

MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO FERRALÍTICO CON AYUDA DEL MÉTODO DIELECTRICO
MOISTURE MEASUREMENT OF FERRALITIC RED SOIL BY DIELECTRIC METHOD

Autores: Santiago Cabrera Moreira

Claudio Pérez Olmo

Kirenia Raquel Rodríguez Valle

Institución: Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez

Correo electrónico santiagoc@ingenieria.unica.cu

RESUMEN

En el trabajo se exponen las correlaciones experimentales existentes entre la humedad de la capa superficial de un suelo ferralítico rojo y su permitividad dieléctrica. En Cuba no han sido divulgadas investigaciones semejantes por lo que el trabajo tuvo como objetivo la determinación de las dependencias mencionadas. La capacidad eléctrica C, linealmente relacionada con la permitividad dieléctrica del suelo, fue determinada con ayuda del medidor LCR-XJ2811C, para la medición de la humedad w del suelo fue aplicado el método gravimétrico a las mismas muestras. Para frecuencias de 1 000y 10 000 Hz, la dependencia C (w) puede ser descrita adecuadamente por polinomios de segundo o tercer grados en correspondencia con investigaciones realizadas en otras latitudes.

Palabras clave: Permitividad Dieléctrica, Suelo Ferralítico Rojo, Contenido de Humedad, Propiedades Dieléctricas, Polarización.

ABSTRACT

In this paper experimental correlations between the moisture of the superficial layer of a red ferralitic soil and its dielectric permittivity are stated. These types of investigations have not been spread in Cuba that is why this work has as a main objective the determination of the mentioned above empiric dependences. The electrical capacity, linearly related to the soil dielectric permittivity using the LCR-

X.12811C meter was determined; as for the moisture measurement the gravimetric method was applied to the same samples. For 1 000 and 10 000 Hz frequencies, the dependence $C(W)$ can be appropriately described by the second or third degree polynomials in correspondence with investigations carried out in other parts of the world.

Keywords: Dielectric Permittivity, Red Ferralitic Soil, Humidity Content, Dielectric Properties, Polarization.

INTRODUCCIÓN

Es conocido que 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). Siendo un recurso limitado a escala 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. 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. Además, la determinación de la variación de la humedad 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. Con estas consideraciones resulta obvia la importancia de la aplicación de métodos fiables, económicos y respetuosos del medio ambiente para la medición de la humedad del suelo y sus variaciones, así como en la respuesta de estas variaciones a diferentes condiciones del contorno.

Todos los métodos de medición del contenido de humedad del suelo usan una propiedad física de una muestra que varía con el contenido de humedad. En Cuba el método más usado es el gravimétrico, método directo de determinación del parámetro mencionado que es laborioso, alto consumidor de tiempo y energía además de ser destructivo de la muestra utilizada. Otros métodos resultan altamente costosos o poco fiables y no han sido ampliamente extendidos en la práctica agrícola e investigativa.

En la práctica internacional el método dieléctrico destaca por su divulgación y potencialidades para la determinación de la humedad del suelo y la descripción del estado físico del suelo, es basado en la relación directa existente entre el volumen de agua en este medio y el valor de su permitividad dieléctrica.

La permitividad dieléctrica (Gibbs, 2010) es la característica fundamental de las propiedades dieléctricas del suelo, ella muestra cuantas veces la intensidad del campo eléctrico en el medio determinado es menor que en el vacío (o el aire).

La acción del campo electromagnético sobre las propiedades dieléctricas del suelo, como en cualquier dieléctrico (Gómez, 2011), está condicionada por los procesos de polarización de los dipolos elementales de la sustancia. Según Nerpín y Chudnovski (1967), el proceso de polarización en el suelo posee un carácter complejo debido a la existencia y superposición de las polarizaciones electrónica, iónica, dipolar, estructural e interlaminar que tiene lugar en los distintos componentes del sistema. Cada una de las fases, al entrar en distintas dosificaciones e interrelaciones en el volumen total de suelo, introduce su aporte al valor efectivo de ϵ del sistema como complejo único de elementos. Es por ello que la cuestión acerca del valor de esta magnitud física en este medio resulta compleja. Desde el punto de vista práctico, son asequibles los métodos experimentales de su determinación para el sistema como un todo.

Los resultados experimentales muestran grandes diferencias en el valor de esta magnitud para los diferentes componentes. Especial influencia sobre ella tienen los contenidos agua. Esta relación permite la determinación del contenido de humedad del suelo a partir de la medición de la permitividad dieléctrica de este sistema (Sudakova, 2010; Topp et al., 1980).

