

Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos⁽¹⁾

José Tadeu Garcia Tommaselli⁽²⁾ e Osny Oliveira Santos Bacchi⁽³⁾

Resumo – Este estudo visou à obtenção das curvas de calibração de um equipamento de TDR (Time Domain Reflectometry) em cinco solos da região de Piracicaba, SP, e testou a adequação da calibração interna do equipamento e das curvas genéricas de calibração. As curvas ajustadas, em cada solo separadamente, apresentaram coeficientes de determinação (R^2) da ordem de 0,99, e a curva ajustada para o conjunto de dados dos cinco solos apresentou $R^2 = 0,976$. A análise de erros-padrão de estimativa mostrou que as curvas genéricas não se prestam às aplicações mais sensíveis, tais como na determinação absoluta do conteúdo de água do solo. Os testes de comparação entre as curvas ajustadas, a curva genérica e a curva embutida no equipamento mostraram que a primeira é superior às demais. O estudo mostrou, também, que a curva de calibração embutida no equipamento é inadequada para as determinações de umidade nos cinco solos estudados.

Termos para indexação: propriedades dielétricas, conteúdo de água do solo, instrumento de medição.

Calibration of a TDR equipment to moisture measurement in soils

Abstract – The aim of this study was to obtain the calibration curves for a TDR (Time Domain Reflectometry) equipment using five soils from the Piracicaba, SP, Brazil. The suitability of the built-in and generic calibration curves was also tested. Individual fitted curves for each soil showed determination coefficients (R^2) of about 0.99 and the fitted curve for all five soils together showed a value of $R^2 = 0.976$. The standard error of estimate analysis has pointed out that generic curves are not suitable for more sensible applications, such as for absolute determination of soil water content. Comparison tests among fitted curves, generic curve and the equipment curve, pointed out that the first one is superior to the others. This study showed also that the equipment built-in calibration curve is not suitable for soil water content determinations for the five studied soils.

Index terms: dielectric properties, soil water content, measuring instruments.

Introdução

A técnica da reflectometria de microondas, aqui denominada TDR (Time Domain Reflectometry), foi introduzida recentemente no Brasil. Um dos primeiros estudos brasileiros nesta área, especificamente para a medida de conteúdo de água do solo, é o de Herrmann Júnior (1993) e o de Tommaselli & Bacchi (1995).

Partindo do estudo de propriedades dielétricas de misturas heterogêneas feito por Looer (1964), a técnica da TDR foi introduzida por Fellner-Feldegg (1969), medindo, inicialmente, as propriedades dielétricas dos líquidos e depois as propriedades dielétricas de vários materiais, entre eles o solo. A partir do trabalho de Topp et al. (1980), a técnica da TDR aplicada aos solos começou a ser considerada muito promissora.

A idéia básica da técnica é medir o tempo de deslocamento t (ns) de uma seqüência de pulsos que possuem harmônicos na frequência de microondas em uma linha de transmissão (antena), composta de duas hastes de aço de comprimento conhecido L (cm), introduzidas no solo. Quanto maior este tempo de deslocamento, maior a constante dielétrica relativa aparente do solo k , conforme a equação:

$$k = [c t / (2 L)]^2 \quad (1)$$

⁽¹⁾ Aceito para publicação em 26 de setembro de 2000.

⁽²⁾ Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Dep. de Física, Química e Biologia, Caixa Postal 467, CEP 19060-900 Presidente Prudente, SP. E-mail: tadeu@prudente.unesp.br

⁽³⁾ Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Caixa Postal 96, CEP 13400-970 Piracicaba, SP. E-mail: osny@cena.usp.br

onde c (aproximadamente 29,9977 cm/ns) é velocidade da luz.

Como a água tem constante dielétrica relativa (81) bem maior que a dos materiais do solo (3 a 5) e do ar (1) (Wang, 1980), quanto maior o conteúdo de água do solo, maior será a sua constante dielétrica aparente, e maior será o tempo de deslocamento do pulso aplicado. A grande disparidade do valor da constante dielétrica da água em relação aos materiais do solo permite a sua determinação através desta técnica, uma vez que a maior parte do efeito do retardamento do pulso na antena é decorrente do conteúdo de água do solo.

Nos últimos anos, a técnica da TDR aplicada aos solos vem ganhando espaço no meio agrônomo, mediante equipamentos já comercializados do tipo do Trase System I (Soil Moisture Equipment Corporation, 1990). Embora o equipamento tenha uma curva de calibração embutida, que o manual do fabricante apregoa como sendo uma curva geral e válida para todos os solos, um estudo recente de Tommaselli (1997), utilizando cinco tipos de solo, mostrou que isto não ocorre.

A calibração do TDR (relação entre o conteúdo de água e a constante dielétrica aparente do solo) vem sendo amplamente estudada e várias abordagens de calibração já foram investigadas, entre elas, a de Topp et al. (1980), com modelos cúbicos (empíricos) e Dasberg & Hopmans (1992), Dirksen & Dasberg (1993) e Ponizovsky et al. (1999) com os modelos semi-empíricos e físicos.

Os modelos empíricos são apenas relações funcionais entre variáveis, e não há, necessariamente, significado físico para a relação encontrada. Os modelos assim ajustados têm sua aplicabilidade limitada aos dados que lhes deram origem, e podem, eventualmente, ajustar-se bem a outros dados provenientes de condições semelhantes. Contudo, tais modelos são relativamente simples e práticos para estabelecer as curvas de calibração dos equipamentos de TDR, e têm sido amplamente empregados por vários autores (Topp et al., 1980; Dasberg & Hopmans, 1992; Roth et al., 1992; Todoroff & Langellier, 1998).

