

CALIBRACION DE UNA SONDA DE NEUTRONES EN UN SUELO HAPLOXERANDS.

CALIBRATION OF NEUTRON PROBE IN A HAPLOXERANDS SOIL.

Celerino Quezada ¹, Marco Sandoval ¹, Adriana Nario ²

¹Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Casilla 537, Chillán, Chile. E-mail cequezad@udec.cl.² Comisión Chilena de Energía Nuclear, Nueva Bilbao 12501, Las Condes, Santiago, Chile.

ABSTRACT

Key words: neutron probe, calibration curve, volumetric water content.

The neutron moisture meter is the indirect sensor more accuracy for soil water- monitoring that require calibration for site specific. The experiment was conducted in a silt loam soil Diguillín serie (Haploxerands). The objective of this study was to calibrate a neutron probe CPN 503-DR Hydroprobe. The water volumetric content and count ratio was measured to 20-40-60-80 and 100 cm depth in aluminum tubes inserted to 1.20- m depth. The results showed a low accuracy for the 20 cm-depth ($R^2=0.62$ and $RMSE=25.08$) by escape of neutrons into the atmosphere and the hydrogen thermalizing of the soil organic matter. A high accuracy was obtained at 40 ($R^2= 0.94$ and $RMSE 9,32$), 60 ($R^2 0.91$ and $RMSE 9.12$) and 80 ($R^2 0.90$ and $RMSE 7.34$) cm depths due to uniform physical properties. The accuracy decreased to 100-cm depth ($R^2=0.66$ and $RMSE=23.05$), by presence of iron and manganese concretions. The calibration curve for all depths have a low accuracy ($R^2=0.59$ and $RMSE=18.75$). Separate calibration by horizon improve the determination of soil water content as compared with the use of single calibration equation for the entire profile and permitted the use in horizon with similar texture, decreasing the error by depth, chemical elements and physical characteristics. The neutron probe used with strict observances of safety and training, is a key tool to get a better accuracy in scientific works on water use efficiency, water balance and irrigation scheduling.

RESUMEN

Palabras claves: sonda de neutrones, curva de calibración, contenido de agua volumétrico

La sonda de neutrones es uno de los sensores indirectos más precisos para el monitoreo del contenido de agua del suelo, pero requiere calibración por sitio específico. Este estudio se realizó en un suelo franco limoso, serie Diguillín (Haploxerands) y su objetivo fue calibrar una sonda de neutrones CPN 503-DR Hydroprobe. El conteo relativo de neutrones (CR) y el contenido de agua volumétrico (θ) se midieron a profundidades de 20-40-60-80 y 100 cm, en tubos de acceso de aluminio instalados hasta una profundidad de 1,20 m. Los resultados mostraron que a la profundidad de 20 cm la precisión es baja ($R^2=0,62$ y $ECMP=25,08$) por efectos del escape de neutrones hacia la atmósfera y termalización de neutrones por el hidrógeno de la materia orgánica. Una alta precisión se obtuvo a profundidades de 40 cm ($R^2=0,94$ y $ECMP=9,32$), 60 cm ($R^2=0,91$ y $ECMP=9,12$), 80 cm ($R^2=0,90$ y $ECMP=7,34$), por características físicas homogéneas de los horizontes. Sin embargo, la precisión disminuyó a los 100 cm ($R^2=0,66$ y $ECMP=23,05$), debido a la presencia de concreciones de hierro y manganeso. La curva de calibración para el perfil de suelo tiene una baja precisión ($R^2=0,59$ y $ECMP=18,75$). Los resultados demuestran que la calibración por horizonte mejora la precisión en la determinación del contenido de agua en comparación con el uso de una sola ecuación para el perfil. Esto permitiría usar la relación lineal de mayor precisión, en horizontes de textura similar y así reducir el

error por efectos del escape de neutrones hacia la atmósfera, termalización por elementos químicos y características físicas del suelo. La sonda de neutrones, usada con estrictas normas de seguridad y capacitación del personal, es una herramienta clave para obtener mayor precisión en la investigación sobre eficiencia de uso del agua, balance hídrico y programación de riego.

