



You are free: to copy, distribute and transmit the work; to adapt the work.  
You must attribute the work in the manner specified by the author or licensor

## METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTO DE TDR PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO

Roberto Avelino Cecílio<sup>1</sup>, Delfran Batista dos Santos<sup>2</sup>

---

### RESUMO

A utilização de equipamentos de TDR consiste em alternativa rápida e precisa para determinação da umidade do solo, todavia sua utilização necessita de calibração específica para cada solo. As metodologias de calibração utilizadas demandam muito tempo ou grande quantidade de solo para sua realização. Neste trabalho, propôs-se e avaliou-se uma metodologia de calibração que permite rápida obtenção de equações, utilizando pequena quantidade de solo. A equação de calibração obtida para Latossolo Vermelho-Amarelo, aplicada na estimativa da umidade do solo contido em recipientes com diferentes umidades, apresentou alto índice de confiança (0,979). A metodologia proposta tem potencialidade de aplicação para calibração de equipamento de TDR com fins de determinação da umidade do solo.

**Palavras-chave:** constante dielétrica, temperatura, latossolo vermelho-amarelo

### METHODOLOGY OF CALIBRATION OF TDR EQUIPMENT TO MEASURE SOIL MOISTURE

#### ABSTRACT

The use of TDR equipments is a rapid and accurate alternative to the determination of soil moisture. Nevertheless the use of this technique needs specific calibration for each soil. Calibration methods in use demands lots of time or soil to achieve calibration equations. This paper presents and evaluates an alternative calibration methodology to achieve TDR calibration equations in short times with the use a few soil. The calibration equation obtained to a Red-Yellow Latosol showed high trustu index (0,979) when it was applied to predict soil moisture of 11 soil columns prepared with different water contents. The results indicates that the calibration methodology has great potential to be applied.

**Keywords:** dielectric constant, temperature, red-yellow latosol

---

Trabalho recebido em 25/09/2009 e aceito para publicação em 08/12/2009.

---

<sup>1</sup> Professor Adjunto, Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq – Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Engenharia Florestal. Alto Universitário, s/n – Capixa Postal 16 – CEP 26570-000 – Alegre (ES). racecilio@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Professor, Escola Agrotécnica Federal de Senhor do Bonfim

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda pelos recursos hídricos está aumentando, e cada vez mais, percebe-se a necessidade de um manejo rigoroso e racional, de modo a assegurar a integridade, produtividade e diversidade dos sistemas agrícolas. Dentre os parâmetros utilizados no manejo da água, a umidade do solo constitui num dos mais importantes dentro do sistema solo-água-planta-atmosfera. Em busca de soluções para mensuração rápida e precisa da umidade do solo, os pesquisadores vêm desenvolvendo novos equipamentos, dentre eles destaca-se a TDR – Reflectometria no Domínio do Tempo (TOPP et al., 1980), por apresentar algumas grandes vantagens (precisão, não destruição da amostra de solo, determinação da umidade em tempo real e a continuidade e automação na coleta dos dados) sobre outros equipamentos (COELHO et al., 2003).

A utilização dessa técnica tem se expandido e proporcionado uma contribuição relevante para os estudos da relação solo-água-planta-atmosfera, possibilitando, dentre outros, avaliar a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (PERSSON & UVO, 2003), identificar o perfil de extração de água do solo pelo sistema radicular das culturas (COELHO & OR, 1996;

SANTOS, 2002), estimar a evapotranspiração das culturas (WARD & DUNIN, 2001) e analisar o movimento de água no solo (THOMSEN et al., 2000; CECÍLIO, 2002; TIMLIN & PACHEPSKY, 2002).

Um dos grandes problemas na utilização desta técnica consiste na dificuldade da obtenção de equações de calibração para os diversos tipos de solo. Algumas metodologias de calibração vem sendo utilizadas, entretanto parte delas demanda um tempo muito grande para obtenção das equações (COELHO et al., 2001), sendo que outra parte demanda grande volume de solo (TOMMASELLI & BACCHI, 2001; PEREIRA et al., 2006).

A utilização de secagem de pequenas amostras de solo em estufa tem sido utilizada para acelerar o processo de calibração da umidade do solo com uso da TDR, uma vez que vários trabalhos não tem verificado efeito da temperatura na determinação da constante dielétrica do solo -  $K_a$  (DAVIS & ANNAN, 1977; COELHO FILHO et al., 2003). Porém existe outra vertente de autores que asseguram haver influência da temperatura sobre a constante dielétrica do solo, principalmente para solos com alto teor de sais e/ou ricos em matéria orgânica (SCHAAP et al., 1996; WRAITH & OR, 1999; CORWIN & LESCH, 2005).

