

CORRELACIONES EMPÍRICAS ENTRE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA Y LA HUMEDAD EN DOS SUELOS AGRÍCOLAS CUBANOS
EMPIRICAL CORRELATIONS BETWEEN DIELECTRIC PERMITTIVITY AND MOISTURE IN TWO CUBAN AGRICULTURAL SOILS

Autores: Santiago Cabrera Moreira

Julio Osbel Batista Charles

Yosvany Palmero Venegas

Institución: Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez

Empresa Cubasoy de Ciego de Ávila

Correo electrónico: santiagoc@unica.cu

RESUMEN

El valor permitividad dieléctrica de un medio es muy sensible al contenido de agua por lo que en la práctica agrícola puede ser utilizado para la medición de la humedad del suelo. En Cuba no son conocidas investigaciones en suelos dirigidas al estudio de la dependencia de este parámetro del contenido de humedad por lo que el presente trabajo tiene como objetivo la obtención experimental y fundamentación teórica de dichas dependencias empíricas para suelos ferralítico rojo y vertisol, utilizando para ello el medidor LCR-XJ2811C y capacitores plano y cilíndrico. Se concluye que en ambos casos, las correlaciones mencionadas en estos suelos son descritas adecuadamente por polinomios de tercer grado. En todos los casos, para iguales contenidos de humedad, se obtienen valores más elevados de permitividad dieléctrica en el vertisol en relación al suelo ferralítico.

Palabras clave: Propiedades Dieléctricas, Capacitores, Capacitancia, Suelo Ferralítico Rojo, Vertisol.

ABSTRACT

The dielectric permittivity ϵ of any material is very sensitive to the water content, from what in the agricultural practice it can be used for the soil moisture measuring. In Cuba, investigations directed to the study of the dependence of the soil ϵ of soil

water content are not well-known, that is why the present work states as objective the experimental obtaining and foundation of the mentioned above empiric dependences for two agricultural soils, red ferralitic soil and vertisol. There were used the LCR-XJ2811C meter and flat and cylindrical condensers. It is concluded that, in both cases, the mentioned correlations in these soils are appropriately described by third degree polynomials. In all the cases, for equal humidity contents, it was obtained higher values of dielectric permittivity in vertisol soil.

Keywords: Dielectric Properties, Capacitors, Capacitance, Red Ferralitic Soil, Vertisol.

INTRODUCCIÓN

La permitividad dieléctrica ϵ es una de las características principales de la sustancia y está íntimamente relacionada con la mayoría de sus propiedades físicas. De ahí su uso extendido en investigaciones sobre diagnóstico, pronóstico y comportamiento de propiedades y estados de sistemas físicos. Su valor es muy sensible al contenido de agua por lo que en la práctica es frecuente el establecimiento de correlaciones empíricas que permitan la determinación rápida y económica de ese último parámetro como es el caso del suelo (Sudakova 2007, Roth et al. 1992).

Otras investigaciones demuestran que la permitividad dieléctrica del suelo (ϵ) depende, no solo del volumen total de agua presente sino también de la forma en que está presente (Beliaev 2008, Bobrov et al. 2006) además de otros factores tales como las propiedades dieléctricas del componente mineral, la naturaleza química y estructura de las partículas, su forma, dimensiones y superficie específica, así como las propiedades dieléctricas del aire en los agregados (Nerpín y Chudnovski, 1967). Es por ello que la dependencia permitividad dieléctrica del suelo ϵ - contenido de humedad w del mismo suelo debe ser específica y brindar información variada sobre su estado general. Dada la relación lineal existente entre ϵ y la capacitancia C de un capacitor relleno con este material, frecuentemente es usada también la dependencia $C(w)$.

En Cuba en algunos centros de investigación y producción son utilizados instrumentos basados en la dependencia arriba mencionada para la determinación de la humedad de los suelos pero no han sido divulgados trabajos sobre la

determinación de $\varepsilon(w)$ en suelos específicos y la obtención y fundamentación teórica de modelos matemáticos que describan esta dependencia.

