



II WORKSHOP DE APLICAÇÕES DE TÉCNICAS ELETROMAGNÉTICAS PARA O MONITORAMENTO AMBIENTAL



Aplicabilidade e limitações da TDR para a medida da umidade em solos brasileiros

Prof. Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz, CNPDIA-EMBRAPA.

Aplicabilidade e limitações da TDR para a medida da umidade em solos brasileiros

Introdução

O princípio da medida da umidade do solo pela técnica da reflectometria no domínio do tempo foi pioneiramente introduzida por Davis e Chudobiak (1975) e implementado e validado por Topp et al. (1980), Topp e Davis (1981) e Topp et al. (1984). O funcionamento da técnica para a medida da umidade é baseado na medida da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em uma guia de onda metálica inserida no solo. O equipamento mede o tempo de trânsito (t) das ondas eletromagnéticas, o qual é dependente da constante dielétrica (ϵ) do meio (solo) através da seguinte equação:

$$t = \frac{2L}{c} \sqrt{\epsilon} \dots\dots\dots [1]$$

onde L (cm) é o comprimento da sonda metálica e c (cm.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, medida pelo TDR, dado pela equação [1]. 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.

Para solos homogêneos (sem extratificação) a umidade volumétrica pode ser calculada usando a relação empírica determinada por Topp et al. (1980):

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \epsilon - 5,5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4,3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \dots\dots\dots [2]$$

Nesse trabalho, os autores verificaram que a constante dielétrica dos solos não era significativamente afetada pela temperatura (entre 10 e 36°C), pela textura (de argilosa a areno-barrenta), pela densidade (1,14 a 1,44 g cm^{-3} , para solos não expansivos) e pelo

conteúdo de sais (com amostras umedecidas com água pura, 0,01 N CaSO₄ ou 2000 ppm de NaCl).

Com relação ao efeito da temperatura, Davis e Chudobiak (1975) observaram um aumento significativo de cerca de 10% em ϵ para temperaturas variando entre 1 e 40°C. O efeito da temperatura na constante dielétrica em função da textura dos solos foi estudada, experimentalmente, por Wraith e Or (1999) e, teoricamente, por Or e Wraith (1999), concluindo que o efeito da temperatura é dependente da quantidade de água adsorvida (ou ligada), do tipo de mineral de argila e das partículas do solo.

A equação de calibração proposta por Topp et al. (1980) tem sido utilizada em diversos estudos, mostrando-se adequada para a determinação da umidade, como por exemplo por Patterson e Smith (1981), Topp et al. (1984), Drungil et al. (1989), para solos com texturas variando entre argilosa e arenosa, Grantz et al. (1990) para solos vulcânicos ricos em ferro e Nadler et al. (1991) para solos salinos e não salinos. Entretanto, diversos autores têm verificado limitações quanto ao uso da Eq. [2] para a medida da umidade com o TDR para solos com altos teores de matéria orgânica (Herkelrath et al. 1991; Pepin et al. 1992; Malicki et al. 1996), solos expansivos (Bridge et al. 1996), solos salinos (Dalton et al. 1990; Noborio et al. 1994; Wyseure, 1997) e solos contendo minerais magnéticos como a magnetita (Robinson et al. 1994 e Roth et al. 1992).

Devido às limitações da equação de Topp, outras calibrações têm sido propostas, como uma relação linear entre a umidade e a raiz quadrada da constante dielétrica (ϵ vs $\theta^{0,5}$) (Ledieu et al. 1986; Ferré et al. 1996; Malicki et al. 1996; Topp et al. 1996). Para solos com texturas mais finas, Yu et al. 1997 propuseram uma relação mais geral dada pela relação ϵ vs θ^γ , onde γ representa um expoente de utilizado para corrigir a estimativa de θ para valores de $\epsilon > 5$.

