INIFAT), La Habana, Cuba., 2002.

MÉTODOS

Localización de las áreas de estudio y caracterización de los suelos presentes en las mismas

El trabajo de calibración de las sondas electromagnéticas se desarrolló en dos zonas del país en las provincias de Artemisa y Pinar del Río con diferentes tipos de suelos, las cuales se describen a continuación.

Zona I. Provincia Artemisa. Municipios Alquizar y Güira de Melena

Las mediciones en campo para la calibración de las sondas electromagnéticas en esta zona se realizaron en dos sitios con un mismo tipo de suelo que son los siguientes:

Sitio 1. Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), situada en Alquizar, provincia Artemisa, con las coordenadas: Latitud 22° 46' 50" N y Longitud 82° 36' 5" O, a una altura sobre el nivel medio del mar de 6 m y a 12 km de la costa, con un área total de 80,29 ha.

Sitio 2. Finca Camacho perteneciente a la CCS Iro de Mayo del municipio Güira de Melena, provincia Artemisa, con coordenadas 22° 45' 34" de Latitud Norte y 82° 30' 58" Longitud Oeste.

El tipo de suelo presente en esta zona es el Ferralítico Rojo compactado y ha sido ampliamente estudiado y caracterizado en cuanto a sus propiedades físicas y químicas por Cid *et al.* (2011). Según estos autores de acuerdo a su funcionamiento hídrico, el suelo presenta un comportamiento diferenciado en la capa de 0-30 cm con respecto a los valores de densidad aparente que influye en el proceso de retención de humedad y en el comportamiento de la conductividad hidráulica¹. A partir de los 40 cm hay una capa más compactada que diferencia estos procesos hidrodinámicos.

suelo presente en el área de trabajo es el predominante en este municipio, clasificado como Gley Ferralítico y sus propiedades físicas básicas se resumen en la Tabla 2, según lo descrito por Cid *et al.* (2011), por su alto contenido de arena se clasifica como de textura arenosa.

TABLA 2. Análisis granulométrico y otras propiedades físicas del perfil del suelo Gley Ferralítico (tomado de Cid *et al.*, 2011)

Prof. (cm)	CC (cm ³ /cm ³)	Da a Cc (g/cm ³)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Pt (%)
0-25	0,283	1,30	10,4	11,1	78,5	44,7
25-50	0,297	1,35	11,6	8,1	80,3	46,2
50-80	0,290	1,35	24,1	8,4	67,5	43,5

Nota: Cc- Humedad a Capacidad de campo, Da- densidad volumétrica o aparente y Pt- porosidad total.

Sitio 2. Áreas de la CCS Carlos M. Céspedes, Finca de Manolo Acosta, en Santa Catalina, municipio de Consolación del Sur, ubicada en el km 125 de la autopista a Pinar del Rio con coordenadas 22° 26' 25" Latitud Norte y 83° 28' 63" Longitud Oeste. El tipo de suelo presente en el área de trabajo es el predominante en este municipio, clasificado como Ferralítico Cuarcítico Amarillo lixiviado típico y sus propiedades físicas básicas se resumen en la Tabla 3, según lo descrito por Cid *et al.* (2011), por su alto contenido de arena se clasifica como de textura arenosa.

TABLA 3. Análisis granulométrico y otras propiedades físicas del perfil del suelo Ferralítico Cuarcítico Amarillo lixiviado típico (tomado de Cid *et al.*, 2011)

Prof. (cm)	CC (cm ³ /cm ³)	Da a Cc (g/cm ³)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Pt (%)
0-20	0,161	1,30	6,6	5,2	88,2	38,6
20-60	0,176	1,45	11,4	4,7	80,9	43,1
60-100	0,264	1,57	30,5	12,4	57,1	39,4

Nota: Cc- Humedad a Capacidad de campo, Da- densidad volumétrica o aparente y Pt- porosidad total.

Principio de funcionamiento y tipos de sondas electromagnéticas disponibles.

Principio de funcionamiento de las sondas:

Medición indirecta de la constante dieléctrica del suelo a partir de la medición del tiempo de transmisión de un pulso electromagnético o de la frecuencia o voltaje de la señal de retorno. Las lecturas son proporcionales a la constante dieléctrica y por tanto a la permitividad del medio (ξ), en este caso el suelo, la cual incluye la permitividad de cada una de las fases que constituyen el sistema suelo: la fase sólida (ξ_s), el agua del suelo (ξ_w), y la fase de aire (ξ_a) (Delta-T Devices Ltd., 2013):

$$\tau \approx \xi_s + \xi_w + \xi_a$$

El contenido de agua tiene un efecto mayor sobre la constante dieléctrica del medio que la temperatura, el tipo de suelo,

su densidad y el contenido de sales.