INTRODUCCIÓN

La determinación del contenido de agua del suelo es un aspecto clave en estudios de respuesta de los cultivos al estrés hídrico y programación de riego (Mwale *et al.*, 2005), eficiencia de uso del agua (Corbeels *et al.*, 1999; Evett *et al.*, 2007), y balance de agua (Tolk y Evett, 2009). Los métodos indirectos más comunes son la sonda de neutrones y los sensores dieléctricos, pero el primero tiene mayor precisión que la sonda de capacitancia (Evett y Steiner, 1995) ya que los valores obtenidos por la sonda de neutrones son casi idénticos con los valores gravimétricos (Mwale *et al.*, 2005)

El instrumento contiene una fuente radioactiva de Am-Be y un detector de neutrones lentos, la cual se introduce a través de un tubo de acceso de aluminio instalado en forma fija en el suelo. Los neutrones tienen un radio de influencia de 15 a 18 cm (Shirazi y Isobe, 1976), y al colisionar con los núcleos de H del agua del suelo pierden energía cinética y son captados por un detector de trifluoruro de boro (BF₃), cuando un neutrón termalizado se encuentra con núcleos de ¹⁰B y es adsorbido, una partícula alfa es emitida generando un pulso eléctrico (Hillel, 2004).

La sonda de neutrones es una técnica rápida y precisa para determinar el contenido de agua del suelo (Gornat y Goldberg, 1972; Yao *et al.*, 2004), pero tiene baja precisión a profundidades menores de 30 cm, zona de mayor densidad de raíces, absorción de agua y donde los procesos de infiltración y evaporación ocasionan grandes cambios en el contenido de agua del suelo (Evett *et al.*, 2003). Al respecto, Farah *et al.* (1984) establecen que la estrata de 0 a 10 cm es muy importante en zonas áridas y semiáridas donde los cambios de humedad son muy rápidos después de un riego y de gran efecto en las plantas, debido a que los estados

de germinación y floración son muy sensibles al déficit hídrico. Por otra parte, la presencia de una fuente radioactiva constituye un peligro potencial para la salud de los usuarios, y en las últimas décadas su utilización ha tendido a disminuir debido a que las legislaciones a través del mundo son más restrictivas para el uso de sustancias radioactivas (Mwale *et al.*, 2005). En la actualidad, ninguno de los sensores basados en propiedades electromagnéticas son suficientemente precisos para el manejo del riego, por lo que el neutrómetro continúa siendo útil para investigación en eficiencias de uso del agua (Evett *et al.*, 2007).

La relación entre el contenido de agua del suelo y los neutrones termalizados es dependiente de la textura, densidad aparente, contenido de materia orgánica, composición química del suelo y profundidad de la medición. El error en la calibración proviene de tres fuentes, la alta variabilidad espacial del suelo, el instrumento, y el método de calibración que es el de mayor contribución a la varianza total asociada con la determinación del contenido de agua del suelo (Haverkamp *et al.*, 1984; Corbeels *et al.*, 1999). La alta correlación entre contenido agua volumétrico y conteo relativo de neutrones permite que la sonda de neutrones pueda ser usada para calibrar los sensores dieléctricos (Leib *et al.*, 2003), ya que presenta errores cuadráticos medios ponderados muy bajos entre 2,9 a 3,7% para suelos de textura franco arenosa a franco limosa (Hanson y Peters, 2000).

La sonda de neutrones requiere calibración por tipo de suelo y por horizonte (Lal, 1974; Lal, 1979) por el efecto de la textura y la densidad aparente y heterogeneidad de los suelos. Por lo anterior, la calibración por sitio específico mejora la precisión de los instrumentos de monitoreo de la humedad del suelo comparado al uso de ecuaciones de calibración de fábrica

(Fares *et al.*, 2004). Al respecto, Lal (1974) determinó que para un contenido de agua volumétrico del 20%, el conteo relativo variaba de 0,568 para una densidad aparente de 1,0 g cm⁻³ a 0,943 para el doble del valor de densidad del suelo.

