

DETERMINACIÓN DE PERFILES DE HUMEDAD EN SUELOS HOMOGÉNEOS A TRAVÉS DE UN MÉTODO GEOELÉCTRICO

ENRIQUE A NUÑEZ¹; MÓNICA RUIZ²; DANIEL CHUK^{3*} & BRUNO ROSSINI¹

Recibido: 14-11-12

Recibido con revisiones: 04-06-13

Aceptado: 06-06-13

RESUMEN

El requerimiento de un uso eficiente del recurso hídrico, particularmente en las zonas semidesérticas, sumado a la creciente atención prestada a los niveles de humedad en las distintas etapas del desarrollo de los cultivos a fin de maximizar la producción, han llevado en los últimos años a la necesidad de disponer de métodos de medición de humedad en suelos que sean precisos, robustos y simples. Se presenta un dispositivo que estima la humedad gravimétrica a través de la resistividad aparente. Aunque el objetivo del diseño del dispositivo es la optimización del riego en los suelos francoarenosos del oeste argentino, el mismo ha sido probado con éxito también en otros suelos como los francos y arcillosos. Los valores de humedad obtenidos han sido contrastados con determinaciones gravimétricas patrón, encontrándose altas correlaciones entre ambos. El método presenta la virtud de brindar un perfil de humedad en función de la profundidad. El diseño permite tanto una versión móvil como una fija con transmisión inalámbrica.

Palabras clave. Distribución de humedad, resistividad, sondeo eléctrico vertical.

DETERMINATION OF MOISTURE PROFILES IN HOMOGENEOUS SOILS THROUGH A GEOELECTRICAL METHOD

ABSTRACT

The need for an efficient use of water resources, particularly in semi-desertic areas, together with the growing attention to moisture levels at different stages of crop growth to maximize production, have led in recent years to the need of methods for measuring soil moisture in a precise, robust and simple way.

This article presents a geoelectric measuring device which determines apparent resistivity, which is closely related to soil moisture. Although the primary objective of the design of this device is the irrigation optimization of sandy-loam soils of western Argentina, it has been successfully tested in other clay and loam soils. The moisture values obtained with the device were highly correlated to soil gravimetric moisture values. The device provides not only a point but a whole moisture profile in depth. The device allows for both a mobile version and a fixed one, equipped with wireless transmission.

Key words. Moisture distribution, resistivity, vertical electrical sounding.

¹ Instituto de Materiales y Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.

² Carrera de Agronomía – Unidad Integrada INTA Regional San Juan; Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.

³ Instituto de Investigaciones Mineras Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.

* Autor de contacto: dchuk@unsj.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La cantidad de agua en nuestro planeta es finita, el número de habitantes está creciendo rápidamente y la utilización del agua crece aún en mayor medida. El 70% del agua que se utiliza en la actualidad en el mundo está destinada a la agricultura y cada vez la superficie cultivada aumenta más (FAO, 2006). El cambio climático está incrementando los efectos adversos de las sequías limitando la producción en zonas de secano. Entre las soluciones a este problema se puede mencionar el uso eficiente del agua que brinda la irrigación por goteo.

En este contexto mundial y particularmente en las zonas áridas o semi áridas es de vital importancia realizar contribuciones que promuevan un uso eficiente del agua. Así, el presente desarrollo está orientado a la optimización del recurso hídrico en las zonas de muy escasas precipitaciones del oeste argentino. En particular, la mayoría de las tareas de campo han sido llevadas a cabo en la Estación Experimental del INTA en Pocito, San Juan.

Se busca, entonces, obtener resultados que permitan desarrollar la actividad agrícola en un marco de sustentabilidad. Un dato imprescindible para poder realizar un riego eficiente es la estimación de un perfil de humedad en función de la profundidad del suelo explorado por las raíces. La mayoría de los métodos utilizados en agricultura miden esta variable puntualmente, y algunos requieren la instalación de tubos de medición que incorporan un costo adicional considerable. Estos sensores suelen ser frágiles y de difícil mantenimiento. Se trata además por lo general de métodos invasivos. Entre ellos se pueden mencionar las sondas tensiométricas, pastillas de yeso y sensores capacitivos (Or, 2001; Schmugge *et al.*, 1980). Los sensores basados en reflectometría en el tiempo o la frecuencia suelen ser más precisos que los citados anteriormente, pero de mayor costo (Mittelbach *et al.*, 2012). Los dispositivos que pueden brindar un perfil de humedad, como los sensores de emisión de neutrones y los basados en reflexión de ondas de radar (GPR, ground-penetrating radar, Steelman y Endres, 2012) son por demás onerosos.