Los suelos ferralíticos rojos (SFR) y vertisoles (SV) representan dos de los suelos agrícolas más importantes en Cuba y han sido investigados minuciosamente utilizando diferentes técnicas de estudio físico y químico. No se conocen o no han sido divulgadas suficientemente sus características dieléctricas, así como modelos matemáticos que describan la dependencia permitividad dieléctrica -contenido de humedad del suelo y su posible fundamentación teórica. Es por ello que el presente trabajo se propone como objetivo determinar la relación empírica $C(w)$ para SFR y SV, utilizando para ello capacitores plano y cilíndrico. Se pretende, además, hacer un análisis comparativo fundamentado de estas dependencias para los suelos en estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la investigación fueron utilizadas muestras de la capa superficial (0 – 5 cm) de suelo ferralítico rojo y suelo vertisol de la provincia de Ciego de Ávila, Cuba.

Los capacitores utilizados presentan las siguientes características técnicas:

- Capacitor cilíndrico:
 - Longitud efectiva: 0,142 m
 - Diametro armadura externa: 0,019 m
 - Diámetro armadura interna: 0,003 m

- Capacitor plano:
 - Longitud de armaduras: 0,25 m
 - Altura de armaduras: 0,15 m
 - Separación entre armaduras: 0,01 m

Los suelos, secados al aire libre y pasados por un tamiz de 1 mm, fueron depositados en los capacitores y ligeramente compactados. A continuación fueron humedecidos hasta la saturación. Las determinaciones de capacitancia fueron realizadas en días sucesivos a partir de la saturación hasta valores cercanos a la humedad higroscópica, con ayuda del medidor digital LCR-XJ2811C. Este instrumento permite, entre otras determinaciones, la obtención de las dependencias

mencionadas para tres frecuencias diferentes de señales: 100, 1 000 y 10 000 Hz (o 0,1; 1 y 10 kHz).

Para la obtención de los modelos matemáticos de $C(w)$ fue utilizado el programa Microsoft Office Excel 2003.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los gráficos de la figura 1 muestran las dependencias $C(w)$ para el vertisol obtenidas con ayuda del condensador cilíndrico para frecuencias de 10 y 1 kHz respectivamente.

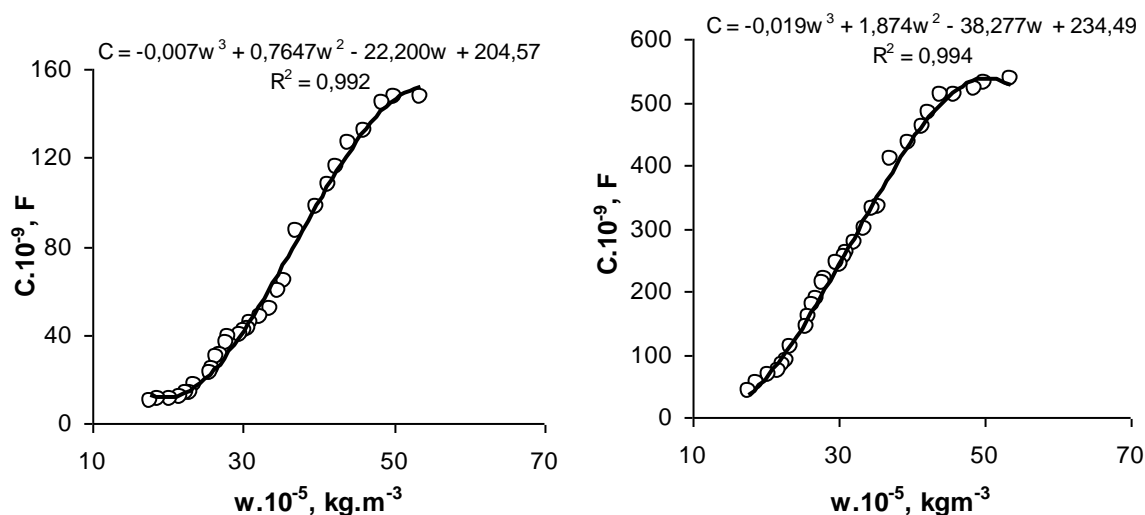


Figura. 1. Comportamiento de la capacitancia en función del contenido de humedad del vertisol (capacitor cilíndrico).

