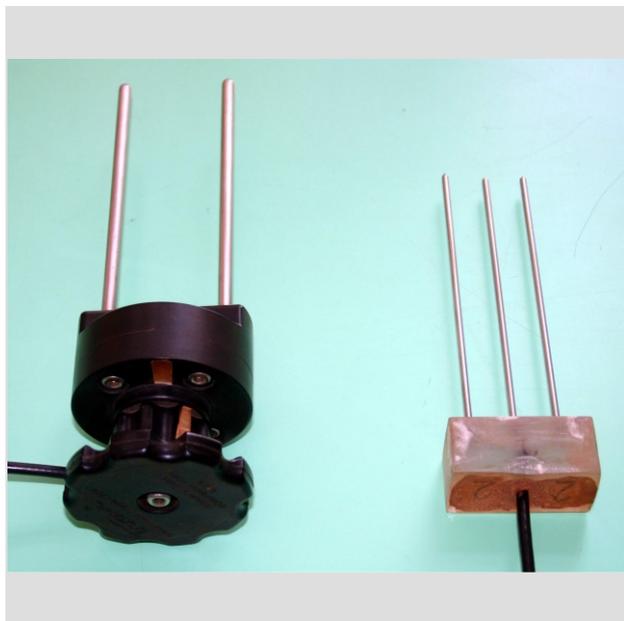


Foto: Valentim Monzane



Validação de 3 Equipamentos de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) para a Medida da Umidade de Solos

Carlos Manoel Pedro Vaz¹
Edson Eiji Matsura²
Pablo Vidal Torrado³
Osny Oliveira dos Santos Bacchi⁴

Resumo

A técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) tem sido mundialmente utilizada para a determinação da umidade e condutividade elétrica dos solos, em substituição às técnicas de moderação de nêutrons e gravimétricas. As principais vantagens da TDR são a não utilização de radiação ionizante, a possibilidade de automação das análises, a multiplexação de diversas sondas num único equipamento e a pouca influência da textura e da densidade do solo na determinação da umidade. No Brasil, a TDR tem sido ainda relativamente pouco utilizada, sendo mais comum o uso das técnicas gravimétricas e a sonda de nêutrons. As principais dificuldades são o pequeno número de equipamentos disponíveis e a ausência de informações quanto à resposta da TDR nos nossos solos. Os solos altamente intemperizados, com presença de altos teores de óxido de ferro e minerais magnéticos e baixos teores de matéria orgânica pode influenciar na resposta da TDR.

O princípio da medida da umidade do solo pela técnica da TDR foi pioneiramente introduzida por Davis e Chudobiak (1975) e implementado e validado por Topp et al. (1980). O funcionamento da TDR para a medida da umidade é baseado na medida da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em uma guia de

onda metálica (sonda) inserida no solo. O equipamento mede o tempo de trânsito (t) das ondas eletromagnéticas na sonda, o qual é dependente da constante dielétrica do solo (ϵ) através da seguinte equação:

$$t = L\sqrt{\epsilon}/c \quad (1)$$

onde L (m) é o comprimento da sonda e c ($m\ s^{-1}$) é a velocidade da luz.

A constante dielétrica medida para um solo é 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 (θ) 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 (TOPP et al. 1980).

Equipamentos testados

Os equipamentos utilizados no teste e validação

¹ Pesquisador, Físico, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, C.P. 741, CEP 13560-970, São Carlos, SP, vaz@cnpdia.embrapa.br

² Engenheiro Agrícola, PhD, FEAGRI/UNICAMP, Caixa Postal 6011, 13083-970, Campinas-SP

³ Engenheiro Agrônomo, PhD, ESALQ/USP, Cx. P. 9, 13418-970, Piracicaba-SP

⁴ Engenheiro Agrônomo, PhD, CENA/USP, Cx. P. 96, 13400-970, Piracicaba-SP

da técnica de TDR foram os seguintes (Figura 1):

- Modelo 1502C, da Tektronix (a)
- Modelo TDR100, da Campbell (b)
- Modelo Trase, da Soil Moisture (c)



Figura 1. Equipamentos de TDR utilizados nos testes e validação da técnica.

As sondas utilizadas no TDR 1502C e TDR 100 foram confeccionadas com 3 varetas de aço inox (3 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento) com espaçamento de 2 cm (Figura 2a). No caso do TDR Trase, foi utilizada a sonda padrão de 2 hastes com 15 cm de comprimento, comercializada pelo fabricante (Figura 2b).