En la literatura extranjera se reporta un gran número de trabajos que investigan el tema. En Cuba no han sido divulgadas investigaciones análogas, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo principal la obtención de las dependencias experimentales de la capacidad eléctrica de un condensador, con suelo ferralítico rojo y su mezcla con arena de río como dieléctrico, en función de su contenido de humedad, así como mostrar la incidencia en ellas de la frecuencia de la señal electromagnética. La capacidad eléctrica del condensador es linealmente proporcional a la permitividad dieléctrica del material colocado entre sus armaduras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de esta investigación fueron utilizadas muestras de la capa superficial (0 – 5 cm) de un suelo ferralítico rojo (SFR) bajo pasto y el mismo suelo mezclado con arena de río en una razón de $\frac{1}{4}$ (25 % de suelo/75 % de arena).

Durante la investigación fue utilizado un condensador cilíndrico cuyas dimensiones son las siguientes:

- Longitud efectiva L: 0,142 m
- Diámetro interno del cilindro externo b: 0,019 m
- Diámetro del cilindro interno a: 0,003 m

La capacidad eléctrica C de este condensador está relacionada directamente con la permitividad dieléctrica ε del material, situado entre sus armaduras como indica la fórmula siguiente:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon L}{\ln(b/a)} \quad (1)$$

En la fórmula (1) ε_0 es la constante dieléctrica.

El suelo y la arena, secados al aire libre y pasados por un tamiz de 1 mm, fueron depositados en el cilindro y ligeramente compactados. A continuación fueron humedecidos por capilaridad hasta la saturación. Las determinaciones de capacidad eléctrica, realizadas en días sucesivos a partir de este contenido de humedad y hasta el punto de marchitez para el caso del suelo ferralítico rojo, fueron realizadas con ayuda del medidor digital LCR-XJ2811C. Este instrumento permite, entre otras mediciones, la obtención de las dependencias mencionadas para tres frecuencias diferentes: 100, 1 000 y 10 000 Hz.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 muestra las dependencias experimentales de la capacidad eléctrica del condensador relleno con suelo ferralítico para frecuencias del pulso electromagnético de 10 y 1 kHz.

Existe una relación directa entre la capacidad eléctrica (y la permitividad dieléctrica) y el contenido de humedad del suelo. La dependencia puede ser descrita por polinomios de segundo grado con altos coeficientes de determinación.

Este resultado es coherente con los reportados por varios investigadores en trabajos similares. Según Nerpín y Chudnovski (1967), en el suelo el incremento del contenido de agua, que posee una permitividad relativa entre 10-20 veces mayor que el resto de los componentes del sistema, condiciona el aumento del valor efectivo de la permitividad dieléctrica del sistema.

En opinión de Topp et al. (1980) el contenido de humedad es el factor determinante del valor de la permitividad dieléctrica del suelo. Otros factores como la temperatura, el tipo de suelo, la densidad de la muestra y contenido de sales tienen un efecto insignificante.

Estos autores proponen un modelo polinomial que sirve de base a la reflectometría de dominio temporal (TDR, por sus iniciales en inglés) que permite la medida del contenido en agua del suelo "in situ":

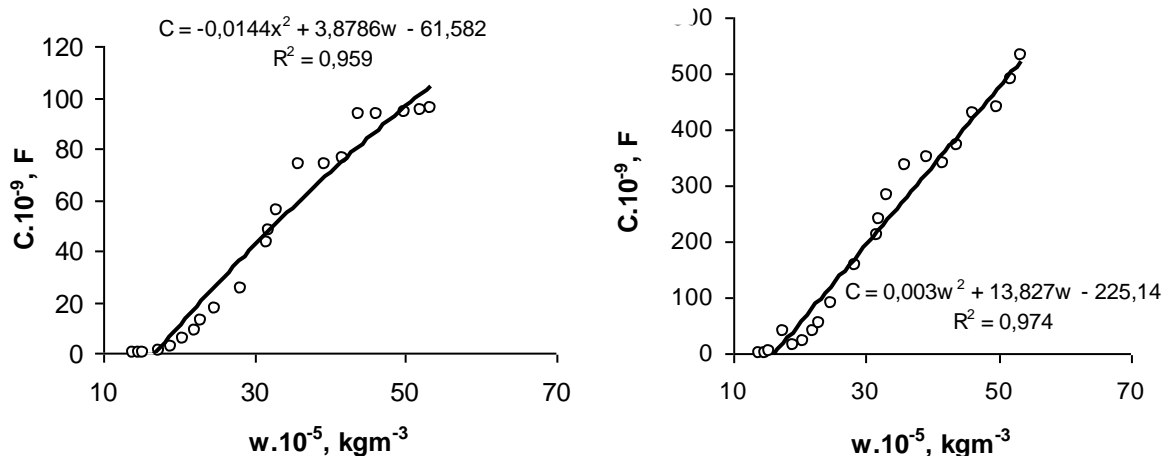


Figura 1. Capacidad eléctrica en función del contenido de humedad del suelo para 10 y 1 kHz respectivamente.

