

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

SONDA ESPIRAL DE TDR PARA A MEDIDA DA UMIDADE NO PERFIL DO SOLO⁽¹⁾

Juliana Maria Manieri⁽²⁾, Carlos Manoel Pedro Vaz⁽³⁾ & Isabella Clerici De Maria⁽⁴⁾

RESUMO

A técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) tem sido uma das mais utilizadas para determinação da umidade volumétrica (θ) dos solos, devido às características favoráveis, como alta precisão, não-utilização de radiação ionizante e pequena influência da salinidade, densidade e textura do solo. Entretanto, uma das limitações é que a maioria dos equipamentos e sondas de TDR disponíveis não possibilita a medida no perfil do solo, como, por exemplo, permite a técnica da sonda de nêutrons. Com a TDR há necessidade de abrir buracos para a instalação de sondas nas profundidades desejadas, restringindo-se o número de pontos amostrados no perfil do solo. Assim, o objetivo deste trabalho foi apresentar e testar uma sonda de TDR que possibilitasse a sondagem detalhada da umidade ao longo do perfil do solo. O sistema consiste de uma sonda espiral posicionada na extremidade de uma haste metálica, acoplada a um penetrômetro de impacto utilizado para facilitar a inserção da sonda nas profundidades desejadas. A calibração da sonda foi realizada em laboratório, com sete solos de diferentes texturas, e sua validação feita em campo nos mesmos solos. A resposta da constante dielétrica (ϵ) medida com a sonda, considerando a umidade, foi mais bem representada por uma função matemática do tipo $\theta = a - b\epsilon + c/\epsilon^2$. O experimento de campo para a validação da calibração obtida em laboratório apresentou erro-padrão da estimativa da umidade de 6 %, considerando uma única equação de calibração com todos os solos em conjunto, e 5 %, levando-se em conta as equações com os solos separados em dois grupos conforme a textura.

Termos de indexação: reflectometria no domínio do tempo, umidade do solo, textura.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado da primeira autora. Projeto financiado pela FAPESP (02/12106-3) e Embrapa (12.098.810-03). Recebido para publicação em março de 2005 e aprovado em janeiro de 2007.

⁽²⁾ Engenheira-Agrônoma, Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agronômico – IAC. Caixa Postal 28, CEP 13001-970 Campinas (SP). Bolsista FAPESP. E-mail: manieri@cnpdia.embrapa.br

⁽³⁾ Pesquisador da Embrapa Instrumentação Agropecuária. Caixa Postal 741, CEP 13560-970 São Carlos (SP). E-mail: vaz@cnpdia.embrapa.br

⁽⁴⁾ Pesquisadora do Centro de Solos e Recursos Ambientais, IAC. E-mail: icdmaria@iac.sp.gov.br

SUMMARY: TDR SPIRAL PROBE FOR MOISTURE MEASUREMENT IN THE SOIL PROFILE

The time-domain reflectometry (TDR) technique has been one of the most used techniques to determine soil volumetric water content (θ) owing to some favorable characteristics such as high precision, non-ionizing radiation and little influence of soil salinity, bulk density and texture. However, most of the TDR equipment and probes available do not allow a detailed measurement along the soil profile, as for instance the neutron probe does. For conventional TDR probes holes or trenches must be opened in the soil to install the probes, which limits the number of points measured in the soil profile. Therefore, the aim of the present study was to test a TDR probe system that allows a detailed description of the water content in the soil profile with no need of installing individual probes. The system is a two-rod coiled probe fixed to the end of a metal rod, linked to a impact penetrometer used for the insertion of the probe to the desired depths. The probes were calibrated in the laboratory with 7 soils of different textures and validated at field conditions for the same soils. The dielectric constant (ϵ) measured with the coiled probe as a function of the water content was best fitted with the mathematical function $\theta = a \cdot b\epsilon + c/\epsilon^2$. The field experiment for validation of the calibration equations presented a relative root mean square error of 6% considering one equation for all soils together, and 5% when considering two different equations for two set of soils grouped according to their texture.

Index terms: time-domain reflectometry, soil water content, texture.

INTRODUÇÃO

A determinação do conteúdo de água ou umidade dos solos é fundamental para os principais estudos de processos físicos, químicos e biológicos que neles ocorrem. As técnicas de medida da umidade do solo são normalmente classificadas como diretas ou indiretas. Os métodos diretos envolvem alguma forma de remoção ou separação da água da matriz do solo com a medida direta da água removida, o que pode ser obtido por aquecimento ou pela utilização de solvente ou reação química. Os métodos indiretos determinam alguma propriedade física ou química relacionada à umidade do solo, como constante dielétrica (ou permissividade dielétrica), condutividade elétrica, capacidade térmica, conteúdo de H ou susceptibilidade magnética (Topp & Ferré, 2002).

A técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) tem sido uma das mais utilizadas na determinação da umidade volumétrica dos solos (θ), devido às diversas características favoráveis, como alta exatidão, não-utilização de radiação ionizante, pequena influência da salinidade do solo (para uma faixa de condutividade elétrica não muito elevada), da densidade, da textura e da temperatura do solo e pela possibilidade de automação e multiplexação de um grande número de sensores em um único equipamento.

A TDR baseia-se na determinação do tempo de propagação t (s) de ondas eletromagnéticas em uma sonda metálica inserida no solo. Com a medida de t é possível determinar a constante dielétrica (ϵ), que é uma média ponderada das constantes dielétricas das partículas do solo ($\epsilon_{\text{part.}} \approx 3-5$), da água ($\epsilon_{\text{água}} = 80$) e de ar ($\epsilon_{\text{ar}} = 1$), com a equação: $\epsilon = (c t / L)^2$, em que c

($m s^{-1}$) é a velocidade da luz no vácuo e L (m), o comprimento da sonda metálica (Davis & Chudobiak, 1975; Topp et al., 1980). Com a variação da quantidade de água no solo (θ) ocorre variação da constante dielétrica ϵ , portanto, por meio de uma calibração experimental entre ϵ e θ , é possível utilizar este método na determinação da umidade de solos. Topp et al. (1980) estabeleceram uma correlação geral com solos de diversas texturas, utilizando para o ajuste um polinômio de terceiro grau. Outros modelos de ajuste da dependência entre ϵ e θ , como os de Ledieu et al. (1986) e Yu et al. (1997), e o modelo conhecido como de fases (*mixing model*) foram estudados por diversos autores, como Dobson et al. (1985), Roth et al. (1990) e Dasberg & Hopmans (1992).

Diversos tipos de sondas de TDR têm sido desenvolvidos e utilizados, como as sondas coaxiais (Topp et al., 1980), de duas, três e quatro hastas (Zegelin & White, 1989), espirais (Nissen et al., 1999; Vaz & Hopmans, 2001), segmentadas (Frueh & Hopmans, 1997) e outras (Inoue et al., 2001; Selker et al., 1993; Nissen et al., 1999). A configuração espiral proposta por Vaz & Hopmans (2001) é particularmente interessante, pois possibilita a construção de minissondas, com comprimento de poucos centímetros. Na configuração linear convencional, o tamanho das sondas deve ser de no mínimo 10 cm, para obtenção de medidas exatas.

Na maioria dos trabalhos realizados com a TDR, as sondas lineares são adequadas, mas em alguns deles – por exemplo, quando são feitas medidas da umidade ao longo do perfil do solo – a necessidade de instalação de grande número de sondas tem sido um fator limitante. Nesses casos, a técnica de moderação de nêutrons ou a de capacitância elétrica, em que há

instalação de um tubo de acesso que possibilita o monitoramento periódico da umidade com bastante detalhe no perfil, apresentam-se mais vantajosas. Entretanto, essas técnicas têm diversas desvantagens quando comparadas com a TDR, como o uso de radiação ionizante e grande influência da densidade, no caso da sonda de nêutrons, e da salinidade, no caso da técnica de capacitância elétrica (Walley et al., 2004).

Assim, visando à ampliação das possibilidades de utilização da técnica da TDR, este trabalho objetivou descrever e avaliar a eficácia de uma sonda espiral de TDR na determinação da umidade volumétrica do solo em diferentes profundidades, sem a necessidade de abrir trincheiras ou buracos para instalação de sondas individuais, e em solos com diferentes texturas.

MATERIAL E MÉTODOS

Solos e preparo das amostras em laboratório

O experimento de calibração foi realizado no laboratório da Embrapa Instrumentação Agropecuária, utilizando-se seis classes de solos de grande ocorrência no Estado de São Paulo: Neossolo Quartzarênico órtico (NQo), Latossolo Vermelho distroférico (LVdf-S.Carlos), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) e Nitossolo Vermelho eutroférico (Nvef), coletados na área experimental da Embrapa Pecuária do Sudeste (CPPSe), localizada no município de São Carlos-SP, e Latossolo Vermelho distroférico (LVdf-Tarumã), coletado em área de produção comercial de cana-de-açúcar no município de Tarumã-SP.

