



Calibração de uma sonda de capacitância em Latossolo Vermelho Argiloso ⁽¹⁾

João Carlos Medeiros ⁽²⁾; [Daiane Conceição de Sousa](#)⁽³⁾; Beáta Emöke Madari ⁽⁴⁾
Alexandre Bryan Heinemann⁽⁴⁾; Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado⁽⁴⁾; Luis
Fernando Stone⁽⁴⁾

(1) Trabalho executado com recursos do CNPq, EMBRAPA, FAPEG e CAPES. (2) Doutorando Embrapa arroz e feijão e Professor adjunto do Centro de Ciências Agrárias; UFPI/CPCE; medeiros.jc@gmail.com; (3) Mestranda em Solos e Nutrição de Plantas; Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Professora Cinobelina Elvas, Bom Jesus, PI; bolsista CAPES; day.nina@hotmail.com; (4) Pesquisadores da Embrapa Arroz e Feijão; beata.madari@embrapa.br

RESUMO: Compreender a dinâmica da água no solo através de seu monitoramento auxilia nos estudos sobre o funcionamento físico-hídrico do solo. Quantificar o conteúdo de água do solo com ferramentas precisas, práticas e de fácil utilização é considerado um atual desafio. Objetivou-se neste trabalho determinar a equação de calibração para uma sonda de capacitância em um Latossolo Vermelho distrófico do Cerrado brasileiro para comparar com a calibração realizada pelo fabricante e calibrações realizadas em outros trabalhos. Foram instalados tubos de PVC (padrão do fabricante) espaçados a cada 5m de distância seguindo as instruções do fabricante. Trinta dias após a instalação iniciou-se a aplicação de água no solo. A calibração foi realizada através de três leituras para cada amostra de solo na camada de 0,1 até 1,0 m, com três níveis diferentes de umidade por uma sonda Diviner 2000[®] gerando-se uma média. Determinou-se umidade gravimétrica e densidade do solo. Os dados obtidos foram submetidos a análise exploratória estatística básica e análise de regressão. O método mostrou-se eficiente para a quantificação do conteúdo de água no solo, porém, verificou-se a necessidade de calibração do equipamento para solos argilosos. As equações testadas não apresentaram resultados satisfatórios na quantificação do conteúdo de água no solo. A estratificação do perfil do solo em classes homogêneas tornou a calibração mais acurada.

Termos de indexação: densidade do solo; umidade gravimétrica; sensor;

INTRODUÇÃO

Obter medidas acuradas do conteúdo de água do solo é um desafio para estudos agrícolas e ambientais. Procura-se então, formas indiretas para a estimação do conteúdo de água no solo, medições simultâneas e armazenamento contínuo de dados por longos períodos de tempo e isso tem provocado um aumento na utilização de sondas de capacitância do tipo FDR (Starr & Paltineanu, 1998; Grove & Rose, 2004).

A estimativa da umidade nestes equipamentos depende do uso de coeficientes de calibração

apropriados. Estes sofrem alterações com a textura e a densidade do solo (Fares et al., 2004) e óxidos e hidróxidos de ferro (Silva & Gervásio, 1999).

Apesar da disponibilidade de uma equação de calibração fornecida pelo fabricante (defull), os resultados mostram que a calibração para solos individuais melhora a precisão (Baumhardt et al., 2000; Groves & Rosa, 2004).

A região do cerrado ocupa cerca de dois milhões de quilômetros quadrados no interior do Brasil, representando 25% do território nacional (Resende et al., 1996). Os Latossolos apresentam grande importância para esta região (Goedert, 1987; Macedo, 1996), cobrem 46% da área apresentam grande potencial para a agricultura dominando as áreas irrigadas (Lopes, 1984; Resck, 1991).

Os objetivos deste estudo foram: (i) determinar a equação de calibração para um campo de capacitância sonda em um Latossolo Vermelho distrófico do Cerrado brasileiro; e (ii) para comparar com a calibração realizada pelo fabricante e outras calibrações realizadas em diferentes ambientes.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na área experimental da Embrapa Arroz e Feijão, no município de Santo Antônio de Goiás-GO, com coordenadas geográficas 16°28' S 49°17' W e altitude de 802 m. A área é pertencente ao bioma Cerrado. O clima da região é do tipo Aw (Köppen), marcado por duas estações bem definidas, outubro a abril, estação chuvosa e maio a setembro, estação seca, e precipitação média anual de 1490 mm.