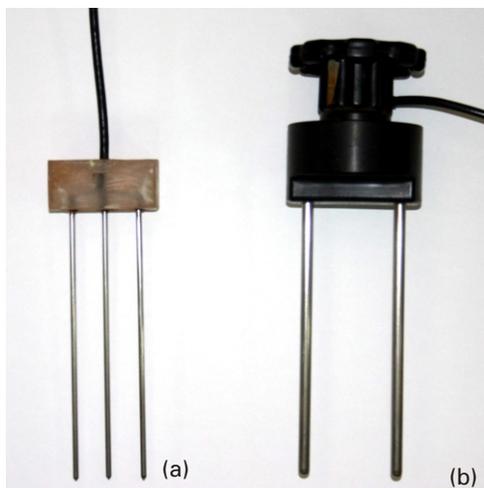


Figura 2. Hastes de TDR utilizadas com os modelos 1502C e TDR-100 (a) e Trase (b).

Solos testados

Para avaliação do desempenho dos equipamentos foram estudados 6 solos, descritos à seguir: Gleissolo Melânico, coletado na quadrícula de Araras; Planossolo Háplico, coletado na quadrícula de Guaíra; Luvisso Crômico, coletado na quadrícula de Marília; Latossolo Vermelho Acriférrico, coletado na quadrícula de Ribeirão Preto; Cambissolo Crômico, coletado na SP-4 e Neossolo Quartzarênico, coletados na quadrícula de Piracicaba.

Procedimento de medida

Os 3 equipamentos utilizam o mesmo princípio da medida do tempo de trânsito, t (ns), da radiação eletromagnética na sonda metálica e calcula a constante dielétrica do meio onde a haste está inserida (ϵ_{solo}), por meio da Eq. 1.

Entretanto, o cálculo dos tempos de trânsito em cada equipamento pode variar, em função do software utilizado para identificar as reflexões no início e final da sonda. No caso do TDR 1502C, não existe um software do fabricante e portanto, foi utilizado o WinTDR99, o qual é fornecido gratuitamente pelo grupo de Física do Solo, da Utah State University, EUA e desenvolvido especificamente para uso com o TDR 1502B ou C. Para tanto, foi utilizado um computador tipo laptop com o software WinTDR99 instalado e conectado com o TDR pela interface serial disponível (RS232). O WinTDR99 fornece a constante dielétrica (ϵ_{solo}), a umidade (θ) através da equação universal de Topp (TOPP et al. 1980).

No caso do TDR 100 existe um software fornecido pelo fabricante, o qual permite as mesmas determinações mencionadas para o caso do TDR 1502C com o WinTDR99, também pela conexão serial. Para o Trase existe um teclado no próprio equipamento e software para a realização das medidas de ϵ_{solo} e θ , dispensando o uso de um computador para a aquisição dos dados.

Os valores de umidade estimados pelos 3 equipamentos de TDR são comparados e avaliados estatisticamente com os valores de referência de umidade gravimétrica, utilizando a relação universal de Topp et al. (1980): $\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \epsilon_{\text{solo}} - 5,5 \times 10^{-4} \epsilon_{\text{solo}}^2 + 4,3 \times 10^{-6} \epsilon_{\text{solo}}^3$, uma equação polinomial de 3º grau obtida com os dados dos 6 solos estudados (*poli 3*) e o modelo de fases dado por Dobson et al. (1985):

$$\epsilon_{\text{solo}} = \epsilon_{\text{ág}} + \frac{\epsilon_{\text{s}} - \epsilon_{\text{ág}}}{1 + \epsilon_{\text{ar}}} \quad (2)$$

onde $\epsilon_{\text{ág}}$, ϵ_{s} e ϵ_{ar} são as constantes dielétricas da água, parte sólida (partículas + matéria orgânica) e ar, respectivamente, ϵ_{s} a porosidade e ϵ_{ar} um parâmetro que depende da orientação das partículas do solo com relação ao campo magnético aplicado.

A avaliação estatística do erro da medida da umidade será realizada através do erro padrão da estimativa (SPIEGEL, 1985):

$$S = \sqrt{\frac{Y - Y_{\text{est}}}{n}} \quad (3)$$

onde Y é o valor medido e Y_{est} o estimado pela equação utilizada (*Topp, Fases ou Poli 3*), e n o número de amostras utilizadas.

Resultados

Os valores médios de densidade, porosidade e intervalos de umidade, obtidos utilizando o procedimento de preparo de amostras descrito anteriormente, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físicas das amostras de solo preparadas para medida com a TDR.