El conteo de neutrones es influenciado por la presencia de átomos de hidrógeno de las capas de arcilla, materia orgánica y ciertos elementos químicos que tienen la capacidad para capturar neutrones termalizados (Babaola, 1972). Según Lal (1974) y Hillel (2004) elementos como el boro, cadmio, cloro, cobalto, fierro y manganeso, exhiben una alta capacidad de absorción de neutrones lentos y pueden alterar la tasa de conteo. Al respecto, Lal (1974) establece que la sonda de neutrones tiene un uso limitado en suelos tropicales con alto contenido de Fe. Altas tasas de conteo son obtenidos en suelos de textura fina por efecto del hidrógeno en los cristales de arcilla y también en suelos con alto contenido de materia orgánica (Gornat y Goldberg, 1974).

La hipótesis planteada es que la calibración de la sonda de neutrones debe realizarse para cada horizonte de suelo y que las ecuaciones de calibración obtenidas pueden ser usadas para horizontes con textura similar. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue calibrar una sonda de neutrones CPN 503-DR Hydroprobe, a diferentes profundidades en un suelo Haploxerands, y así dar mayor precisión a la determinación del contenido de agua del

suelo en investigaciones sobre eficiencia de uso del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó en la Estación Experimental El Nogal de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, en Chillán, Chile (36°35'43,2" lat S, 72°04'39" long O, 140 msnm), durante los meses de noviembre 2007 a marzo del 2008. El suelo pertenece a la serie Diguillín (Haploxerands) derivado de cenizas volcánicas modernas que descansa sobre un substrato constituido por toba volcánica, de textura franca, topografía plana, profundo y buen drenaje (Stolpe, 2006). Las características físicas e hídricas son las siguientes:

El equipo utilizado es marca CPN 503-DR Hydrprobe con actividad de 50 mCi y una fuente radioactiva de Am – Be (Cuadro 2). La parcela tenía una superficie de 20 x 20 m donde se instalaron tres tubos de acceso de aluminio diámetro interior de 47 mm y diámetro exterior de 51 mm, a una profundidad de 1,20 m, sellado en el fondo, con una extensión de 10 cm sobre el nivel del suelo. El orificio para el tubo de acceso se realizó con barreno de diámetro similar, para obtener buen contacto suelo - pared del tubo y así evitar espacios con aire.

La parcela se regó hasta capacidad de campo y el conteo de neutrones se midió a profundidades

Cuadro 1. Características físicas e hídricas del suelo Serie Diguillín (Haploxerands)
Table 1. Physical and hydric characteristics of a soil Series Diguillín (Haploxerands)

Prof.(cm)	Textura ¹	Color H	CC ²	PMP ³	Dap ⁴	HA ⁵
20	Franca	10 YR 2/2	44,46	23,74	0,77	20,72
40	Franca	10 YR 3/2	44,46	24,48	0,94	19,98
60	Franca	10 YR 4/4	40,84	21,09	0,83	19,75
80	Fco limosa	10 YR 4/3	40,32	19,29	0,82	21,03
100	Fco limosa	10 YR 5/4	41,89	23,38	0,94	18,51

¹Método de Bouyoucos;

²Capacidad de campo(%hbss);

³Punto de marchitez permanente(%hbss);

⁴Densidad aparente (g cm⁻³);

⁵Humedad aprovechable(%)

Cuadro 2. Descripción de la sonda de neutrones
Table 2. Description of neutron probe

Características técnicas	Sonda
Marca	CPN 503-DR Hydroprobe
Peso	6,8 kg
Fuente radioactiva	$^{241}\text{Am} - ^9\text{Be}$
Actividad	50 mCi
Detector	$^{10}\text{B-F}_3$
Radio influencia	18 cm
Diámetro sonda	3,8 cm
Ciclo de conteo	30 s

de 20-40-60-80 y 100 cm. Previo a la medición en el suelo se obtenía el conteo estándar del equipo en la posición de blindaje (Figura 1). Al mismo tiempo se tomaron muestras de suelo con barreno para la determinación de humedad gravimétrica a 105°C por 24 horas. La densidad aparente se determinó por el método del cilindro, extrayendo muestras de una calicata a profundidades de 20-40-60-80 y 100 cm, utilizando cilindros metálicos de 50 mm de diámetro interior por 51 mm de altura (100,09 cm³). La curva de calibración se realizó mediante la relación entre conteo relativo de neutrones (CR) y contenido de agua volumétrico (Θ) por profundidad, y para todo el perfil. La tasa de conteo relativo (CR) se obtuvo dividiendo el conteo de neutrones en el suelo por el conteo

estándar en posición de blindaje.

