



Calibração de TDR: desempenho de alguns métodos e equações de calibração

Calibration of TDR: performance of some methods and calibration equations

Delfran Batista dos Santos¹, Roberto Avelino Cecílio², Eugênio Ferreira Coelho³, Rafael Oliveira Batista⁴, Alisson Jadavi Pereira da Silva¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano / *Campus* Senhor do Bonfim (IF BAIANO), Estrada de Igara, km 04, s/n, zona rural, Senhor do Bonfim, Bahia, Brasil, 48.970-000, E-mail: delfran.batista@gmail.com

²Universidade Federal do Espírito Santo / Departamento de Engenharia Florestal (UFES / DEF)

³Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Centro Nacional de Pesquisa Mandioca e Fruticultura Tropical (EMBRAPA / CNPMF)

⁴Universidade Federal Rural do Semiárido / Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas (UFERSA / DCAT)

Recebido em: 06/04/2012

Aceito em: 09/05/2012

Resumo. A utilização da técnica da “Reflectometria no Domínio do Tempo” tem proporcionado uma contribuição relevante para os estudos da relação solo-água-planta. A calibração desse equipamento tem sido necessária, devido à dependência relacionada aos atributos físicos e químicos dos diferentes tipos de solo. Nesse trabalho foram ajustadas equações de calibração para dois solos de texturas diferentes (franco arenoso e argiloso), a partir de duas metodologias de preparo de amostras para calibração. Os resultados levaram à conclusão de que as equações de calibração obtidas explicaram satisfatoriamente a variação da umidade do solo; e as duas metodologias aplicadas no trabalho se mostraram adequadas para calibração dos solos estudados.

Palavras-chave. Constante dielétrica, reflectometria no domínio do tempo, teor de água

Abstract. The use of technique "Time Domain Reflectometry" has provided contribution to soil-water-plant studies. The calibration of this equipment has been necessary due to the dependence related to physical and chemical properties of different soil types. In this work calibration equations were adjusted for two soils with different textures (sandy loam and clay), from two methods of preparation of samples for calibration. The authors concluded that the calibration equations explained satisfactorily the variation in soil moisture, and the two methodologies used in the work are suitable for calibration of soils.

Keywords. Dielectric constant, time domain reflectometry, water content

Introdução

Vários equipamentos para medição indireta do teor de água no solo existe no mercado atualmente dentre eles tem-se o refletômetro tipo TDR (Time Domain Reflectometry), que apresenta um grande potencial de desenvolvimento, devido às vantagens associadas a sua utilização.

O princípio de funcionamento da TDR baseia-se no tempo de percurso de um pulso eletromagnético na haste da sonda inserida no solo, o qual é dependente da constante dielétrica do solo, que refere-se a uma média ponderada das constantes dielétricas das frações dos componentes do solo, ou seja, das fases sólida, líquida e gasosa. Como a

constante dielétrica da água é de aproximadamente 80, do ar 1 e do material sólido (mineral e orgânico) de 3 a 7, uma pequena variação na umidade volumétrica do solo causará uma mudança considerável da constante dielétrica. Através de uma correlação experimental entre a constante dielétrica medida com o TDR e a umidade volumétrica do solo medida por gravimetria, pode-se, portanto, utilizar a técnica de TDR para a determinação da umidade do solo (Vaz et al., 2004).

A utilização da técnica da TDR para fins de determinação da umidade do solo tem respaldo na relação existente entre a constante dielétrica aparente do solo (k_a) e o teor volumétrico de água



do solo (θ) e tem potencializado várias pesquisas, destacando-se a determinação do teor de água do solo (Lacerda et al., 2009; Kaiser et al., 2010), a determinação da condutividade elétrica da solução do solo (Graff et al., 2010), a identificação do perfil de extração de água do solo pelo sistema radicular das culturas (Silva et al., 2009), a estimativa da evapotranspiração das culturas (Figueiredo et al., 2009) e os estudos de movimento de água no solo (Barros et al., 2009). Essa técnica tem proporcionado uma contribuição relevante para os estudos da relação solo-água-planta.