Tipos de sondas disponibles:

Las sondas electromagnéticas utilizadas se pueden dividir en dos grupos:

Grupo A (Figura 1):

Compuesto por la sondas del tipo Equipos Delta T (Delta T Devices Ltd), con las siguientes características Delta-T Devices Ltd. (2013):

Procedencia: Inglaterra.

Registran: Voltaje dc (mV)

Incluyen dos tipos de sondas con el mismo medidor de humedad:

- Sonda ML2x ThetaProbe para medición en superficie.
- Sonda de perfil tipo PR2 para medición en profundidad.
- Medidor de Humedad HH2

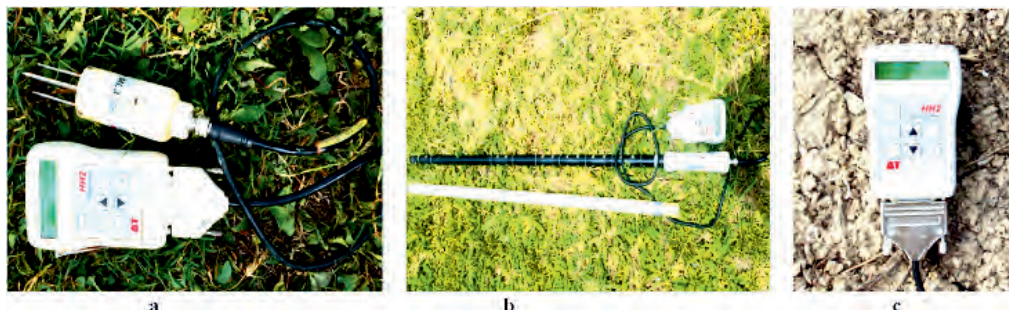


FIGURA 1. Sondas del Grupo A: a) Sonda superficial ML2x con medidor HH2; b) Sonda de perfil tipo PR2 con medidor HH2 y c) Medidor de humedad HH2.

Grupo B (Figura 2):

Compuesto por las sondas del tipo Equipos Spectrum Technologies, Inc., con las siguientes características Spectrum Technologies, Inc. (2009):

Procedencia: EUA
Registran: periodo (μ s)
 Incluye la sonda:

- TDR 300 para medición hasta 20 cm con posibilidad de acople a GPS.

Se plantea en los manuales de usuario de estas sondas que la afectación de la precisión en las lecturas de humedad por el contenido de sales será significativa solo para tenores de conductividad eléctrica $EC > 2$ dS/m.



FIGURA 2. Sonda del Grupo B: TDR 300 de Spectrum Technologies, Inc.

Calibración específica de las sondas electromagnéticas

La calibración en aire y agua destilada se establece en el manual de usuario para calibrar la sonda si se cambian las varillas de medición, pues puede influir en la precisión de la medición las características del acero de su fabricación.

Por otra parte las relaciones establecidas en estos medidores para la conversión de las señales registradas en valores de humedad volumétrica ofrecen una precisión de $\pm (0,06 - 0,03) m^3.m^{-3}$ y esta puede mejorar si se realiza su calibración para cada sitio en particular ya que las propiedades físicas de los suelos varían grandemente de un lugar a otro Delta-T Devices Ltd. (2013).

Procedimiento seguido para la calibración en cada sitio específico

La calibración de las sondas para cada sitio específico se hizo siguiendo el procedimiento propuesto por el autor adaptado de Delta-T Devices Ltd. (2013), que consta de los siguientes pasos:

- Se tomaron lecturas con la sonda y simultáneamente muestras de suelo para la determinación de la humedad (W_g) por el método directo que es el gravimétrico.
- Las lecturas con las sondas se tomaron considerando la opción de registrar los valores de voltaje o periodo junto a los valores de humedad volumétrica (W_v) calculados internamente por el medidor.
- Se repitieron las lecturas junto a los muestreos en diferentes

condiciones de humedad del suelo (similar al rango en que se va a monitorear la humedad) en cada sitio.

- Los valores de humedad se expresaron en términos de humedad volumétrica (W_v) según la expresión: $W_v = W_g \times D_a$, para lo cual se utilizaron los valores de densidad aparente (D_a) resumidos para cada tipo de suelo en las Tablas 1, 2 y 3 respectivamente.
- Los pares de valores obtenidos: mV – W_v (%) o μ s – W_v (%) se ordenaron por profundidad y se hizo un análisis de regresión lineal para encontrar los parámetros de ajuste (pendiente e intersección). El estadígrafo a considerar para la calidad de las ecuaciones es el coeficiente de determinación.
- A partir de las ecuaciones de calibración obtenidas se calcularon las humedades volumétricas ($W_{v_{calc}}$) para cada sitio y se obtuvieron relaciones lineales con los valores de humedad obtenidos con las sondas según su calibración interna ($W_{v_{TDR}}$). Estas relaciones facilitan la conversión de las lecturas con las sondas si no se toman los valores de voltaje o periodo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de las ecuaciones de calibración específicas de las sondas para cada zona y sitio estudiado

Zona I. Provincia Artemisa. Municipios: Alquízar y Güira de Melena

Sitio 1. Pulido, Alquízar

En la Figura 3a se presenta la ecuación de calibración específica obtenida para la sonda TDR ML2x con medidor HH2 en suelo Ferralítico Rojo compactado en la zona de estudio 1 (sitio 1), ubicada en Pulido, en el municipio Alquízar, provincia Artemisa. Se presenta además la ecuación de calibración interna de la sonda según los parámetros obtenidos por el fabricante en condiciones de laboratorio.