La medición de humedad indirecta a través de la conductividad eléctrica aparente σ del suelo –o bien su inversa la resistividad $\rho = 1/\sigma$ – se presenta como una alternativa robusta, de fácil aplicación y novedosa, ya que, si bien está anticipada por investigadores como Martínez R. *et al.* (2011), no es contemplada en las habituales revisiones del estado del arte como la de Dobriyal *et al.* (2012). Si la resistividad de las rocas y suelos dependiese únicamen-

te de los minerales constituyentes, habrían de considerarse como aislantes en la inmensa mayoría de los casos, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales y otros elementos lo son en la práctica. Sólo en el caso de que el medio contuviese minerales metálicos en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora. Afortunadamente, todos los suelos tienen poros, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, de lo que resulta que en conjunto, los suelos presentan una resistividad, muy variable según los casos. Orellana (1972) demuestra que la resistividad de los suelos puede variar en margen amplísimo en función del contenido en agua en un factor de 10^6 a 10^{-3} .

Según la ley de Archie modificada (Orellana, 1972) la resistividad del suelo depende de parámetros como la tortuosidad, cementación, textura, resistividad aparente del agua con sales disueltas que ocupan parcialmente los poros. Cuando estas características son homogéneas en un determinado tipo de suelo, en una medición puntual la conductividad se relaciona únicamente con su contenido en agua (Samouelian *et al.*, 2005). De esta manera puede inferirse el contenido de humedad del suelo a partir de la medición de la conductividad.

Sondeo Eléctrico Vertical

El *Sondeo Eléctrico Vertical* SEV (McNeill, 1992) es un método geofísico ampliamente usado en tareas de prospección que permite estimar la resistividad aparente de un suelo. Al introducir dos electrodos y aplicar un voltaje a los mismos se produce una corriente eléctrica; a lo largo del terreno se crea un campo eléctrico y diferencias de potencial. Dos electrodos adicionales son usados para medir el potencial en un punto central. La Figura 1 muestra, en líneas llenas, los trayectos seguidos por corrientes de igual intensidad, y en líneas discontinuas los puntos que tienen igual potencial. Un voltímetro ubicado en MN medirá la diferencia de potencial generada por la corriente inyectada a través de AB.

Adicionalmente, se pueden conseguir medidas cada vez más profundas de la resistividad aparente del suelo mediante el uso de un espaciado mayor entre los electrodos de corriente, o recurriendo a sistemas multipolo (Panissod *et al.*, 1997). El denominado dispositivo de "Schlumberger" (Wattanasen y Elminga, 2008) consiste en mover los electrodos de corriente AB manteniendo fija la posición de los electrodos de medición de diferencias de potencial MN, separados por un diferencial de la distancia AB. Se obtiene