Tendo em vista o anteriormente exposto, a proposta do presente trabalho é avaliar uma metodologia de calibração que, utilizando secagem do solo em estufa, seja capaz de obter curvas de calibração em um intervalo de tempo relativamente curto, utilizando apenas uma pequena quantidade de solo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido nas dependências do Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Viçosa, na cidade de Viçosa, MG. Amostras de solo deformadas foram retiradas do campo em um Latossolo Vermelho-Amarelo, cujas características físicas e granulométricas estão apresentadas na Tabela 1. As amostras foram destorroadas, secas ao ar e

peneiradas em malha de 0,002 m, sendo, em seguida, acondicionadas em três recipientes, de massa conhecida, construídos em PVC, com altura de 0,20 m e diâmetro de 0,097 m. A fim de permitir a saturação do solo dos recipientes, sua parte inferior foi fechada com tela de malha fina. A massa de solo utilizada para preenchimento de cada recipiente foi aquela necessária para a obtenção de densidade aparente próxima à observada em campo. O solo contido dentro dos recipientes foi então saturado durante um período de 48 horas. Guias de onda com duas hastes de 0,20 m de comprimento e separadas 0,05 m tiveram suas massas medidas e foram inseridas no solo de cada recipiente durante a saturação.

Tabela 1 – Características físicas do solo utilizado no experimento

Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	$\rho^1$	$\rho_r^3$	Classe Textural
dag kg <sup>-1</sup>		kg dm <sup>-3</sup>				
13	9	4	74	1,00	2,69	Muito argilosa

<sup>1</sup> Método da pipeta

<sup>2</sup> Massa específica aparente do solo (Método do anel volumétrico).

<sup>3</sup> Massa específica de partículas (Método do balão volumétrico).

A coleta de dados iniciou-se logo após a inserção das guias de onda, quando os recipientes foram mantidos com a superfície do solo exposta para permitir

perda de água apenas por evaporação. Os teores de água foram determinados por intermédio de pesagem periódicas dos conjuntos recipiente-solo-guias de onda. A

cada pesagem dos conjuntos eram feitas leituras da constante dielétrica aparente do solo ( $K_a$ ) com a utilização do analisador de umidade Trase I.

A fim de acelerar o processo de calibração para um intervalo de apenas 5 dias, utilizou-se o seguinte procedimento:

*1º dia* - Logo após a saturação determinou-se a massa dos conjuntos recipiente-solo-água-guia de onda (MT) e os respectivos valores da constante dielétrica aparente do solo ( $K_a$ ). Os recipientes contendo o solo foram deixados sendo secos ao ar durante 12 horas, sendo realizadas determinações horárias de MT e  $K_a$ . Durante a noite os recipientes foram colocados em estufa com temperatura de 45°C.

*2º dia* - Os recipientes permaneceram na estufa elevando-se a temperatura para 65°C, sendo as determinações de MT e  $K_a$  realizadas em intervalos de três horas no período diurno, à noite reduziu-se a temperatura para 50°C.

*3º, 4º e 5º dias* - os recipientes permaneceram na estufa elevando-se a temperatura para 110°C fazendo-se as determinações em intervalos de uma hora e meia durante período diurno, reduzindo-se a temperatura para 60°C no período da noite no 3º e para 80°C no 4º dia.

Após a última medição de MT e  $K_a$ , retirou-se amostras do solo contido em cada recipiente e obteve-se a umidade final

por meio do método padrão de estufa, determinando-se, assim, a massa seca de todo o volume de solo contido nos recipientes. Com base nas massas de solo seco (MS), dos recipientes (MR) e das guias de onda (MG), além da densidade do solo ( $\rho$ ) e dos valores de MT determinadas diariamente, obteve-se os valores de umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) do solo pela equação 1.

$$\theta_v = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}} \left( \frac{MT - MS - MG - MR}{MS} \right)$$

em que,

$\theta_v$  – umidade volumétrica do solo,  $m^3 m^{-3}$ ;

$\rho$  – massa específica do solo,  $kg dm^{-3}$ ;

$\rho_{\text{água}}$  – massa específica da água,  $kg dm^{-3}$ ;

MT – massa do conjunto recipiente-solo úmido-guia de onda; kg;

MS – massa de solo seco; kg;

MG – massa da guia de onda; kg; e

MR – massa do recipiente, kg.

