

CALIBRACIÓN DE UNA SONDA DE CAPACITANCIA EN SUELOS ARGIUDOLES DE LA ZONA CENTRAL DE LA PROVINCIA DE BS. AS., ARGENTINA

P. Weinzettel y E. Usunoff

Instituto de Hidrología de Llanuras, (UNCPBA, CIC, Mun. de Azul). Rep. de Italia 780, 7300 – Azul, Bs. As., Argentina.
paw@faa.unicen.edu.ar

RESUMEN. Se presentan los resultados obtenidos durante la calibración de una sonda de capacitancia (Troxler, modelo Sentry 200 AP) en suelos Argiudoles típicos en la zona central de la provincia de Buenos Aires.

La sonda de capacitancia ha sido diseñada para realizar mediciones de humedad en suelo mediante la instalación de un caño de acceso, que en este caso permite la realización de mediciones cada 10 cm de profundidad.

En este trabajo se muestra la metodología utilizada para su calibración en campo, mediante la confección de diferentes curvas de ajuste y se compara los resultados obtenidos con respecto a las curvas provistas por el fabricante para diferentes tipos de suelos. Los coeficientes de determinación (r^2) variaron entre 0.62 y 0.92.

La instalación varió según el tipo de suelo estudiado, en algunos casos se realizó el hincado del caño mediante la perforación de un pozo de menor diámetro que el caño de acceso y en otros casos se perforó con máquina rotativa y se colocó el caño rellenando el pequeño espacio anular con el mismo material extraído. La utilización de máquina rotativa se debió a la presencia de costras calcáreas muy tenaces y muy comunes en la zona denominada localmente como “tosca”.

Se ha notado que en ciertos casos la sonda de capacitancia es muy práctica para la determinación de la humedad, pero en otros casos ha sido muy difícil de calibrar. Para determinados casos se ha notado una muy buena correlación entre las determinaciones realizadas con la sonda y las determinadas aplicando la curva proporcionada por el fabricante, especialmente para las texturas más gruesas.

ABSTRACT. Calibration results of a capacitance probe (Troxler, model Sentry 200 AP) in typical Argiudols soils from the central region on Buenos Aires Province are presented. The capacitance probe has been designed to obtain soil moisture readings along an access tube, which in this case was used at every 10-cm depth. This paper describes the methodology used for field-calibration, by coming up with a set of fitting curves, and comparing them with the curves provided by Troxler for different types of soils. The determination coefficients (r^2) vary between 0.62 and 0.92. The access tube placement varied according to

the soil type studied. In some cases a well was drilled (of a smaller diameter than that of the tube), and the tube was driven down. In other cases, and due to the existence of hard-calcareous, caliche-like horizons –locally known as “tosca”-, the well had a diameter slightly larger than that of the tube, so that the space between the tube and the well was filled up with the sediments drilled out. The capacitance probe has been very useful in measuring soil moisture in many cases.

The field-calibration curves matched closely the standard curves provided by Troxler, particularly in large-textured soils.

1. Introducción

En los últimos años se han desarrollado técnicas para la medición de la humedad del suelo y zona no saturada, que evitan el uso de equipos basados en la emisión de neutrones. Estos últimos han mostrado ser bastantes precisos pero cuentan con la desventaja de necesitar permisos especiales para su uso que varían según las leyes de cada país, y por otra parte existe siempre el riesgo de la exposición al material radiactivo con las conocidas consecuencias para la salud humana.

En este trabajo se presenta la metodología utilizada y los resultados obtenidos con una sonda de capacitancia. La misma fue utilizada para la realización de una serie de investigaciones en la zona no saturada en la cuenca del arroyo Azul en la zona central de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

Para la realización de las mediciones se instalaron caños de acceso de plástico en tres parcelas experimentales ubicadas en distintos sectores de la cuenca sobre suelos Argiudoles típicos.