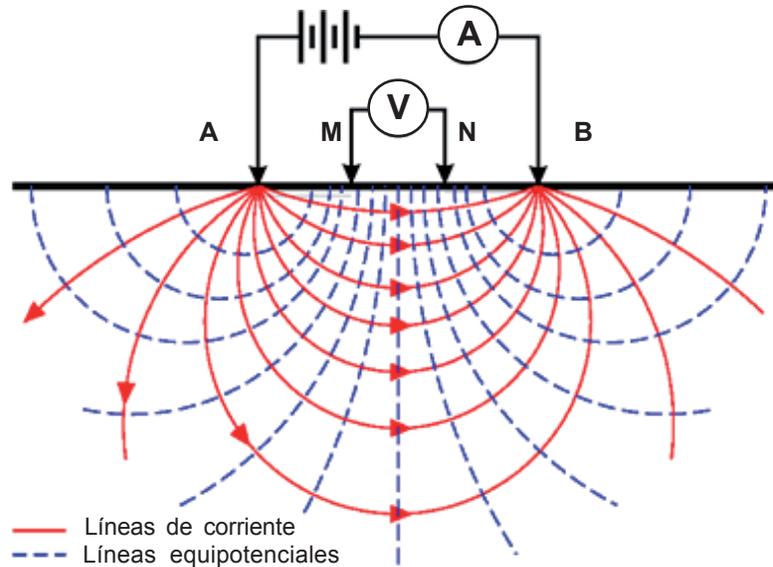


Figura 1. Líneas de corriente (en línea llena) y potencial (líneas a trazos) generadas en el SEV.

Figure 1. Energy current (full lines) and voltage lines (dashed lines) in Vertical Electric Sounding VES.

de esta manera un sondeo eléctrico vertical (Vertical Electrical Sounding, VES). Dado que el dispositivo mide a una pseudopropundidad $AB/2$, por donde pasa el 70% de la corriente, al repetir el procedimiento de medición del dispositivo Schlumberger desplazando los electrodos de corriente una distancia constante se realiza un sondeo eléctrico vertical continuo (CVES) (Milsom y Eriksen, 2011).

El objetivo del presente trabajo fue mostrar la validez del método de obtención de perfiles de humedad en suelos homogéneos a partir de mediciones de resistividad aparente de los mismos, obtenidas a partir de principios geoelectrónicos, contrastándolo con el método gravimétrico de determinación de humedad de suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones presentadas en este artículo se han realizado con un instrumental de sondeo geoelectrónico especialmente diseñado por los autores de este trabajo, al que se hará referencia en adelante como "sensor geoelectrónico".

El mismo está caracterizado por alta sensibilidad en la medición de corrientes y voltajes aún pequeños, con una resolución en la lectura de voltaje de 0,1 mV. El éxito del procedimiento depende de dicha sensibilidad, la capacidad del

circuito de reducción del potencial espontáneo por debajo de $1 \mu\text{V}$ y la modificación de la expresión matemática tradicional de Schlumberger para adaptarla a los distintos tipos de suelo.

-*Calibración del sensor:* para la calibración del sensor se utilizó el protocolo propuesto para el dispositivo EM38 (Rhoades y Corwin, 1981; McNeill, 1992), que consiste en inundar el predio seleccionado con 30 cm de altura de agua y realizar las mediciones diariamente luego de transcurridas 48 horas. Simultáneamente se realizaron mediciones con el sensor geoelectrónico y se extrajeron a iguales profundidades muestras de suelos para determinar el porcentaje de humedad de la misma según la siguiente fórmula:

$$H [\%] = 100 \frac{P_a}{P_s} \quad (1)$$

donde P_a y P_s son los pesos de agua y sólidos contenidos en la muestra.

-*Validación:* A fin de estudiar la exactitud del método se efectuaron muestreos en suelos de distinta textura y con el régimen de riego establecido por el protocolo EM38 ya citado. En todos los casos las mediciones se efectuaron sin cultivo alguno, ya que la presencia de raíces produce desviaciones en las determinaciones. Las experiencias se realizaron en invierno, a fin de minimizar el efecto de la evaporación estival, muy notable en la zona de estudio.

Se han obtenido simultáneamente mediciones geoeléctricas y muestras de suelo para determinar humedad gravimétrica según la expresión (1).

RESULTADOS

En la Figura 2 se puede observar la comparación entre las determinaciones geoeléctricas y gravimétricas en un mismo punto de medición, luego de la aplicación del protocolo de calibración del sensor EM38, con 72 hs de diferencia. En la misma, el eje de profundidad está invertido a fin de identificar intuitivamente la medición con la naturaleza de esa variable. El estudio fue realizado en un suelo franco arenoso de la Estación Experimental San Juan del INTA, ubicado en 31°39'21" S 68°35'18.04" O.