Aproximadamente 10 kg de cada solo foram coletados na camada superficial (0–0,20 m); para o Argissolo foi coletada também amostra do horizonte

B-textural (PVAbt) entre 0,50 e 0,60 m de profundidade. No quadro 1 são apresentados alguns atributos desses solos, determinados no laboratório de solos da ESALQ/USP, Piracicaba-SP.

A preparação das amostras para obtenção das curvas de calibração consistiu na secagem do solo a 100 °C por 24 h, seu destorroamento e peneiramento em malha de 2 mm. Para cada solo foram preparadas amostras (Quadro 2) com diferentes umidades, acondicionadas em cilindros de PVC de 0,0762 m de diâmetro interno e 0,09 m de altura, com o fundo vedado com papel-filtro. Procedeu-se ao preenchimento dos recipientes com os solos, de modo que fossem obtidas amostras com densidades próximas para cada solo. O quadro 2 apresenta os valores médios e desvios-padrão da densidade das amostras obtidas para cada solo, em que se verifica variação mínima de 0,4 % para o LVd-S.Carlos e máxima de 7,8 % para o LVdf-Tarumã. Embora tenha havido preocupação em obter amostras com densidades próximas em cada solo, sabe-se que a variação da densidade tem pouca influência na constante dielétrica dos solos (Yu et al., 1999). Os solos foram acondicionados nos cilindros e saturados lentamente em bandeja com água; uma das amostras para cada solo foi reservada (amostra mais úmida), e as restantes, levadas à estufa a 50 °C para obtenção de amostras com umidades variáveis. Periodicamente, as amostras eram pesadas e retiradas da estufa, obtendo-se assim amostras desde próximas à saturação até praticamente secas. Para obter amostras com umidades o mais homogêneas possível, os cilindros eram colocados na estufa em posição horizontal, com a extremidade superior também vedada, para não perder solo ou perturbar a amostra, e girados periodicamente, para evitar a formação de gradientes de umidade. Após serem retiradas da estufa, as amostras eram deixadas em descanso por pelo menos 48 h, e as medidas foram realizadas conforme ilustrado na figura 1a.

Quadro 1. Granulometria, pH e teor de matéria orgânica (MO) dos solos utilizados para calibrar a sonda espiral de TDR

Solo	Textura	Areia			Argila	pH CaCl ₂	MO
		%					
NQo – São Carlos	Areia franca	86	6	8	4,6	11	
LVdf – São Carlos	Argila	43	8	49	4,7	54	
LVAd – São Carlos	Franco-argilo-arenosa	62	6	32	4,3	31	
LVd – São Carlos	Argila	43	10	47	5,5	37	
PVAd – São Carlos	Franco-argilo-arenosa	70	6	24	4,9	23	
PVAbt – São Carlos	Argila	43	6	51	4,7	11	
Nvef – São Carlos	Muito argilosa	18	16	66	4,6	39	
LVdf – Tarumã	Argila	15	37	48			

Neossolo Quartzarênico órtico (NQo), Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico horizonte A (PVAd) e horizonte B (PVAbt) e Nitossolo Vermelho eutroférico (Nvef).

Quadro 2. Valores mínimos e máximos das umidades (θ) das amostras de cada solo e valores médios e desvio padrão das densidades (D_s) das amostras utilizadas para calibração da TDR em laboratório

Solo	θ		D_s		n
	Mínimo	Máximo	Média	DP	
	m ³ m ⁻³		kg dm ⁻³		
NQo – São Carlos	0,007	0,349	1,60	0,05	9
LVdf – São Carlos	0,019	0,525	1,36	0,02	23
LVAd – São Carlos	0,010	0,488	1,36	0,02	12
LVd – São Carlos	0,027	0,506	1,35	0,01	10
PVAd – São Carlos	0,007	0,436	1,42	0,01	10
PVAbt – São Carlos	0,015	0,486	1,33	0,03	9
NVef – São Carlos	0,024	0,541	1,26	0,01	10
LVdf – Tarumã	0,200	0,440	1,02	0,08	48

