

ESTIMACIÓN DE ERRORES EN EL CALIBRADO DE LA SONDA DE NEUTRONES

K. M. Kamimura¹, M. C. Alves², O Arf³, L. S. Vanzela⁴ y F. S. Campos⁵

¹ Aluna de graduação do curso de agronomia; kmkamimura@aluno.feis.unesp.br,

² Dept. Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos; mcalves@agr.feis.unesp.br,

³ Dept. Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio-Economia; arf@agr.feis.unesp.br,

⁴ Eng. Agr., Aluno de Pós-graduação em Sistema de Produção, nível de mestrado; lsv@agr.feis.unesp.br,

⁵ Eng. Agr., Aluna de Pós-graduação em Sistema de Produção, nível de mestrado; ivonetbibi@bol.com.br

RESUMEN. La sonda de neutrones es un instrumento no destructivo utilizado para la determinación del contenido en agua del suelo. Las principales ventajas del método son: permitir la obtención de datos de humedad del suelo en el mismo punto a lo largo el tiempo, presentando además la posibilidad de alta periodicidad de medición, así como de lecturas continuas en el campo. Este trabajo tiene como objetivo estimar el error en la calibración de la sonda de neutrones en un Ferralsol. La humedad volumétrica y el conteo relativo medidos a tres profundidades presentaron una relación lineal con coeficientes de correlación que oscilaron entre $r^2= 0.91$ y $r^2= 0.98$. Se evaluaron las diferentes fuentes de error durante el calibrado.

ABSTRACT. The neutron probe is a tool used for determination of soil water content without deforming the soil. The main advantages of the method are that it allows to obtain soil moisture measurement on the same point along the time, including the possibility of high periodicity in measurements and even continuous readings in the field. The objective of this work was to perform neutron probe calibration on a Ferralsol. Coefficients of correlation between volumetric water content and relative counts at three different depths ranged from $r^2= 0.91$ to $r^2= 0.98$. Error sources during calibration were assessed.

1. Introducción

La técnica de determinación de la humedad del suelo mediante sonda de neutrones todavía presenta controversias, según Turatti (1990). A pesar de que la sonda ya se utilizó durante más de tres décadas, no es posible establecer criterios universales adecuados para su calibrado. Se trata de una técnica compleja, que necesita no solo calibrado, sino que presenta el problema de que se refiere a una "esfera de influencia" representada por un volumen de suelo más o menos esférico, en el que a su vez el contenido hídrico presenta una gran variabilidad espacial. Por ello, durante el calibrado pueden ocurrir diversos

errores que limitan posteriormente la fiabilidad de los datos (Teixeira et al. 2005).

Cuando se trata de la determinación de la humedad volumétrica, estos errores pueden ser instrumentales, de calibrado y locales, relacionados con el lugar concreto de medida (Bacchi y Reichardt, 1990, 1997). El error instrumental se refiere a los errores generados en las diversas etapas de medida y están relacionados con los fundamentos en que se basa el funcionamiento del equipo (emisión, computo, fotomultiplicación, etc.), siendo estas etapas muy importantes en la sensibilidad de medida de la sonda. (Falleiros et al. 1993). Los errores de calibrado dependen de la variabilidad espacial del suelo, de la metodología empleada durante el proceso de calibrado (instalación de los tubos de acceso, número de muestreos, etc.) y del tipo de fuente de neutrones utilizada en la sonda. Todos los errores relacionados con estos factores van a ser incorporados en la regresión, que es lo principal en la calibración. Los errores locales están relacionados con la utilización de la sonda en diferentes lugares y tubos de acceso, pudiendo ser debidos a la variabilidad espacial del suelo y a los procedimientos de instalación de los tubos de acceso. Debido a lo anterior, este trabajo tiene como objetivo principal estimar los errores producidos en la técnica de determinación de la humedad volumétrica del suelo con la ayuda de la sonda de neutrones.

