



XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo

Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas
31 de julho à 05 de agosto - Center Convention - Uberlândia/Minas Gerais

ESTIMATIVA DA UMIDADE DE UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO COM USO DA TÉCNICA DA TDR

**José Antonio do Vale Sant'Ana⁽¹⁾; Eugênio Ferreira Coelho⁽²⁾; Manoel Alves de Faria⁽³⁾; Beatriz Santos
Conceição⁽⁴⁾; Mauricio Antonio Coelho Filho⁽²⁾**

⁽¹⁾ Doutorando do Programa Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, CEP: 37200-000.

Email: jantonio@posgrad.ufla.br.

⁽²⁾ Pesquisador da Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, Cruz das Almas - BA, CEP: 44380-000. Email: eugenio@cnpmf.embrapa.br.

⁽³⁾ Professor Titular da Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, CEP: 37200-000. Email: mafaria@ufla.br.

⁽⁴⁾ Graduando do curso de Agronomia da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas - BA, CEP: 44380-000.

Resumo – O acompanhamento da umidade do solo com o uso da reflectometria do domínio do tempo (TDR) vem sendo cada vez mais utilizada para o monitoramento da umidade do solo, devido à facilidade de operação e determinação de umidade do solo em tempo real. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a estimativa da umidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico com uso da técnica da reflectometria do domínio do tempo (TDR). Foram Utilizadas amostras de solo indeformadas, retiradas nas camadas de 0,5-0,20; 0,25 - 0,40; 0,45 - 0,60 e 0,65 - 0,80 m, sendo três repetições para cada camada do solo, totalizando 12 amostras. As sondas de TDR foram confeccionadas artesanalmente, com três hastes de 0,003 m de diâmetro e 0,10 m de comprimento efetivo, fora da resina, espaçadas de 0,017 m com cabos coaxiais de 50 ohms e isoladas com resina epóxi no início das hastes. As amostras foram retiradas com tubo de PVC de 0,15 m de comprimento por 0,110 m de diâmetro nominal. As leituras do peso do conjunto tubo - sonda - solo - tela - papel foi feita com balança analítica e a umidade do solo estimada pela TDR. As estimativas para as diferentes camadas do solo não apresentaram diferenças entre si. O ajuste do modelo avalia a calibração para as camadas do solo em estudo, indicando a viabilidade do emprego das sondas manufaturadas.

Palavras-Chave: calibração; constante dielétrica; solo.

INTRODUÇÃO

O acompanhamento da umidade do solo com o uso da reflectometria do domínio do tempo (TDR) vem sendo cada vez mais utilizada para o monitoramento da umidade do solo, devido a facilidade de operação e determinação de umidade do solo em tempo real. A técnica TDR apresenta vantagens como rapidez na obtenção da umidade volumétrica (Tommaselli, 1997), a repetibilidade das leituras, a não destruição da região amostrada, a não emissão de radiações ionizantes (Noborio, 2001), os fatos das sondas TDR poderem ser acopladas a multiplexadores (Coelho et al 2006) pode ser utilizada ainda em aplicações para o desenvolvimento de métodos para determinação da condutividade hidráulica do solo (Melo Filho, 2003).