Associando-se os valores de  $\theta_v$  aos respectivos valores de  $K_a$  periodicamente determinados, foi realizada a calibração das guias de onda de TDR, por meio do ajuste de um modelo polinomial do terceiro grau (TOPP et al., 1980).

Para avaliar o desempenho da equação de calibração gerada a partir da utilização da metodologia anteriormente descrita, preparou-se 11 recipientes preenchidos com o mesmo solo, na mesma

densidade, sendo cada um com uma umidade diferente, variando entre 21,5% e 47,7%. Mediu-se, à temperatura ambiente (22°C), os valores  $K_a$  do solo contido em cada um destes recipientes com o analisador de umidade Trase I. Determinou-se os valores de  $\theta_v$  do solo desses recipientes da mesma forma que descrito para o procedimento de calibração. De posse dos valores de  $K_a$  para o solo destes recipientes estimou-se a umidade volumétrica por intermédio da equação de calibração gerada anteriormente.

O confronto entre os valores de  $\theta_v$  medidos e estimados permitiu a avaliação do desempenho da equação gerada e, conseqüentemente, da metodologia de calibração. Este desempenho foi testado por meio do índice de confiança (c), proposto por Camargo; Sentelhas (1997), que permite analisar conjuntamente a precisão e a exatidão da equação gerada,

sendo calculado pelo produto do coeficiente de correlação (r) e do índice de concordância (d), proposto por Willmott (1981), apresentados nas equações 2 e 3, respectivamente. Na Tabela 2 são apresentados os critérios de avaliação do desempenho de modelos quanto ao seu índice de confiança.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2}$$

em que,

$E$  – valor de umidade estimado;  $m^3 m^{-3}$ ;

$\bar{E}$  – média dos valores de umidade estimados;  $m^3 m^{-3}$ ;

$M$  – valor de umidade medido;  $m^3 m^{-3}$ ;

$\bar{M}$  – média dos valores de umidade medidos;  $m^3 m^{-3}$ ; e

$n$  – número de medições.

Tabela 2 – Critérios de análise do desempenho de modelos com base no índice de confiança (Camargo; Sentelhas, 1997)

Valor de c	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentadas a curva e a equação de calibração geradas com a utilização da metodologia proposta. Observa-se que a equação de calibração

apresentou um alto valor de R<sup>2</sup> (0,98), indicando a existência de bom ajuste desta aos dados experimentais. A magnitude do valor de R<sup>2</sup> foi a mesma encontrada por Silva; Gervásio (1999) e por Tommaselli; Bacchi (2001) para solos do Brasil.

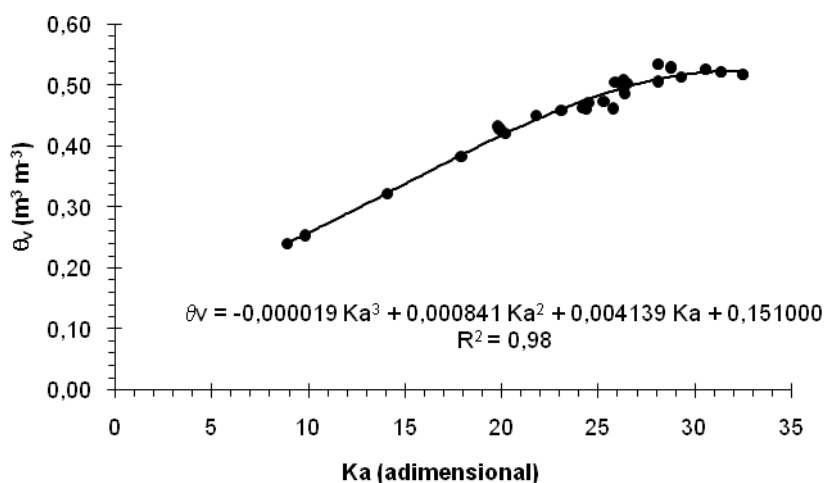


Figura 1. Curva e equação de calibração da relação entre a umidade volumétrica (θ<sub>v</sub>) e a constante dielétrica aparente (Ka) do Latossolo Vermelho-Amarelo.

Na Tabela 3 são apresentados os valores de  $\theta_v$  medidos nos recipientes utilizados para a validação da equação de calibração e os valores estimados por intermédio da equação de calibração ajustada. Observa-se que o erro relativo (ER) máximo, em termos absolutos, entre

o valor medido e estimado de  $\theta_v$  foi igual a 10,4%, sendo o erro relativo médio, também em termos absolutos, igual a 5,0%, podendo ser considerados como erros de baixa magnitude.