Aunque las determinaciones se realizaron en invierno, y en consecuencia el efecto del secado entre dos me-

diciones consecutivas no es muy notable, el sistema logra detectar la diferencia de humedad, sobre todo en la zona más cercana a la superficie. En la Figura 3 se observa el ajuste entre los datos obtenidos con el sensor geoeléctrico y el método gravimétrico considerando los dos paquetes de muestras señaladas en la Figura 2. La primera medición está indicada con círculos llenos y la posterior a las 72 hs con círculos vacíos. Los parámetros obtenidos por mínimos cuadrados para la recta de ajuste $y = ax + b$ son $a = 1,026$ y $b = 1,205 \times 10^{-8}$. Una pendiente cercana a la unidad y una ordenada al origen prácticamente nula, con un valor de ajuste de $R^2 = 0,9147$ muestran la alta coherencia que presentan los datos obtenidos con el sensor geoeléctrico en relación a la humedad real que poseen los suelos.

El tipo de curvas obtenidas para el suelo franco arenoso se presenta en la Figura 4. Se puede observar como a través del método propuesto se obtiene el perfil de humedad del suelo con mediciones cada 10 cm.

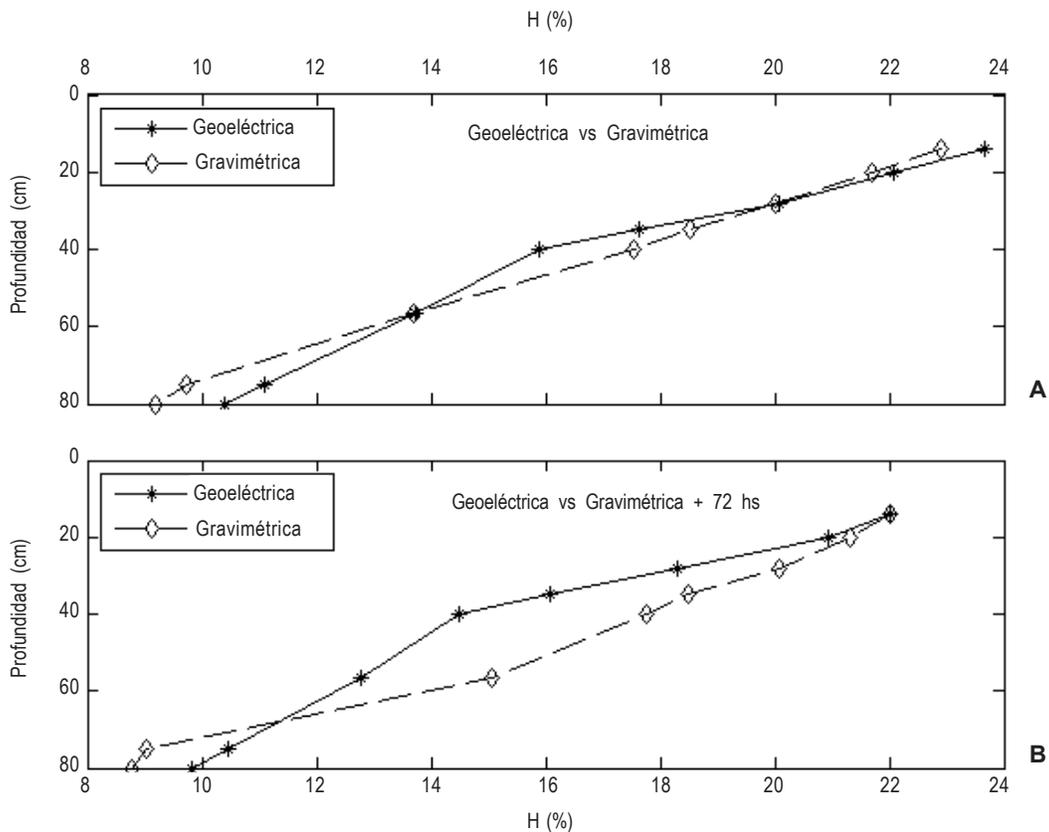


Figura 2. Porcentajes de humedad a distintas profundidades obtenidos por gravimetría (rombo blanco) y por el método geoeléctrico (rombo negro) a las 48 hs de realizada la inundación del predio (A) y 72 hs más tarde (B).