2. Sector de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el sector medio de la cuenca del arroyo Azul, provincia de Buenos

Aires, Argentina (Fig. 1). Tal cuenca presenta unas serranías bajas en el sector sur, que pasan a suaves lomadas en el sector central hasta la ciudad de Azul. Este sector presenta suelos argiúdoles de alta producción agrícola ganadera. Hacia el norte de la ciudad de Azul, en cambio, la cuenca presenta pendientes superficiales muy bajas y dominan los suelos natracuales y natracuales con un rendimiento productivo muy inferior, utilizados básicamente para la cría de ganado. La cuenca tiene un área total de aproximadamente 6.000 km². La precipitación media en la zona es de 900 mm por año, la temperatura media anual es de 14 °C con una media máxima de 21.5 °C en enero y una media mínima de 7.2 °C en julio.

En la zona de estudio se han instrumentado tres parcelas experimentales sobre suelos Argiúdoles típicos para el estudio de las propiedades hidráulicas del suelo y la zona no saturada, y la evaluación de la recarga al acuífero freático (Weinzettel et al., 2002). Las parcelas se encuentran separadas unos 30 kilómetros una de otra y en el perfil presentan en casi todos los casos, una costra calcárea denominada localmente "tosca". La tosca se encuentra a manera de planchas o niveles discontinuos tanto lateralmente como en profundidad. Los niveles oscilan en unos 10 cm o más de espesor y suelen presentar alta dureza. En la parcela 1 la tosca se presenta en forma variable entre 100 centímetros y 130 centímetros de profundidad por lo que el suelo, según la última clasificación de Soil Taxonomy, sería Paleudol petrocálcico. En las restantes parcelas se presenta por debajo de los 180 centímetros de profundidad. Estos niveles petrocálcicos son importantes de tener en cuenta al momento de la instrumentación de las parcelas debido al inconveniente que supone su perforación con barreno al instalar caños de acceso o tensiómetros.

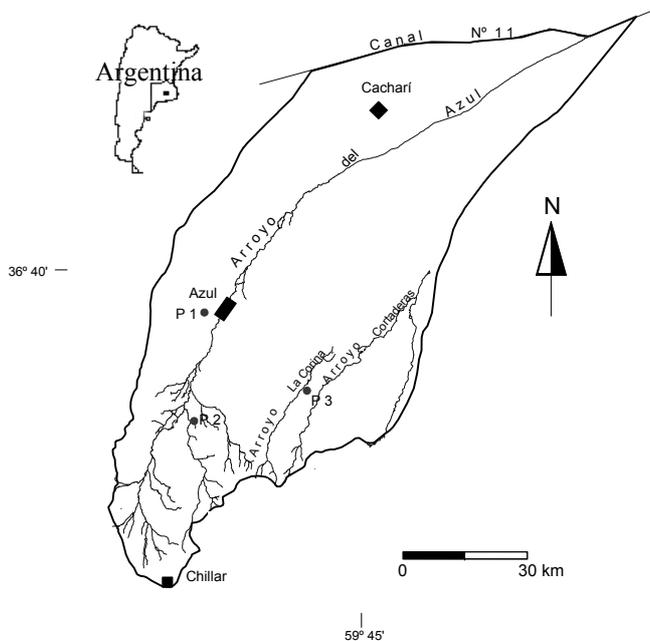


Fig. 1. Ubicación de los sitios de estudio.

El perfil de suelo para las parcelas en forma resumida

presenta estructura granular hasta los 18 cm, luego estructura de columnas gruesas en la parcela 1 y prismas en las restantes. El horizonte C aparece a los 66 cm en la parcela 1 y a 80 cm en las parcelas 2 y 3. La parte superficial del suelo posee abundantes raíces y signos de intensa actividad biológica. La composición textural de los suelos y su densidad aparente se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Textura de los suelos estudiados.

Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Densidad aparente (g.cm ⁻³)
Parcela 1				
20	32.0	34.2	33.8	1.276
30	54.0	28.9	17.2	1.358
60	13.9	56.2	29.9	1.318
90	8.5	56.0	35.5	1.349
120	8.2	45.0	46.8	1.401
150	8.8	43.4	52.2	1.420
Parcela 2				
20	28.0	35.5	36.6	1.264
30	35.9	28.6	35.5	1.424
60	23.6	28.1	48.3	1.476
90	9.3	33.0	57.7	1.490
120	14.6	29.8	55.6	1.454
150	9.4	31.3	59.3	1.451
Parcela 3				
20	27.9	38.6	33.5	1.293
30	30.2	35.4	34.3	1.440
60	33.2	27.5	39.3	1.557
90	21.4	29.3	49.3	1.548
120	15.4	26.7	57.8	1.586
150	12.6	32.8	54.6	1.612

3. La sonda de capacitancia

Para la medición de la humedad en campo se han desarrollado varios métodos de medición indirecta, de los cuales el método dispersión de neutrones es el más conocido. En los últimos años, han sido desarrolladas otras técnicas para la determinación de la humedad del suelo mediante la medición de la constante dieléctrica del suelo, aprovechando el hecho que la constante dieléctrica del agua (81) es mucho mayor que la del suelo seco (3 a 5) y que la del aire (1). Los dos sistemas empleados son el sistema TDR (time domain reflectometry), cuyo desarrollo se produjo en la década de 1980 a través de las publicaciones de Topp et al., 1980, y Dalton et al., 1984, entre otros, y, la sonda de capacitancia (capacitance probe), descrita por Dean et al., 1987.

El sistema TDR se basa en la medición de la velocidad de un pulso electromagnético transmitido en el suelo, que emplean frecuencias de 1 a 5 GHz, mientras que la sonda de capacitancia utiliza frecuencias de resonancia de 150 MHz o menores.

La sonda de capacitancia consiste en un par de electrodos separados por un plástico dieléctrico. Los electrodos superior e inferior y el plástico separador adoptan una forma cilíndrica, que se introduce en un tubo de acceso plástico instalado en el suelo. Un circuito de resonancia LC (L= inductancia, C= capacitancia) en la sonda incluye al suelo fuera del tubo de acceso, el tubo de

acceso mismo, más el espacio de aire entre la sonda y el caño de acceso como uno de los elementos del capacitor. Los cambios en la frecuencia de resonancia del circuito dependen de los cambios en la capacitancia del sistema suelo – tubo de acceso. La diferencia entre la frecuencia de resonancia de la sonda en el tubo de acceso la línea de base de la frecuencia de resonancia es el valor D que es reportado por la unidad lectora (Evet y Steiner, 1995; Evett, 2000). El equipo utilizado fue desarrollado por Troxler Electronic Laboratories, Inc., y su modelo Sentry 200 AP, fue fabricado a partir del trabajo de Dean et al. (1987). La sonda se introduce en un tubo de acceso de PVC instalado cuidadosamente en el suelo, y luego se realizan las mediciones de humedad a medida que se baja la sonda en el caño. Actualmente se fabrican también sondas con multisensores que recogen datos en un determinado intervalo de tiempo a una unidad de memoria. Muchos artículos se han escrito sobre la sonda sonda de capacitancia, tomando como referencia a las determinaciones realizadas con la sonda neutrónica (Evet y Steiner, 1995, Tomer y Anderson, 1995, Ould Mohamed et al., 1997). En este aspecto se coincide con Paltineanu y Starr, (1997), en que debido a la diferencia de medida de los métodos, la esfera de influencia, etc., no es del todo apropiada la comparación. Al respecto, Bell et al. (1987) indican las diferencias de funcionamiento de uno y otro método y qué tipo de agua detecta cada uno.

Este tipo de sonda tiene una sensibilidad vertical de 17 cm y un radio de unos 13 cm (Dean et al., 1987). Por ello, es primordial la correcta instalación del caño de acceso, tratando de evitar que se produzcan huecos con aire que producen lecturas erróneas; de igual modo, debe evitarse la compactación del caño contra el suelo.

Muy importante en este tipo de sonda es el cable que vincula la sonda con la unidad lectora. En el equipo aquí utilizado, la empresa encargada de la comercialización de la sonda realizó el cambio del cable original por uno mejorado y realizó una serie de 10 calibraciones, todas no lineales, para distintas texturas de suelos.

4. Instalación y calibración

La instalación de los caños de acceso se realizó en cada parcela teniendo en cuenta las particularidades del suelo en cada sector. Es así que, según se presentaron o no niveles de tosca de alta dureza, se optó por un determinado tipo de instalación.