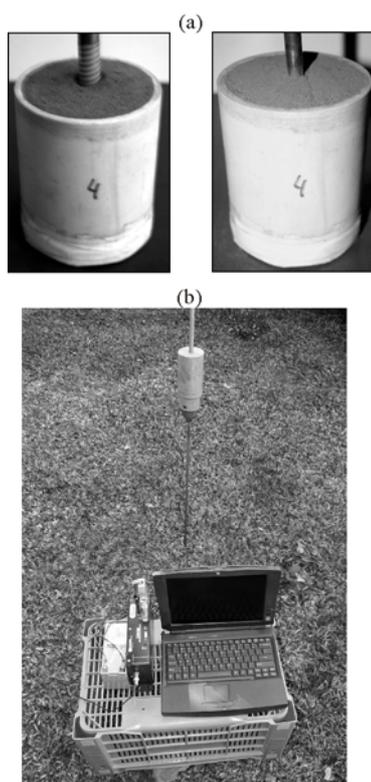


Figura 1. Fotos da sonda espiral de TDR adaptada na haste do penetrômetro, sendo inserida em uma amostra de solo, na medida em laboratório (a) e o sistema utilizado em campo para a medida em várias profundidades (b).

Descrição da sonda de TDR e método de obtenção dos dados no laboratório (calibração)

Nas determinações com a TDR foi utilizada uma sonda espiral, consistindo de dois fios de aço enrolados

paralelamente ao redor de um cilindro de PVC (Figura 2), na extremidade de uma haste de aço de 0,60 m de comprimento. O cabo coaxial que conecta a sonda ao equipamento de TDR foi guiado por dentro da haste metálica, para não atrapalhar sua inserção no solo. Mais detalhes sobre a construção da sonda podem ser obtidos em Vaz & Hopmans (2001). No experimento de laboratório foram utilizados dois equipamentos de TDR, o modelo 1502 C da Tektronix e o TDR-100 da Campbell, conectados por interface serial a um computador tipo PC. No caso do 1502 C utilizou-se o software WinTDR99, disponível gratuitamente na internet (<http://soilphysics.usu.edu>, Universidade de Utah, EUA), e para o TDR-100, o software PC-TDR100, fornecido pelo fabricante. O procedimento de medida consistiu da inserção vertical da sonda nas amostras de solo com diferentes umidades (Figura 1a) e da determinação da constante dielétrica para os dois equipamentos. Posteriormente, o solo era então retirado do cilindro de PVC e colocado em recipientes de Al para secagem completa em estufa (105 °C por 48 h), para determinação da umidade volumétrica θ (m³ m⁻³) pela razão entre a massa de água e o volume do recipiente de PVC. No quadro 2 é apresentado o resumo dos valores mínimos e máximos das umidades das amostras de cada solo.

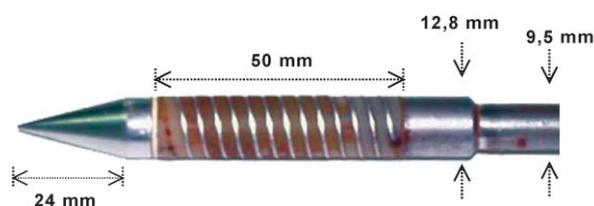


Figura 2. Sonda espiral de TDR posicionada acima do cone da haste de um penetrômetro.

Ajuste dos dados de umidade versus constante dielétrica

Por meio do software Origin (Microcal), várias funções foram avaliadas para encontrar o melhor ajuste dos dados. Considerou-se inicialmente um ajuste com todos os solos em conjunto e posteriormente separados em dois grupos: aqueles com teores de argila + silte < 50 % (NQo-S.C., LVAd-S.C. e PVAd-S.C.) e argila + silte > 50 % (NVef-S.C., LVdf-S.C., LVd-S.C., PVAbt-S.C. e LVdf-Tarumã). Na avaliação da eficiência do ajuste foram utilizados o coeficiente de determinação (R^2) e o erro-padrão da estimativa –EPE (Spiegel, 1985), sendo este último definido por:

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_{est})^2}{n}}$$

sendo Y o valor medido e Y_{st} o estimado pela equação de calibração e n o número de amostras utilizadas.