Solo	Local	s^* (kg m ⁻³)		f^* m ³ m ⁻³	(m ³ m ⁻³)		n [*]	ρ^* kg m ⁻³
		Media	DP		Minimo	maximo		
Gleissolo	Araras	0,698	0,042	0,74	0,033	0,507	20	2,65
Planossolo	Guaira	1,163	0,035	0,58	0,011	0,429	20	2,76
Luvissolo	Marilia	1,365	0,035	0,50	0,032	0,404	21	2,72
Latossolo	Rib. Preto	0,925	0,071	0,68	0,013	0,478	21	2,88
Cambissolo	SP-4	1,099	0,054	0,59	0,010	0,456	20	2,70
Neossolo	Piracicaba	1,453	0,041	0,46	0,018	0,337	20	2,67
media		1,117		0,59				

* s = densidade do solo, $f = (1 - s / \rho) =$ porosidade do solo, n = número de amostras e ρ = densidade das partículas

Os resultados da constante dielétrica em função da umidade para os 6 solos são apresentados nas Figuras 2a (para os 3 equipamentos individualmente e todos os solos em conjunto) e 2b, 2c e 2d (para os solos e equipamentos individualmente).

O ajuste do modelo de fases (parâmetro θ) foi realizado por mínimos quadrados, utilizando a ferramenta Solver do Excel, da Eq. [2] nos dados de θ solo vs θ ar medidos para cada equipamento e θ solo = 4, θ ar = 80 e θ ar = 1 (Vaz et al. 2001). Os valores de θ obtidos dos ajustes foram: 0,698 (1502 C), 0,664 (TDR 100) e 0,570 (Trase). Para possibilitar a comparação dos erros entre os modelos, utilizou-se um valor médio de $\theta = 0,650$, uma vez que os modelos polinomiais de 3º grau de Topp e o obtido com os dados deste trabalho (Poli 3) são independentes do equipamento.

As equações de ajuste obtidas e utilizadas, com os respectivos parâmetros de ajuste foram:

Topp: $5,3 \cdot 10^{-2} \theta^2 + 2,92 \cdot 10^{-2} \theta + 5,5 \cdot 10^{-4} \theta^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \theta^3$

Fases: $0,650 - 1,60 / 16,22$

Poli 3: $6,23 \cdot 10^{-2} \theta^2 + 3,76 \cdot 10^{-2} \theta + 1,1 \cdot 10^{-3} \theta^2 + 1,33 \cdot 10^{-5} \theta^3$

A Figura 3a mostra que, de um modo geral, há uma boa concordância dos dados experimentais com os 3 modelos de ajuste. Observando-se os equipamentos e solos individualmente (Fig. 2b, c e d), nota-se uma pequena diferença na resposta de θ solo vs θ ar, principalmente entre os equipamentos. Os resultados do 1502 C e TDR 100 foram muito próximos, mas o Trase apresentou medidas de θ solo menores dos apresentados pelo 1502C e TDR 100. A Figura 3d mostra como os dados do Trase desviaram-se da equação de Topp, enquanto que para o 1502C e TDR100 a equação de Topp apresenta um bom ajuste.

Um outro aspecto importante de ser observado é que o Gleissolo apresentou valores de θ solo abaixo da equação de Topp, indicando um comportamento típico de solos orgânicos (teor de matéria orgânica elevada). Também, o Neossolo apresentou um pequeno deslocamento para valores acima da curva de Topp. Entretanto, essas diferenças não são, aparentemente, grandes a tal modo que justifiquem curvas de calibração específicas para cada um dos solos. Para uma avaliação mais detalhada e analítica dos erros na medida da

Tabela 2 os valores do erro padrão da estimativa (Eq. 3) para os 3 equipamentos, considerando os 3 modelos de ajuste propostos e os solos em conjunto e individualmente.

Observa-se que os valores de S estão em média na faixa de 3 % para o 1502C e TDR 100. Entretanto, para o Trase os valores de S são bem maiores, entre 4 e 6 %, dependendo do modelo da curva de calibração utilizada.