$$\theta = 0,0000043 \varepsilon^3 - 0,00055 \varepsilon^2 + 0,0293 \varepsilon - 0,053$$

Aquí θ representa el contenido volumétrico de humedad del suelo.

Teniendo en cuenta que este modelo no es válido para los suelos orgánicos, Roth et al. (1992) proponen un modelo diferente:

$$\theta = 0,0000361 - 0,0019\varepsilon^2 + 0,0448\varepsilon - 0,078$$

Por su parte, Baliscio y Lomas (1989) encontraron que el contenido volumétrico de humedad del suelo puede ser correlacionado con la capacidad C de un condensador plano y la frecuencia ν de una señal electromagnética mediante la expresión:

$$\theta = 0,1418 \upsilon^2 + 0,03125 C^2 - 0,0596 \upsilon C + 0,04182 \upsilon - 0,03075 C + 0,00473$$

Trabajos más recientes (Sudakova, 2010; Beliaev, 2003) confirman la dependencia de ε de la humedad del suelo aunque no son determinantes respecto al rol de otros factores.

Las curvas de la figura 2 muestran que para todo el intervalo de humedades del suelo investigado existe una relación inversa entre los valores de la capacidad eléctrica (de la permitividad dieléctrica) y la frecuencia del pulso electromagnético utilizado.

El resultado es similar al obtenido por Beliaev et al. (2003) y Kra (1992) en suelos de distinta composición mecánica.

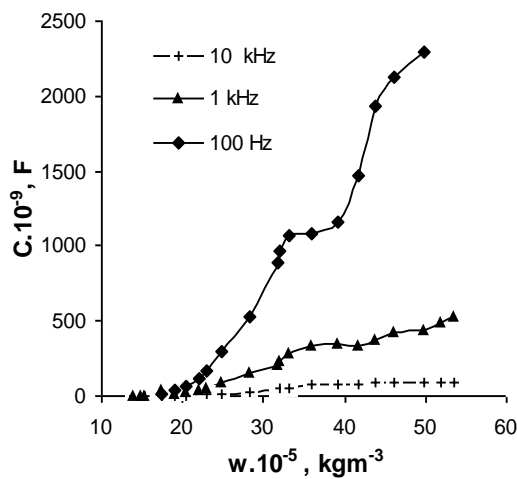


Figura 2. Comportamiento de la capacidad eléctrica del capacitor en función de la frecuencia de la señal utilizada.

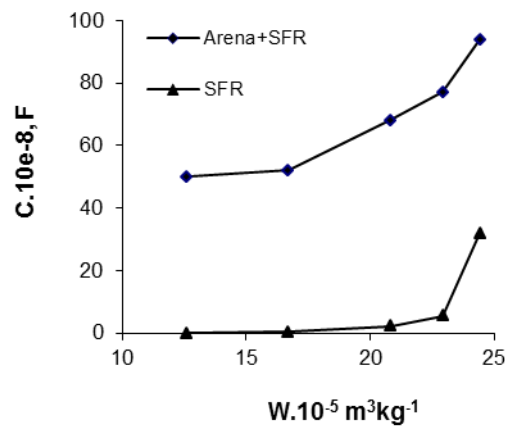


Figura 3. Comportamiento de las capacidades eléctricas en función de la humedad en el SFR y su mezcla con arena.

Según los primeros autores, para altas frecuencias (10-10³ MHz), en la mayor parte de los componentes del suelo, los fenómenos de polarización predominan sobre los fenómenos de conductividad mientras que para frecuencias bajas (menores de 100 Hz) no se ha observado que la permitividad dieléctrica dependa de la frecuencia del pulso.