Além da umidade e da condutividade elétrica do solo, este sistema de aquisição de dados permite, adicionalmente, o acompanhamento da dinâmica de solutos no solo nas pesquisas com fertirrigação (Cotrim, 2009). Embora apresente desvantagens, como o alto custo, a complexa calibração e a existência de alguns erros inerentes à própria técnica (Tommaselli, 1997). Atualmente os usuários da técnica da TDR têm usado guias de onda de construção artesanal (Conciani et al., 1997; Coelho et al 2005; villwock et al 2004) obtendo resultados satisfatórios com ganho bem relevantes, quando comparado com os custos para aquisição das sondas industriais. De acordo com Regalado et al. (2007) a determinação dos teores de água do solo pela técnica de TDR é feita a partir de valores da constante dielétrica aparente(ϵ), correlacionados aos dados de teor de água(θ) ,por meio de curvas de calibração obtidas a partir de dados de campo ou laboratório. Mualem e Friedman (1991) relatam que esta relação é fortemente influenciada por alguns atributos físicos do solo, como textura, densidade e porosidade. Villwock (2004) afirma que a calibração é exigida especialmente quando se trabalha com Latossolos, devido a algumas particularidades, como, por exemplo, os altos teores de ferro e argila e a expansibilidade do solo. Diante disso, o presente trabalho teve o objetivo de apresentar equações de calibração de sondas de TDR para leitura de umidade em diferentes profundidades em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no laboratório de Irrigação e Fertirrigação do Centro Nacional de Pesquisa Mandioca e Fruticultura Tropical, em Cruz das Almas - BA, (12°48'S; 39°06'W; 225 m). Foram Utilizadas amostras de solo indeformadas, retiradas nas camadas de 0,5-0,20; 0,25 - 0,40; 0,45 - 0,60 e 0,65 - 0,80 m, sendo três repetições para cada camada. O solo foi coletado no campo experimental do Instituto Federal de Ciência e tecnologia Baiano (*Campus* Guanambi-BA), classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, com horizonte A fraco, textura média (EMBRAPA, 2006; Donato et al., 2010). As características físico-hídricas do solo encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 Características físico-hídricas do solo da área experimental.

Características	0 - 0,2 (m)	0,2 - 0,4 (m)	0,4 - 0,6 (m)
Areia (g kg ⁻¹)	675	662,5	-
Silte (g kg ⁻¹)	75	88,3	-
Argila (g kg ⁻¹)	250	249,2	-
Densidade do solo (Mg m ⁻³)	1,66	1,75	-
Retenção de água -10 kPa (m ³ m ⁻³)	0,2102	0,2308	0,2325
Retenção de água -1500 kPa (m ³ m ⁻³)	0,1340	0,1325	0,1125

As sondas de TDR foram confeccionadas artesanalmente, com três hastes de 0,003 m de diâmetro e 0,10 m de comprimento efetivo, fora da resina, espaçadas de 0,017 m com cabos coaxiais de 50 ohms e isoladas com resina epóxi no início das hastes de espessura 0,04 m (Figura 1). As amostras foram retiradas com tubo de PVC de 0,15 m de comprimento por 0,110 m de diâmetro nominal, identificados e previamente pesados, com uma das extremidades em bisel, que foram introduzidos no solo nas profundidades especificadas. Concluída a retirada, as amostras tiveram uma das extremidades revestidas por tela de nylon e papel filtro, com a função de permitir apenas a passagem da água para o exterior do tubo. Logo após, saturou-se o solo no interior do tubo por 48 horas, nos quais foram inseridas as guias de onda identificadas e previamente pesadas, até cobrir completamente as hastes (Figura 1).



Figura 1 Detalhe da calibração das sondas de TDR com as hastes inseridas completamente no solo após 48 horas de saturação, Cruz das Almas-BA, 2011.

As leituras do peso do conjunto tubo - sonda - solo - tela - papel foi feita com balança analítica e a umidade do solo estimada pela TDR. A princípio, as leituras eram feitas de quinze em quinze minutos. Na medida em que ocorria a redução de umidade, as leituras eram feitas em maiores intervalos de tempo. Quando a umidade do solo atingia valores tais que o peso do conjunto tubo - sonda - solo - tela - papel tornava-se pouco variável, era procedido o seu secamento em estufa a 105°C. Os valores das umidades volumétricas (θ_i) eram determinados a cada pesagem do conjunto, através da equação 1:

$$\theta = \frac{PU - PS}{Vs} \quad (1)$$

em que,

PU – Peso do solo úmido atual + PE, g;
 PS – Peso do solo seco + PE, g;
 PE – Peso da coluna de PVC + Peso da guia de onda + telas de nylon e papel filtro, g;
 Vs – Volume do solo, cm³.