En la parcela 1, se instaló un tubo de acceso hasta los 2 metros de profundidad mediante la perforación de un pequeño pozo con máquina perforadora de diámetro ligeramente superior al del caño a instalar. El pequeño espacio anular fue rellenado con el mismo material extraído de cada sector del suelo. En la Parcela 2 también se realizó la instalación de un caño de acceso con perforadora, en este caso hasta los 2.8 metros de profundidad (el nivel petrocálcico en este caso se encuentra a 2.4 metros de profundidad). En la Parcela 3 la instalación se llevó a cabo mediante barrenado e hincado

del caño de PVC hasta 1.8 metros de profundidad, ya que la tosca impidió una profundización mayor.

Si bien se sabe que la sonda de capacitancia es muy sensible a variaciones en la densidad aparente del suelo incluyendo a la macroporosidad, la instalación mediante un pozo con perforadora y relleno del espacio anular (1 cm), funcionó en algunos casos mejor que la instalación por hincado en la cual la compactación producida alteró las condiciones ideales de medición.

Para lograr determinaciones más precisas del contenido de humedad del suelo de los sectores en estudio, se realizó la calibración de la sonda para cada tubo de acceso instalado. La calibración se realizó por el método gravimétrico.

Para llegar a una calibración satisfactoria de la sonda en cada lugar de estudio, se obtuvieron numerosas muestras de suelo mediante un extractor de muestras de suelo de volumen conocido y de un largo de 6 centímetros, el cual se hincó cada 10 centímetros de profundidad. En dos o tres lugares cercanos a cada tubo de acceso instalado, la metodología utilizada fue obtener una muestra de suelo de volumen conocido para la medición de la humedad volumétrica de la muestra. Luego fueron promediados los valores de cada profundidad, y el valor de humedad obtenido se relacionó con la lectura realizada por la sonda. Posteriormente, se agruparon los puntos correspondientes a distintos horizontes del suelo, obteniéndose una recta de ajuste para cada grupo de puntos con diferentes r^2 .

Tabla 2. Calibraciones para la parcela 1

Profundidad (cm)	Ecuación	n	r^2	RCEM ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
20 – 60	$\Theta = 0.0004544 D - 1.7536$	27	0.849	0.041
70 – 120	$\Theta = 0.0007578 D - 2.7583$	14	0.648	0.036
130–170 (*)	$\Theta = \ln((D-5039)/-1887)/0.0376$	---	----	

(*) Calibración de fábrica para este horizonte del suelo con tosca.

Tabla 3. Calibraciones para la parcela 2

Profundidad (cm)	Ecuación	n	r^2	RCEM ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
20 – 50	$\Theta = 0.0003842 D - 1.4302$	19	0.912	0.018
60 - 90	$\Theta = 0.0007449 D - 3.1070$	24	0.766	0.033
100 – 150	$\Theta = 0.0006459 D - 2.5226$	18	0.725	0.036

Tabla 4. Calibraciones para la parcela 3

Profundidad (cm)	Ecuación	n	r^2	RCEM ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
20	$\Theta = 0.0007901 D - 3.3162$	8	0.704	0.036
30	$\Theta = 0.0011638 D - 4.9444$	8	0.756	0.041
40 – 50	$\Theta = 0.0012918 D - 5.7396$	8	0.852	0.029
60	$\Theta = 0.0014847 D - 6.5415$	7	0.799	0.037
80 - 140	$\Theta = 0.0004748 D - 1.7454$	13	0.782	0.023

En las Tablas 2 a 4 se observa la calibración obtenida para las tres parcelas y la raíz del error cuadrático medio

(RCME) de cada una de ellas. Cada valor de n corresponde a dos o tres puntos de muestras de suelo.

La Fig. 2 muestra el ajuste obtenido para los puntos de las parcelas 1 (las líneas punteadas indican el intervalo de confianza del 95 %). Los mejores ajustes en esta parcela correspondieron a los primeros 60 centímetros de suelo, con un RCME de $0.041 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Evidentemente en este horizonte del suelo el ajuste ha sido mejor debido a dos posibles causas: por un lado al ser el suelo más arcilloso se ha producido un mejor contacto entre el suelo, el material de relleno y el tubo de PVC, y por otra parte, el muestreo está menos afectado por errores en este sector más superficial; de hecho, a partir de los 60 centímetros suelen encontrarse algunas costras calcáreas que dificultan la toma de muestra para la calibración.