Os modelos empíricos de calibração pressupõem que a relação entre a constante dielétrica aparente e o conteúdo de água do solo é dependente apenas deste último, e assim, Topp et al. (1980) desenvolveram

uma curva de calibração, que consideraram universal:

$$k = 3,03 + 9,3\theta + 146\theta^2 - 76,7\theta^3 \quad (2a)$$

ou:

$$\theta = (-530 + 292k - 5,5k^2 + 0,043k^3)/10^4, \quad (2b)$$

onde k é a constante dielétrica relativa aparente do solo, e θ é o conteúdo volumétrico de água do solo, em $m^3 m^{-3}$.

Os objetivos deste estudo foram: determinar as curvas de calibração específicas para cinco solos da região de Piracicaba; verificar se a curva de calibração do Trase System I e as curvas genéricas de calibração são adequadas para os solos estudados; mostrar os erros cometidos se forem usadas as curvas genéricas ao invés das curvas de calibração específicas de cada solo, e determinar o intervalo de aplicabilidade da determinação da umidade do solo pela técnica da TDR, nesses solos.

Material e Métodos

Foram coletadas amostras indeformadas de cinco solos da região de Piracicaba, SP: Areia Quartzosa (AQ), Latossolo Vermelho-Amarelo (LV), Latossolo Vermelho-Escuro (LE), Podzólico Vermelho-Amarelo (PV) e Terra Roxa Estruturada (TE). As amostras foram extraídas da camada 0-150 mm de profundidade e eram da ordem de 80 a 100 kg de cada solo. A Tabela 1 apresenta os locais das coletas das amostras.

A coleta dos solos, os testes iniciais, o experimento e as análises química e física foram executados no período de 15/4/1995 a 12/2/1996.

As amostras para as análises químicas (teor de matéria orgânica e de óxidos de ferro), para as análises físicas (granulometria, densidade de partículas e superfície específica) e para as leituras das constantes dielétricas aparentes foram feitas com solos peneirados em malha de 2 mm.

A análise granulométrica foi efetuada utilizando-se o método da pipeta, a densidade de partículas pelo método do balão com álcool, e a determinação do teor de óxido de ferro, através do ataque sulfúrico (Embrapa, 1997). A determinação da matéria orgânica foi feita pelo método de Walkley-Black (Raij & Quaggio, 1983). A superfície específica foi determinada por um procedimento de exposição da amostra de solo a uma solução saturada de NaCl, sob vácuo em dissecador, conforme metodologia apresentada por Sapozhnikov & Shevchenko (1989). Todos estes resultados estão apresentados na Tabela 2.

Em um teste inicial ficou determinado que, para cada amostra de solo a ser analisada, com um volume aproxi-

mado de 3 L de solo, era necessário pulverizar 100 mL de água para incrementar a umidade da amostra em cerca de $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, levando-se em conta a perda dos pulverizadores.

As amostras trazidas do campo eram peneiradas em malha de 2 mm e secadas ao ar. Os níveis de umidade (intervalos de cerca de $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) eram obtidos espalhando o solo sobre uma mesa e adicionando água com o pulverizador. A seguir, o solo era revolvido para homogeneização, e adicionava-se mais água até o total desejado (cerca de 100 mL). Para melhorar a homogeneização final, o solo úmido era passado três vezes em peneira, e depois, colocado em recipientes herméticos (sacos de plástico), deixando-o repousar cerca de 16 horas (à noite). No dia seguinte, o material de solo era transferido para um balde de plástico (150 mm de diâmetro por 200 mm de profundidade), mantendo sua densidade o mais uniforme possível, em um valor aproximado de $1,1 \text{ kg cm}^{-3}$. O balde com o solo era então pesado, o que permitia a obtenção do valor de densidade úmida (Roth et al., 1992; Dirksen & Dasberg, 1993). Este procedimento era executado em quatro amostras do mesmo tipo de solo, sem um controle rigoroso do teor de umidade a ser obtido. Estas amostras eram consideradas amostras distintas, e não repetições.

A etapa seguinte foi a obtenção das leituras da constante dielétrica relativa aparente, realizadas pelo equipamento de TDR TRASE System I. A sonda consistia de duas

hastes metálicas de 6,35 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento separadas entre si por 51 mm. Foram feitas 25 leituras de cada amostra, sendo realizada uma por minuto, usando o recurso de leituras automatizadas do equipamento.

Uma vez executadas as leituras da constante dielétrica aparente, eram retiradas cinco amostras indeformadas de solo, distribuídas em cinco níveis de profundidade do balde, para a determinação da umidade a base de massa, bem como para avaliar a homogeneidade da umidade do solo. Os valores gravimétricos de umidade mostraram que o conteúdo de água distribuído dentro do balde era homogêneo, pois as variações entre os valores de umidade dos cinco níveis (coeficientes de variação inferiores a 2%) eram da mesma ordem de grandeza das variações inerentes ao método gravimétrico. A média destes cinco valores de umidade era considerada como valor da umidade da amostra do balde. Este valor médio de umidade, a base de massa úmida, junto com o valor de densidade úmida, permitiu a determinação da umidade volumétrica.