El contenido volumétrico de agua (Θ) se determinó mediante la siguiente relación:

$$\Theta = W * (D_{ap} / \rho)$$

Donde: W=contenido de agua gravimétrico(%);
 D_{ap} =densidad aparente (g cm⁻³); ρ = densidad del agua (1,0 g cm⁻³)

Los datos de contenido de agua volumétrico (Θ) y conteo relativo de neutrones (CR) fueron sometidos a un análisis de regresión, obteniendo el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio ponderado (ECMP) utilizando el programa Infostat (2004). La relación es de tipo lineal ($\Theta = aCR + b$) y varía según el tipo de suelo, donde “a” representa la pendiente y “b” el intercepto.



Figura 1 . Sonda de neutrones CPN 503-DR Hydroprobe en posición de conteo estándar y medición en el suelo.

Figure 1. Neutron moisture meter CPN 503-DR Hydroprobe in position of standard count and soil measuring

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La curva de calibración de la sonda de neutrones es afectada por el tipo de suelo, profundidad y elementos químicos que tienen la capacidad de termalizar neutrones. En la Figura 2 se presenta la relación entre contenido de agua volumétrico y conteo relativo para la profundidad de 20 cm, obteniéndose una baja correlación ($R^2=0,66$ y $ECMP=25,08$) probablemente por efecto de la dispersión de neutrones hacia la atmósfera y contenido de materia orgánica. Esto concuerda con Gornat y Goldberg (1972) quienes determinaron que la baja tasa de conteo en estratas superiores de suelos arenosos y franco arcillosos se debe al escape de neutrones desde el suelo. Al respecto, Otto y Gimenez (2000) midieron el contenido de agua del suelo con sonda de neutrones, instalando tubos de acceso a 90 cm para rábano y 105 cm de profundidad para remolacha y espinaca, pero usaron TDR en los 20 cm superiores de suelo. Por su parte, Hillel (2004) expresa que mediciones en los primeros 20 cm del suelo son imprecisas debido al posible

escape de neutrones hacia la atmósfera.

Para las profundidades de 40, 60 y 80 cm (Figuras 3, 4 y 5) se observa una alta relación entre conteo relativo y contenido de agua volumétrico, ya que se obtienen coeficientes de determinación entre 0,90 y 0,94 y ECMP inferiores a 10. Según Gornat y Goldberg (1972) en suelos de textura uniforme y con cambios graduales en el contenido de humedad, la desviación del contenido de humedad promedio del suelo para incrementos con diferente espesor son pequeños. En cambio para la profundidad de 100 cm (Figura 6) la precisión es menor ($R^2=0,66$ y $ECMP=23,05$) probablemente por la presencia de concreciones de Fe y Mn debido al substratum de toba volcánica que restringe el movimiento del agua, haciendo variar el drenaje interno de bueno a moderado (Stolpe, 2006). Según, Lal (1974) una concentración de 5% de fierro, introduce un error de 4,5 % en la termalización de neutrones.

El análisis de la calibración para todo el perfil (Figura 7) presenta baja precisión ($R^2=0,59$ y $ECMP=18,75$) por efecto de los cambios texturales. Similares resultados obtuvieron

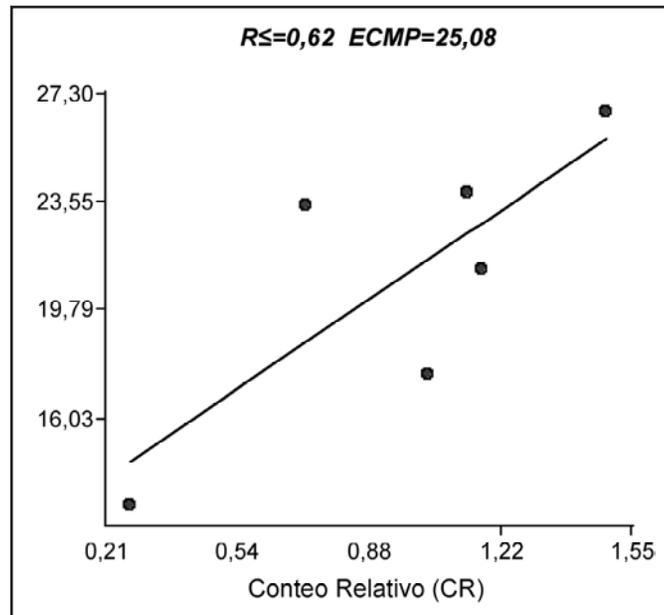


Figura 2-Curva de calibración de una sonda de neutrones CPN 503-DR Hydroprobe a profundidad de 20 cm en un suelo Haploxerands ($\Theta = 9,21 \text{ CR} + 12,01$).