Como se puede apreciar para este primer caso la ecuación de calibración específica obtenida presenta un buen ajuste con un valor del coeficiente de determinación superior al 80%, no obstante la ecuación obtenida difiere en gran medida de la ecuación de calibración interna de la sonda debido a las diferencias texturales y estructurales del suelo Ferralítico Rojo compactado con respecto a la mezcla homogénea utilizada para la ecuación de calibración en condiciones de laboratorio.

En este caso se obtuvo una única ecuación de calibración para todas las profundidades del perfil de suelo analizado, lo cual se asocia a la relativa homogeneidad de las propiedades texturales y estructurales de este suelo según lo analizado en la Tabla 2 de los métodos. Esta ecuación debe ser utilizada a partir de la lectura del voltaje de la señal de salida que se obtiene con la sonda (en mV).

Por otra parte la Figura 3b presenta la ecuación de calibración que puede ser utilizada a partir de considerar el valor de la humedad volumétrica medida con la sonda según su ecuación interna para obtener el valor de la humedad volumétrica correspondiente a la calibración específica para este suelo y sitio. En este caso el ajuste muestra también un alto valor del coeficiente de determinación lo que asegura la precisión en la determinación de la humedad con esta sonda en esta condición específica.

La utilización de la ecuación interna de la sonda para estas condiciones de estudio implicaría una subestimación de la humedad del suelo en un 10% como promedio comparado con el uso de la calibración específica, lo que a su vez implicaría errores en los cálculos de las láminas de riego para la profundidad considerada de alrededor de 20 mm que a su vez incidiría en inexactitudes en los cálculos de los consumos de agua de los cultivos que se deriven

de los balances hídricos que se realicen en estudios de riego.

Otros autores también han encontrado relaciones lineales de las mediciones con sondas electromagnéticas y la humedad del suelo con alta significación, como Vera *et. al.* (2016) en suelos franco arcillosos de Murcia, España y han señalado posibles sobrestimaciones de la humedad si no se utilizan las ecuaciones específicas para cada sitio con valores entre 55% y 200%.

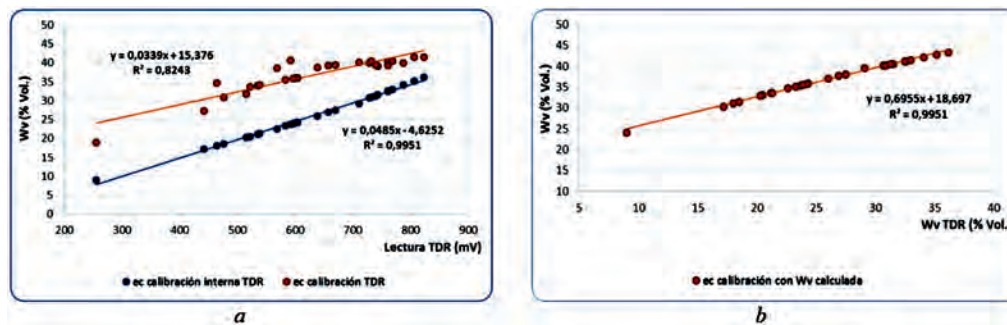


FIGURA 3. Ecuaciones de calibración para la sonda TDR ML2X con medidor HH2 en suelo Ferralítico Rojo compactado, en Pulido, Alquízar: a) ecuaciones específica e interna; b) ecuación para la humedad volumétrica.

En la Figura 4a se muestra la ecuación de calibración específica e interna obtenidas para la sonda de profundidad PR2 con medidor HH2 en suelo Ferralítico Rojo compactado para este mismo sitio. Como se aprecia la ecuación de calibración específica obtenida presenta un buen ajuste con un valor del coeficiente de determinación superior al 80% y al igual que en el primer caso la ecuación obtenida difiere en gran medida de la ecuación de calibración interna de la sonda, esto ratifica las diferencias texturales y estructurales del suelo Ferralítico Rojo compactado con respecto a la, mezcla homogénea utilizada para la ecuación de calibración en condiciones de laboratorio.