Extraídas as amostras, o solo foi sendo novamente peneirado e misturado com o material remanescente da determinação anterior, sendo repetido o procedimento de umedecimento do solo. Em cada etapa de umedecimento era adicionada uma quantidade aproximada de 100 mL de água para cerca de 5 kg de solo. Este procedimento era repetido até próximo da condição de saturação do solo, avaliada de modo subjetivo.

Tabela 1. Coordenadas geográficas aproximadas e localização dos pontos de coleta dos solos.

| Solo ⁽¹⁾ | Latitude (S) | Longitude (W) | Localização |
|---------------------|--------------|---------------|------------------------------------------|
| AQ | 22°33'55" | 48°57'39" | Estrada São Pedro - Santa Maria da Serra |
| PV | 22°38'42" | 47°48'57" | Estrada Piracicaba - São Pedro |
| LV | 22°46'49" | 47°40'10" | Trevo de Saltinho |
| TE | 22°42'11" | 47°37'21" | Posto Meteorológico da ESALQ/USP |
| LE | 22°48'26" | 47°39'8" | Trevo da Usina Santa Helena |

⁽¹⁾AQ: Areia Quartzosa; PV: Podzólico Vermelho-Amarelo; LV: Latossolo Vermelho-Amarelo; TE: Terra Roxa Estruturada; LE: Latossolo Vermelho-Escuro.

Tabela 2. Granulometria, densidade de partículas (ρ_{part}), superfície específica (SE), teores de matéria orgânica (MO) e de óxido de ferro (Fe_2O_3).

| Solo ⁽¹⁾ | Argila (g kg^{-1}) | Silte (g kg^{-1}) | Areia (g kg^{-1}) | ρ_{part} (t m^{-3}) | SE ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$) | MO (g kg^{-1}) | Fe_2O_3 (g kg^{-1}) |
|---------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| AQ | 47 | 22 | 931 | 2,619 | 13,6 | 2,7 | 4,2 |
| LV | 194 | 119 | 687 | 2,615 | 51,3 | 6,9 | 8,4 |
| LE | 386 | 232 | 382 | 2,611 | 84,6 | 4,7 | 51,8 |
| PV | 292 | 531 | 177 | 2,539 | 119,6 | 3,3 | 52,5 |
| TE | 365 | 292 | 343 | 2,855 | 81,1 | 3,8 | 111,2 |

⁽¹⁾AQ: Areia Quartzosa; LV: Latossolo Vermelho-Amarelo; LE: Latossolo Vermelho-Escuro; PV: Podzólico Vermelho-Amarelo; TE: Terra Roxa Estruturada.

Para a determinação correta do ponto de saturação, o solo foi colocado em um balde perfurado no fundo, e saturado de baixo para cima, por ascensão capilar, por uma lâmina d'água, nunca superior a um quinto da altura do balde, para evitar a formação de bolhas de ar dentro do solo a ser saturado.

Para a determinação do ponto de umidade mínima, o solo foi secado em estufa por 48 horas a 105°C, deixado esfriar por cerca de seis horas, e colocado no recipiente para efetuarem-se as leituras da constante dielétrica.

A determinação do conteúdo volumétrico de água do solo (θ) foi feita seguindo a equação, adaptada de Tommaselli (1997):

$$\theta = \frac{\rho_u}{\left(1 + \frac{1}{u_s}\right) \cdot \rho_a} \quad (3)$$

onde ρ_u é a densidade úmida em kg cm^{-3} , definida como razão entre a soma das massas de sólidos do solo, água do solo e ar do solo e o volume por estes ocupado (volume do balde), u_s é a umidade do solo à base de massa seca, em kg kg^{-1} , e ρ_a é a densidade da água, que foi considerada igual a 1 kg cm^{-3} .

Obtidos os valores de θ e k , foi possível estabelecer a curva de calibração de cada um dos solos estudados, mediante o ajuste de uma equação polinomial cúbica. Foram feitas, também, análises comparativas com a curva de Topp et al. (1980) e a curva de calibração do aparelho. Para estabelecer o grau de importância dos coeficientes (linear, quadrático e cúbico) foi utilizado o teste de hipótese de nulidade do parâmetro, utilizando a distribuição t de Student.

Resultados e Discussão

A Figura 1 mostra os valores observados da constante dielétrica relativa aparente k , em razão do conteúdo volumétrico de água θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), nos solos AQ, LV, LE, PV, TE e em todos estes solos em um conjunto único. Mostra, também, as curvas polinomiais cúbicas ajustadas dos dados observados, a curva referente ao modelo de Topp et al. (1980), e a curva de calibração embutida no equipamento de TDR Trase System I da Soil Moisture Equipment Corporation (1990).