A utilização da técnica da TDR na determinação da umidade do solo apresenta algumas vantagens sobre outros equipamentos, tais como leituras em tempo real e em curtos intervalos de tempo, a redução da degradação da região amostrada, não emissão de radiações ionizantes, portabilidade e facilidade de acoplamento a dispositivos coletores de dados. Como desvantagens podemos citar a dependência dos atributos físicos e

químicos do solo, a calibração trabalhosa e o elevado custo do equipamento. Algumas pesquisas estão sendo realizadas com o objetivo de aumentar o uso potencial desse equipamento. O alto custo do equipamento já se tornou objeto de estudo entre vários pesquisadores no Brasil (Santos et al., 2010; Soncela et al., 2011), que têm, entre outras atividades, trabalhado na construção de guias de onda com materiais nacionais, reduzindo muito o seu custo.

Com intuito de resolver o problema de calibração do equipamento de TDR, Topp et al. (1980) desenvolveram um modelo empírico, utilizando vários tipos de solos (Equação 1). Vale salientar que os solos estudados pelos autores não englobam atributos de solos com elevado grau de intemperismo, a exemplo dos encontrados em regiões de clima tropical. Os pesquisadores Jacobsen & Schjonning (1993), verificaram que o modelo proposto por Topp e colaboradores não promove bons ajustes para solos de textura fina.

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} k_a - 5,5 \times 10^{-4} k_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} k_a^3 \quad (1)$$

em que,

- θ = teor volumétrico de água do solo, $m^3 m^{-3}$;
- k_a = constante dielétrica aparente do solo, adimensional;

Roth et al. (1990) desenvolveram uma equação com embasamento físico que visa determinar a umidade do solo com base na constante

dielétrica de cada uma das fases do solo, bem como em sua porosidade (Equação 2).

$$\theta = \frac{k_a^\beta - (1 - \phi)k_s^\beta - \phi k_g^\beta}{k_l^\beta - k_g^\beta} \quad (2)$$

em que,

- β = parâmetro relacionado com a geometria do meio poroso, adimensional;
- ϕ = porosidade do solo, $m^3 m^{-3}$;
- K_s = constante dielétrica da fase sólida do solo, adimensional;
- K_g = constante dielétrica da fase gasosa do solo, adimensional;
- K_l = constante dielétrica da fase líquida do solo, adimensional.

A constante dielétrica da fase sólida do solo varia entre 3 e 5, a da água (fase líquida) é igual a 81 e a do ar (fase gasosa) é igual a 1. Segundo Andrade et al. (2003), alguns autores têm recomendado o valor de 0,5 para o parâmetro β .

O problema da calibração do TDR devido à dependência relacionada às propriedades físicas e químicas do solo tem sido objeto de diversos estudos (Guimarães et al., 2010) e vem sendo

sanado com a calibração do equipamento TDR para solos específicos (Feltrin, 2009; Calderón, 2010).

Grandes esforços vêm sendo realizados por profissionais de várias áreas do conhecimento, no intuito de desenvolver metodologias mais simples e rápidas de calibração para os diferentes tipos de solo (Cecilio & Santos 2009).



Em função do exposto, esse trabalho tem por objetivo ajustar equações de calibração para dois solos de texturas diferentes (franco arenoso e argiloso), a partir de duas metodologias de preparo de amostras para calibração.

Material e Métodos

O trabalho foi conduzido nas dependências do Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal

de Viçosa, na cidade de Viçosa, MG. Dois solos de texturas diferentes (Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo) classificados de acordo as premissas da Embrapa (2006) e cujas características físicas (Tabela 1) foram determinadas conforme metodologia recomendada pela Embrapa (1997). As curvas de calibração foram estimadas com uso de duas metodologias de calibração, sendo uma metodologia para cada tipo de solo.

Tabela 1. Características físicas dos solos utilizados no trabalho

Solo	Areia total	Silte	Argila	d_s ¹	η ²	Classe Textural
	g kg ⁻¹			kg dm ⁻³	m ³ m ⁻³	
Latossolo Vermelho-Amarelo	22	7	71	1,03	0,56	Argilosa
Latossolo Amarelo	77	9	14	1,46	0,30	Franco arenosa

¹ Massa específica do solo (Método do anel volumétrico).