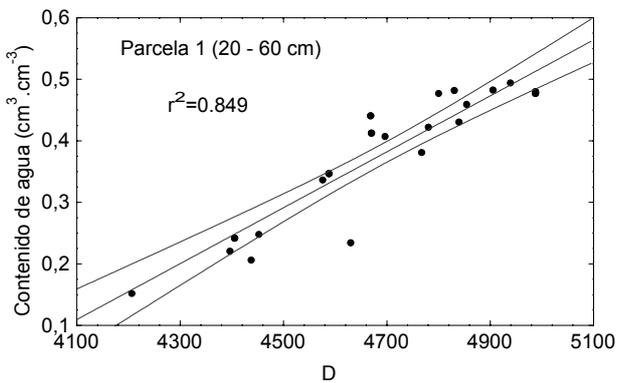


Fig. 2. Calibración para la parcela 1 (20 a 60 cm)

Como se observa en la Tabla 2, se decidió utilizar una de las calibraciones de fábrica para obtener los valores de humedad por debajo de los 120 cm de profundidad, ya que el muestreo del suelo mediante barreno fue prácticamente imposible por la presencia del nivel petrocálcico (tosca).

Las calibraciones de fábrica han mostrado ser fiables para tales profundidades, al menos para un determinado rango de humedad. En la Fig. 3 se muestra el resultado obtenido de calcular la humedad con una calibración de fábrica, calibración D para textura franco limosa, y la calibración de campo para la profundidad de 120 cm.

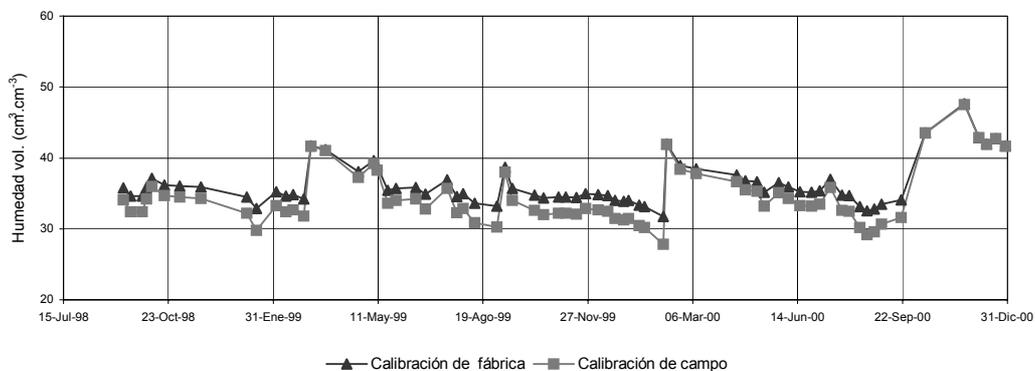


Fig. 3. Comparación entre calibración de fábrica y calibración de campo para la parcela 1 a 120 cm de profundidad

Como puede observarse la calibración de fábrica reproduce valores de humedad ligeramente por encima de la calibración de campo. La correlación obtenida de las mediciones de humedad con la calibración de campo y de fábrica tuvo un r^2 de 0.9931 (Fig. 4). No obstante se debe tener en cuenta que la calibración de campo para este sector del suelo tiene un bajo r^2 de 0.648, con un RCME de $0.036 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. En general, se advierte que las calibraciones de campo y de fábrica tienen mayor correlación cuando el suelo está húmedo. De hecho, puede verse en la Fig. 4, que hacia fines del año 2000 se produce una perfecta concordancia en las mediciones estando el suelo prácticamente saturado (el nivel freático en este período osciló entre 1.06 y 3.35 m). Por lo tanto, en esta parcela cuyo caño de acceso ha sido instalado con máquina perforadora y relleno con el material extraído se han logrado ajustes aceptables, sobre todo si se considera la gran complicación que significa la presencia de horizontes carbonáticos muy tenaces para la instalación del tubo de acceso.