Figure 2. Percentages of soil moisture at different depths obtained by gravimetric (white diamonds) and geoelectric methods (black diamonds) at 48 hours of flooding (A) and 72 hours later (B).

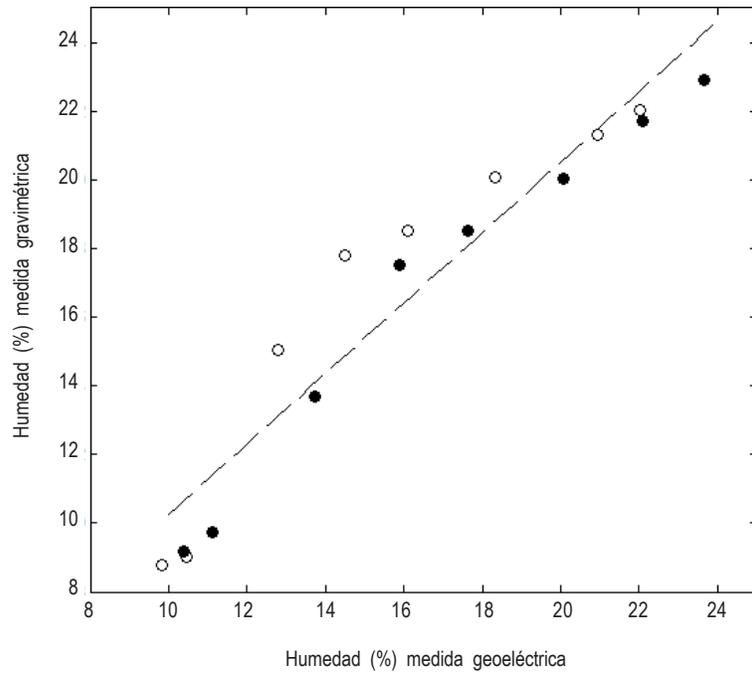


Figura 3. Ajuste lineal de la humedad gravimétrica con el porcentaje de humedad obtenido a través del sensor geoelectrico.
 Figure 3. Linear fitting of gravimetric and geoelectric measurements.

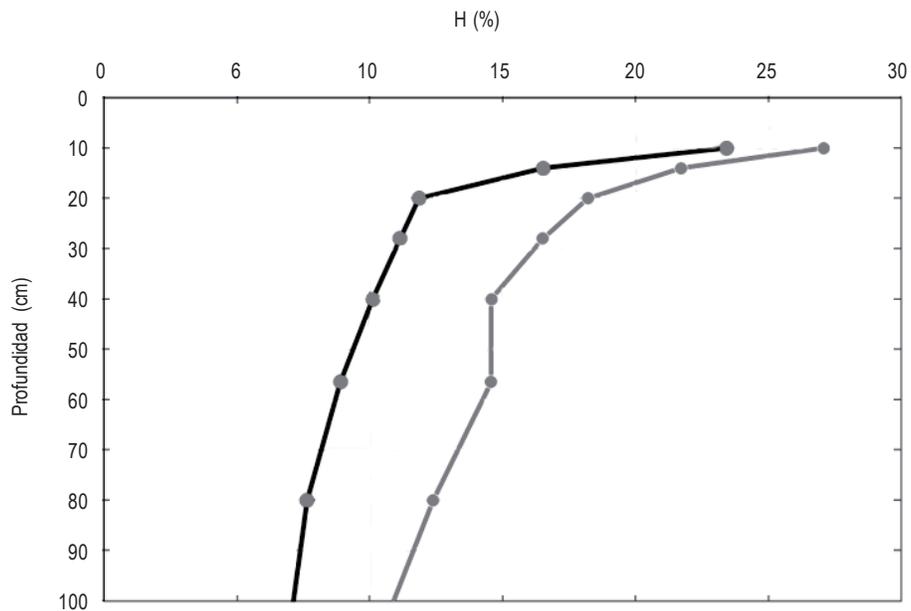


Figura 4. Curvas de humedad en función de la profundidad obtenidas con el método geoelectrico para un mismo suelo con dos regimenes de riego: 12 mm diarios (gris) y 3 mm diarios (negro).
 Figure 4. Soil moisture at different soil profile depths obtained with the geoelectric device for the same soil and two irrigation schemes: 12 mm (gray) and 3 mm (black) daily.