² Porosidade do solo.

As metodologias de calibração utilizadas são descritas na sequência, sendo que a Metodologia 1 foi utilizada na calibração do solo de textura média (Latossolo Amarelo) e a Metodologia 2 na calibração do solo de textura fina (Latossolo Vermelho-Amarelo).

Metodologia de calibração 1

As amostras de solos deformadas retiradas do perfil de 20 cm de um Latossolo Amarelo (textura franco arenosa), de massa conhecida, foram destorroadas e secas ao ar, sendo, em seguida acondicionadas em três recipientes construídos com segmentos de tubos de PVC de 0,25 m de comprimento e 0,075 m de diâmetro e volume de 0,0011 m³. O acondicionamento foi feito até a altura suficiente para instalar as guias de onda no sentido vertical do recipiente, sendo que a massa de solo acondicionada foi igual àquela necessária para a obtenção de densidade do solo igual a 1,46 kg dm⁻³. A densidade do solo foi determinada através da metodologia proposta por Costa et al. (2008). A fim de permitir a passagem da água de drenagem e evitar perdas de solo, a parte inferior dos recipientes foi fechada com tela de malha fina, cuja massa era também conhecida. O solo contido dentro dos recipientes foi então saturado durante um período de 48 horas.

As guias de onda tiveram suas massas medidas e foram inseridas no solo durante a saturação. Após a instalação das guias de onda, os

recipientes foram mantidos com a superfície do solo exposta, para permitir perda de água apenas por evaporação. Os recipientes contendo solo e guias de onda tiveram suas massas medidas diariamente, por intermédio de balança analítica, desde a saturação até a estabilização da umidade do solo, caracterizada pela estabilização da massa dos recipientes preenchidos com solo. No momento de cada determinação da massa foram feitas leituras do tempo de propagação do pulso eletromagnético, utilizando-se um equipamento de TDR Trase System I.

Os valores da constante dielétrica correspondente a cada umidade das amostras foram calculados conforme Or & Wraith (1997). Após a estabilização das massas de solo contidas nos recipientes, retirou-se as guias de onda e a telas dos mesmos, levando o conjunto recipiente-solo à estufa, 105 °C, durante 24 h, determinando-se, assim, a massa de solo seco, e a massa do recipiente. Com base nas massas de solo seco, recipiente, tela e guia de onda, além das massas úmidas determinadas diariamente, obteve-se os valores de umidade gravimétrica e volumétrica do solo a cada dia (Cecílio & Santos, 2009).

Assim, associando-se os valores de umidade volumétrica aos valores de constante dielétrica anteriormente calculados, foi realizada a calibração das guias de onda de TDR, por meio do ajuste de um modelo polinomial. A metodologia 1 de calibração descrita anteriormente já foi utilizada por outros pesquisadores na calibração de amostras de



um Latossolo Amarelo Distrófico, com as seguintes características físicas: 59 g kg⁻¹ de areia total, 10 g kg⁻¹ de silte, 31 g kg⁻¹ de argila e densidade do solo de 1,33 kg dm⁻³ (Coelho et al., 2003).

Metodologia de calibração 2

As amostras do Latossolo Vermelho-Amarelo (textura argilosa) foram destorroadas, secas ao ar e passadas em peneiras de malha 0,002 m, sendo posteriormente armazenadas em 20 recipientes construídos de segmentos de tubos de PVC. Estes recipientes possuíam 0,20 m de diâmetro externo e altura útil de 0,370 m, sendo a base dos mesmos concretada com argamassa de traço forte, com 0,03 m de altura, revestida por lona plástica.

Em cada um dos recipientes acondicionou-se uma certa massa de solo com teores de umidade diferentes, variando entre a umidade higroscópica e a capacidade de campo. Para tanto, antes de fazer o preenchimento dos recipientes, foi necessário determinar-se a umidade residual do solo. Calculou-se a quantidade de água a ser adicionada ao solo de cada recipiente subtraindo-se da umidade desejada, o valor da umidade higroscópica, e multiplicando a diferença pela massa do solo. A massa de água foi

cuidadosamente aspergida sobre a massa de solo e, logo após, a mistura foi peneirada por duas vezes consecutivas, em peneiras de malha 0,002 m e, finalmente, a mistura foi depositada no recipiente. Após a deposição do solo, cada recipiente foi vedado com lona plástica e cinta elástica, sendo deixado em repouso por 10 dias para que houvesse a homogeneização da umidade em todo o perfil.