Figure 2. Calibration curve of the CPN DR-503 Hydroprobe neutron probe to a depth of 20 -cm in a Haploxerands soil ($\Theta = 9.21 \text{ CR} + 12.01$)

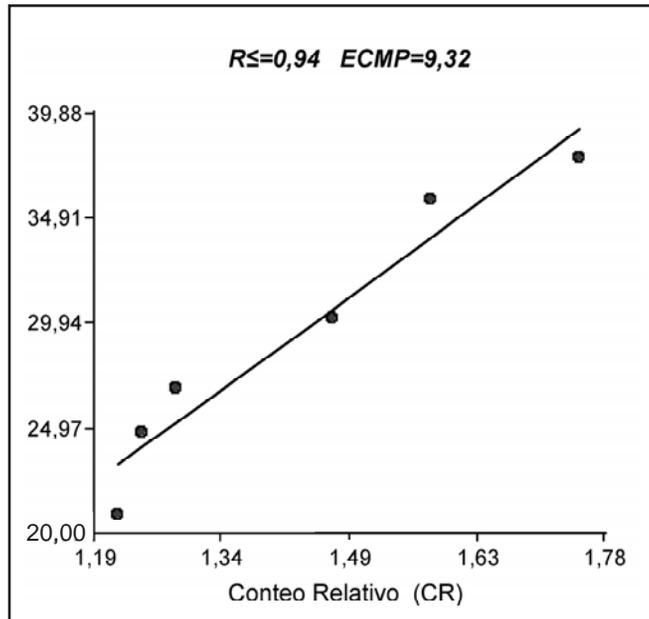


Figura 3. Curva de calibración de una sonda de neutrones CPN 503-DR Hydroprobe a profundidad de 40 cm en un suelo Haploxerands ($\Theta = 29,53CR - 12,71$)

Figure 3. Calibration curve of the CPN DR-503 Hydroprobe neutron probe to a depth of 40 cm in a Haploxerands soil ($\Theta = 29.53 CR - 12.71$)

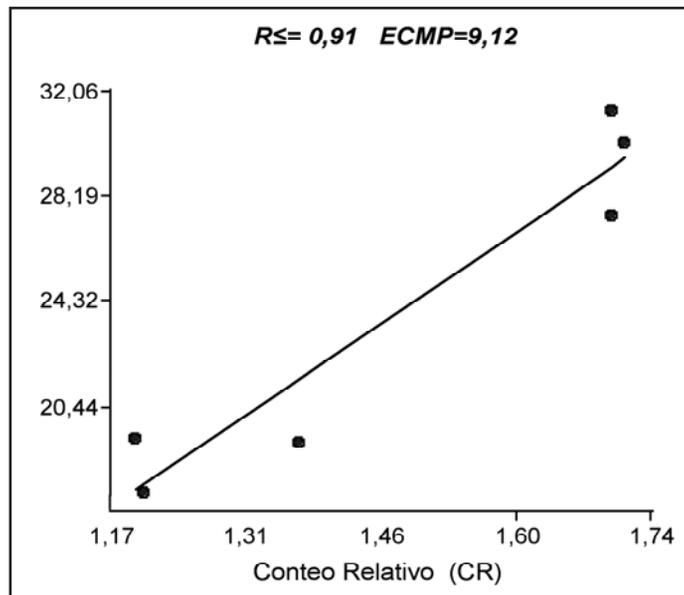


Figura 4. Curva de calibración de una sonda de neutrones CPN 503-DR Hydroprobe a profundidad de 60 cm en un suelo Haploxerands ($\Theta = 23,84CR - 11,18$).