En la figura 2 y 3 se muestran las mismas dependencias para el vertisol y suelo ferralítico respectivamente, con mediciones realizadas en el capacitor plano y utilizando las mismas frecuencias de la señal electromagnética.

Cómo se observa, existe una relación directa entre la capacitancia (y la permitividad dieléctrica) y el contenido de humedad de ambos suelos con altos coeficientes de determinación que confirman la adecuación de los modelos seleccionados.

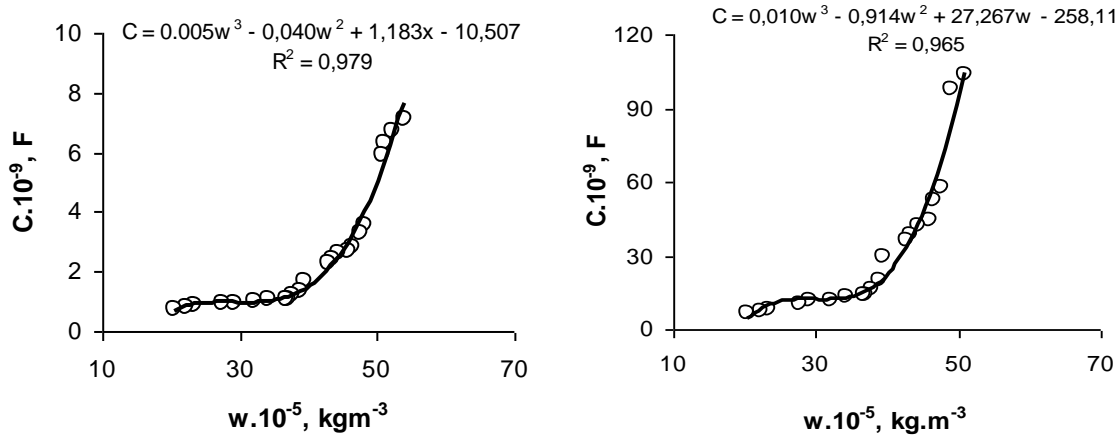


Figura 2. Comportamiento de la capacitancia en función del contenido de humedad del vertisol (capacitor plano).

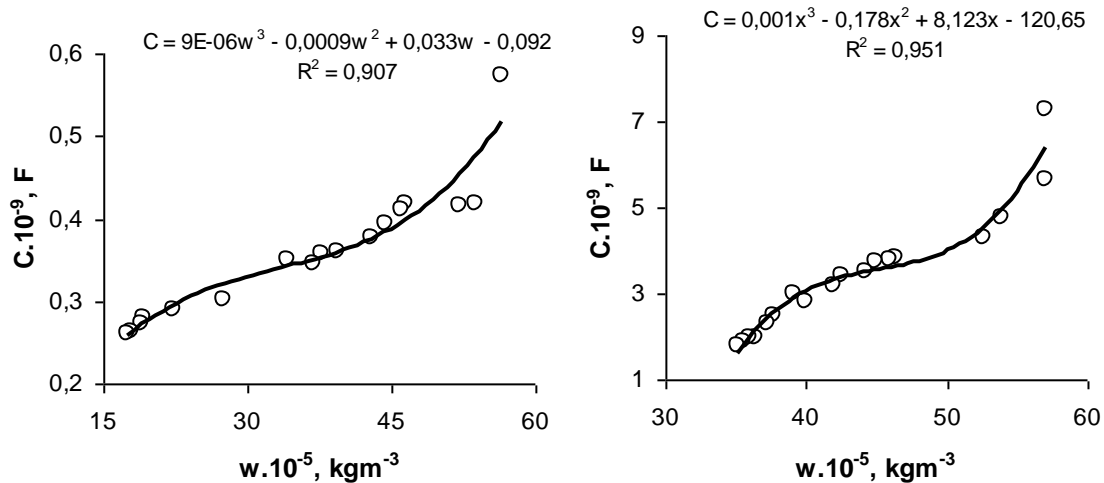


Figura 3. Comportamiento de la capacitancia eléctrica en función del contenido de humedad del suelo ferralítico rojo (capacitor plano)