En la parcela 2 se obtuvieron tres rectas de ajustes aceptables, especialmente para la primera capa de suelo (20 a 50 cm) con un r^2 de 0.912 (Fig. 5), y un RCME de $0.018 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Las restantes rectas de ajuste tuvieron un r^2 de 0.766 y 0.762 (Tabla 3).

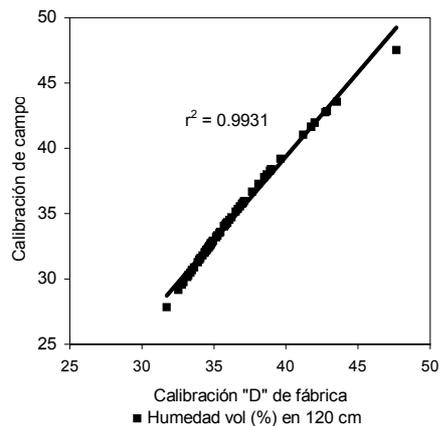


Fig. 4. Correlación entre valores de humedad utilizando calibración de campo y de fábrica para 120 cm de profundidad en la parcela 1

A diferencia de la parcela 1, este sector presenta el nivel de tosca a unos 240 cm de profundidad. Esto facilitó la instalación del tubo de acceso, al no atravesar niveles compactos. La metodología de instalación fue similar a la utilizada para la parcela 1, aunque los resultados fueron mejores debido a que el tubo fue mejor instalado debido a la carencia de tosca en el perfil.

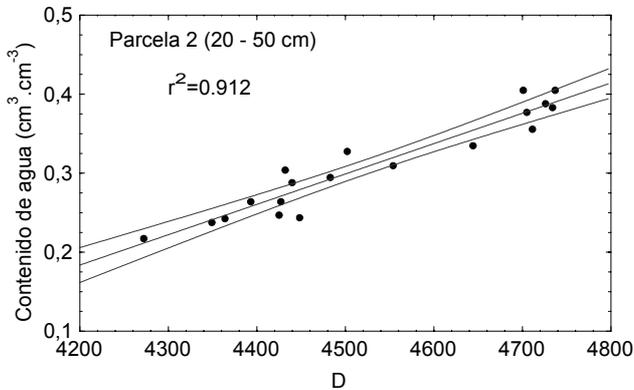


Fig. 5. Recta de ajuste para los datos de humedad de la parcela 2 (de 20 a 50 cm).

En la Fig. 6 se observa las diferencias obtenidas entre la medición de humedad volumétrica en el perfil de suelo de la parcela 2 obtenido mediante gravimetría y los datos registrados por la sonda para dos fechas. Puede apreciarse una buena correlación entre los dos tipos de mediciones.

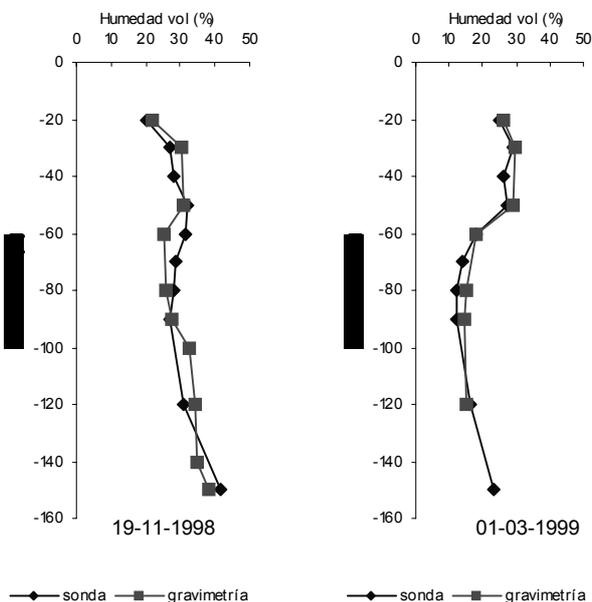


Fig. 6. Comparación entre valores de humedad medidos mediante barreno y sonda para dos fechas en la parcela 2.