Uma outra abordagem bastante utilizada entre a constante dielétrica, a umidade e outros parâmetros do solo é o chamado “dielectric mixing model”, estudado por diversos autores como Ansoult et al. (1985); Roth et al. (1990); Dasberg e Hopmans (1992); Dirksen e Dasberg (1993) e Weitz et al. (1997), dentre outros. Essa abordagem expressa a constante dielétrica do solo ϵ_{solo} como uma ponderação entre as diversas fases constituintes do solo (sólida, líquida e gasosa) dada pela seguinte equação:

$$\epsilon_{solo}^{\alpha} = \theta \epsilon_{ag}^{\alpha} + (1 - \Phi) \epsilon_s^{\alpha} + (\Phi - \theta) \epsilon_{ar}^{\alpha} \dots\dots\dots [3]$$

onde ϵ_{ag} , ϵ_s e ϵ_{ar} são as constantes dielétricas da água, parte sólida (partículas + matéria orgânica) e ar, respectivamente, Φ a porosidade e α um parâmetro que depende da orientação das partículas do solo com relação ao campo eletromagnético aplicado.

Malicki et al. (1996) propôs uma nova calibração empírica que incorpora a densidade global do solo (ρ):

$$\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 0,819 - 0,168\rho - 0,159\rho^2}{7,17 + 1,18\rho} \dots\dots\dots [4]$$

A Eq. [4] foi testada para uma grande variedade de solos com diferentes texturas, incluindo solos orgânicos e arenosos, com densidades variando entre 0,13 e 1,66 g cm⁻³, proporcionando uma redução em cerca de 1/5 da variância da estimativa de θ quando comparada com a equação desconsiderando o efeito de ρ .

Além dos modelos citados, existem outros como a teoria do meio efetivo (Alharthi e Lange, 1987), o modelo de Maxwell-DeLor (Dobson et al. 1985) e o modelo de auto-similaridade de Sen et al. (1981), mas com menor utilização e aplicabilidade que as outras descritas anteriormente. Dos modelos citados o modelo de misturas dielétricas (“dielectric mixing model”) de 3 fases e a equação universal de Topp (modelo polinomial de terceiro grau) têm sido os mais utilizados. No caso do modelo de misturas dielétricas de 3 fases existe um detalhamento chamado de modelo de 4 fases (Dobson et al. 1985; Dasberg e Hopmans, 1992) que considera a fase líquida como subdividida em 2 outras: a água livre, com constante dielétrica próxima a 80 e a água adsorvida ou ligada, com ε variando entre 3 e 30 (Yu et al. 1999). O modelo de misturas dielétricas de 3 fases é bastante útil e apresenta excelentes resultados para solos com alta superfície específica, onde os modelos de misturas dielétricas de 3 fases e de Topp apresentam deficiências.

No Brasil, os primeiros trabalhos com TDR foram realizados por Herrmann (1993), que desenvolveu um equipamento de transmissão de microondas para a determinação da umidade do solo e Tomaselli e Bacchi (2001) que realizou estudos de calibração da técnica de TDR para diversos solos com texturas variadas. Os resultados obtidos por Tomaselli e Bacchi (2001) para 5 solos com texturas bem variadas (Neossolo, Argissolo, Latossolos e Nitossolo) utilizando o TDR Trase system, mostraram que a equação de Topp não apresentou um bom desempenho para umidades acima de 0,15 m³m⁻³. Os melhores ajustes foram obtidos com equações polinomiais de terceiro grau específicas a cada solo.

Teixeira et al. (2003) avaliaram o desempenho do TDR Easy Test em um Latossolo Amarelo de Manaus e verificaram que das equações utilizadas (Topp, Malicki e Teixeira et al. 1997) a de Topp subestimou os valores de umidade e as equações de Malicki e Teixeira et al. 1997 ($\theta = 4,64 \cdot 10^{-2} + 2,04 \cdot 10^{-2} \varepsilon + 1,68 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2$) apresentaram resultados similares. Não foi observada diferença significativa entre o modo de instalação (vertical ou horizontal), mas

houve diferença significativa entre os resultados obtidos em amostras deformadas e indeformadas.

Melo-Filho e Libardi (2005) utilizaram o TDR modelo PM917 da E.S.I Enviromental Sensors Inc. (sonda com 5 segmentos de 0,15 m) para avaliar a estabilidade temporal de medidas de umidade do solo em uma parcela experimental de 50 pontos de observação distanciados de 1 metro entre si. As calibrações foram obtidas com um conjunto de dados de 210 pares de leituras de TDR e umidade volumétrica pelo método gravimétrico, para cada uma das profundidades. Não foram discutidos no trabalho, aspectos do desempenho das calibrações obtidas, nem comparadas com outras equações de calibração, por não ser o foco principal do trabalho, mas mostra uma utilização interessante da técnica.