El comportamiento de la humedad con la profundidad en este tipo de suelo (Fig. 5) puede ajustarse apropiadamente con una expresión potencial del tipo

$$y = ax^b + c \quad (2)$$

Para este suelo en particular, los valores de los parámetros son $a = 180,45$; $b = -0,5740$ y $c = -4,2059$.

En un suelo arcilloso, la curva puede manifestar una distribución distinta de humedad, como la que se presenta en la Figura 6, debido a una mayor retención de agua por debajo de los 50 cm. Dicha determinación fue obtenida en el departamento de San Martín, San Juan, con coordenadas 31°30'39.23" S 68°21'27.06" O.

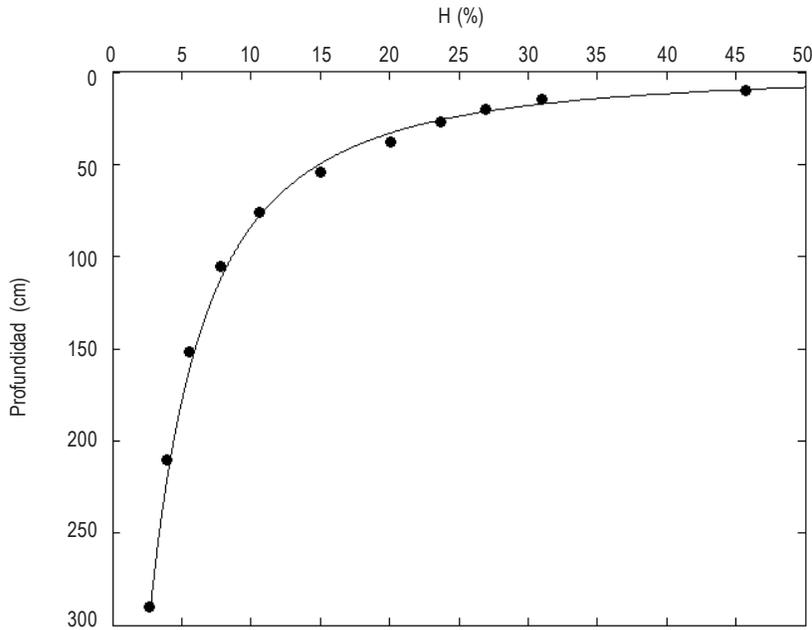


Figura 5. Ajuste de la curva de humedad en función de la profundidad para un suelo de textura franco-arenosa.
Figure 5. Fitting of soil moisture at different profile depths for a loam-sandy soil.