A maior dispersão dos pontos observados em torno da curva ajustada ocorre nos extremos. Em umidades abaixo de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, as curvas de Topp et al. (1980) e do Trase System I apresentam comportamento similar. Acima deste valor, estas curvas são

bem distintas. A curva de Topp et al. (1980) superestima sistematicamente os valores da constante dielétrica aparente em valores de umidade superiores a $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, nos solos LE, PV e TE, e se ajusta muito bem aos valores de umidade de até $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$

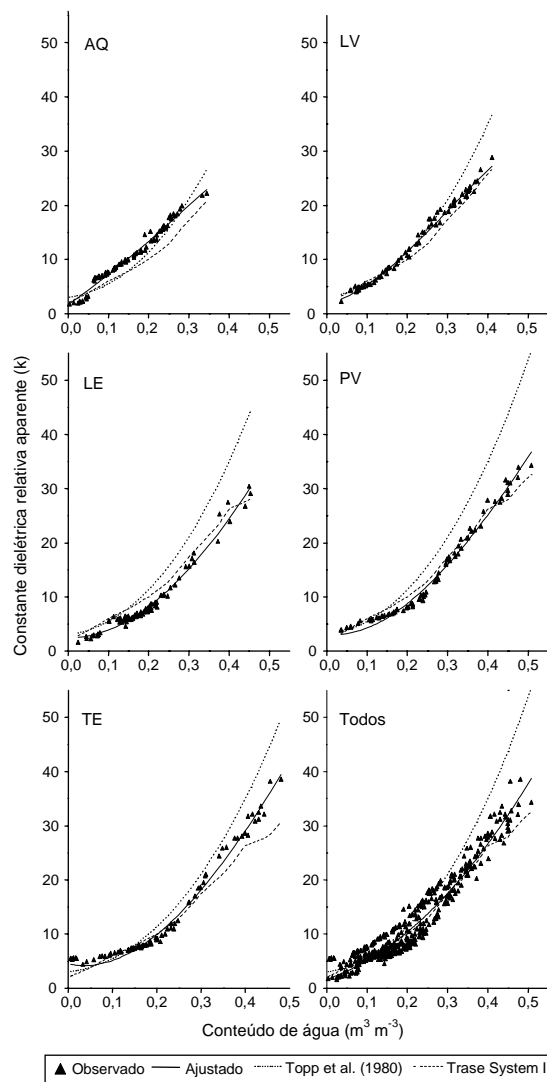


Figura 1. Relações entre o conteúdo de água e a constante dielétrica aparente dos solos areia quartzosa (AQ), Latossolo Vermelho-Amarelo (LV), Latossolo Vermelho-Escuro (LE), Podzólico Vermelho-Amarelo (PV) e Terra Roxa Estruturada (TE). São mostradas as curvas de Topp et al. (1980), do Trase System I (Soil Moisture Equipment Corporation, 1990) e o polinômio cúbico ajustado.

no solo LV. No solo AQ, o melhor ajuste da curva é na faixa de 0,25 a 0,30 m³ m⁻³. A melhor concordância entre o comportamento da curva de calibração do equipamento Trase System I e a curva de calibração ajustada ocorre com os solos PV e LV, e a pior concordância entre elas ocorre com o solo AQ.

De maneira geral, as curvas ajustadas não são, em nenhum momento e em nenhum dos solos, coincidentes, e assim mostram a necessidade de calibração do aparelho em cada solo especificamente (Figura 1). A curva de calibração que acompanha o aparelho comportou-se melhor no solo PV, e pior no AQ. Todas as curvas de calibração ajustadas apresentaram coeficientes de correlação acima de 0,988. Percebe-se, também, a ineficácia do modelo de Topp et al. (1980), pois mostra que ele superestima os valores das constantes dielétricas à medida que aumenta a umidade, fato também já constatado por Herkelrath et al. (1991), Dasberg & Hopmans (1992), Roth et al. (1992), Dirksen & Dasberg (1993) e Yu et al. (1997). As discrepâncias entre a curva de Topp et al. (1980) e as curvas deste estudo talvez se devam às diferentes classes de solos utilizados em cada um dos estudos. Topp et al. (1980) utilizaram solos de uma gama muito ampla de texturas, e estenderam a curva de calibração até o limite de 1 m³ m⁻³, ao passo que neste estudo utilizou-se uma gama mais restrita de texturas e estendeu-se a calibração até o limite do ponto de saturação de cada solo.

O melhor ajuste do modelo de Topp et al. (1980) aos dados dos solos deste estudo foi observado somente quanto a valores de umidade abaixo de 0,15 m³ m⁻³. Pela Figura 1, percebe-se que esse mo-

delo foi mais adequado quando aplicado no conjunto de todos os solos; contudo, sua aderência parece razoável apenas para os casos dos solos LV e TE.

Os solos coletados são bem distintos entre si, principalmente em relação à distribuição do tamanho das partículas, superfície específica e teor de óxidos de ferro (Tabela 2).

Os valores das análises de variância das regressões foram obtidos utilizando-se os modelos cúbicos (Tabela 3). A determinação dos termos independentes foi feita por meio de uma regressão linear, utilizando apenas os cinco menores valores. O termo independente representa a constante dielétrica relativa aparente do solo seco ($\theta = 0$) e, de acordo com a Tabela 3, apresentou valores distintos em cada solo, mostrando uma provável relação entre a constante dielétrica relativa do solo e algumas de suas propriedades. Este procedimento foi adotado para evitar uma condição de decréscimo de k com aumento de θ , que acontecia quando o termo independente era deixado livre pelo ajuste do modelo cúbico.

As probabilidades ($\text{Prob} > F$) demonstram que todos os modelos encontrados são significativos a um grau de confiança superior a 99%.