Tabela 3 – Valores de  $\theta_v$  medidos e estimados pela equação de calibração

<b>Ka</b> <b>(adimensional)</b>	<b><math>\theta_v</math> (<math>m^3 m^{-3}</math>)</b>		<b>ER<sup>1</sup> (%)</b>
	<b>medida</b>	<b>estimada</b>	
7,95	0,220	0,227	-3,6
7,87	0,213	0,226	-6,1
7,86	0,219	0,226	-3,3
8,24	0,235	0,232	1,5
8,65	0,215	0,237	-10,4
9,46	0,258	0,249	3,5
10,07	0,280	0,259	7,5
10,73	0,298	0,269	9,8
11,12	0,296	0,275	7,0
23,16	0,468	0,462	1,2
25,02	0,477	0,483	-1,4

<sup>1</sup> ER: erro relativo

O cálculo do coeficiente de correlação (r) e do índice de concordância

(d) resultou nos valores 0,986 e 0,993, o que resultou em um índice de confiança (c)

igual a 0,979. O valor de c encontrado faz com que o desempenho da equação gerada seja considerado como ótimo, evidenciando que a metodologia de calibração que faz uso da estufa para acelerar o processo também apresentou ótimo desempenho. Desta maneira, a equação pode ser utilizada para a estimativa da umidade volumétrica do Latossolo Vermelho-Amarelo.

#### 4. CONCLUSÕES

A equação de calibração gerada ajustou-se muito bem aos dados experimentais.

A equação de calibração teve ótimo desempenho quando aplicada para estimativa da umidade em condições diferentes daquela para qual seu ajuste foi realizado.

A metodologia avaliada tem potencialidade para ser aplicada no ajuste de curvas de calibração de equipamentos de TDR para a medida da umidade do solo.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

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

CECÍLIO, R.A. **Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado**. 119p. Tese (Mestrado em Eng. Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, 2002.

COELHO, E.F.; OR, D. A parametric model for two-dimensional water uptake by corn roots under drip irrigation. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.1039-1049, 1996.

COELHO, E.F.; ANDRADE, C.L.T.; OR, D.; LOPES, L.C.; SOUZA, C.F. Desempenho de diferentes guias de onda para uso com analisador de umidade TRASE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.81-87, 2001.

COELHO, E.F.; CALDAS, R.C.; SANTOS, D.B.; LEDO, C.A.S. Número e espaçamento entre hastes de guia de onda para medida da umidade do solo com TDR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.215-220, 2003.

COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; SANTOS, M.R. Variação da umidade e condutividade elétrica do solo,



- estimadas por TDR, em função da temperatura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32. Goiânia, GO. **Anais**. Sociedade Brasileira de Eng. Agrícola, Goiânia, 2003. (CD-ROM)
- CORWIN D.L.; LESCH S.M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.46, p.11-43. 2005.
- DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic detection of soil moisture: Progress Report I. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.3, p.76-86, 1977.
- PEREIRA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; MONTOVANI, E.C.; RAMOS, M.M.; MARTINS, J.H. Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo.. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.306-314, 2006.
- PERSSON, M.; UVO, C.B. Estimating soil solution electrical conductivity from time domain reflectometry measurements using neural networks. **Journal of Hydrology**, v.273, p.249-256, 2003.
- SANTOS, D.B. **Extração de água pela cultura do limão ‘Tahiti’ com porta enxerto citrumelo ‘Swingle’ sob microaspersão nas condições semi-áridas da Bahia**. 109p. Tese (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal da Paraíba, 2002.
- SCHAAP, M.G.; DE LANGE, L.; HEIMOVAARA, T.J. TDR calibration of organic forest floor media. **Soil Technology**, v.11, p.205-217, 1996.
- SILVA, E.L.; GERVÁSIO, E.S. Uso do instrumento TDR para a 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.
- THOMSEN, A.; HANSEN, B.; SCHELDE, K. Application of TDR to water level measurement. **Journal of Hydrology**, v.236, p.252-258, 2000.
- TIMLIN, D.; PACHEPSKY, Y. Infiltration measurement using a vertical time-domain reflectometry probe and a reflection simulation model. **Soil Science**, v.167, n.1, p.1-8, 2002.
- TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de

- TDR para medida de umidade dos solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.9, p.1145-1154, 2001.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, p.574-582, 1980.
- WARD, P.R.; DUNIN, F.X. Growing season evapotranspiration from duplex soils in south-western Australia. **Agricultural Water Management**, v.50, p.141-159, 2001.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1981.
- WRAITH, J.M., OR, D. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: experimental evidence and hypothesis development. **Water Resources Research**, v.35, p.361-369. 1999.