O modelo ajustado aos dados de umidade gravimétrica medida e a constante dielétrica aparente foi o polinomial cúbico, por apresentar melhor desempenho, conforme Milani et al. (2008). Os resultados de umidade medida por gravimetria e estimada pelos modelos de calibração das sondas de TDR, foram comparados através de uma regressão linear simples do tipo $Y=aX$, em que o coeficiente angular próximo de 1,0 com R^2 elevado, indica maior precisão do modelo ajustado. O teste t de Student foi aplicado ao nível de 5% de significância, para comparar os resultados das médias dos desvios percentuais entre valores estimados. Os indicativos estatísticos RMSE (raiz quadrada da média dos quadrados dos erros) e “d” (índice de concordância de Willmott), foram utilizados na avaliação do modelo abordado, os quais são obtidos pelas equações abaixo:

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

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i + \bar{O}|)^2} \right] \quad (3)$$

Onde,

n= numero de dados
 O_i = valor observado.
 E_i = valor estimado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística não identificou diferença entre médias de umidade obtidas para as camadas do solo testadas ($P < 0,05$), segundo o teste t de Student. As camadas de 0,45-0,60 m e 0,65-0,80 m apresentaram valores absolutos similares (0,2106 m³ m⁻³ e 0,2129 m³ m⁻³, respectivamente) com uma pequena elevação na umidade média, quando comparado com as camadas do solo superficiais de 0,05-0,20 m e 0,25-0,40 m (Tabela 2).

Tabela 2 Média da umidade estimada para diferentes camadas do solo. Cruz das Almas-BA, 2011.

Camadas do solo (m)	Médias da umidade (m ³ .m ⁻³)
0,05-0,20	0,1899 a
0,25-0,40	0,1827 a
0,45-0,60	0,2106 a
0,65-0,80	0,2129 a

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si, segundo o teste t de Student a 5% de probabilidade.

A Tabela 3 ilustra o ajuste do modelo polinomial cúbico, em que as análises de variância da regressão foram

significativas para todas as camadas do solo avaliadas. Os ajustes dos modelos cúbicos aos dados indicaram que acima de 99% das variações da umidade gravimétrica podem ser explicadas pelas variações da constante dielétrica, para todas as camadas do solo. Esse modelo tem sido adotado por outros autores, como Baker e Allmaras (1990), Milani et al. (2008), Souza et al. (1999) e Topp et al. (1980).

Da análise de variância da regressão entre os dados de umidade medida por gravimetria e umidade estimada pela TDR (modelo de calibração), conclui-se que o modelo de regressão linear simples explicou significativamente a variável dependente (umidade estimada). A umidade estimada pela regressão linear simples superestimou, em média, a umidade gravimétrica em 0,05%, na camada do solo de 0,05-0,20 m, enquanto que no caso da camada do solo de 0,25-0,40 m, a umidade estimada subestimou a umidade gravimétrica em 2,5% (Gráfico 1). Nas camadas do solo 0,45-0,60 e 0,65-0,80 m, a umidade estimada pela regressão linear simples superestimou, em média, a umidade gravimétrica em 0,05% e 0,08%, respectivamente (Gráfico 2). Diante dos resultados encontrados, a calibração indicou a viabilidade de emprego das sondas manufaturadas, sendo empregada uma equação de calibração para cada camada do solo avaliada, conforme apresenta a Tabela 3.