La base metodológica para la determinación de la humedad del suelo mediante sonda de neutrones consiste, según Guerra (2000) en situar una fuente radioactiva a una profundidad deseada en el suelo (por medio de un tubo de acceso, de acero o aluminio, insertado verticalmente). Dicha fuente emite neutrones rápidos, que penetran radialmente en el suelo, en donde se encuentran varios núcleos atómicos con los cuales colisionan elásticamente, perdiendo energía cinética. Esta pérdida es máxima cuando el neutron choca con una partícula de masa similar a la suya. En la práctica, ha encontrado que la moderación de neutrones rápidos en el suelo es proporcional al contenido en hidrógeno del mismo (elemento con núcleos de masa similar a los neutrones). Así, cuando los neutrones rápidos colisionan con los núcleos de hidrógeno del agua del suelo, estos neutrones pierden su máxima energía formando,

alrededor de la fuente radioactiva, una nube de neutrones moderados (o termalizados) los cuales son captados por el detector, generalmente constituido por BF_3 (trifluoruro de boro) y así, cuando un neutrón moderado o lento se encuentra con B y es absorbido, se emite una partícula de He generando un pulso eléctrico. Este pulso, a su vez, se envía, por un cable, al medidor, donde se registra la lectura. Cuanto mayor sea el contenido de hidrógeno en el suelo (más agua), más neutrones rápidos son moderados, mayor es el número de pulsos enviados al medidor y más elevado es el valor de la lectura o registro.

2. Material y Métodos

El trabajo de campo fue realizado en el año agrícola 2003/04, en un área experimental perteneciente a la Faculdade de Engenharia – UNESP, Campus de Ilha Solteira, situada a $51^\circ 22'$ de longitud Oeste de Greenwich e $20^\circ 22'$ de latitud sur, con altitud de 335 metros. El suelo del lugar es del tipo *latossolo vermelho*, distrófico típico argiloso, A moderado, hipodistrófico, álico, caolínico, férrico, compactado, muy profundo, moderadamente ácido, según el Sistema de Clasificación Brasileño (Embrapa, 1999; Demattê, 1980), que equivale a un Ferralsol (FAO) o a un Oxisol (Soil Survey Staff). La precipitación, la temperatura y la humedad relativa del aire, media anual, son respectivamente: de 1370 mm, $23,5^\circ \text{C}$ y 70 a 80%.

Se utilizó una sonda manual con el mismo diámetro del tubo de acceso para perforar el suelo. Se instalaron 3 tubos de PVC en la parcela estudiada, de 0,90 m de longitud, siendo la profundidad de penetración en el suelo de 0,60 m, de modo que dichos tubos sobresalían 0,30 m por encima de la superficie del suelo para evitar la entrada del suelo o suciedad en el tubo y facilitar la instalación de la caja de blindaje de la sonda sobre el tubo. La extremidad superior del tubo se cubrió con una tapa desechable, para evitar la entrada de agua.

Alrededor de cada tubo de acceso se delimitó un área de calibrado de 2 m x 2 m, que se llevó a condiciones próximas a saturación. Para ello consideró que el suelo tiene un 50% de volumen de poros y un 50% de volumen de sólidos en la capa de 0,40 m, por lo que se añadieron $0,40 \text{ m}^3$, es decir 400 L de agua. Las lecturas se iniciaron 4 horas después de finalizar la infiltración y se repitieron en progresión geométrica a las 8, 24, 48 h, etc., hasta 30 días después.

Se utilizaron tres tubos de PVC de 75 mm para el calibrado de la sonda. Se llevó a cabo un conteo standard mediante lecturas sobre la caja de blindaje que contiene el equipo de medida, de acuerdo con las recomendaciones del constructor. Esta medida se tomó con la sonda siempre en la misma posición. El ensayo permite obtener el denominado conteo standard (Cs). Posteriormente, el calibrado de la sonda propiamente dicho consiste en obtener la razón entre la lectura del aparato a una profundidad determinada (C) y el conteo standard (es decir, cuentas por segundo en el suelo (C) / cuentas standard en la atmósfera (Cs)). La ecuación de calibrado, finalmente, se obtiene relacionando el conteo relativo que corresponde a la atenuación de neutrones, C/C_s con la

humedad determinada por el método gravimétrico de referencia.