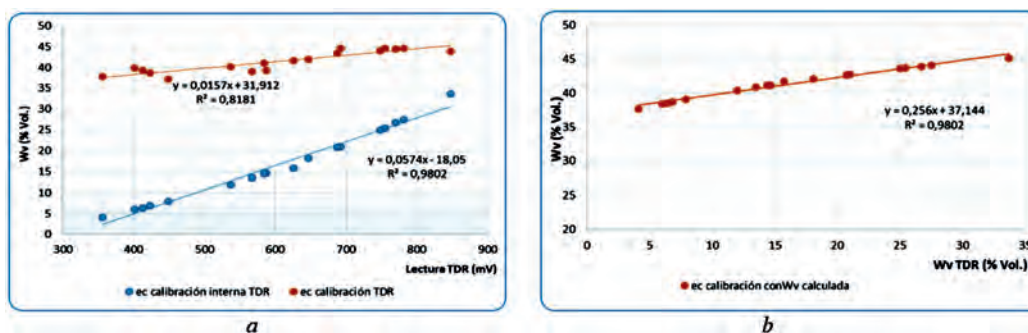


FIGURA 4. Ecuación de calibración específica e interna para la sonda de profundidad PR2 en suelo Ferralítico Rojo compactado, en Pulido, Alquízar: a) ecuaciones específica e interna; b) ecuación para la humedad volumétrica.

De manera similar a la sonda ML2x se obtuvo para esta sonda de profundidad PR2 una única ecuación de calibración para todas las profundidades del perfil de suelo analizado, lo cual está asociado como ya se explicó a la relativa homogeneidad de las propiedades texturales y estructurales de este suelo, según lo analizado en la Tabla 3.

Además en la Figura 4b se presenta la ecuación de calibración que puede ser utilizada a partir de considerar el valor de la humedad volumétrica medida con la sonda según su ecuación interna para obtener el valor de la humedad volumétrica correspondiente a la calibración específica para este suelo y sitio.

De manera similar a lo ya visto para la sonda ML2x la no utilización de la ecuación de calibración específica en estas condiciones implicaría subestimaciones de la humedad del suelo por capas en un rango de 15% para los mayores valores de humedad a 30% para los menores valores de humedad, lo

que implicaría errores en la estimación de las láminas de agua entre 30 y 60 mm por cada capa considerada.

Estos resultados coinciden con otros autores que resaltan la importancia de considerar las ecuaciones específicas de calibración para cada sitio (Vera *et al.*, 2016).

Sitio 2. Finca Camacho, Güira de Melena

La ecuación de calibración específica e interna que se muestran en la Figura 5a fueron obtenidas para la sonda TDR 300 en suelo Ferralítico Rojo compactado en la zona de estudio 1 (sitio 2), ubicada en la finca Camacho, en el municipio Güira de Melena, provincia Artemisa. Como se observa, también en este caso, la ecuación de calibración específica obtenida presenta un buen ajuste, con un valor del coeficiente de regresión superior al 80%.

En este sitio, a diferencia de los anteriores, la ecuación de calibración específica obtenida no difiere en gran medida de

la ecuación de calibración interna de la sonda debido a que se utilizó la opción disponible en el equipo de calibración para suelos con alto contenido de arcilla (HyClay), lo cual coincide con las características del suelo estudiado. Como se puede observar las pendientes de ambas rectas son similares (0,027 y 0,028) al igual que los interceptos (70 y 76).

Esta ecuación debe ser utilizada a partir de la lectura del periodo de la señal de salida que se obtiene con la sonda (en μs). Por otra parte la Figura 5b presenta la ecuación de calibración para ser utilizada

con el valor de la humedad volumétrica medida con la sonda.

En este caso los errores de estimación de la humedad al utilizar la ecuación interna de la sonda con respecto a la específica se reducen considerablemente a menos del 2%, no obstante el uso de la calibración específica implicaría imprecisiones de los cálculos de las láminas de agua de cómo media 4 mm, lo cual puede ser importante en manejos de riego localizado, como ha sido señalado por otros autores (Tapias *et. al.*, 2001; Reyna *et. al.*, 2011; Vera *et. al.*, 2016; Martínez y Ceballos, 2017).

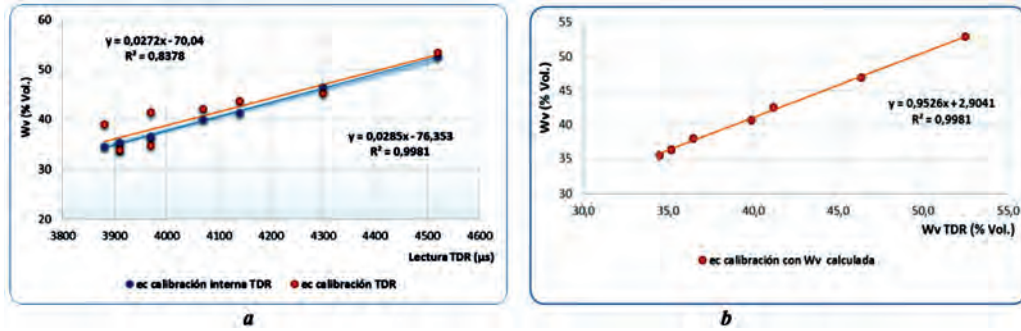


FIGURA 5. Ecuación de calibración específica e interna para la sonda TDR 300 en suelo Ferralítico Rojo compactado, en la Finca Camacho, Güira de Melena: a) ecuaciones específica e interna; b) ecuación para la humedad volumétrica.