Este resultado es válido para los dos tipos de capacitores. Cabrera et. al (2013) reportan un resultado similar al investigar un suelo ferralítico rojo utilizando un capacitor cilíndrico. De esta forma se confirma por una parte que estos suelos cumplen las regularidades obtenidas por otros investigadores (Mironov et al., 2009; Sudakova, 2007, Topp et al., 1980) y el resultado parece ser independiente del tipo de capacitor utilizado, aunque los modelos que describen la relación sean diferentes.

Un análisis detallado del comportamiento de la función $C(w)$ arroja una débil dependencia de la permitividad dieléctrica con el contenido de humedad en las

regiones en que el líquido es fuertemente retenido por la fase sólida del suelo ($w <$ punto de marchitez) mientras que hay un crecimiento brusco de la función para el intervalo de humedad débilmente retenida (punto de marchitez $< w \leq$ capacidad de campo). Este comportamiento es más visible en el caso del vertisol en que los valores de superficie y carga específicas de las partículas del suelo son significativamente superiores que en el suelo ferralítico (Cabrera, 2000) y puede estar relacionado con la disminución de la entropía de las moléculas de agua y el aumento de su energía de activación en el primer intervalo de humedad mencionado que condiciona una mayor intensidad de la polarización del medio como se explica más abajo. Por las mismas posibles causas se produce un comportamiento diferente de la curva (incremento brusco de su pendiente) en la región de humedad débilmente retenida.

En condiciones experimentales Beliaev et al. (2008) establecieron una fuerte dependencia de la parte real e imaginaria de la permitividad dieléctrica del espesor de la capa de agua alrededor de las partículas del suelo. Es conocido que para una baja humectación el agua forma láminas monomoleculares alrededor de las partículas. La más fuertemente retenida es la primera lámina monomolecular. Con cada nueva lámina el agua es menos fuertemente retenida por la superficie del suelo. De esta forma, cada nueva porción de agua contribuye al valor de la permitividad dieléctrica. Concluyen que esta dependencia es más visible en suelos en que esta forma del líquido puede alcanzar hasta la mitad del total de agua del suelo.

Por su parte, Bobrov et al. (2006) definen tres partes en las dependencias de la parte real $\varepsilon'(w)$ e imaginaria $\varepsilon''(w)$ de la permitividad dieléctrica correspondientes al agua fuertemente retenida, débilmente retenida y libre y proponen los parámetros necesarios para su determinación en estas curvas.

Análisis comparativo de $c(w)$ en los suelos investigados

En opinión de varios investigadores (Beliaev 2008, Bobrov et al. 2006, Malicki et al., 1996) la permitividad dieléctrica del suelo depende de modo complejo no solo del contenido de humedad sino también del resto de los componentes del suelo y sus propiedades como sistema único, de tal forma que la dependencia $C(w)$ resulta única para cada tipo de suelo. Un acercamiento a esta problemática puede resultar

del análisis comparativo de dicha dependencia para los suelos estudiados en el presente trabajo mostrada en los gráficos de la figura 4 para la frecuencia de 10 kHz de la señal electromagnética.

Experimentalmente se obtienen valores superiores de permitividad para el caso del vertisol independientemente del tipo de condensador utilizado. Teniendo en cuenta que desde el punto de vista físico, tanto referente a su composición mecánica y mineralógica y su comportamiento general como sistema, existen marcadas diferencias entre estos dos suelos, puede explicarse este resultado empírico a partir de las siguientes consideraciones, que, por demás, no agotan el tema tratado.