Medidas de campo e validação das calibrações

As medidas de campo foram realizadas com a sonda espiral adaptada à haste metálica conectada a um penetrômetro marca Kamaq, modelo Stolf (Stolf, 1991) (Figura 1b). O penetrômetro é utilizado para posicionar a sonda em profundidades desejadas, o que é conseguido dando pequenos impactos, controlando-se com a mão a intensidade destes, de modo a colocar a sonda nas profundidades estabelecidas. Foram feitas medidas em campo com todos os seis solos de São Carlos, em fevereiro e julho de 2004, e com o solo de Tarumã, em janeiro de 2005. Com a ajuda do peso de impacto, a haste com a sonda combinada foi inserida no solo de 5 em 5 cm, desde a superfície até 60 cm de profundidade (12 pontos), e a constante dielétrica determinada nessas profundidades. Os valores de constante dielétrica dos solos foram então convertidos em valores de umidade volumétrica, utilizando-se as equações obtidas das calibrações do experimento em laboratório para todos os solos em conjunto e por grupos de textura, conforme definido anteriormente. Após as medidas com a TDR, foram coletadas amostras indeformadas (anéis de aço de 0,05 m de diâmetro interno e 0,05 m de altura) nas mesmas profundidades e próximo ao local de medida com a TDR, para determinação da umidade volumétrica e posterior comparação com a umidade estimada com a sonda espiral. Foram realizadas duas medidas completas (ao longo do perfil) para cada solo, totalizando 168 medidas (12 x 7 x 2). Utilizou-se nessas medidas apenas o TDR 100.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verifica-se que a constante dielétrica aumenta com o aumento da umidade (Figura 3), de forma similar ao observado com sondas lineares convencionais (Topp et al., 1980; Noborio, 2001), embora os valores da

constante dielétrica sejam menores que os obtidos com sondas convencionais, devido à influência do material plástico de isolamento da sonda, conforme já mencionado em outros trabalhos, como os de Nissen et al. (1999) e Vaz & Hopmans (2001). Entretanto, isso não inviabiliza a utilização da sonda para medidas da umidade, uma vez que são estabelecidas relações experimentais específicas (Figura 3). Para valores de umidade abaixo de 10 % houve pouca variação dos valores de constante dielétrica medida para os diversos solos; contudo, em umidades maiores verificou-se que para alguns solos, como NVef, LVdf, LVd e PVAbt, a constante dielétrica apresentou valores ligeiramente mais baixos que os do restante dos solos. Isso se deve ao efeito da textura do solo no comportamento dielétrico da água, visto que em solos com maior quantidade de areia a água está mais livre e, nos mais argilosos, mais adsorvida, fazendo com que haja pequena diminuição da constante dielétrica (Dasberg & Hopmans, 1992).

Uma comparação entre as respostas obtidas com os dois equipamentos é apresentada na figura 4. Para

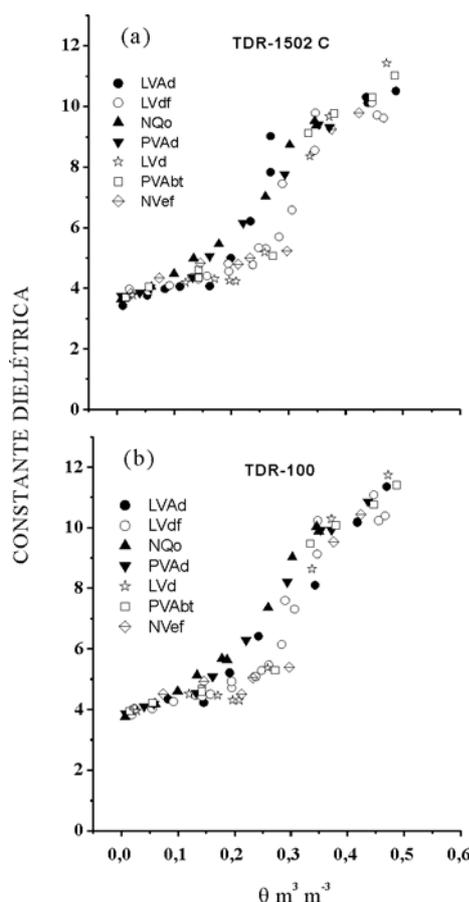


Figura 3. Constantes dielétricas medidas para os sete solos estudados considerando a umidade com a sonda espiral de TDR para o TDR-1502C (a) e o TDR-100 (b), determinadas em amostras de solo deformadas, em laboratório.

valores de constantes dielétricas próximos a 6 as respostas foram muito semelhantes, mas para valores acima deste o TDR100 apresentou valores ligeiramente mais altos do que o TDR1502 C. O quadro 3 apresenta os coeficientes da função $\theta = a + b\varepsilon + c/\varepsilon^2$, ajustada para todos os solos em conjunto (Figura 5a) e também para os dois grupos de textura, definidos como argila + silte < 50 % e argila + silte > 50 % (Figura 5b e c, respectivamente), utilizando os dados dos dois equipamentos em conjunto. Observa-se que houve bom ajuste dos dados, principalmente para os solos do grupo com argila + silte < 50 % ($R^2 = 0,97$ e EPE = $0,033 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). No caso do grupo de solos com argila + silte > 50 % e do grupo de todos os solos em conjunto, o coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,89, e o EPE da umidade, próximo a 6 %. Os erros maiores obtidos com o segundo grupo de textura (argila + silte > 50 %) e, conseqüentemente, com o grupo de todos os solos em conjunto foram provavelmente decorrentes da maior dificuldade da inserção da haste e de problemas de contato sonda-solo, devido às características mais compressivas desses solos.