Para determinação da umidade de saturação dos solos, utilizou-se dois recipientes de PVC com 0,20 m de diâmetro externo e base de PVC perfurada. Estes foram imersos em água até 2/3 da altura da coluna durante três dias. As guias de onda foram verticalmente inseridas no solo sendo feitas três leituras do pulso refletido e armazenando estas informações.

Com os tempos de percurso na sonda dos pulsos refletidos, coletados com o refletômetro tipo TDR, obteve-se o valor da constante dielétrica do solo. Após a realização das leituras, determinou-se a umidade gravimétrica (U_g) do solo coletando-se quatro amostras de cada recipiente, às profundidades de 5, 10, 20 e 30 cm. Para cada recipiente, a densidade do solo (d_s) foi determinada com a utilização da Equação 3.

$$d_s = \frac{(M_t - M_R) 1}{1 + U_g V} \quad (3)$$

em que,

- d_s = densidade do solo, g cm⁻³;
- U_g = umidade gravimétrica média do solo de cada recipiente, g. g⁻¹;
- M_t = massa do conjunto solos seco + água + recipiente, g;
- M_R = massa do recipiente, g; e
- V = volume ocupado pelo solo, cm³.

A umidade volumétrica foi obtida por intermédio do produto entre a umidade gravimétrica e a densidade do solo em cada recipiente. Para a calibração, utilizou-se o modelo polinomial de terceiro grau. A metodologia 2 descrita anteriormente já foi utilizada por outros pesquisadores na calibração de amostras de um Latossolo Vermelho e uma Areia Quartzosa de texturas argilosa e arenosa respectivamente (Pereira et al. 2006).

Comparação das equações

Após a determinação das equações de calibração, comparou-se as mesmas com outras equações, determinadas para solos de textura semelhante àqueles estudados e com as equações propostas por Topp et al. (1980) e por Roth et al (1990).

Na comparação do Latossolo Amarelo (franco arenoso), utilizaram-se as equações 4 e 5, propostas por Jacobsen & Schjonning (1993) e por Tommaselli & Bacchi (2001), respectivamente.

$$\theta = -7,01 \times 10^{-2} + 3,47 \times 10^{-2} ka - 11,6 \times 10^{-4} ka^2 + 18 \times 10^{-6} ka^3 \quad (4)$$

$$\theta = -2,02 \times 10^{-2} + 2,57 \times 10^{-2} ka - 7,0 \times 10^{-4} ka^2 + 1,0 \times 10^{-5} ka^3 \quad (5)$$



Na comparação do Latossolo Vermelho-Amarelo (argiloso), utilizaram-se as equações 6 e 7,

propostas por Souza (2002) e Pereira (2001), respectivamente

$$\theta = -6,03 \times 10^{-2} + 4,15 \times 10^{-2} ka - 1,7 \times 10^{-3} ka^2 + 3,0 \times 10^{-5} ka^3 \quad (6)$$

$$\theta = -4,5 \times 10^{-1} + 1,11 \times 10^{-1} ka - 5,06 \times 10^{-3} ka^2 + 8,123 \times 10^{-5} ka^3 \quad (7)$$

Para testar a performance das equações foram utilizados o coeficiente de concordância (d), desenvolvido por Willmott (1981) e o desvio padrão geral (GSD), de acordo com recomendações de Fila et al. (2003). O coeficiente de concordância

expressa a exatidão das estimativas em relação aos observados, variando de zero, que indica nulidade, a 1 que indica perfeita exatidão. Estes índices são calculados pelas equações 8 e 9:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad (8)$$

$$GSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{n}} \frac{1}{\bar{M}} \quad (9)$$

em que,

- E = valor estimado;
- M = valor medido;
- \bar{M} = média do valor medido; e
- n = número de medições.