El resultado puede encontrar explicación en la teoría de Debye (Schroeder, 2000) si, con toda razón, el suelo humedecido es considerado un líquido polar. En tal caso, la permitividad dieléctrica debe decrecer con la frecuencia, comportamiento del sistema que encuentra reflejo en diferentes modelos. Los más utilizados comúnmente son el

modelo de Debye (2) y el de Cole-Cole (3) también denominado de Maxwell-Wagner (Topp et al., 2000):

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau} - i \frac{\sigma_0}{\omega\varepsilon_0} \quad (2)$$

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (i\omega\tau)^{1-\xi}} - i \frac{\sigma_0}{\omega\varepsilon_0} \quad (3)$$

En (3), ξ es un coeficiente que cumple la condición: $0 < \xi < 1$. En ambos se considera la variación de la permitividad dieléctrica en función de la frecuencia ω , la conductividad dieléctrica estática (frecuencia nula del pulso) σ_0 de dos valores extremos de permitividad, ε_s y ε_{∞} , a baja frecuencia el primero y a muy alta el segundo, y el periodo de relajación τ . En las expresiones anteriores i es la unidad compleja ($\sqrt{-1}$).

En la figura 3 se exponen las tendencias de variación de la capacidad eléctrica en función del contenido de humedad en el SFR y su mezcla con arena para una frecuencia de 1 kHz de la señal electromagnética. Para iguales contenidos de humedad, los valores de permitividad dieléctrica para el caso de la mezcla de arena y suelo son significativamente mayores que para el suelo. Tal comportamiento de este parámetro puede explicarse a partir de distribución relativa entre las fases sólida y gaseosa de estos sistemas.

En efecto, los datos experimentales (Nerpín y Chudnovski 1967) muestran que todos los componentes sólidos del suelo poseen valores mayores de permitividad dieléctrica que el aire. Para un mismo contenido de humedad, en el caso de la mezcla de arena y suelo, a la fase sólida corresponde una parte significativamente mayor del volumen total del sistema en comparación con el suelo puro. La capacidad eléctrica del capacitor con dieléctrico del primer material entre sus armaduras será mayor que cuando tiene dieléctrico del segundo. Este resultado preliminar puede ser un indicio de la influencia de la composición mecánica del suelo y otros parámetros asociados sobre la permitividad dieléctrica del suelo que, en casos concretos, podría no ser despreciable.

Considerando que, desde el punto de vista agrícola, resultan interesantes los contenidos de humedad entre el límite productivo y la capacidad de campo (aproximadamente: $0,75 CC \leq w \leq CC$), se hizo un ensayo de modelación de la función $C = f(w)$ para el suelo ferralítico rojo. Los resultados se muestran en la figura 4.

Para las frecuencias utilizadas, los valores de las magnitudes físicas medidas tienen ajustes altamente significativos en modelos polinomiales de segundo grado lo que resulta alentador para la automatización del riego en este tipo de suelo. Ajustes similares en modelos lineales reporta Kra (1992) en suelos orgánicos para contenidos volumétricos de humedades inferiores al 40 y 45 % utilizando sensores capacitivos en condiciones de campo.

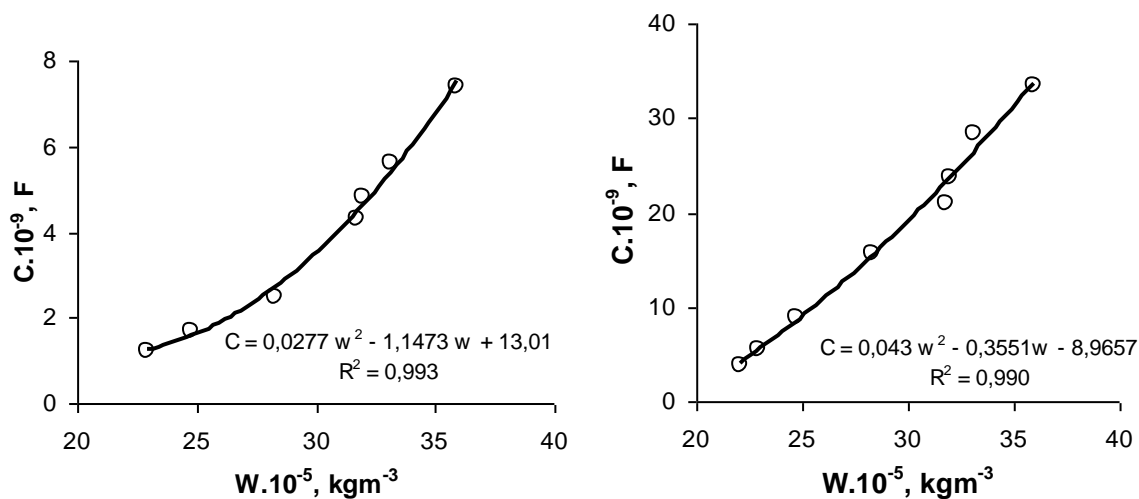


Figura 4: Comportamiento de la capacidad eléctrica en función del contenido de humedad entre el límite productivo y la capacidad de campo para frecuencias de 10 y 1 kHz respectivamente.