Os testes de hipótese das estimativas dos parâmetros demonstram que, para os modelos aplicados aos dados do solo AQ e aos dados do conjunto de todos os solos, há uma probabilidade elevada (>81% e >72%, respectivamente) de o coeficiente cúbico ser nulo, o que leva a questionar a sua necessidade no modelo, de modo análogo ao trabalho de Yu et al. (1997). Excetuando-se os dados do solo AQ, todos os demais dados mostram que o coeficiente qua-

Tabela 3. Resumo da análise de variância das regressões.

| Solo ⁽¹⁾ | Prob>F | R ² _{aj} | Estimativa dos parâmetros | | | Termo ⁽²⁾ independente | Prob> T ⁽³⁾ | | |
|---------------------|--------|------------------------------|---------------------------|------------|------------|--------------------------------------|-------------------------|------------|------------|
| | | | θ | θ^2 | θ^3 | | θ | θ^2 | θ^3 |
| AQ | 0,0001 | 0,994 | 52,39 | 34,44 | -19,89 | 1,65 | 0,0001 | 0,3425 | 0,8132 |
| LV | 0,0001 | 0,997 | 16,19 | 204,55 | -227,72 | 1,84 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| LE | 0,0001 | 0,989 | -2,89 | 166,30 | -55,85 | 2,55 | 0,4306 | 0,0001 | 0,2347 |
| PV | 0,0001 | 0,995 | -6,11 | 193,52 | -100,37 | 3,05 | 0,1356 | 0,0001 | 0,0103 |
| TE | 0,0001 | 0,993 | -16,96 | 243,59 | -119,21 | 4,50 | 0,0002 | 0,0001 | 0,0181 |
| Todos | 0,0001 | 0,976 | -2,15 | 204,28 | -132,86 | 3,50 | 0,0001 | 0,0002 | 0,7269 |

⁽¹⁾AQ: Areia Quartzosa; LV: Latossolo Vermelho-Amarelo; LE: Latossolo Vermelho-Escuro; PV: Podzólico Vermelho-Amarelo; TE: Terra Roxa Estruturada.

⁽²⁾O termo independente foi obtido através de uma regressão linear entre os cinco pares de valores mais baixos de cada conjunto de dados, e por isso, não foi testado. ⁽³⁾O valor |T| foi obtido a partir de uma distribuição t de Student, para testar a hipótese H₀: parâmetro = 0.

drático é importante no modelo, pois a probabilidade de que ele seja nulo é praticamente zero. O coeficiente linear se mostrou tão ou mais importante que o coeficiente quadrático, na maioria dos casos, excetuando-se os casos dos solos LE e PV, onde apresentou probabilidade de ser nulo, com significância superior a zero.

Esta análise demonstra que o modelo cúbico, embora de grande utilização, nem sempre se faz necessário.

A Tabela 4 mostra os erros-padrão de estimativa cometidos na aplicação dos modelos cúbicos em cada tipo de solo, em seu próprio conjunto de origem, e mostra, também, os erros-padrão de estimativa cometidos ao aplicar o modelo cúbico geral, oriundo do conjunto de todos os cinco solos, a cada solo individualmente.

Os erros-padrão de estimativa magnificam-se acentuadamente quando se aplica o modelo cúbico geral a cada solo individualmente, chegando a aumentar mais que o triplo, como no caso do solo AQ (de 0,756 com o modelo específico para 2,598 com o modelo geral). No melhor caso (TE), o erro aumentou em cerca de 64% (de 1,053 para 1,723).

O uso de um único modelo empírico geral, ajustado com dados de diferentes solos, compromete a precisão das determinações quando aplicado a cada solo individualmente. Assim, os modelos cúbicos gerais devem ser preteridos em relação aos modelos cúbicos específicos.

Como as análises estatísticas foram efetuadas tomando-se a constante dielétrica relativa aparente k como variável dependente, e a umidade volumétrica θ como variável independente, para fins práticos, foram obtidas as equações inversas, explicitando-se a umidade volumétrica θ nas equações de regressão originais. As equações obtidas foram as seguintes:

$$\text{AQ: } \theta = -2.10^{-5}k^3 + 0,0007k^2 + 0,0093k + 0,0024; \\ R^2 = 0,981 \quad (4a)$$

$$\text{LV: } \theta = +1.10^{-5}k^3 - 0,0007k^2 + 0,0257k - 0,0202; \\ R^2 = 0,990 \quad (4b)$$

$$\text{LE: } \theta = +2.10^{-5}k^3 - 0,0015k^2 + 0,0393k - 0,0333; \\ R^2 = 0,975 \quad (4c)$$

$$\text{PV: } \theta = +4.10^{-5}k^3 - 0,0023k^2 + 0,0551k - 0,1274; \\ R^2 = 0,986 \quad (4d)$$

$$\text{TE: } \theta = +3.10^{-5}k^3 - 0,0023k^2 + 0,0597k - 0,1890; \\ R^2 = 0,961 \quad (4e)$$

$$\text{Todos: } \theta = +8.10^{-6}k^3 - 0,0007k^2 + 0,0269k - 0,0194; \\ R^2 = 0,913. \quad (4f)$$

O objetivo destas equações é simplesmente auxiliar os futuros usuários destes modelos, que poderão, através da leitura de k , inferir rapidamente o valor de θ .

Os erros-padrão de estimativa do modelo de Topp et al. (1980), quando este é aplicado a estes solos (Tabela 5), são da mesma ordem de grandeza do nosso modelo cúbico geral, fato também observado por Roth et al. (1992), comparando seu modelo com o de Topp et al. (1980). Por exemplo, a aplicação do modelo cúbico geral ao solo AQ determina um erro-padrão de estimativa de 2,598, e o modelo de Topp et al. (1980) determina um erro de 2,27. Para o pior caso, o TE, o ajuste deste modelo determina um erro de 5,18 e um coeficiente de determinação de apenas 0,705, que é inaceitável, em termos de calibração.