Fila et al. (2003) revelaram que, quando os índices GSD e d são avaliados em conjunto, os limites a serem tomados para a avaliação do desempenho de modelos são: bom desempenho quando $GSD \leq 0,10$ e $d \geq 0,95$ e desempenho ruim para $d < 0,9$ ou $GSD > 0,2$. As demais faixas de variação destes índices são consideradas como de desempenho aceitável.

Resultados e Discussão

A equação de calibração do Latossolo Amarelo (textura franco arenosa) foi ajustada com um modelo polinomial do segundo grau, uma vez que Tommaselli (1997) constatou que o termo cúbico do modelo proposto por Topp et al. (1980) deixa de ser importante à medida que a textura do solo se torna mais grosseira. Assim sendo a equação de calibração ajustada para o Latossolo Amarelo foi:

$$\theta = -0,047 + 0,0246ka - 0,0004ka^2 \quad R^2 = 0,983 \quad (10)$$

A curva de calibração do Latossolo Vermelho-Amarelo (textura argilosa) foi ajustada,

por meio de uma equação polinomial do terceiro grau. Assim sendo, a equação de calibração foi:

$$\theta = -0,5945 + 0,1243 ka - 0,0053 ka^2 + 8 \times 10^{-5} Ka^3 \quad R^2 = 0,977 \quad (11)$$

A Figura 1 mostra os dados experimentais e curvas de calibração dos dois solos estudados.

Percebe-se que na Metodologia de calibração 2 (Latossolo Vermelho Amarelo) a umidade em

volume não apresentou-se uniformemente espaçada entre a umidade residual e a de saturação do solo. Isto se deve tanto ao fato de a umidade de saturação ser bem superior à capacidade de campo quanto, aos diferentes valores de densidade encontrados nos diversos recipientes utilizados na calibração. Ocorreu uma variação da densidade entre os valores de 0,70 e 1,00 kg dm⁻³, para o solo na umidade residual e saturado, sendo a densidade média igual a 0,83 kg dm⁻³. Para a utilização desta metodologia, torna-se imprescindível uma melhor distribuição da umidade entre a capacidade de campo e a saturação do solo. Também é necessário uma padronização da densidade do solo acondicionado dentro dos recipientes, que deverá está em consonância com a densidade da área onde será realizado o monitoramento da umidade.

A Metodologia de calibração 2 apresenta a vantagem de possibilitar a obtenção da curva de calibração em um período de tempo menor (cerca de 15 dias, no caso do presente trabalho) quando comparada à Metodologia de calibração 1 (cerca de 100 dias, no presente trabalho). Isso porque, na metodologia 2, o solo é previamente preparado em diversas umidades sendo acondicionado nos recipientes apenas o tempo necessário para a homogeneização da umidade, enquanto na metodologia 1, o solo é saturado e a calibração só é encerrada quando este atinge umidade constante. Entretanto a título de comparação e afim de aumentar a confiabilidade das metodologias aplicadas nesse estudo, faz-se necessário expandir as classes e texturas de solos avaliadas por ambas as metodologias em pesquisas futuras.