Las muestras para determinación de humedad gravimétrica se tomaron a 30 cm de distancia alrededor del tubo respectivo, a la misma profundidad de las lecturas. La humedad del suelo determinada por el método gravimétrico (kg kg^{-1}) para las profundidades estudiadas se multiplicó por la densidad media de cada profundidad, obteniéndose así la humedad volumétrica (m^3 de agua por m^3 de suelo).

Con los resultados de humedad y las respectivas lecturas de la sonda, se calculó la regresión lineal de calibrado de la sonda. Las ecuaciones de la recta y sus respectivos coeficientes de ajuste (R^2) se determinaron para las profundidades de 0,10; 0,20 e 0,40 m.

A partir de los datos experimentales también se aplicó el análisis de la varianza de la regresión y el test de significación de la correlación para evaluar la precisión de calibrado; además con los datos obtenidos en el área experimental se determinó la varianza de la humedad debido al error instrumental, la varianza de la humedad debido al error durante el calibrado, la varianza total de la humedad y la varianza asociada a los errores locales.

3. Resultados y discusión

Los datos del análisis de la varianza de la regresión y del test de significación de la correlación para las tres profundidades se presentan en la Tabla 1.

Como se puede observar en la Tabla 1, tanto el análisis de varianza de la regresión como el test de significación de la correlación son altamente significativos, indicando una buena regresión, lo que también se confirma por los altos coeficientes de correlación. En la Tabla 2 se presentan las varianzas de la humedad debido al error instrumental, la varianza de la humedad debido al error de calibrado, la varianza total de la humedad y la varianza debido a los errores locales, y sus respectivas desviaciones standard y los coeficientes de variación, para la determinación de la humedad del suelo con la sonda de neutrones.



Fig. 1. Sonda de neutrones utilizada en el proyecto de investigación.

Las dificultades de la calibración son inherentes al proceso de moderación de neutrones en un medio heterogéneo (suelo, agua, aire), que está asociado a la

variabilidad espacial de la densidad y de la composición química que, en general, los suelos presentan. (Nielsen et al. 1973). A pesar de estos problemas, este método es el único usado desde hace tiempo y también en la actualidad para medir las variaciones de humedad de un perfil de modo no destructiva durante un período de tiempo como puede ser el ciclo de una cosecha. (Kirda et al. 1992).