Los resultados arriba expuestos son promisorios para la práctica agrícola y el estudio general del contenido de humedad del suelo dado que, una vez debidamente instrumentado, fundamentan un método de medición que permite un ahorro considerable de tiempo y energía considerando su esencia y la demanda energética del equipamiento utilizado. Por otra parte, a diferencia de otras vías, es un método no destructivo y puede garantizar el control automático del riego de los cultivos. Aunque se precisan estudios más detallados, es indudable que el método expuesto

puede contribuir al desarrollo de un nuevo enfoque de estudio del estado físico del suelo.

CONCLUSIONES

La relación entre la capacidad eléctrica de un condensador cilíndrico con suelo ferralítico rojo entre sus armaduras y el contenido de humedad del mismo se ajusta a un modelo polinomial de segundo grado con coeficientes de determinación por encima de 0,95 para frecuencias de campo electromagnético de 1 y 10 kHz. Para intervalos de humedad entre el límite productivo y la capacidad de campo el ajuste anterior alcanza valores del coeficiente de determinación de 0,99 para ambos valores de frecuencia de la señal electromagnética. Existe una relación inversa entre la capacidad eléctrica de un condensador cilíndrico con suelo ferralítico rojo entre sus armaduras y la frecuencia del campo electromagnético utilizado.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- BALISCIO, C.C. Y LOMAS, K.M.: «A comparative Study of Moisture sensor for Use in Mushroom Beds», *Transactions of the ASSAE*, Vol.32, pp. 928-933, 1989.
- BARONI, L.; CENCI, L.; TETTAMANTI, M. Y BERATI, M.: «Evaluating the environment impact of various dietary pattern combined with different food production system», *European Journal of clinical nutrition*, No. 61, pp. 270-286, 2007.
- BELIAEV, T.A.; BOBROV, P.P.; IVCHENKO, O.A. Y MANDRIGUINA, V.N.: «Zavisimost dielectricheskoi pronisaemosti sviazannoi vadoi at yiyó kalischestva» *Islidobanue Zemlí at kosmosa*, No. 5, pp. 28-34, 2003.
- GIBBS, K.: *Advanced Physics*, Cambridge University Press, Great Britain, pp.336-338, 2010.
- GÓMEZ, T.: *Cuestiones y problemas de Electromagnetismo y semiconductores*, Servicios y publicaciones SPUV-99.4127, Universidad Politécnica de Valencia, pp.208-209, España, 2011.
- KRA, E.: *The de desigh, construction and tests of an in situ capacitance moisture sensor and portable capacitance moisture meter for organic soil and sawdust*, Thesis of master Science, The University of British Columbia, 1992.
- FABREGAT, F.; FERRIOLS, N.S.; GARCÍA, G. Y BISQUERT, J.: *Estudio de los diferentes estados energéticos del agua del suelo en función de los fenómenos de relajación*

- dieléctrica. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA., Tenerife, pp. 23-28, 1999.
- NERPÍN, O.V. Y CHUDNOVSKI, A.F.: *Física Poshb» Izdatielstva*, Nauka, pp. 400- 401, Moskvá, 1967.
- TOPP, G.C.; ZEGELIN, S. Y WHITE, I.: «Impact of the real and imaginary components of relativity permittivity on time domain reflectometry», *Soil Science Society American Journal*, No. 64, pp. 1244-1252, 2000.
- TOPP, G.C.; DAVIS J.L. Y ANNAN A.P.: «Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission», *Water Resour. Research*, No.16, pp. 574-582, 1980.
- SCHROEDER, D.: *An Introduction to Thermal Physics*, Addison-Wesley, San Francisco, California, 2000.
- SUDAKOVA, M.S.: *Razrabotka y primenienie metodiki dielectrichskij izmerienii s ispolzovaniem palievova geodarta v laboratornij uslovijaj*, Avtoreferat disertaksii na saiskanie uchonoi stepeni kandidata fisico-matematicheskij nauk, MGU, Moskvá, 2010.