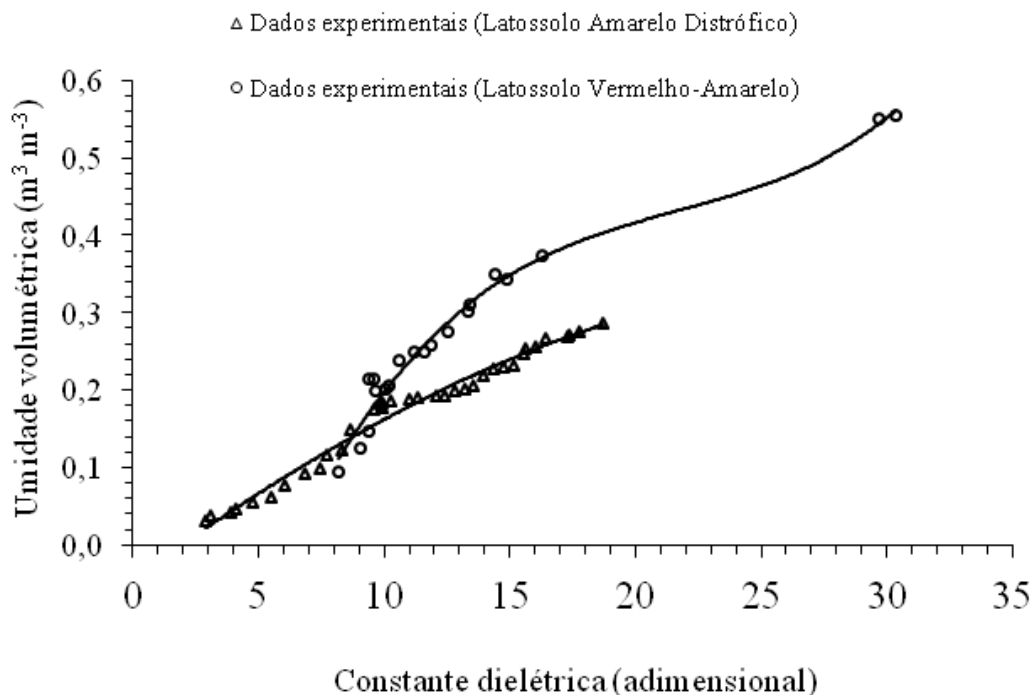


Figura 1. Curvas de calibração dos dois solos em estudo

Os valores calculados para o coeficiente de concordância (d) e o desvio padrão geral (GSD) são apresentados no Tabela 2. Os valores de “GSD” e “d” das equações de regressão de ambos os solos estão dentro da faixa considerada como de bom desempenho, indicando uma excelente concordância entre os valores de umidade medidos e calculados, principalmente devido aos altos valores de d.

De acordo Fila et al. (2003), as equações 10 e 11 apresentaram bom desempenho na calibração dos solos estudados; entretanto as equações de Topp et

al. (1980) e Souza (2002) aplicadas ao Latossolo Vermelho-Amarelo apresentaram valores de d inferiores a 0,95, sendo portanto classificadas como de desempenho apenas aceitável. As demais equações, aplicadas ao Latossolo Vermelho-Amarelo (textura argilosa) apresentaram bom desempenho. Todas as equações aplicadas ao Latossolo Amarelo (textura franco arenosa) apresentaram bom desempenho.



Tabela 2. Valores do coeficiente de concordância (d) e do desvio padrão geral (GSD) calculados para cada equação

Latossolo Vermelho-Amarelo (textura argilosa)			Latossolo Amarelo (textura franco arenosa)		
Equação	d	GSD	Equação	d	GSD
Equação (11)	0,994	0,0009	Equação (10)	0,994	0,0005
Pereira (2001)	0,970	0,0018	Jacobsen & Schjonning (1993)	0,989	0,0007
Roth et al. (1990)	0,964	0,0020	Tommaselli & Bacchi (2001)	0,984	0,0008
Souza (2002)	0,928	0,0026	Roth et al. (1990)	0,973	0,0012
Topp et al. (1980)	0,921	0,0029	Topp et al. (1980)	0,965	0,0013

Conclusões

Com base no presente trabalho, pode-se concluir que: As equações de calibração obtidas explicaram satisfatoriamente a variação da umidade do solo. As duas metodologias se mostraram adequadas para calibração dos solos estudados, porém para fazer uso da metodologia 2 torna-se imprescindível a melhor distribuição da umidade entre a capacidade de campo e a saturação do solo e padronização da densidade do solo acondicionado nos recipientes.

Referências

ANDRADE, C.L.T.; COSTA, E.L.; ALBUQUERQUE, P.E.P. Desenvolvimento e calibração de guias de onda para TDR. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.173-176, 2003.

BARROS, A.C.; FOLEGATTI, M.V.; SOUZA, C.F.; SANTORO, B.L. Distribuição de água no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.6, p.700-707, 2009.

CALDERÓN, V.J.V. **Interpretação dos resultados de ensaios TDR para a determinação do teor de umidade dos solos**. 2010. Ano de Obtenção: 2010. 117p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010..

CECILIO, R.A.; SANTOS, D.B. Metodologia de calibração de equipamento de TDR para determinação da umidade do solo. **Engenharia Ambiental**, v.6, n.3, p.524-533, 2009.