Figure 4. Calibration curve of the CPN DR-503 Hydroprobe neutron probe to a depth of 60 cm in a Haploxerands soil ($\Theta = 23.84 CR - 11.18$)

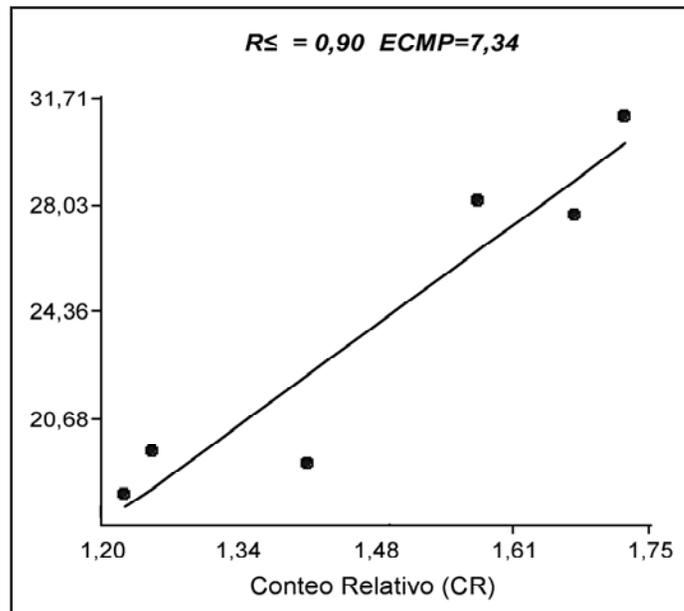


Figura 5. Curva de calibración de una sonda de neutrones CPN 503-DR Hydroprobe profundidad de 80 cm en un suelo Haploxerands ($\Theta = 24,62CR - 12,43$)

Figure 5. Calibration curve of the CPN DR-503 Hydroprobe neutron probe to a depth of 80 cm in a Haploxerands soil ($\Theta = 24.62 CR - 12.43$)

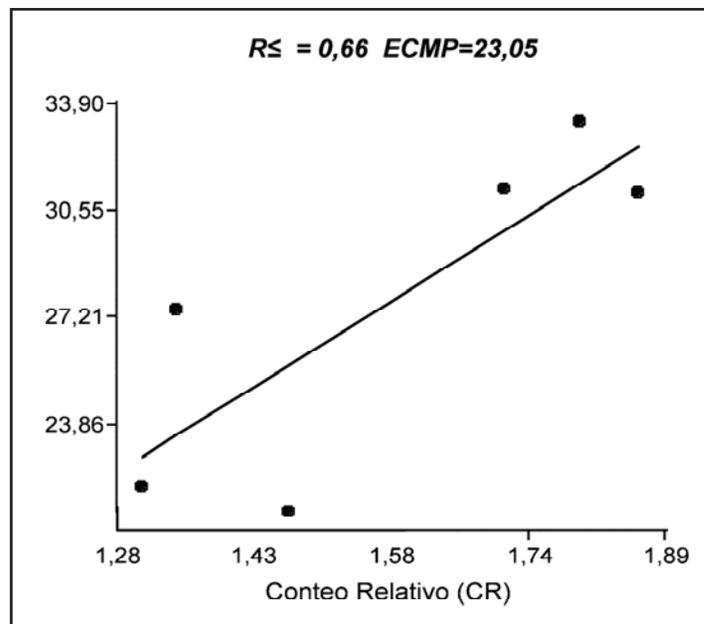


Figura 6. Curva de calibración de una sonda de neutrones CPN 503-DR Hydroprobe a profundidad de 100 cm en un suelo Haploxerands ($\Theta = 17,52CR - 0,03$)

Figure 6. Calibration curve of the CPN DR-503 Hydroprobe neutron probe to a of 100 cm depth in a Haploxerands soil ($\Theta = 17.52 CR - 0.03$)