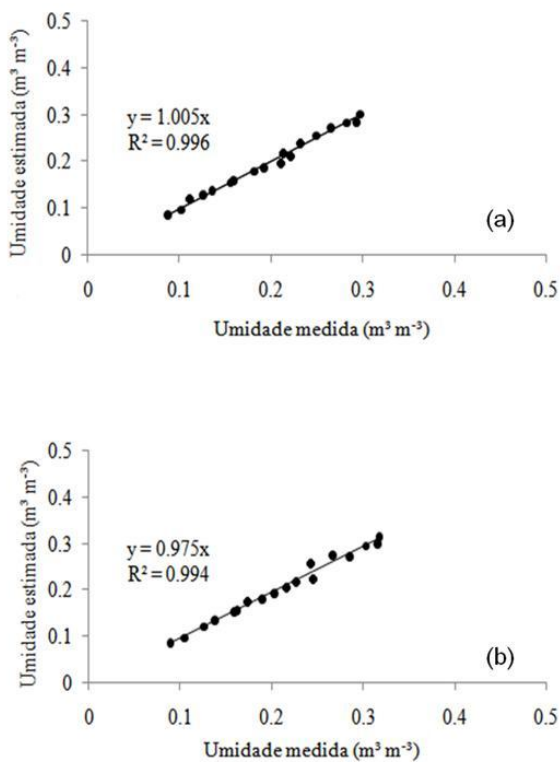


Gráfico 1 Valores da umidade estimada pelo modelo de regressão linear simples em função da umidade gravimétrica para as camadas do solo de 0,05-0,20 m (a) e 0,025-0,40 m (b). Cruz das Almas - BA, 2011.

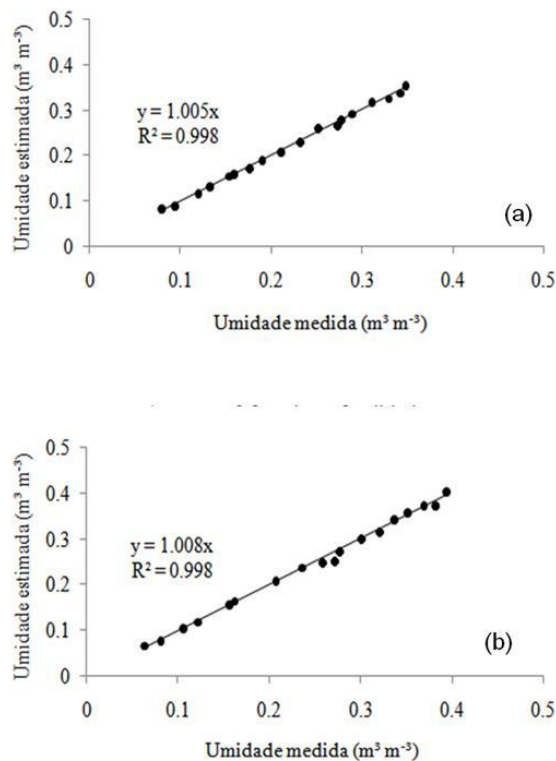


Gráfico 2 Valores da umidade estimada pelo modelo de regressão linear simples em função da umidade gravimétrica para as camadas do solo de 0,45-0,60 m (a) e 0,65-0,80 m (b). Cruz das Almas - BA, 2011.

Na tabela 4 é apresentada a avaliação das equações de calibração obtida para as diferentes camadas do solo, com base na raiz quadrada da média dos quadrados dos erros e no índice de concordância de Willmott. Em geral, a calibração para todas as camadas apresentaram um baixo valor para o indicativo estatístico, RMSE (raiz quadrada da média dos quadrados dos erros), o que sinaliza para o bom desempenho do modelo.

Verifica-se que os valores do conteúdo de água estimados pelas equações mostraram uma concordância elevada (99%) com os dados determinados por gravimetria, indicando boa eficácia do ajuste do modelo polinomial cúbico para as sondas de TDR em estudos (Tabela 4). Coelho et al. (2006) ressaltam que os modelos de calibração variam conforme o tipo de solo e que um modelo polinomial de terceiro grau pode ser calibrado com exatidão para cada situação de solo.

CONCLUSÕES

1. As estimativas para as diferentes camadas do solo não apresentaram diferenças entre si.
2. O ajuste do modelo avalia a calibração para as camadas do solo em estudo, indicando a viabilidade do emprego das sondas manufaturadas.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG, CAPES, UFLA pelo auxílio financeiro e concessão de bolsa e a EMBRAPA Mandioca e Fruticultura pela infra-estrutura e disponibilização dos materiais para o desenvolvimento do trabalho.