Os valores dos coeficientes de determinação e dos erros-padrão de estimativa (Tabela 5) comprovam a baixa aderência do modelo de Topp et al. (1980). Dos cinco solos, o LE e o PV mostraram os melhores ajustes ao modelo de Topp et al. (1980), com coeficientes de determinação próximos a 0,9; contudo, o LE apresentou o menor erro-padrão de estimativa de k (1,35). Os piores ajustes ocorreram com o TE e o LV, com coeficientes de determinação de 0,705 e 0,799, respectivamente.

Estas observações são concordantes com as de vários autores, entre eles Dasberg & Hopmans (1992), Dirksen & Dasberg (1993) e Ponizovsky et al.

Tabela 4. Erro-padrão de estimativa do modelo cúbico de cada solo e o modelo cúbico geral (conjunto dos cinco solos) aplicado a cada solo separadamente.

| Solo ⁽¹⁾ | Erro-padrão de estimativa ⁽²⁾ | |
|---------------------|------------------------------------------|--------------|
| | Modelo específico | Modelo geral |
| AQ | 0,756 | 2,598 |
| LV | 0,716 | 1,187 |
| LE | 0,897 | 2,090 |
| PV | 1,035 | 1,778 |
| TE | 1,053 | 1,723 |

⁽¹⁾AQ: Areia Quartzosa; LV: Latossolo Vermelho-Amarelo; LE: Latossolo Vermelho-Escuro; PV: Podzólico Vermelho-Amarelo; TE: Terra Roxa Estruturada. ⁽²⁾Erro-padrão de estimativa = (Soma dos Quadrados dos Resíduos/Graus de Liberdade)^{1/2}.

(1999), no que diz respeito à validade do modelo de Topp et al. (1980) quando aplicados a outros tipos de solos não oriundos do seu estudo original.

Pela afirmativa de Topp et al. (1980) de que a constante dielétrica relativa aparente dos solos minerais depende apenas do seu conteúdo de água, seria de se esperar que o seu modelo tivesse o mesmo tipo de comportamento em cada um dos solos mostrados na Figura 1. Contudo, observa-se que o comportamento do modelo é distinto para cada um dos solos, demonstrando que a constante dielétrica aparente relativa dos solos depende de suas propriedades intrínsecas (Dirksen & Dasberg, 1993). Os resultados deste trabalho dão evidências de que, além da água, a distribuição do tamanho de partículas, o teor de óxido de ferro, o teor de matéria orgânica e a superfície específica são características que podem influenciar o valor da constante dielétrica do solo. O efeito mais direto das distribuições do tamanho de partículas é o aumento da superfície específica, gerando maior quantidade de água adsorvida, que apresenta uma constante dielétrica bem abaixo daquela da água livre. A matéria orgânica apresenta algum efeito indireto, ou seja, a sua presença determina um aumento da superfície específica do solo. O teor de óxidos de ferro apresenta um efeito dielétrico semelhante ao da matéria orgânica. Os valores dos termos independentes das equações de regressão (Tabela 2) mostram relação direta com o teor de óxido de ferro, com o teor de argila, e com a superfície específica (Tabela 3) dos solos aqui estudados. Esta informação pode ser usada, futuramente, para melhorar a modelagem na calibração dos aparelhos de TDR.

Se, de fato, o modelo de Topp et al. (1980) fosse universal, seria de se esperar que a técnica da TDR fosse um método direto de determinação do conteúdo de água do solo, sem a necessidade de curvas de calibração para diferentes tipos de solo. Contudo, em seu artigo original, esse autor mostrou que, para solos de textura fina e orgânicos, as relações $k \times \theta$ mostraram respostas muito pequenas na região $0 < \theta < 0,1$, ou seja, para valores de θ entre 0 e 0,1, os valores lidos de k apresentam um incremento de pouca amplitude. Tal tipo de comportamento também foi documentado por Herkelrath et al. (1991), com relação a solos orgânicos, e por Smith & Tice (1988) e

Dasberg & Hopmans (1992), em relação a solos de textura fina.

Esta baixa sensibilidade de respostas a baixas umidades (no intervalo $0 < \theta < 0,1$) está de acordo com o que foi aqui observado, ou seja, os valores lidos têm alta variabilidade, e o incremento em k é relativamente pequeno, como mostra a Figura 1. Observa-se claramente, este tipo de comportamento, principalmente nos solos PV, LE e TE, de textura mais fina e com maiores teores de óxido de ferro.

A curva de calibração do equipamento de TDR da Soil Moisture Equipment Corporation (1990) foi obtida utilizando-se três tipos de solo: um, arenoso; um, de textura média, e um, argiloso. A documentação técnica do equipamento (Soil Moisture Equipment Corporation, 1990) não apresenta nenhuma informação adicional sobre os solos usados em sua calibração. A tabela de calibração do aparelho consiste de 17 pares de pontos variando de $\theta = 0\%$ e $k = 2$ até $\theta = 99,9\%$ e $k = 81,5$. Para obter os valores de θ em razão do k medido, o aparelho interpola linearmente o valor lido entre os valores imediatamente acima e abaixo do valor medido.

Tratando-se de valores de umidade de até $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, as curvas de calibração do equipamento e de Topp et al. (1980) são equivalentes e têm boa aderência aos dados dos solos LV e PV (Figura 1). Contudo, acima de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, estas duas curvas divergem, e, de modo geral, a curva de calibração do equipamento apresenta aderência melhor, embora, na maioria dos casos apresente uma subestimativa ou superestimativa sistemática dos valores de k .