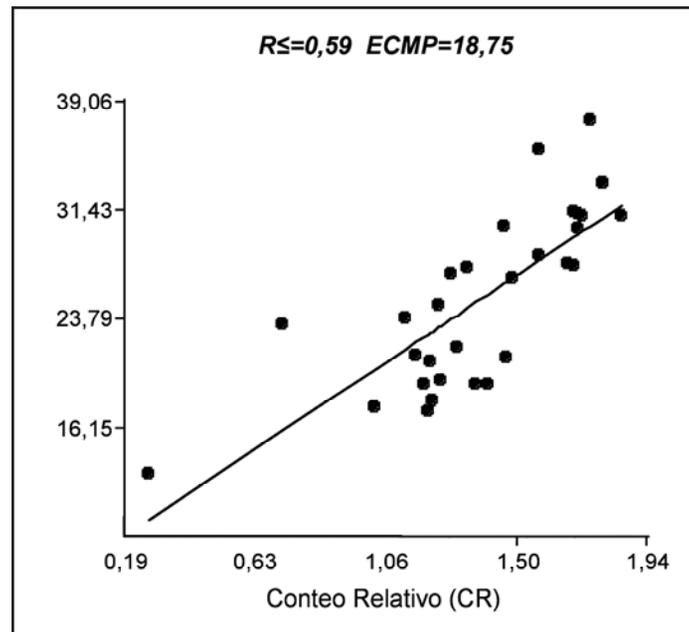


Figura 7. Curva de calibración de una sonda de neutrones CPN 503-DR Hydroprobe a profundidades entre 20 y 100 cm un suelo Haploxerands ($\Theta = 13,93 \text{ CR} + 5,89$).

Figure 7. Calibration curve of the CPN DR-503 Hydroprobe neutron probe between the 20 –to 100- cm depth in a Haploxerands soil ($\Theta = 13.93 \text{ CR} - 5.89$)

Quezada y Fernández(1977) en suelos graníticos con un $R^2=0,66$ por el aumento del contenido de arcilla en profundidad. Esto indica la necesidad de realizar calibraciones individuales por horizonte de suelo para disminuir los efectos de los cambios texturales en la tasa de conteo de neutrones (Corbeels *et al.*, 1999; Yao *et al.*,

2004;Evelt *et al.*,2007). Similar planteamiento tienen Fares *et al.*(2004) quienes determinan que la calibración individual cada 10 cm de profundidad mejora la precisión, comparada con una sola curva de calibración para todo el perfil, especialmente en subsuelos afectados por compresión y dilatación debido al aumento

Cuadro3. Ecuaciones de calibración de una sonda de neutrones CPN 503-DR Hydroprobe para diferentes profundidades usando un modelo lineal.

Table 3. Neutron scattering calibrations equation CPN 503-DR Hydroprobe for different soil depths using a linear model.

Prof.(cm)	a *	b	R ²	ECMP	N
20	9,21	12,01	0,62	25,08	6
40	29,53	-12,71	0,94	9,32	6
60	23,84	-11,18	0,91	9,12	6
80	24,62	-12,43	0,90	7,34	6
100	17,52	-0,03	0,66	23,05	6
Perfil	13,93	5,89	0,59	18,75	30

* Los coeficientes a y b son para la ecuación de calibración: $\Theta = a\text{CR} + b$ donde Θ es el contenido volumétrico de agua (%) y CR el conteo relativo de neutrones. R^2 =coeficiente de determinación; ECMP=error cuadrático medio ponderado; N=número de muestras.

del contenido de arcilla. Por otra parte, Frueh y Hopmans (1997) utilizaron la sonda de neutrones para calibrar sondas TDR y también concluyen que deben ser calibradas por profundidad, al igual como se realiza la calibración de la sonda de neutrones.

El análisis de las ecuaciones de regresión por profundidad (Cuadro 3) y su relación con las características físicas del suelo indicaría que por tratarse de un perfil homogéneo es posible utilizar las ecuaciones de regresión de mayor precisión en horizontes de textura similar, minimizando así el efecto de la dispersión de neutrones hacia la atmósfera y de las características físicas y químicas del suelo.

CONCLUSIONES

La sonda de neutrones, usada con estrictas normas de seguridad y capacitación del personal, es un instrumento preciso para la determinación del contenido de agua del suelo en la investigación sobre eficiencia de uso del agua, balance hídrico y programación de riego. La calibración por horizonte mejora la precisión en la determinación del contenido de agua del suelo en comparación con el uso de una sola ecuación para todo el perfil. Además, permitiría usar la curva de calibración de mayor precisión, en horizontes de textura similar y así reducir el efecto de la dispersión de neutrones en el horizonte superficial, y de la variabilidad en las características físicas y químicas del suelo.