El tipo de mineral preponderante en el suelo influye decisivamente en las características superficiales fundamentales de las partículas del suelo. Así, en el caso de los vertisoles, con un predominio de la montmorillonita en su composición mineral, los valores de superficie, carga y energía específicas son superiores que, en el caso de los suelos ferralíticos, donde la caolinita predomina sobre el resto de los componentes minerales. Esto hecho tiene una marcada incidencia en el comportamiento físico general de la superficie de contacto sólido-líquido y, en particular, en sus propiedades eléctricas.

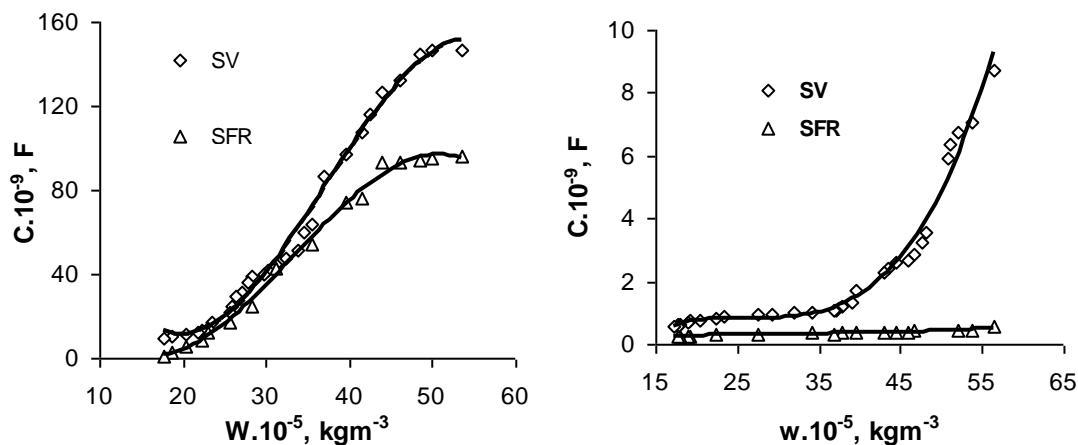


Figura 4: Gráficos comparativos de la dependencia $C(w)$ para los suelos estudiados: capacitores cilíndrico y plano.

Como se conoce las propiedades físicas del agua dependen significativamente de su estructura, de los tipos de enlaces existentes entre sus moléculas, así como los que establece con las moléculas del medio en contacto. Cuantitativamente, el grado

de ordenamiento estructural de un líquido puede caracterizarse mediante la entropía. Las moléculas de agua más próximas a la superficie sólida del suelo están expuestas a dos procesos que determinan su comportamiento dinámico. Por una parte, el movimiento térmico característico tiende a desorganizarlas, a orientar sus momentos dipolares en todos los sentidos. Las fuerzas de adsorción de la superficie de las partículas del suelo tienen un efecto contrario sobre ellas.

Para un mismo valor de contenido de humedad en esta región de agua fuertemente retenida, en el caso del vertisol, donde se reportan altos valores de superficie específica y carga superficial (Cabrera 2000), deben esperarse valores de las fuerzas de adsorción superiores a las registradas en el suelo ferralítico y, por tanto, un mayor ordenamiento en la disposición de las moléculas de agua alrededor de las partículas del suelo. Esta situación debe condicionar menores valores de entropía y como consecuencia, una mayor sensibilidad del sistema ante la acción de agentes externos como el caso de un campo electromagnético. En términos eléctricos esto se traduce en valores superiores de la permitividad dieléctrica para el vertisol en comparación con el suelo ferralítico.