Tabela 5. Erro-padrão de estimativa e coeficientes de determinação do ajuste do modelo de Topp et al. (1980) aos dados dos solos deste estudo.

| Solo ⁽¹⁾ | Erro-padrão de estimativa | Coefficiente de determinação ⁽²⁾ |
|---------------------|---------------------------|---------------------------------------------|
| AQ | 2,27 | 0,800 |
| LV | 3,09 | 0,799 |
| LE | 1,35 | 0,922 |
| PV | 2,76 | 0,900 |
| TE | 5,18 | 0,705 |
| Todos | 3,40 | 0,812 |

⁽¹⁾AQ: Areia Quartzosa; LV: Latossolo Vermelho-Amarelo; LE: Latossolo Vermelho-Escuro; PV: Podzólico Vermelho-Amarelo; TE: Terra Roxa Estruturada. ⁽²⁾R² generalizado = variação explicada/variação total = $\frac{\sum(k_{\text{est}} - \bar{k}_{\text{obs}})^2}{\sum(k_{\text{obs}} - \bar{k}_{\text{obs}})^2}$.

A Figura 2 mostra a relação entre os valores de umidade do solo medidos (θ volumétrico) e os estimados pelo equipamento Trase System I (θ TDR), para cada solo propriamente dito e considerando o conjunto de todos os solos deste estudo. Esse equipamento apresenta faixas de superestimativa siste-

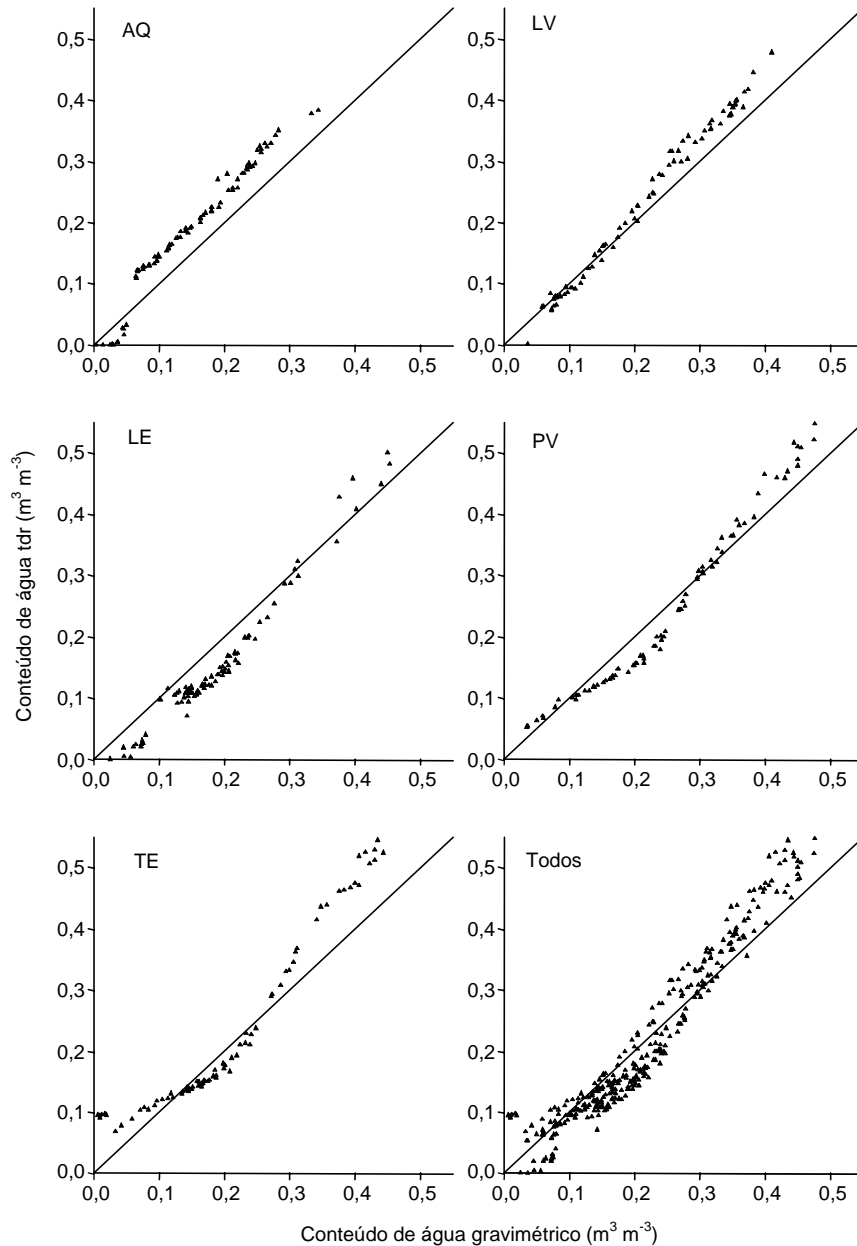


Figura 2. Umidade do solo determinada gravimetricamente em relação às determinadas pelo Trase System I (Soil Moisture Equipment Corporation, 1990) nos solos Areia Quartzosa (AQ), Latossolo Vermelho-Amarelo (LV), Latossolo Vermelho-Escuro (LE), Podzólico Vermelho-Amarelo (PV) e Terra Roxa Estruturada (TE).