BIBLIOGRAFIA

BABAOLA, O. 1972. Influence of bound water on the calibration of neutron moisture meter. *Soil Sci.* 114: 323-324.

CORBEELS, M.; HARTMANN, R.; HOFFMAN, G.; VANCLEEMPUT, O. 1999. Field calibration of a neutron moisture meter in Vertisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:11-18.

EVETT, S.R.; STEINER, J.L. 1995. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 961-968

EVETT, S.R.; TOLK, J.A.; HOWELL, T.A. 2003. A depth control stand for improved accuracy with

the neutron probe. *Vadose Zone Journal* 2:642-649.

EVETT, S.R.; IBRAGIMOV, N.; KAMILOV, B.; ESANBEKOV, Y.; SARIMSAKOV, M.; SHADMANOV, J.; MIRHASHIMOV, R.; MUSAEV, R.; RADJALBOIV, T.; MUHAMMADIEV, B. 2007. Neutron moisture meter calibration in six soils of Uzbekistan affected by carbonate accumulation. *Vadose Zone Journal* 6: 406-412.

FARAH, S.M.; REGINATO, R.J.; NAKAYAMA, F.S. 1984. Calibration of soil surface neutron moisture meter. *Soil Sci.* 138: 235-239.

FARES, A.; BUSS, P.; DALTON, M.; L-KADI, A.I.; PARSONS, L.R. 2004. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking-swelling clay soil. *Vadose Zone Journal* 3: 1390-1399.

FRUEH, W.T.; HOPMANS, J.W. 1997. Soil moisture calibration of a TDR multilevel probe in gravelly soils. *Soil Sci.* 162: 554-565.

GORNAT, B.; GOLDBERG, D. 1972. The relation between moisture measurements with a neutron probe and soil texture. *Soil Sci.* 114: 254-258.

HANSON, B.R.; PETERS, D.W. 2000. Using dielectric soil moisture sensors for irrigation scheduling. *Acta Hort.* 537: 471-477.

HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M.; VACHUD, G. 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 1. Local standpoint. *Soil Sci.* 137: 78-90.

HILLEL, D. 2004. *Introduction to environmental soil physics.* Elsevier Academic Press, New York. 494 p.

INFOSTAT. 2004. *InfoStat: Software estadístico. Manual del usuario. Versión 2004.* Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Editorial Brujas. Córdoba, Argentina.

LAL, R. 1974. The effect of soil texture and density on the neutron and density probe calibration for some tropical soils. *Soil Sci.* 117:183-190.

LAL, R. 1979. Concentration and size of gravel in relation to neutron moisture and density probe calibration. *Soil Sci.* 127: 41-50

LEIB, B.G.; JABRO, J.D.; MATTHEWS, G.R. 2003. Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. *Soil Sci.* 168: 396-408.

MWALE S.S.; AZAMALI, S.N.; SPARKES, D.L. 2005. Can the PR1 capacitance probe replace the neutron probe for routine soil-water measurements?. *Soil Use and Management* 21: 340-347.

OTTO, R.F.; GIMENEZ, C. 2000. Evapotranspiration and dry matter production of horticultural crops under cover. *Acta Hort.* 516: 23-30.

QUEZADA, C.; FERNÁNDEZ, B. 1977.

- Determinación de conductividad no saturada mediante el método del perfil instantáneo. *Agric. Tec.* 37: 106-111.
- SHIRAZI, G.A.; ISOBE, M. 1976. Calibration of neutron probe in some selected Hawaiian soil. *Soil Sci.* 122:165-170.
- STOLPE, N. 2006. Descripciones de los principales suelos de la VIII Región de Chile. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Publicaciones N°1. 84 p.
- TOLK, J.A.; EVETT, S.R. 2009. Lysimetry versus neutron moisture meter for evapotranspiration determination in four soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:1693-1698.
- YAO, T.; WIERENGA, P.J.; GRAHAM, A.R.; NEUMAN, S.P. 2004. Neutron probe calibration in a vertically stratified vadose zone. *Vadose Zone Journal.* 3: 1400-1406.