Na figura 6 são apresentados dois exemplos de medidas da umidade no campo com a sonda espiral:

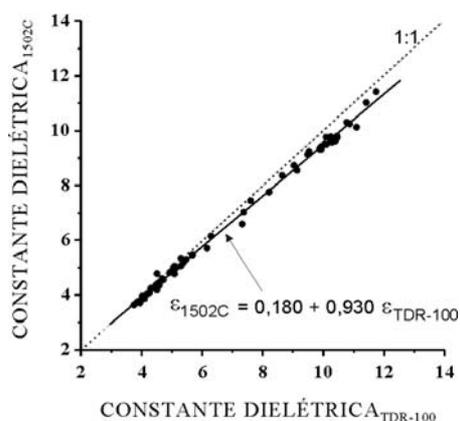


Figura 4. Comparação da constante dielétrica medida com o TDR-100 (Campbell) e o 1502C (Tektronix) para os sete solos estudados, com amostras deformadas, em laboratório.

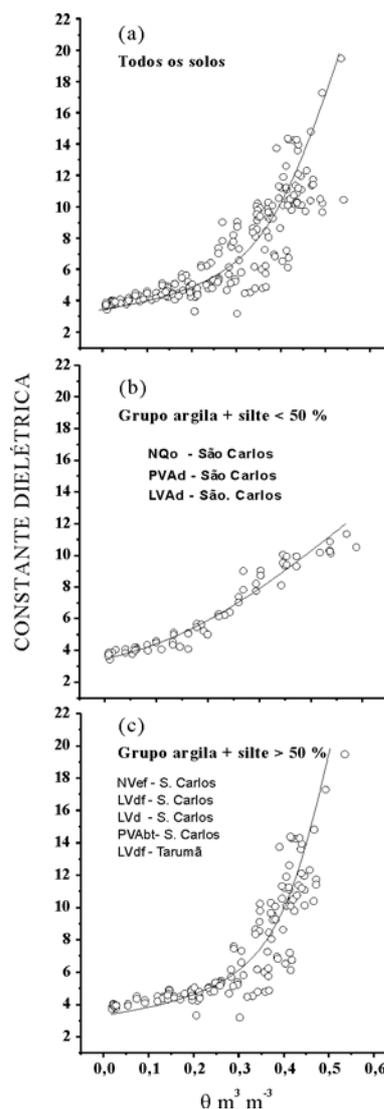


Figura 5. Respostas da constante dielétrica considerando a umidade com a sonda espiral de TDR, medida com os dois equipamentos (TDR 1502 C e TDR-100), para todos os solos (a) e os grupos de solos com argila + silte < 50 % (b) e argila + silte > 50 % (c), com amostras deformadas, em laboratório. O ajuste dos dados foi realizado com a função $\theta = a + b\varepsilon + c/\varepsilon^2$, e os coeficientes do ajuste são apresentados no quadro 3.

Quadro 3. Parâmetro de ajuste da função $\theta = a + b\varepsilon + c/\varepsilon^2$ nos dados apresentados na figura 5a, b e c

Grupo de solo	a	b	c	R^2	EPE
Todos os solos	0,33341	0,01056	-4,37070	0,89	0,063
Argila + silte < 50 % ⁽¹⁾	0,04391	0,03651	-2,04607	0,97	0,033
Argila + silte > 50 % ⁽²⁾	0,37478	0,00700	-4,4138	0,89	0,060

⁽¹⁾ Solos NQo, PVAd, LVAd. ⁽²⁾ Solos Nvef, LVaf-S. Carlos, LVd e PVAbt e LVdf - Tarumã; EPE: erro-padrão da estimativa.

um para o solo LVdf-S.Carlos e outro para o NQo-S. Carlos, utilizando as equações específicas por grupos de textura (Figura 5c e b). As medidas foram realizadas no mês de fevereiro, ou seja, em um período de chuvas. As diferenças obtidas na umidade ao longo do perfil dos dois solos se devem aos gradientes de textura, densidade e porosidade, matéria orgânica, ou seja, das propriedades físicas desses solos, bem como ao regime de chuvas próximo à data de amostragem.