O solo é classificado como Latossolo Vermelho Acriférico Típico (EMBRAPA, 2007). Suas principais características descritas foram: horizonte A moderado, horizonte Bw com espessura acima de 150 cm, textura muito argilosa, baixa saturação por bases (V<50%), CTC variando de 9,5 (superfície) a 1,5 cmolc kg arg⁻¹ (sub-superfície), razão silte/argila entre 0,36 e 0,13, Ki de 1,68 a 1,31, ΔpH de 0 a 0,8 e teor de Fe₂O₃ (extraído em H₂SO₄) entre 19 e 24% (Santos et al., 2005).

Tratamentos e amostragens

A calibração foi realizada com a sonda Diviner 2000[®] (Sentek Pty Ltda, Austrália). Estas sondas



são constituídas de um par de eletrodos que atuam como um capacitor eletrônico.

Quando em funcionamento, a matriz do solo forma o meio dielétrico do capacitor. A capacitância aumenta com o número de moléculas de água livre, ou seja, seus polos respondem ao campo elétrico criado pelo capacitor (Sentek, 2000 e 2001).

Seis tubos de PVC (padrão do fabricante) foram instalados espaçados a cada 5 m. Trinta dias após a instalação, iniciou-se a aplicação de água no solo para obtenção de três níveis de umidade: saturado, úmido e seco. Três leituras com a sonda FDR foram realizadas para cada camada de solo (0,1 até 1,0m), gerando-se um valor médio de frequência (FR) medido em cada camada de solo. Após as leituras, procedeu-se a coleta do solo para determinação da umidade gravimétrica e densidade do solo. As amostras foram pesadas, secas em estufa (105°C) e pesadas novamente, após 48h.

Os índices utilizados foram: raiz do erro médio quadrado (RMSE), erro médio (EM), coeficiente de determinação (R^2) e índice de confiança (IC) proposto por (Camargo & Sentelhas.,1987), descrito na **Tabela 1**. A densidade do solo foi determinada conforme a metodologia (Blake & Hartge, 1986).

Tabela 1. Critérios de interpretação dos valores do índice de confiança (IC) propostos por Camargo e Sentelhas (1987)

IC	Desempenho do modelo
0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,76	Bom
0,61 a 0,66	Mediano
0,51 a 0,61	Sufrível
0,41 a 0,51	Mau
<0,40	Péssimo

Análise estatística

Vários índices foram calculados para avaliar o desempenho tanto das FPT existentes da literatura, quanto das FPT desenvolvidas neste trabalho. Os índices utilizados foram: raiz do erro médio quadrado (RMSE), erro médio (EM) e coeficiente de determinação (R^2), representado pela Eq. (1, 2 e 3):

Além disso, empregou-se o índice de confiança (IC) descrito na equação (4), proposto por (Camargo & Sentelhas.,1987). Este é o produto do índice de Willmott, equação (5) pelo coeficiente de correlação de Pearson, equação (6).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (I)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i) \quad (II)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (III)$$

$$CI = r * w \quad (IV)$$

$$w = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{O})^2}{[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}) + \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})]^2} \quad (V)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2]^{0,5}} \quad (VI)$$

Onde: n representa o número de observações; O_i os valores observados (medidos), e E_i os valores estimados (preditos). A interpretação do IC deu-se conforme os critérios propostos por (Camargo & Sentelhas., 1987), descritos na **Tabela 1**.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se uma redução na densidade e na argila com o aumento da profundidade, e isto pode estar relacionado ao gradiente textural e ao histórico de uso da área. Propôs-se então uma equação para estimar a umidade em todo o perfil do solo e outra em que se divide o perfil em três camadas em função dos valores da densidade e conteúdo de argila (**Figura 1**).

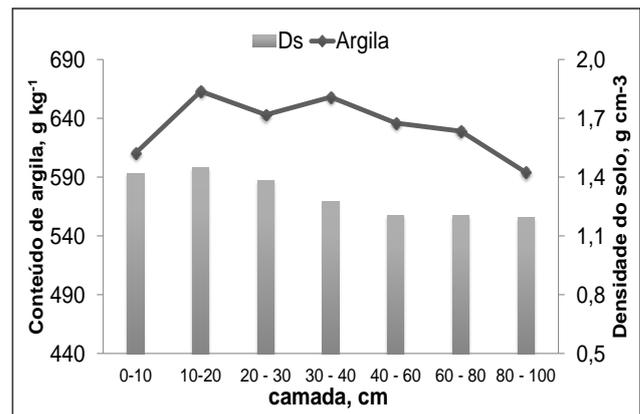


Figura 1. Conteúdo de argila e densidade do solo relacionados a frequência obtida com a sonda de capacitância nos primeiros 100 cm de um Latossolo Vermelho argiloso.