Tabela 3 Ajuste do modelo polinomial cúbico para umidade gravimétrica em função da constante dielétrica, nas diferentes camadas do Latossolo-Vermelho Amarelo Distrófico. Cruz das Almas - BA, 2011.

Camadas do solo (m)	Modelo	R ²
0,05-0,20	Y= 0,00008498 Ka ³ - 0,0045 Ka ² + 0,0894 Ka - 0,4511	0,996
0,25-0,40	Y= 0,0000890 KA ³ - 0,0046 KA ² + 0,0888 KA - 0,4411	0,995
0,45-0,60	Y= 0,000065664 KA ³ - 0,0033 KA ² + 0,0674 KA - 0,3133	0,998
0,65-0,80	Y= 0,000044578 KA ³ - 0,0025 KA ² + 0,0580 KA - 0,2720	0,999

Tabela 4 Determinação dos indicativos estatísticos, RMSE (raiz quadrada da média dos quadrados dos erros) e “d” (índice de concordância de Willmott) do modelo. Cruz das Almas, 2011.

Índices	Camadas do solo (m)			
	0,05-0,20	0,25-0,40	0,45-0,60	0,65-0,80
RMSE	0,004	0,007	0,004	0,005
d	0,999	0,999	0,999	0,999

REFERÊNCIAS

- BAKER, J. M.; ALLMARAS, R. R. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 1, p. 1-6, 1990.
- COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO, FILHO. M A, LEDO, C. A. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.30, n.1, p. 23-30, 2006.
- COELHO E. F.; VELLAME L. M. & COELHO FILHO M. A. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.475-480, 2005.
- CONCIANI, W.; CARNEIRO, B.J.; SOARES, M.M.; HERMANN, P.S.P.; CRESTANA, S. Emprego de TDR com sondas multihastes segmentadas para medida de umidade de um perfil de solo. In: Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária, 1, 1997, São Carlos, **Anais...** São Carlos. EMBRAPA-CNPDIA. p.169-173, 1997.
- COTRIM, C.E. **Otimização da irrigação Localizada em pomares de manga no Semi-árido Bahiano**. 2009. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- DONATO, S. L. R.; LÉDO, A. A.; PEREIRA, M. C.; COELHO, E. F.; COTRIM, C. E.; COELHO FILHO, M. A. Estado nutricional de bananeiras tipo Prata sob diferentes sistemas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 9, p. 980-988, set. 2010.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.
- MELO FILHO, J. F. de. **Variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica em função da umidade de um latossolo sob condições de campo**. Piracicaba 2003. 145p. Tese(Doutorado) – ESALQ, USP.
- MILANI, D. I. C.; TAVARES, M. H. F.; CLEMENTINA, S. Calibração de sondas TDR em condições de laboratório. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 3, n. 1, p. 68-75, 2008.
- MUALEM, Y. e S. P. FRIEDMAN. Theoretical prediction of electrical conductivity insaturated and unsaturated soil. **Water Resources Research**, Washington, vol. 27, n. 10, p. 2771-2777, 1991.
- NOBORIO. K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Washington, v.31, n.3, p. 213-237, 2001.
- REGALADO C. M.; RITTER A. e RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ R. M. Performance of the Commercial WET Capacitance Sensor as Compared with Time Domain Reflectometry in Volcanic Soils. **Vadose Zone Journal**, v. 6; n. 2, p. 244-254, 2007.
- SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Desempenho de sondas multihaste segmentada para o monitoramento da umidade do solo por meio da técnica de TDR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelotas: SBEA/UFPeL, 1999. 1 CD-ROM.
- TOMMASELLI, J. T. G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (time domain reflectometry)**. Piracicaba, 1997. 109 p. Tese de Doutorado – Centro Nacional de Energia na Agricultura, Universidade de São Paulo.
- TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content; measurement in coaxial lines. **Water Resources Research**, Washington, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980.
- VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F.; VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Irriga**, Botucatu, v.9. p.82-88, 2004.