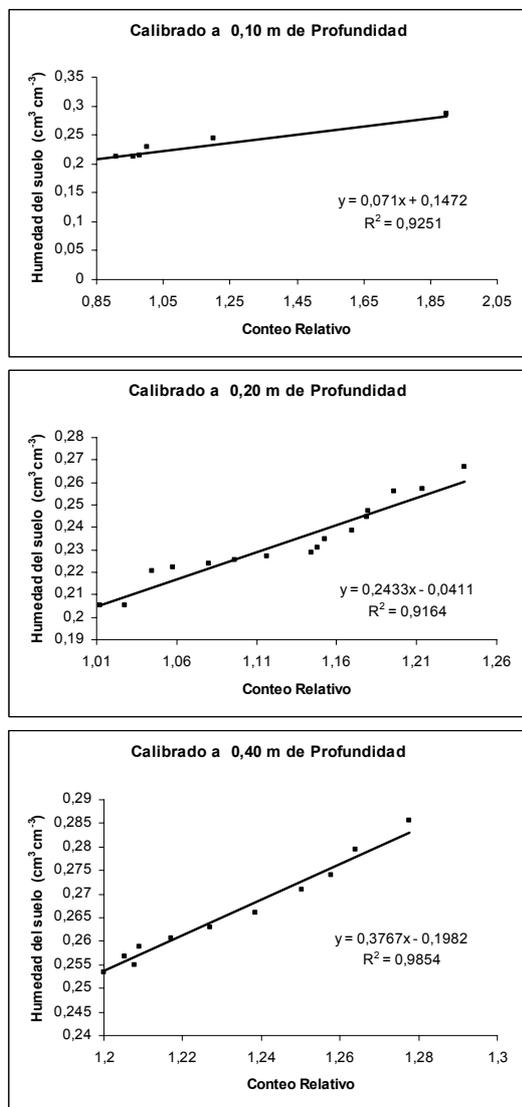


Fig. 2. Regresión para las profundidades de 0,10; 0,20 e 0,40 m.

Tabla 1. Análisis de varianza de la regresión y test de significación de la correlación para las ecuaciones de calibración en las profundidades de 0,10; 0,20 e 0,40 m.

Profundidad	Regresión	Análisis de varianza de la regresión	Test de significación de la correlación
0,10 m	$\theta = 0,0646x + 0,1475$ $R^2 = 0,9242$	$F^1 170,62$	$t^2 = 13,06$
0,20 m	$\theta = 0,2433x - 0,0411$ $R^2 = 0,9164$	$F^1 153,41$	$t^2 = 12,38$
0,40 m	$\theta = 0,3767x - 0,1982$ $R^2 = 0,9854$	$F^1 868,18$	$t^2 = 30,57$

¹Significativo al nivel de 1% por el test "F".

²Significativo al nivel de 0,1% por el test "t".



Fig. 3. Sonda de neutrones realizando el computo relativo.

Tabla 2. Varianza de la humedad debido al error instrumental (VEI), varianza de la humedad debido al error en la calibración (VUC), varianza total de la humedad (VTU) y varianza debido a los errores locales (VEL), para la determinación de la humedad en las tres profundidades.

*Prof.	VEI	VUC	VTU	VEL
0,1 m	$s^2_i(\theta) = 1,03E-07$	$s^2_c(\theta) = 20,000$	$s^2(\theta) = 0,00018$	$s^2 L(\theta) = 0,000106$
	$s_i(\theta) = 0,000321$	$sc(\theta) = 0,01365$	$s(\theta) = 0,013662$	$sL(\theta) = 0,010315$
	CV (%) = 0,18	CV (%) = 7,63	CV (%) = 7,63	CV (%) = 5,76
0,2 m	$s^2_i(\theta) = 0,00090$	$s^2_c(\theta) = 0,0029$	$s^2(\theta) = 0,0038$	$s^2 L(\theta) = 0,00091$
	$s_i(\theta) = 0,030015$	$sc(\theta) = 0,0542$	$s(\theta) = 0,0620$	$sL(\theta) = 0,030162$
	CV (%) = 12,14	CV (%) = 21,96	CV (%) = 25,10	CV (%) = 12,20
0,4 m	$s^2_i(\theta) = 0,00011$	$s^2_c(\theta) = 0,001057$	$s^2(\theta) = 0,0012$	$s^2 L(\theta) = 0,000076$
	$s_i(\theta) = 0,01071$	$sc(\theta) = 0,03251$	$s(\theta) = 0,0342$	$sL(\theta) = 0,008734$
	CV (%) = 4,03	CV (%) = 12,22	CV (%) = 12,86	CV (%) = 3,28

La humedad del suelo determinada mediante sonda de neutrones (Tabla 1), pone en evidencia que el análisis de la varianza de la humedad debido al error de calibrado (VUC) y la varianza total de la humedad (VTU), proporcionan los mayores coeficientes de variación. Ya que la varianza de la humedad debido al error instrumental (VEI) y la varianza debido a los errores locales (VEL) no presentaron coeficientes de variación elevados con la excepción de la profundidad de 0,20 m. Una de las hipótesis para explicar estos valores sería tener en cuenta la influencia de la

discontinuidad de los poros, la textura, la estructura y la porosidad del suelo.