En cuanto a las calibraciones realizadas en la parcela 3, estas fueron las más complicadas ya que hubo que agrupar los puntos obtenidos para las calibraciones en 5 rectas con un r^2 de 0.85 a 0.70, según el nivel de suelo (Tabla 4). En

este caso se optó por realizar la instalación del caño de acceso mediante el hincado del mismo realizando una perforación de diámetro menor con un barreno de mano por dentro del caño plástico, tal como se indica en el manual de la sonda y por Bell, et al. (1987). Este tipo de instalación en suelos como los estudiados no dio el resultado esperado. Posiblemente el hincado del caño ha producido alguna pequeña deformación del caño o una compactación del suelo, que hace difícil la medición confiable con la sonda.

Otro problema que se ha detectado ha sido una suerte de presión diferencial sobre el caño de plástico por parte del suelo. Este efecto se ha notado especialmente cuando al introducir la sonda (la cual debe ir rozando por dentro del caño de acceso), la misma baja más frenada en ciertas partes del perfil. Este síntoma se ha detectado en ciertos momentos del año especialmente en los tubos de las parcelas 2 y 3. Seguramente la presencia de arcillas de tipo expansivo produce este fenómeno de compresión diferencial del caño. No obstante este efecto no ha conducido a (o al menos no se han detectado) variaciones significativas en las mediciones realizadas.

5. Discusión

Mediante la calibración de la sonda de capacitancia en suelos argiúdoles se ha logrado obtener la variación de humedad semanal en cada una de las parcelas estudiadas. Las parcelas se encuentran a una distancia de unos 30 km y, mediante la utilización de este equipo, se ha logrado realizar recorridos de medio día cada semana para la obtención del estado de humedad del perfil del suelo más otras mediciones de rutina que se realizan en cada sitio (tensiometría, pluviometría, freaticometría)

Si bien en varios trabajos se discute acerca de la exactitud o no de este tipo de equipo frente a la sonda de neutrones, para el proyecto de investigación en el que se utiliza se ha logrado una aceptable y rápida forma de medición de la humedad del suelo.

No obstante, se reconoce que la calibración del equipo presenta serios problemas y puede llegar a ser muy tediosa según el tipo de instalación que se haya elegido y también dependiendo del tipo de suelo que se esté estudiando.

Por otra parte, se ha observado que es esencial la calibración del equipo en el campo mediante la toma de muestras de suelo, ya que si bien en algunos casos como el presentado en la Fig. 4, los valores obtenidos mediante calibración de fábrica y aquellos obtenidos mediante barrenado tienen buena correlación, no siempre ello es la norma. De hecho, al tratar de utilizar diferentes tipos de curvas de fábrica para los distintos horizontes del perfil, éstas no han guardado relación en varios casos con la calibración realizada mediante el muestreo de suelo. Esta tarea no es menor ya que para calibrar convenientemente el equipo se debe realizar un barrenado en profundidad que a veces no resulta fácil, especialmente si el suelo presenta costras calcáreas o niveles petrocálcicos. Por otra parte, la

forma de instalación del caño mediante perforadora ha dado en este caso mejores resultados que la instalación mediante el hincado del caño de acceso.

Una serie de mediciones con la sonda en la parcela 1 se muestran en la Fig. 7, donde se aprecia la respuesta de las mediciones con la sonda a las variaciones de humedad del suelo durante el período que va de agosto de 1998 a

diciembre de 2000. Se observa que se produce un fuerte desecamiento hasta la profundidad de 90 centímetros para los meses de verano, especialmente en diciembre y en enero, mientras que en la época invernal los suelos permanecen con buena reserva de humedad, luego de las lluvias ocurridas en otoño que son las que restituyen agua al perfil.