Zona 2. Provincia Pinar del Río. Municipios: Los Palacios y Consolación del Sur

Sitio 1. UEBA Sierra Maestra, Los Palacios

En la *Figura 6a* se muestra la ecuación de calibración específica e interna obtenidas para la *sonda ML2x* en suelo Gley Ferralítico en la zona de estudio 2 (sitio 1), ubicada en la UEBA Sierra Maestra del municipio Los Palacios, provincia Pinar del Río. En este caso se observa que, a pesar de existir una leve dispersión entre los puntos, la ecuación de calibración específica obtenida se ajusta bien a una única recta, con un coeficiente de regresión superior al 80%, sin embargo difiere en gran medida de la ecuación de calibración interna de la sonda, debido a que

para este tipo de suelo los contenidos de arena son elevados (más de 70%) con respecto a la mezcla homogénea utilizada en condiciones de laboratorio para la ecuación de calibración.

Igualmente en la *Figura 6b* se presenta la ecuación de calibración para ser utilizada a partir de considerar el valor de la humedad volumétrica medida con la sonda con un alto coeficiente de determinación que asegura la precisión en la estimación de la humedad en estas condiciones.

La comparación de las humedades estimadas con la ecuación de calibración interna con respecto a la específica implicaría subestimaciones de cómo media un 10% similar a las observadas con la sonda ML2x en suelo Ferralítico Rojo compactado en la zona 1 de estudio.

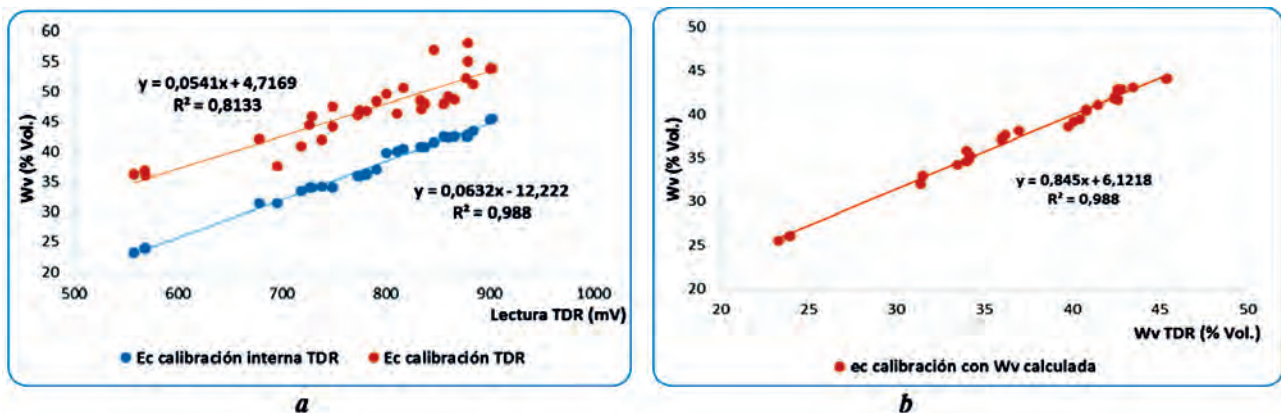


FIGURA 6. Ecuaciones de calibración para la sonda ML2x en suelo Gley Ferralítico, Los Palacios, Pinar del Río: a) ecuaciones específica e interna; b) ecuación para la humedad volumétrica.

Sitio 2. Finca de Manolo Acosta. Consolación del Sur

La *Figura 7a* muestra la ecuación de calibración específica e interna obtenidas para la sonda TDR ML2x con medidor HH2

en suelo Ferralítico Cuarcítico Amarillo lixiviado típico en la zona de estudio 2 (sitio 2), ubicada en el municipio Consolación del Sur, provincia Pinar del Río.

En dicha figura se aprecia una alta dispersión de los valores por lo que no se pueden ajustar a una única recta, además el coeficiente de determinación es muy bajo (0,2329). Esto puede estar asociado a las variaciones en las propiedades texturales del suelo entre las capas de 0-15 cm y 15-30 cm (ver tabla 3 de Materiales y Métodos), donde los contenidos de arcilla varían de 7% a más de 11% respectivamente. Para resolver esta particularidad fue necesario hacer el ajuste de las curvas independiente para cada profundidad.