Los errores cometidos en la obtención de lecturas provenientes de una fuente emisora de neutrones son, comumente, de dos tipos: error debido a la emisión al azar de neutrones y error asociado con el equipo utilizado. Para cualquier tiempo, el computo de neutrones sigue la distribución de Poisson con media igual a n y desvío-padrón $n^{1/2}$ (Gardner, 1985). Si se hace un número adecuado de mediciones y la información plotada en una curva de distribución de desvíos con respecto a la media, se encontrará que el computo sigue la familiar curva de distribución normal, la cual para la mayoría de las mediciones nucleares es una adecuada aproximación a la distribución de Poisson (Wang y Willis, 1965). En general, los computos se hacen para obtener aproximaciones equivalentes a un desvío padrón del 1%.

4. Conclusiones

Los mayores errores asociados a la determinación de la humedad volumétrica del suelo mediante la sonda de neutrones, en el caso estudiado, fueron los relacionados con el calibrado del instrumento y con la humedad total.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado en parte con fondos de la Consellería de Presidencia de la Xunta de Galicia (España) en el marco del proyecto "Conservación de suelos y aguas en la cuenca del Río Paraná como base para la sustentabilidad de las actividades agrícolas, de referencia PR803C 2005/16-0

Referencias

- Bacchi, O. O. S. y Reichardt, K. 1990. A sonda de nêutrons e seu uso na pesquisa agrônômica. Boletim Didático - 022, Piracicaba, Universidade de São Paulo. Centro e Energia Nuclear na Agricultura. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz. ESALQ.
- Demattê, J. L. I. 1980. Levantamento detalhado dos solos do "Campus experimental de Ilha Solteira". Piracicaba: ESALQ/USP- Departamento de Solos, Geologia e Fertilidade, 11-31 pp.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-(EMBRAPA). 1999. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, 412 pp.
- Falleiros, M.C., Ravelo Sanchez, A., Souza, M. Dornelas. Neutron probe measurement of soil water content close to soil surface. Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), Dec 1993, vol.50, no.3, p.333-337.
- Gardner, W.H. 1985. Water content. In: Methods of soil analysis. Part I: Physical and mineralogical methods. A. Klute (ed). Madisson: ASA-SSSA. Agronomy Series, No. 9, 493-544 pp.
- Guerra, H.O.C. 2000. Física dos solos. 1 ed. Campina Grande, PB: UFPB, 173 pp.
- Kirda, C. and Reichardt, K. Comparison of neutron moisture gauges with nonnuclear methods to measure field soil water status. Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), 1992, vol.49, no.spe, p.111-121.
- Nielsen, D.R.; Biggar, J.W.; Erh, K.T.. Spatial variability of field measured soil-water properties. Hilgardia, v.42, p.215-259, 1973.
- Reichardt, K., Portezan, O., Bacchi, O.O.S. et al. Neutron probe calibration correction by temporal stability parameters of soil water content probability distribution. Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), June 1997, vol.54, no.spe, p.17-21.
- Teixeira, Claudia Fernanda Almeida, Moraes, Sergio Oliveira and Simonete, Marcia Aparecida Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. Rev. Bras. Ciênc. Solo, Abr 2005, vol.29, no.2, p.161-168.
- Torres, P.S. y Gonzáles, R. 1993. Determination of the humidity in representative soils of the western savannas using neutrons probes. In: Congreso Venezolano Sobre la Ciencia del Suelo. Caracas, Venezuela. Programa y resúmenes de trabajos, 75-76 pp.
- Turatti, A. L., Villagra, M. M., Ponce, J.E., Bacchi, O. O. S. y Reichardt, K. 1990. Variabilidade espacial de solo e sua implicação na calibração de sondas de nêutrons. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 14, 259-262 pp.
- Wang, C.H. y Willis David, L. 1965. Radiotracer methodology in biological science. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.