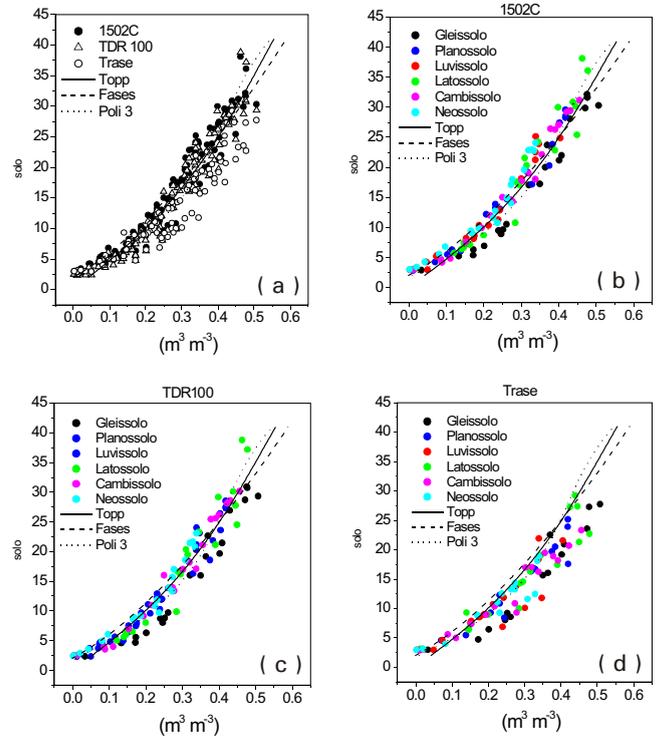


Figura 3. Variação da constante dielétrica medida com o TDR 1502 C (a, b), o TDR 100 (a, c) e o Trase (a, d) em função da umidade para os 6 solos avaliados.

Tabela 2. Erro padrão da estimativa (Eq. 3) obtido com os 3 modelos de ajuste.

Solos	Erro padrao da estimativa (S, m ³ m ⁻³)								
	1502 C			TDR 100			Trase		
	Topp	Fases	Poli 3	Topp	Fases	Poli 3	Topp	Fases	Poli 3
Todos	0,032	0,035	0,031	0,032	0,041	0,030	0,050	0,059	0,042
Gleissolo	0,040	0,054	0,036	0,051	0,066	0,048	0,066	0,080	0,060
Planossolo	0,022	0,030	0,025	0,030	0,029	0,029	0,041	0,051	0,033
Luvissolo	0,031	0,032	0,029	0,026	0,030	0,021	0,049	0,057	0,041
Latossolo	0,036	0,033	0,031	0,038	0,050	0,033	0,050	0,057	0,044
Cambissolo	0,021	0,026	0,022	0,030	0,029	0,022	0,047	0,057	0,037
neossolo	0,038	0,028	0,041	0,028	0,025	0,029	0,041	0,049	0,031

Outra observação importante é que o Gleissolo apresentou um erro padrão da estimativa, de cerca de 5 %, ou seja, bem maior que a média dos outros solos que foi de 3 %. Assim, esse deve ser o erro considerado para o Gleissolo quando da adoção de uma equação de calibração geral. Caso o usuário necessite de precisão maior, calibrações específicas para este solo deve ser utilizadas.

Conclusões

O TDR 100 e tektronix 1502C apresentaram uma precisão de aproximadamente 3% para a determinação da umidade para os solos estudados. Já no caso do Trase o erro obtido variou de 4 a 6 %, indicando que os 2 primeiros equipamentos possuem precisão maior, quando

se utilizaram as calibrações para os 3 modelos de ajuste. Entretanto, pode-se obter uma precisão maior na determinação da umidade com o Trase, utilizando-se calibrações específicas para o equipamento em particular, uma vez que as equações de ajuste obtidas (Fases e Poli 3) consideram o resultado médio dos 3 equipamentos.

Comparando-se os resultados obtidos neste trabalho com solos brasileiros, com outros dos EUA, Canadá e Europa, pode-se afirmar que não existem diferenças significativas nas respostas. Assim, a técnica de TDR pode ser aplicada em solos tropicais brasileiros, com a mesma precisão daquelas já descritas para solos de regiões temperadas.

Referências Bibliográficas

DAVIS, J. L.; CHUDOBIAK, W. J. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. **Geol. Surv. Can. Part A Paper**, [S. L.], v. 75, p. 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.**, Mississippi, GE-23, p. 35-46, 1985.

SPIEGEL, M. **Estatística**. 2. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1985. 454p.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resour. Res.**, Washington, v. 16, p. 574-582, 1980.

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.**, Madison, v. 65, p. 4-12, 2001.

Comunicado Técnico, 61

Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:
Embrapa Instrumentação Agropecuária
Rua XV de Novembro, 1542 - Caixa Postal 741
CEP 13560-970 - São Carlos-SP
Fone: 16 3374 2477
Fax: 16 3372 5958
E-mail: sac@cnpdia.embrapa.br
www.cnpdia.embrapa.br

1a. edição
1a. impressão 2004: tiragem 300

Comitê de Publicações

Presidente: *Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso*
Secretária Executiva: *Valéria de Fátima Cardoso*
Membros: *Dra. Débora Marcondes B. P. Milori,*
Dr. João de Mendonça Naime,
Dr. Washington Luiz de Barros Melo

Membro Suplente: *Dr. Paulo S. P. Herrmann Junior*

Expediente

Supervisor editorial: *Dr. Rubens Bernardes Filho*
Revisão de texto: *Valéria de Fátima Cardoso*
Tratamento das ilustrações: *Valentim Monzane*
Editoração eletrônica: *Valentim Monzane*