As equações de calibração utilizadas para estimar a umidade volumétrica do solo são apresentadas na **Tabela 2**. Verifica-se que as equações testadas em outros estudos foram desenvolvidas para solos de textura média e arenosa, havendo uma carência de modelos que calibrem a sonda Diviner 2000® em solos argilosos. Observa-se que todas as equações testadas obtiveram elevado coeficiente de determinação no modelo (R^2) no momento da



calibração, exceto o modelo proposto para todo o perfil (0-100).

O coeficiente de determinação foi menor quando se considerou o perfil de solo inteiro (**Figura 2A**), quando comparadas às camadas homogêneas (**Figura 2B, C e D**). Esses resultados demonstram que, para este tipo de solo é recomendado estratificação do perfil para calibrar a sonda Diviner 2000®.

Quando os valores de Θ , calculados pelas equações de calibração, testadas e propostas, foram plotados para cada camada estudada, observou-se que todas as equações pré-existentes testadas subestimaram os valores de Θ em subsuperfície (**Figura 3**).

Na **Tabela 3** são apresentados os indicadores estatísticos utilizados para testar a acurácia das equações de calibração do equipamento Diviner 2000®. Os valores de IC indicam que as equações provenientes da calibração do equipamento para o solo estudado possuem desempenho ótimo para a calibração em camadas e bom para a calibração realizada com amostras de solo de todo o perfil.

CONCLUSÕES

A sonda Diviner 2000® foi eficiente para a quantificação do conteúdo de água no solo estudado.

Os valores de umidade do solo, estimados com a equação proposta pelo fabricante e algumas equações produzidas em outros trabalhos, subestimaram o conteúdo de argila em subsuperfície.

Verificou-se a necessidade de calibração do equipamento para solos argilosos.

As equações testadas não apresentaram resultado satisfatório na quantificação do conteúdo de água no solo.

A estratificação do perfil do solo em classes homogêneas tornou a calibração mais acurada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, EMBRAPA, FAPEG e CAPES pelas bolsas e recursos que possibilitaram o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

BAUMHARDT, R.L.; LASCANO, R.J. & EVETT, S.R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensory capacitance probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:1940-1946, 2000.

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis – physical and mineralogical methods*. 2 ed. Madison, ASA, 1986. p.363-375.

CAMARGO, A.P. & SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão, EMBRAPA. Disponível em: <<http://www.cnpaf.embrapa.br/>>. Acesso em 9 de jun de 2015.

GOEDERT, W.J. Solos dos cerrados: Tecnologias e estratégias de manejo. EMBRAPA-CPAC/Nobel. 1987. 422p.

Groves S.J.L. & Rose S.C.L. Calibration equations for Diviner 2000 capacitance measurements of volumetric soil water content of six soils. *Soil Use and Management*, v.20, n.1, p. 96-97, 2004.

LOPES, A.S. Solos sob "cerrado": Características, propriedades e manejo. POTAFOS. 1984. 162p.

MACEDO, J. Os solos da região dos Cerrados. In: Alvarez V., V.H.; Fontes, L.E.F. & Fontes, M.P.F. ed. *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. UFV/SBCS. 1996. p. 135-155.

RESCK, D.V.S. Uso e ocupação do solo no Brasil Central. EMBRAPA-CPAC. 1991. 29p.

RESENDE, M.; KER, J.C.; BAHIA FILHO, A.F.C. Desenvolvimento sustentado do Cerrado. In: Alvarez V., V.H.; Fontes, L.E.F. & Fontes, M.P.F. ed. *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. UFV/SBCS. 1996. p. 169-199.

SANTOS, R.M. Calibração de sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry) para estimativa da umidade do solo. 2005. 53p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas.

SENTEK. Calibration of the Sentek Pty Sensors. 2001. 54p Ltd Soil Moisture.

SENTEK. Diviner 2000®: user guide version 1.4. Stepney: Sentek Pty Ltd, 2007.

SILVA, E.L da; & GERVÁSIO, E.S. Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo distrófico. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, v. 3, n. 3, p. 417-420, 1999.

STARR, J. L. & PALTINEANU, I. C. Soil water dynamics using multisensor capacitance probes in nontraffic interrows of corn. *Soil Science Society of America Journal*, v. 62, n. 1, p. 114-122, 1998.