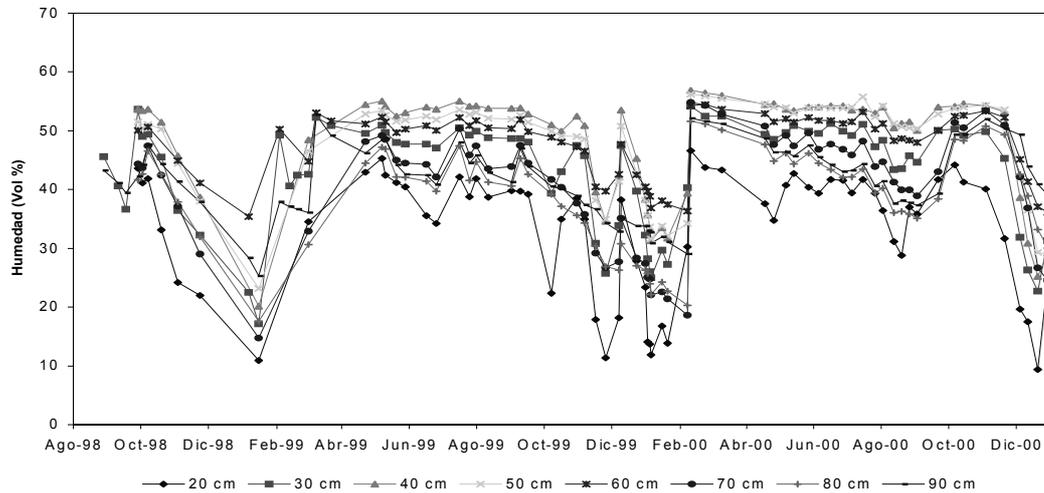


Fig. 7. Mediciones de humedad del suelo con la sonda de capacitancia hasta los 90 cm de profundidad en la parcela 1

6. Conclusiones

En este trabajo se ha tratado de aportar en base a la experiencia obtenida, acerca de las prestaciones y limitaciones de una sonda de capacitancia para el estudio de suelos argiudoles como los que se encuentran en la cuenca del arroyo del Azul.

Básicamente, la sonda de capacitancia ha servido para la determinación de la humedad en forma rápida, una vez que se logró una calibración aceptable, teniendo en cuenta sus limitaciones y posibles errores debido a problemas de instalación y/o calibración.

La instalación cuidadosa mediante una máquina perforadora ha dado resultados comparativamente mejores que los obtenidos mediante el hincado del tubo de acceso en este tipo de suelo sobre todo por la presencia de tosca, que hace que el hincado del tubo sea prácticamente imposible.

Es recomendable realizar una calibración en campo abarcando puntos en un amplio rango de humedades del suelo. La calibración en este caso ha dado buenos resultados, obteniendo testigos del suelo cada 10 centímetros de profundidad, y luego agrupando los puntos hasta obtener distintas calibraciones para cada perfil. También se ha observado que de no ser posible por las características del suelo, la calibración mediante la extracción de muestras de suelo por la presencia de tosca u otro material, puede apelarse siempre con mucho cuidado, a las calibraciones de fábrica, siempre y cuando algún tipo validación sea posible.

Referencias

- Bell, J., Dean, T y Hodnett, M. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part II. Field techniques, evaluation and calibration. *Journal of Hydrology*. 93 : 79-90
- Dalton, F., Herkelrath, W., Rawlins, D. y Rhoades, J. 1984. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with single probe. *Science*. 224:989-990.
- Dean, T., Bell, J. y Baty, J. 1987. Soil moisture measurement by improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. *Journal of Hydrology*, 93:67-78.
- Evett, S. R. 2000. Some aspects of time domain reflectometry, neutron scattering, and capacitance methods for soil water content measurement. In Comparison of soil water measurement using the neutron scattering, time domain reflectometry and capacitance methods. International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1137. 163 pp.
- Evett, S. y Steiner, J. 1995. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:961-968.
- Ould mohamed, S., Bertuzzi, P., Bruand, A. Raison, L y Bruckler, L. 1997. Field Evaluation and error analysis of soil water content measurement using the capacitance probe method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:399-408.
- Paltineanu, I. y Starr, J. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1576-1585.
- Tomer, M. y Anderson, J. 1995. Field evaluation of a soil water – capacitance probe in a fine sand. *Soil Sci.* 159:90-97.
- Topp, G., Davis, J. y Annan, A. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16:574-582.
- Weinzettel, P., Usunoff, E. y Vives, L. 2002. Groundwater recharge estimations from studies of the unsaturated zone. *Proc. XXXII IAH –VI ALHSUD Congress*, 731:738.