A figura 7 apresenta uma comparação entre as medidas da umidade volumétrica estimadas pela TDR no campo e os valores medidos com as amostras coletadas nos anéis volumétricos. São apresentados dois conjuntos de pontos, um com a umidade estimada utilizando a equação de calibração que considera todos os solos em conjunto (Figura 5a e Quadro 3) e outro grupo considerando as duas equações de calibração obtidas para os dois grupos de textura (Figura 5b e

e Quadro 3). O erro-padrão da estimativa da umidade obtido com a calibração de todos os solos em conjunto foi de 6,3 %, e com os grupos de textura, de 5,4 %. Esses podem ser considerados, portanto, os erros do método, que se devem a um conjunto de fatores, entre eles o erro na determinação da umidade volumétrica do solo, as heterogeneidades locais do solo no campo, o próprio erro da técnica da TDR e as questões relacionadas ao contato solo-sonda. Para uma base de comparação, os erros associados às medidas com TDR têm sido reportados na literatura como sendo da ordem de 1 a 3 % em amostras de solo deformado, em laboratório. Outros autores, como Laurent et al. (2005), também reportaram erros similares (1 a 7 %) em um estudo comparativo com calibrações em laboratório e campo, atribuindo-os aos diversos fatores de interferência do sistema de calibração e medida em campo.

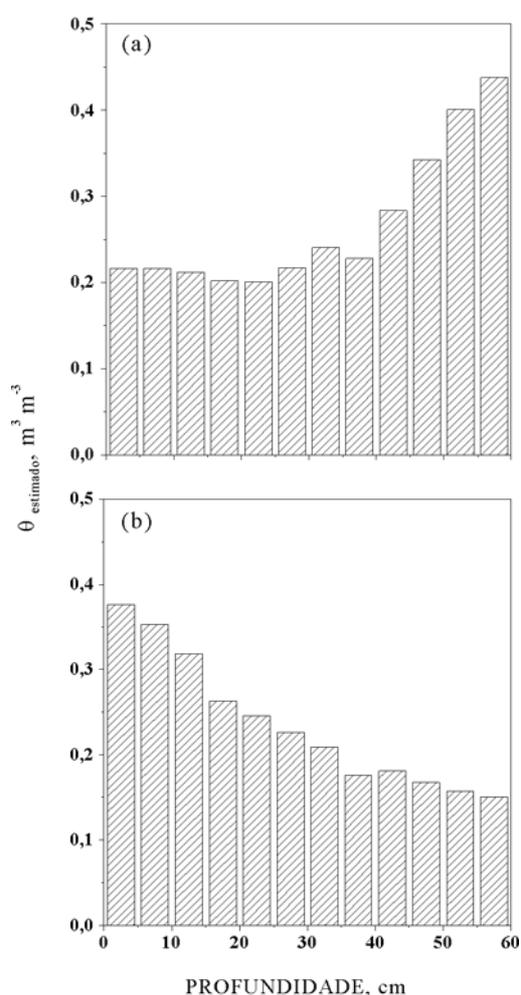


Figura 6. Valores da umidade do solo em campo para o Neossolo Quartzarênico órtico (a) e Latossolo Vermelho distroférico (b), ambos de São Carlos, obtidos com a sonda espiral de TDR adaptada a um penetrômetro e medidos com o equipamento TDR-100.

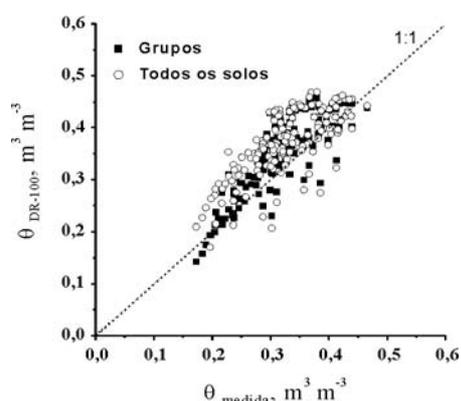


Figura 7. Comparação da umidade estimada pela TDR com as equações de calibração geral (para todos os solos) e por grupo de textura (classes de solos).