De este modo las ecuaciones de calibración específica para la sonda TDR ML2x con medidor HH2 en suelo Ferralítico Cuarcítico Amarillo lixiviado típico son las mostradas en la Figura 7b, presentando un buen ajuste y un valor del coeficiente de determinación cercano o superior al 80%. Aparece además, en esta figura la ecuación de calibración interna para dicha sonda determinada por el fabricante en condiciones de laboratorio. Estas ecuaciones deben ser utilizadas a partir de la lectura del voltaje de la señal de salida que se obtiene con la sonda (en mV). La Figura 7c muestra además las ecuaciones de calibración para ser utilizadas a partir de considerar el valor

de la humedad volumétrica medida con la sonda para obtener el valor de la humedad volumétrica correspondiente a la calibración específica para este suelo y sitio.

El análisis de la estimación de las humedades a partir de considerar las ecuaciones específicas con respecto a las internas de la sonda refleja posibles sobreestimaciones de la humedad del suelo a la profundidad de 15 cm de hasta 10%, que implica errores de 15 mm en la cuantificación de las láminas de agua, para el rango de los mayores valores de humedad. Esta sobreestimación disminuye considerablemente (menor del 2%) para las humedades menores a $0,15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

Por otra parte para la profundidad de 30 cm se observa algo similar a lo ya visto en los casos anteriores con una subestimación de la humedad en todo el rango de cómo media 5% que implica errores en las láminas de agua de 8 mm como media.

Reina *et al.* (2011) encontraron ecuaciones de calibración específicas en suelos de textura limosa en Córdoba, Argentina y demostraron que mejoraban la estimación de la humedad del suelo en más del 2%.

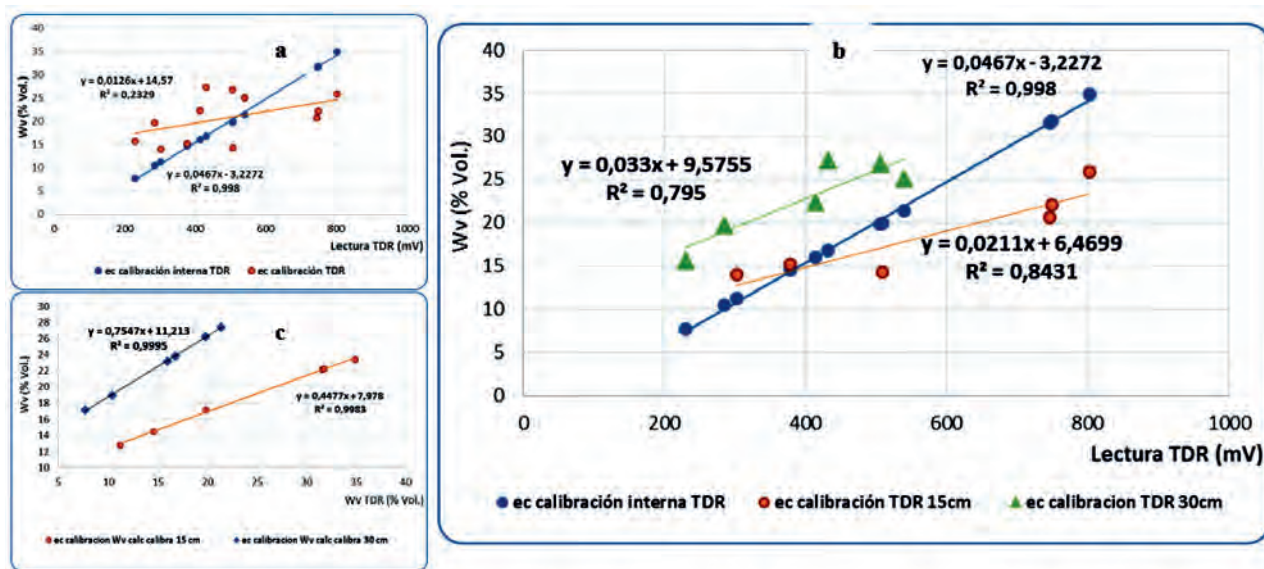


FIGURA 7. Ecuaciones de calibración para la sonda TDR ML2x en suelo Ferralítico Cuarcítico Amarillo lixiviado, en Consolación del Sur: a) sin diferenciar por capas del suelo, b) ecuaciones específica e interna por capas; c) ecuaciones por capas para la humedad volumétrica.