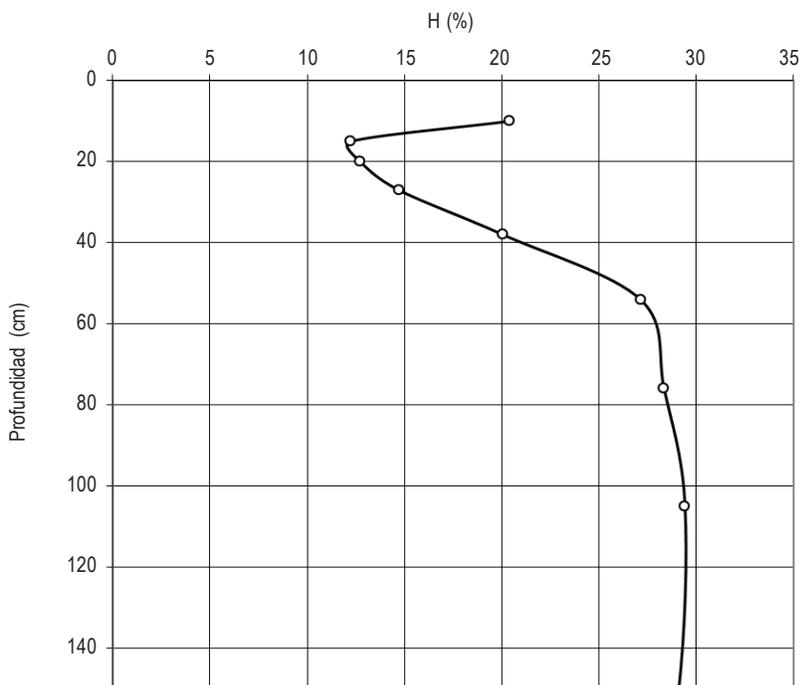


Figura 6. Perfil de humedad en función de la profundidad obtenido con el método geoelectrónico para un suelo de textura arcillosa.
Figure 6. Soil moisture profile geoelectric measurements at different depths for a clayey soil.

CONCLUSIONES

El método ha demostrado ser muy preciso, brindando una distribución de humedad en función de la profundidad. Siendo además un procedimiento no invasivo, se presenta como alternativa viable en suelos homogéneos. Se han realizado con éxito pruebas en las cuales el dispositivo está ubicado en forma permanente en un punto, realizándose la transmisión de la medición por un medio inalámbrico. Asimismo, dado que se trata de un procedimiento no invasivo, es útil también la versión móvil del dispositivo que es aplicada superficialmente por el usuario, obteniéndose una medición en pocos segundos que es almacenada en una memoria local y luego descargada en una computadora personal por un 'bus' universal.

Si bien no han sido presentados en este artículo, el cual está orientado a la validez del método, se han desarrollado procedimientos para corregir la lectura por la presencia de raíces.

AGRADECIMIENTOS

El presente desarrollo ha sido llevado a cabo en el marco del Proyecto DETERMINACIÓN INDIRECTA DE HUMEDAD DE SUELOS POR UN MÉTODO GEOELÉCTRICO NO INVASIVO, código 21/1970, financiado por la Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

Dobriyal, P; A Qureshi; R Badola & SA Hussain. 2012. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *J Hydrol* (458-459): 110-117.

FAO. 2006. Informe sobre Desarrollo Humano. Capítulo 4. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). http://hdr.undp.org/en/media/05-Chapter%204_ES.pdf. 10 de mayo de 2013.

Martinez Rodriguez, A; R Rodriguez Perez & A Perez Sendin. 2011. Sensoramiento del estado de compactación del suelo mediante un campo magnético variable. *Rev Cie Téc Agr*. 20(1): 25-30.

Mittelbach, H; I Lehner & SI Seneviratne. 2012. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *J Hydrol* (430-431): 39-49.

McNeill, JD. 1992. Rapid, accurate, mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. Soil Sci Soc Am J. Special Publications N°30.

Milsom, JJ & A Eriksen. 2011. *Field Geophysics*. John Wiley & Sons.

Or, D. 2001. Who invented the tensiometer? *Soil Sci Soc Am J* 65: 1-3.

Orellana, E. 1972. *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Paraninfo.

Panissod, C; M Dabas; A Jolivet & A Tabbagh. 1997. A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3m) geoelectrical investigation: the 'Vol-de-canards' array. *Geophys Prospect* 45: 983-1002.

Rhoades, JD & DL Corwin. 1981. Determining soil electrical conductivity-depth relation using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci Soc Am J* 45: 255-260.

Samouelian, A; I Cousin; A Tabbagh; A Bruand & G Richard. 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Till Res* 83:173-193.

Steelman, CM & AL Endres. 2012. Assessing vertical soil moisture dynamics using multi-frequency GPR common-midpoint soundings. *J Hydrol* 436-437: 51-66.

Schmugge, TJ, TJ Jackson & HL McKim. 1980. Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resour Res* 16(6): 961.

Wattanasen, K & S Elminga. 2008. Direct and indirect methods for groundwater investigations: A case-study of MRS and VES in the southern part of Sweden. *J Appl Geophys* 66(3-4): 104-117.