Teixeira et al. (2005) utilizaram o TDR 1502B da Tektronix conectado ao coletor de dados CR10X da Campbell para a medida da umidade do solo e comparação com a sonda neutrons e tensiômetro em um Nitossolo Vermelho Distrófico. As medidas foram realizadas em um experimento de perfil instantâneo e os resultados de umidade na profundidade de 0,7 m mostraram que o TDR apresentou comportamento mais próximo ao obtido pelo tensiômetro, quando comparado à sonda de nêutrons e, na profundidade de 1 m, a sonda de nêutrons mostrou-se mais eficiente na determinação da umidade.

Oliveira et al. (2005) utilizaram o TDR 1502B da Tektronix conectado a um notebook para avaliar padrões de sazonalidade de água disponível em um Latossolo Vermelho da região do cerrado (Brasília), até 7 metros de profundidade. Como calibração, obteve-se uma equação polinomial de terceiro grau ($\theta = 9,56 \cdot 10^{-2} + 1,21 \cdot 10^{-2} \varepsilon + 0,46 \cdot 10^{-3} \varepsilon^2 - 2,12 \cdot 10^{-5} \varepsilon^3$). A técnica de TDR forneceu informações importantes para o estudo do efeito das raízes profundas na dinâmica da água no solo no ecossistema de cerrado.

Coelho et al. (2006) avaliaram seis modelos de ajuste de ε versus θ com dois modelos de TDR (Trase e TDR 100) em três solos (Latossolo Vermelho Escuro eutrófico, Neossolo fúlvico, Latossolo Amarelo distrófico coeso). Verificaram que os modelos pré-instalados nos equipamentos foram os que forneceram os piores desempenhos. Os melhores foram os modelos cúbicos específicos para cada solo e melhor modelo genérico foi o modelo de misturas dielétricas (Eq. 3). Os piores foram os modelos de Ledieu (ε vs $\theta^{0,5}$) e de Topp.

Devido às características particulares dos solos brasileiros mais intemperizados como a presença de altos teores de óxidos de ferro ou de materiais magnéticos, baixos teores de matéria orgânica, temperatura média elevada, dentre outros, existe ainda necessidades de mais pesquisas com diferentes equipamentos e um maior número de solos para se conhecer melhor

os limites de utilização, validade e as calibrações mais adequadas da TDR em solos brasileiros.

Neste trabalho é avaliado o desempenho de três equipamentos de TDR em 19 solos, considerando quatro diferentes modelos de ajustes (misturas dielétricas de 3 fases, Topp, e funções polinomiais gerais para cada equipamento, considerando todos os solos).

Parte Experimental

Equipamentos de TDR utilizados

Os equipamentos utilizados no teste e validação da técnica de TDR foram os seguintes (Figura 1):

- Modelo 1502 C, da Tektronix (a)
- Modelo TDR 100, da Campbell (b)
- Modelo Trase, da Soil Moisture (c)

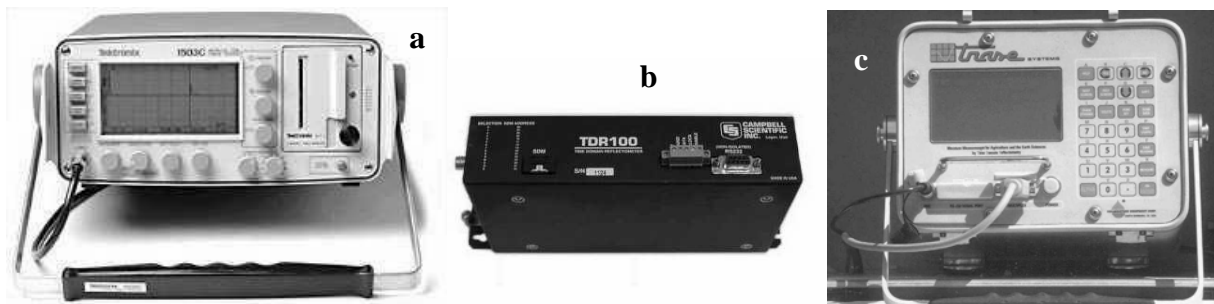


Figura 1. Equipamentos de TDR utilizados nos testes e validação da técnica para solos brasileiros.