mática dos valores de θ . No solo AQ, esta superestimativa ocorre quando $\theta > 0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; no solo LV, quando $\theta > 0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; no solo LE, quando $\theta > 0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; no solo PV, quando $\theta > 0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; no solo TE, quando $\theta > 0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $\theta < 0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. No conjunto de todos os solos, percebe-se uma superestimativa sistemática quando $\theta > 0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Há, também, regiões de subestimativa sistemática. No solo AQ, estas subestimativas ocorrem quando $\theta < 0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; no LE, quando $\theta < 0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; no PV, quando $\theta < 0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $\theta > 0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; no TE, quando $\theta < 0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $\theta > 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Considerando-se todos os solos juntos, embora os valores sigam a tendência da linha 1:1, a dispersão dos pontos ao redor desta curva é elevada, sendo mais crítica quanto menores forem os valores de θ . Suponha-se, por exemplo, que se tem uma determinação gravimétrica de umidade de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Desconhecendo o tipo de solo, sabe-se, de antemão, que o aparelho poderá fornecer estimativas de $0,07$ até $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, incorrendo em erro de até 50%. A melhor resposta da curva de calibração do aparelho está na faixa de $0,25$ a $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com um erro médio em torno de 10%.

Estas observações, juntamente com as do item anterior, fornecem subsídios, mais que suficientes, para não se aceitar a curva de calibração do Trase System I, da Soil Moisture Equipment Corporation (1990), bem como a curva de calibração de Topp et al. (1980) como modelos universais.

As Figuras 1 e 2 mostram que as curvas de calibração são críticas nos intervalos aproximados de $0 < \theta < 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e acima de $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ onde os pontos apresentam maior dispersão. Contudo, um fator atenuante a este problema é que as variações de umidade do solo, no campo, e o intervalo de interesse agrônômico, estão dentro deste intervalo de $0,1$ a $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

As considerações acima devem ser ponderadas com a precisão necessária à determinação da umidade. Se o propósito desta determinação for a obtenção de valores absolutos de conteúdo de água do solo, a curva de calibração do equipamento estudado não é recomendada, mas se o propósito for mais voltado às variações do conteúdo de água do solo, acredita-se que a curva de calibração do aparelho forneça valores com erros dentro de uma ordem de grandeza aceitável (inferiores a 10%).

Conclusões

1. A curva de calibração empírica obtida com o conjunto de dados dos cinco solos não tem suficiente grau de precisão para ser denominada curva de calibração empírica universal.

2. As curvas de calibração obtidas em cada solo individualmente têm boa precisão num intervalo de aplicabilidade de $0,10$ a $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

3. A curva de calibração de Topp et al. (1980) e a curva de calibração embutida no equipamento Trase I não são aplicáveis aos solos estudados.

Referências

DASBERG, S.; HOPMANS, W. Time domain reflectometry calibration for uniformly and non-uniformly wetted sandy and clayey loam soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 1341-1345, 1992.

DIRKSEN, C.; DASBERG, S. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 660-667, 1993.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FELLNER-FELDEGG, J. The measurement of dielectrics in the time domain. **Journal of Physical Chemistry**, Washington, v. 73, p. 616-623, 1969.

HERKELRATH, W. N.; HAMBURG, S. P.; MURPHY, F. Automatic, real time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. **Water Resources Research**, Washington, v. 27, p. 857-864, 1991.

HERRMANN JÚNIOR, P. S. P. **Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de microondas**. São Carlos : USP, 1993. 124 p. Dissertação de Mestrado.

LOOR, G. P. de. Dielectric properties of heterogeneous mixture. **Applied Scientific Research**, Dordrecht, v. B3, p. 479-482, 1964.

PONIZOVSKY, A. A.; CHUDINOVA, S. M.; PACHEPSKY, Y. A. Performance of TDR calibration models as affect by soil texture. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 218, p. 35-43, 1999.

- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas : Instituto Agromômico, 1983. 170 p.
- ROTH, C. H.; MALICKI, M. A.; PLAGGE, R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 43, p. 1-13, 1992.
- SAPOZHNIKOV, P. M.; SHEVCHENKO, A. V. A rapid method of determining the total specific surface of soils. **Pochvovedeniye**, Moscow, v. 11, p. 148-150, 1989.
- SMITH, M. W.; TICE, A. R. **Measurement of the unfrozen water content of soils**: comparison of NMR and TDR methods. Vicksburg : US Army Corp of Engineers-Cold Regions Research Engineering Laboratory, 1988. (Report, 88-18).
- SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORPORATION (Santa Barbara, Estados Unidos). **Trase system I**. Santa Barbara, 1990. 53 p.
- TODOROFF, P.; LANGELLIER, P. Comparison of empirical and partly deterministic methods of time domain reflectometry calibration, based on a study of two subtropical soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 45, p. 325-340, 1998.
- TOMMASELLI, J. T. G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um equipamento de TDR (Time-Domain Reflectometry)**. Piracicaba : Esalq, 1997. 109 p. Tese de Doutorado.
- TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de reflectometria de microondas para dois solos paulistas típicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. **Anais...** Viçosa : UFV, 1995. v. 1, p. 24-26.
- 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.
- WANG, J. R. The dielectric properties of soil-water mixtures at microwave frequencies. **Radio Science**, Washington, v. 15, p. 977-985, 1980.
- 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 Resources Research**, Washington, v. 33, p. 2417-2421, 1997.