COELHO, E.F.; CALDAS, R.C.; SANTOS, D.B. dos; LEDO, C.A. da 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.

COSTA, W.A.; OLIVEIRA, C.A.S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo-vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p. 515-523, 2008.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ª Edição - EMBRAPA Solos, Rio de Janeiro 2006. 306p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FELTRIN, R.M. **Comportamento das variáveis hidrológicas do balanço hídrico do solo em lisímetros de drenagem**. 2009. Ano de Obtenção: 2009. 94p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

FIGUEIREDO, V.B.; MEDEIROS, J.F.; ZOCOLER, J.L.; ESPINOLA SOBRINHO, J. Evapotranspiração da cultura da melancia irrigada com água de diferentes salinidades. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.2, p. 231-240, 2009.

FILA G., BELLOCCHI G.; DONATELLI M.; ACUTIS M. IRENE_DLL: object-oriented library



- for evaluating numerical estimates. **Agronomy Journal**, v.95, p.1330-1333, 2003.
- GRÄFF, T.; ZEHE, E.; SCHLAEGER, S.; MORGNER, M.; BAUER, A.; BECKER, R.; CREUTZFELDT, B.; BRONSTERT, A. A quality assessment of spatial TDR soil moisture measurements in homogenous and heterogeneous media with laboratory experiments. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.7, p.269-311, 2010.
- GUIMARAES, R.M.L.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; BLAINSKI, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.4, p.657-669, 2010.
- JACOBSEN, O.H.; SCHJONNING, P. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. **Journal of Hydrology**, v.151, p.147-157, 1993.
- KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; MINELLA, J.P.G. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.34, n.3, p.649-658, 2010.
- LACERDA, R.; GUERRA, H.; JÚNIOR, G. Influência do déficit hídrico e da matéria orgânica do solo no crescimento e desenvolvimento da mamoneira BRS 188 – Paraguaçu. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.4, n.4, p.440-448, 2009.
- OR, D.; WRAITH, J.M. **Agricultural and environmental soil physics**. Utah State University. Logan. Utah. 1997. 218p.
- PEREIRA, S. **Tecnologia da reflectometria no domínio do tempo para a medição da umidade do solo**. 2001. Ano de obtenção: 2001. 88p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- PEREIRA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, 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
- ROTH, K.; SHULIN, R.; FLUHLER, H.; ATTINGER, W. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach. **Water Resources Research**, v.26, p.2267-2273, 1990.
- SANTOS, M.R.; ZONTA, J.H.; MARTINEZ, M.A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.2, p.299-308, 2010.
- SILVA, A.J.P.; COELHO, E.F.; MIRANDA, J.H.; WORKMAN, S.R. Estimating water application efficiency for drip irrigation emitter patterns on banana. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.7, p.730-737, 2009.
- SONCELA, R.; SAMPAIO, S.C.; VILAS BOAS, M.A.; TAVARES, M.H.F.; SOUZA, C.F.; SONCELA, A.S. Electrical conductivity of soil irrigated with swine wastewater estimated by time-domain reflectometry1. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.4, p.1293-1300, 2011.
- SOUZA, C.F. **A utilização da reflectometria no domínio do tempo (TDR) na modelagem do bulbo molhado do solo irrigado por gotejamento**. 2002. Ano de Obtenção: 2002. 115p. Tese (Doutorado em Água e Solo). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- TOMMASELLI, J.T.G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um equipamento de TDR (Time-Domain Reflectometry)**. 1997. Ano de Obtenção: 1997. 109p. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade de São Paulo - ESALQ, 1997.
- TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de 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**, Washington, v.16, p.574-582, 1980.
- VAZ, C.M.P.; MATSURA, E.E.; TORRADO, P.V.; BACCHI, O.O.S. **Validação de 3 Equipamentos**



Revista Agrarian

ISSN: 1984-2538

**de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo)
para a Medida da Umidade de Solos.** Concórdia:
EMBRAPA-CNPDIA, 2004. 4p (EMBRAPA-
CNPDIA. Comunicado Técnico, 61).

WILLMOTT, C.J. On the validation of models.
Physical Geography, v.2, p.184-194, 1981.