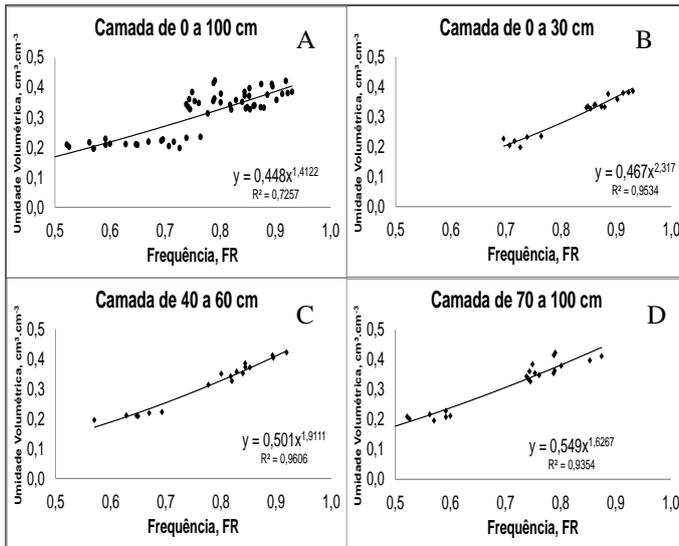


Figura 2. Modelos ajustados entre valores de umidade volumétrica do solo e frequência obtida com a sonda de capacitância para o perfil inteiro do solo avaliado (A) e estratificação em camadas (B, C e D).

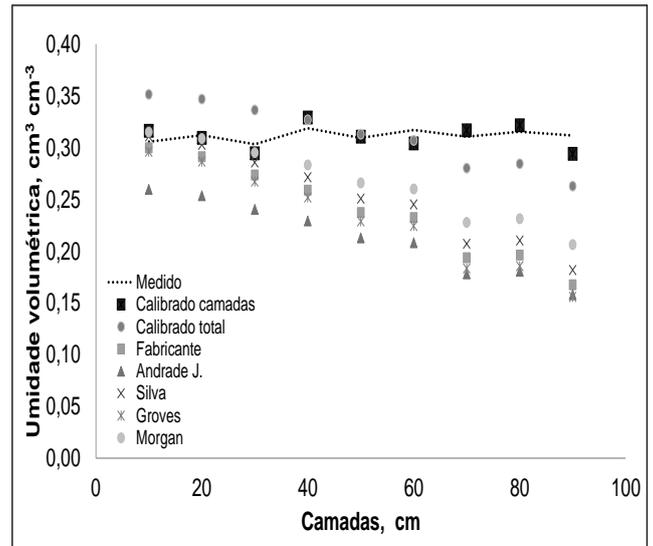


Figura 3. Umidade volumétrica do solo calculada por diferentes equações de calibração de uma sonda de capacitância na camada de 0-100 cm de profundidade de um Latosolo vermelho distrófico.

Origem dos dados	Textura	Modelos	R ² (modelo)
Calibração do fabricante	Media	$\theta = 0,494FR^{3,017}$	0,99
Obtida (camada - 0 a 100 cm)	Argilosa	$\theta = 0,448FR^{1,412}$	0,73
Obtida (camada - 10 a 30 cm)	Argilosa	$\theta = 0,467FR^{2,317}$	0,95
Obtida (camada - 40 a 60 cm)	Argilosa	$\theta = 0,501FR^{1,9111}$	0,96
Obtida (camada - 70 a 100 cm)	Argilosa	$\theta = 0,549FR^{1,6267}$	0,89
Andrade Junior (2007)	Arenosa	$\theta = 0,397FR^{2,533}$	0,97
Silva et al. (2007)	Arenosa	$\theta = 0,492FR^{2,757}$	0,93
Groves e Roses (2004)	Siltosa	$\theta = 0,531FR^{3,815}$	0,96
Morgan et al. (2004)	Arenosa	$\theta = 0,451FR^{2,121}$	0,83

Tabela 2. Equações de calibração utilizadas para estimar a umidade volumétrica do solo utilizando uma sonda de capacitância (FDR)

Tabela 3. Indicadores estatísticos utilizados para testar diferentes equações de calibração usadas para estimar a umidade volumétrica do solo utilizando uma sonda de capacitância (FDR)

Indicadores	Fabricante	Andrade J.	Silva	Groves	Morgan	Calibrado camadas	Calibrado total
RMSE	0,09	0,11	0,08	0,10	0,06	0,02	0,04
ME	0,07	0,10	0,06	0,08	0,05	0,01	0,01
W	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
r	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,98	0,86
R ²	0,72	0,73	0,73	0,72	0,73	0,95	0,73
IC	0,84	0,84	0,84	0,83	0,85	0,97	0,85

RMSE= raiz do erro médio quadrado; ME=erro médio; W = Índice de Willmott; r = Correlação de Pearson; R² = Coef. de determinação; IC = Índice de confiança proposto por Camargo e Sentelhas (1987).