Análisis integral de las ecuaciones de calibración específicas obtenidas por tipos de sondas y tipos de suelos

La comparación entre los valores de las pendientes (a) y los interceptos (b) de todas las ecuaciones de calibración obtenidas (Tabla 4) indica primeramente que los parámetros de las ecuaciones de calibración para la sonda ML2x en diferentes tipos de suelos (Ferralítico Rojo compactado, Gley Ferralítico y Ferralítico Cuarcítico Amarillo lixiviado) cambian asociados fundamentalmente a las diferencias en sus propiedades texturales. Las pendientes de las curvas de calibración de esta sonda no varían significativamente, excepto para el Gley Ferralítico, donde la pendiente es prácticamente el doble (de 0.025 como media a 0.05), lo cual puede estar asociado a los altos contenidos de arena de este tipo de suelo que lo diferencia de los demás, donde hay mayor contenido de arcilla.

Por otra parte, los interceptos de las ecuaciones para los suelos Gley Ferralítico y Ferralítico Cuarcítico difieren en gran medida del estimado para el Ferralítico Rojo compactado, donde este aumenta en más del doble. Estas diferencias en los interceptos reflejan las variaciones de la constante dieléctrica en la fase sólida del suelo que no pueden ser explicadas por las variaciones en la humedad y pueden estar asociadas al tipo de arcilla presente en el Ferralítico Rojo compactado con respecto a los otros dos suelos, la cual puede tener mayor contenido de agua de constitución. Esto ha sido señalado por otros autores como Cid *et al.* (2011).

Otros autores han señalado el efecto de las propiedades físicas texturales de los suelos sobre las ecuaciones de calibración de este tipo de sondas y en particular el efecto de los contenidos de arcilla (Martínez y Ceballos, 2017; Reina *et al.*, 2011; Tommaselli e Bacchi, 2001).

Por otra parte, un análisis de los parámetros de las ecuaciones de calibración para un mismo tipo de suelo con diferentes tipos de sonda, como es el caso de las ecuaciones para las sondas ML2x, PR2 y TDR-300 en el suelo Ferralítico Rojo compactado, muestra que las pendientes son similares lo que está asociado a que es un mismo tipo de suelo y que la variación de la lectura de la sonda responde al mismo principio que asume que la variación es directamente proporcional al contenido de agua del suelo.

No obstante, en este caso si se analizan los interceptos éstos van a variar significativamente de una sonda a otra para el mismo tipo de suelo (entre 15 y 70) lo cual está asociado

principalmente a la estructura del equipo, el tipo, cantidad, tamaño y disposición de las varillas o sensores, los accesorios para la medición como es el tubo de acceso para la sonda de profundidad PR2 y los medidores con sus diferentes formas de captura y conversión de la señal.

El efecto de los tipos de varillas y las formas de captura y conversión de las señales de los equipos sobre las relaciones de calibración, también ha sido señalado en otros trabajos antecedentes relacionados con el diseño y construcción de diferentes tipos de sondas electromagnéticas (SENTEK, 2000; Tapias *et. al.*, 2001; Reyna *et. al.*, 2011; Vera *et. al.*, 2016; Martínez y Ceballos, 2017).

TABLA 4. Pendientes(a), interceptos (b) y coeficientes de determinación (R²), para cada tipo de suelo y sonda evaluada

Tipo de Suelo	Lugar	Prof. Calibración	ML2x + HH2			Prof. PR2 + HH2			TDR 300		
			a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
Ferralítico Rojo compactado	Pulido, Alquízar	0-100 cm	0,03	15,38	0,82	0,02	31,91	0,82			
	Güira de Melena	0-20 cm							0,03	70,04	0,84
Gley Ferralítico	Los Palacios	0-15 cm	0,05	4,72	0,81						
Ferralítico Cuarácitico Amarillo lixiviado típico	Consolación del Sur	0-15 cm	0,02	6,47	0,84						
		15-30 cm	0,03	9,58	0,80						

CONCLUSIONES

- La no utilización de las ecuaciones de calibración específicas obtenidas para cada condición de estudio implicaría una subestimación de la humedad del suelo entre 2%-30% que conllevaría a errores en los cálculos de las láminas de riego en un rango de 4 mm – 60 mm.
- Las ecuaciones de calibración específicas obtenidas para los tres tipos de sondas electromagnéticas evaluadas resultaron ajustadas a un modelo lineal con coeficientes de determinación mayores del 80% y sus parámetros varían en función de las características texturales y estructurales del suelo o

- incluso de las distintas capas en un mismo perfil de suelo.
- Para la sonda ML2x las pendientes de las ecuaciones de calibración específica no varían significativamente por tipos de suelos, excepto para el Gley Ferralítico, mientras que el intercepto difiere marcadamente para el Ferralítico Rojo compactado, lo que se asocia a las características texturales de estos suelos.
- Las ecuaciones de calibración específicas obtenidas en el suelo Ferralítico Rojo compactado para las sondas evaluadas, definen pendientes similares e interceptos que varían significativamente, lo que se asocia a las características estructurales y de medición de cada equipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CID, G.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; J. HERRERA Y RUÍZ, M. E.: “Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2): 42-46., 2011, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.