Para el resto del agua enlazada, a partir de la capa difusa, en el mecanismo de retención hídrica predominan las fuerzas hidrodinámicas y osmóticas. Considerando contenidos de sales típicos para suelos agrícolas, el análisis puede concentrarse en el primer tipo de fuerzas. Para iguales contenidos de humedad el mayor volumen de microporos es presentado por los vertisoles (Cabrera 2000). Es lógico entonces esperar en ellos valores de fuerzas de retención hídrica superiores que en los suelos ferralíticos, menores valores de entropía y una mayor vulnerabilidad del sistema ante intervenciones externas. Puede explicarse entonces el comportamiento de los suelos estudiados para este tipo de agua mostrado en los gráficos de la figura 4.

Es evidente que la naturaleza compleja de la dependencia $\varepsilon(w)$ para los suelos requiere de determinaciones más exactas y detalladas y un análisis integral de los resultados que pueden contribuir al desarrollo de un nuevo enfoque de estudio de estos sistemas físicos que hace mayor énfasis en su cuidado y protección al mismo tiempo que contribuye al ahorro de energía (Cabrera et al. 2013).

CONCLUSIONES

La dependencia experimental de la capacidad eléctrica de condensadores (plano y cilíndrico) con dieléctricos de suelos ferralítico rojo y vertisuelo (y la permitividad dieléctrica de estos materiales) de su contenido de humedad para frecuencias de la señal electromagnética de 1 000 y 10 000 Hz es caracterizada adecuadamente por un polinomio de tercer grado independientemente del condensador utilizado. Además del volumen de humedad, sobre la forma de la curva que describe la dependencia anterior influyen otras características del sistema tales como las formas de agua presente, la composición mecánica y el tipo de arcilla presente. El método, debidamente utilizado, permite el ahorro significativo de energía y tiempo en la determinación contenido de humedad del suelo, resulta una contribución al manejo ecológico de estos agrosistemas y puede brindar información general sobre su estado físico y comportamiento general.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- BELIAEV, A.; BOBROV, P.; IVCHENKO, O. Y MANDRIGUINA, N: «Zavisimost dielectricheskoi pronisaemosti sviazannoi vadoi at ziyó kalischestva», *Isliedobanue Zemlí at kosmosa*, No. 5, pp. 28-34, 2008.
- BOBROV, P.; MIRONOV, V. Y IVCHENKO, O.: «Spektrroskopicheskaya model dielectricheskoi pronisaemasti pochv, ispolsuya standartuzovannie agroficheskie pakazatieli», *Isliedobanue Zemlí at kosmosa*, No.1, pp.15-23, Moscú, 2008.
- CABRERA, S.; BROWN, O.; PÉREZ, C. Y RODRÍGUEZ, K.: «Método dieléctrico de determinación del contenido de humedad del suelo», *Revista Universidad&Ciencia*, Vol. 4, No.1, Cuba, 2015.
- CABRERA, S.: *Enfoque agrofísico para el estudio del estado físico de los suelos (en el ejemplo de los vertisoles)*, Tesis de Doctorado, CEGIC, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba, 2000.
- MALICKI, A.; PLAGGE, M. Y ROTH, H.: «Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil,» *Eur. J. Soil Sci*, 47, pp.357-366, USA 1996.
- MIRONOV, V.; KOSOLAPOVA L. Y FOMIN, F.: «Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils//IEEE», *Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 47, No.7, pp. 2059–2070, 2009.

- NERPÍN, O. Y CHUDNOVSKI, A.: *Física Poshb*, pp 400- 401, Moscú, 1967.
- ROTH, H.; MALICKI, A. Y PLAGGE, R.: «Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR», *Doswiadczalna*, Vol.4, pp. 20-236, 1992.
- SUDAKOVA, M.: *Razrabotka y primenienie metodiki dielectrichskij izmerenii s ispolzovaniem palievova geodarta v laboratornij uslovijaj*, Avtoreferat disertaksii na saiskanie uchonoi stepeni kandidata fisico-matematicheskij nauk, Izdatielsba MGU, pp.35-41, Moskvá, 2007.
- TOPP, C.; DAVIS, L. Y ANNAN, P.: «Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission», *Water Resour. Res.*, No.16, pp. 574-582, USA, 1980.