CONCLUSÕES

1. Para as diversas classes de solo testadas, incluindo texturas desde areia franca (NQo-São Carlos) até muito argilosa (NVef-São Carlos), verificou-se que a sonda espiral apresentou comportamento similar ao das sondas lineares convencionais. Os erros-padrão da estimativa variaram de 3 a 6 % na calibração de laboratório e de 5 a 6 % nos testes de campo, utilizando equações de calibração específicas por grupo de textura e com todos os solos em conjunto, respectivamente. Esses erros estão dentro da faixa reportada na literatura e são bastante satisfatórios para o sistema proposto, considerando ainda as vantagens da determinação da umidade no perfil do solo de uma forma não-invasiva e rápida.

2. A calibração da sonda, por meio do ajuste dos dados à função $\theta = a + b\epsilon + c/\epsilon^2$, pode ser feita para um conjunto de solos com textura semelhante, obtendo-se um erro-padrão relativamente baixo.

LITERATURA CITADA

- DASBERG, S. & HOPMANS, J.W. Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:293-297, 1992.
- DAVIS, J.L. & CHUDOBIAK, W.J. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. *Geol. Surv. Can., Part A Paper*, 75:75-79, 1975.
- DOBSON, M.C.; ULABY, F.T.; HALLIKAINEN, M.T. & EL-RAYES, M.A. Microwave dielectric behavior of wet soil, II. Dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 23:35-46, 1985.
- FRUEH, W.T. & HOPMANS, J.W. Soil moisture calibration of a TDR multilevel probe in gravely soils. *Soil Sci.*, 162:554-565, 1997.
- INOUE, Y.; WATANABE, T. & KITAMURA, K. Prototype time-domain reflectometry probes for measurement of moisture content near the soil surface for applications to "on-the-move" measurements. *Agric. Water Manag.*, 50:41-52, 2001.
- LAURENT, J.P.; RUELLE, P.; DELAGE, L.; ZAIRI, A.; BEN NOURA, B. & ADJMI, T. Monitoring soil water content profiles with a commercial TDR system: Comparative field tests and laboratory calibration. *Vadose Zone J.*, 4:1030-1036, 2005.
- LEDIEU, J.; RIDDER, P.; CLERCK, P. & DAUTREBANDE, S. A method measuring soil water moisture by time domain reflectometry. *J. Hydrol.*, 88:319-328, 1986.
- NISSEN, H.H.; MOLDRUP, P.; OLESEN, T. & RASKMARK, P. Printed circuit board time domain reflectometry probe: Measurements of soil water content. *Soil Sci.*, 164:454-466, 1999.
- NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. *Comp. Electr. Agric.*, 31:213-237, 2001.
- ROTH, K.; SHULIN, R.; FLUHLER, H. & ATTINGER, W. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Res. Res.*, 26:2267-2273, 1990.
- SELKER, J.S.; GRAFF, L. & STEENHUIS, T. Noninvasive time domain reflectometry moisture measurement probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:934-936, 1993.
- SPIEGEL, M. *Estatística*. 2.ed. New York, Mc Graw-Hill, 1985.454p.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:229-235, 1991.
- TOPP G.C.; DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Res. Res.*, 16:574-582, 1980.
- TOPP, G.C. & FERRÉ, P.A. The soil solution phase. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. *Methods of soil analysis*. Wisconsin, Soil Science Society of America, 2002. p.417-1071.
- VAZ, C.M.P. & HOPMANS, J.W. Simultaneous measurement of soil strength and water content with a combined penetrometer-moisture probe. *Soil Sci Soc. Am. J.*, 65:4-12, 2001.
- VICENTE, M.A.; GALLARDO, J.F.; MORENO, G. & GONZALEZ, M.I. Comparison of soil water-contents as measured with a neutron probe and time domain reflectometry in a Mediterranean forest ("Sierra de Gata", Central Western Spain). *Ann. For. Sci.*, 60:185-193, 2003.
- WHALLEY, W.R.; COPE, R.E.; NICHOLL, C.J. & WHITEMORE, A.P. In-field calibration of a dielectric soil moisture meter designed for use in an access tube. *Soil Use Manag.*, 20:203-206, 2004.
- YU, C.; WARRICK, A.W.; CONKLIN, M.H.; YOUNG, M.H. & ZREDA, M. Two and three parameter calibrations of time domain reflectometry for soil moisture measurement. *Water Res. Res.*, 33:2417-2421, 1997.
- YU, C.; WARRICK, W. & CONKLIN, M.H. Derived functions of time domain reflectometry for soil moisture measurements. *Water Res. Res.*, 35:1789-1796, 1999.
- ZEGELIN, S.J. & WHITE, I. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Res. Res.*, 25:2367-2376, 1989.