DELTA-T DEVICES LTD: *Manual de usuario de sondas de humedad tipo HH2*. Versión 4.0.1. 117 pág., 2013.

FRIEDRICH, TH.: “Manejo Sostenible de Suelo con Agricultura de Conservación. Significado para el cultivo de Arroz”, *Revista Ingeniería Agrícola*, 7(1): 3-7(enero-febrero-marzo), 2017, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: **2227-8761**.

HERRERA, J.; LÓPEZ, T. Y GONZÁLEZ F.: “El uso del agua en la agricultura en Cuba”, *Revista Ingeniería Agrícola*, 1(2): 1-7, (julio-diciembre), 2011, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: **2227-8761**.

HIDROSENSE: Manual de usuario sonda TDR, 25pp., Ed. Hidrosense. 2001.

MARTÍNEZ, J. y CEBALLOS, A.: Diseño y validación de una sonda TDR para la medición de la humedad del suelo. Temas de Investigación en Zona no Saturada. Univ. Salamanca [en línea] 2010, Disponible en: http://www.abe.ufl.edu/carpna/files/pdf/zona_no_saturada/temas_de_investigacion_v5/10.pdf [Consulta: enero 22 2017].

REYNA, T.; REYNA, S.; LÁBAQUE, M.; FULGINTINI, F.; RIHA, C. Y LINARES, J.: “Importancia de la determinación de la humedad en estudios de infiltración y escorrentía superficial para períodos largos” Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional Córdoba, *Ambi-Agua, Taubaté*, 6(2): 91-110, 2011. (DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.188>).

SENTEK PTY LTD.: *Diviner 2000 User Guide*, 70pp., Versión 1.2. 2000.

- SPECTRUM TECHNOLOGIES, INC.: *Manual del producto Sonda de medición de humedad TDR 300*, 31pp., Ed. FIELDSCOUT, USA, 2009.
- TAPIAS, J.C.; SALGOT DE MARÇAY, M. Y CASAS, A.: “Utilidad de la técnica TDR para la medida de la variación espacial y temporal de la humedad del suelo en campos de golf”, *Edafología*, ISSN: 1135-6863, 8(3): 1-10, 2001.
- TOMMASELLI, J. T. G. e BACCHI, O. O. S.: Calibração de umumequipamento de TDR para medida de umidade de solos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 36(9): 1145-1154, 2001, ISSN: 0100-204X, ISSN: 1678-3921 (Online)
- VERA, J., ABRISQUETA., J.M., QUEZADA, R., MUNGUÍA, J., CALLEJAS, R., GÁLVEZ, R.A., ABRISQUETA, I., RUIZ-SÁNCHEZ, M.C.: Calibración de sondas capacitivas para estimar la humedad del suelo en condiciones de campo: efecto de la pedregosidad. [en línea] 2016, Disponible en: www.plastiques-agricoles.com/wp-content/uploads/2016/06/Irrigation-07.pdf [Consulta: enero 22 2017].

Recibido: 23/11/2017.

Aprobado: 04/05/2018.

Teresa López, Investigadora Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana. Cuba. Correo electrónico: directoradjunta@iagric.cu

Alfredo Ustariz, Correo electrónico: directoradjunta@iagric.cu

Enrique Cisneros, Correo electrónico: dptoriegol@iagric.cu

Amaury Rodríguez, Correo electrónico: dptomecan8@iagric.cu

Julián Herrera, Correo electrónico: direccioninvest1@iagric.cu

Felicita González, Correo electrónico: dptoambiente4@iagric.cu

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

Programa de Asociación de País
Fortalecimiento de Capacidades para la Coordinación de Información y los sistemas de Monitoreo/ MST en Áreas con problemas de manejo de los Recursos Hídricos

El “Programa de asociación de País” (CPP OP-15) en “Apoyo a la implementación del Programa Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía de la República de Cuba”, recoge los fundamentos que propician el Manejo Sostenible de Tierras (MST). Para ello, propone fortalecer la coordinación entre las entidades nacionales, ofrece las alternativas para prevenir la degradación de tierras, así como recuperar y rehabilitar las funciones, resiliencia y productividad de los ecosistemas e incrementar la seguridad alimentaria.

Sus acciones se centran en la eliminación de las barreras que se oponen al logro del MST, mediante la aplicación de modelos que mejoren la integración entre los actores a todos los niveles, mediante acciones en el terreno, en el contexto de las políticas, el planeamiento, las regulaciones y en la toma de conciencia ciudadana en el manejo de los recursos naturales sobre bases científicamente argumentadas. En particular, el Proyecto 2 tiene como objetivo fortalecer la coordinación de la información y los sistemas de Monitoreo en la gestión de los recursos hídricos en función del MST”.

Todos por nuestra tierra

PROYECTO 2