As sondas utilizadas no TDR 1502 C 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. No caso do TDR Trase, foi utilizada a sonda padrão de 2 hastes com 15 cm de comprimento, comercializada pelo fabricante.

Solos testados

No total foram analisados 19 solos, sendo 7 em 2003, 6 em 2004 e 6 em 2005. A Tabela 1 apresenta a denominação de cada um dos solos, bem como o local da amostragem e algumas propriedades físicas das amostras preparadas para as determinações da constante dielétrica pela TDR. Conforme pode ser verificado, fizeram parte desta avaliação as seguintes

classes e quantidades de solos: 7 Latossolos, 3 Argissolos, 2 Nitossolos, 1 Organossolo, 1 Gleissolo, 1 Planossolo, 1 Luvisso, 1 Cambissolo e 2 Neossolos.

Cerca de 10 kg de cada solo foram coletados e levados ao laboratório de solos da Embrapa Instrumentação Agropecuária, em São Carlos, onde foram secos ao ar e preparados para as determinações das curvas de calibração de umidade pela técnica da TDR.

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

Solo	Local	ρ_s^* (g cm ⁻³)		ϕ^* cm ³ cm ⁻³	θ (cm ³ cm ⁻³)		n [*]	ρ_p^* g cm ⁻³
		Média	DP		Mínimo	Máximo		
Argissolo	Piracicaba	1,154	0,047	0,58	0,018	0,454	21	2,75
LVA	São Carlos	1,268	0,036	0,54	0,052	0,416	20	2,75
LV	Piracicaba	1,020	0,063	0,63	0,014	0,459	19	2,75
Nitossolo	Ribeirão Preto	1,007	0,052	0,63	0,027	0,521	21	2,75
Organossolo	Pariquera Açú	0,827	0,036	0,70	0,009	0,512	21	2,75
LA	São Carlos	1,235	0,054	0,55	0,009	0,428	19	2,75
Gleissolo	Araras	0,698	0,042	0,74	0,033	0,507	20	2,65
Planossolo	Guaíra	1,163	0,035	0,58	0,011	0,429	20	2,76
Luvisso	Marília	1,365	0,035	0,50	0,032	0,404	21	2,72
Latossolo	Ribeirão 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
Neossolo	São Carlos	1,623	0,026	0,385	0,071	0,323	12	2,64
Nitossolo	São Carlos	1,143	0,047	0,624	0,089	0,579	18	3,04
LVA _d	São Carlos	1,272	0,036	0,516	0,072	0,484	11	2,73
LV _d	São Carlos	1,270	0,048	0,562	0,108	0,528	20	2,90
LV _{ef}	São Carlos	1,254	0,042	0,585	0,059	0,503	17	3,02
PV-A	São Carlos	1,260	0,020	0,528	0,076	0,473	11	2,67
PV-bt	São Carlos	1,137	0,030	0,579	0,112	0,515	11	2,70

* ρ_s = densidade do solo, $\phi = (1 - \rho_s / \rho_p)$ = porosidade do solo, n = número de amostras e ρ_p = densidade das partículas

As amostras para as medidas pela TDR foram preparadas acondicionando-se os solos em cilindros de PVC de 3 polegadas, com 17 cm de comprimento. Na base inferior dos cilindros foram colocados papel de filtro, fixados com fita adesiva. Os solos foram

cuidadosamente inseridos no cilindro de modo a se obter amostras homogêneas. Todas as amostras foram colocadas em uma bandeja com água para um umedecimento inicial por ascensão capilar (cerca de 1 hora) e posteriormente saturadas por ascensão forçada (de baixo para cima, com água na bandeja até bem próximo ao topo da amostra) por cerca de 12 horas. Diferentes valores de umidade foram obtidos colocando-se as amostras, após a saturação, em estufa por 60°C em intervalos de tempos variáveis. Após atingir a umidade desejada a amostra era deixada esfriar e a sonda de 3 hastes inserida na amostra para a medida da constante dielétrica (ϵ_{solo}) com o TDR 1502 C e TDR 100. Posteriormente, a sonda de 3 hastes era retirada e a de 2 hastes inserida na amostra para a medida da umidade com o TDR Trase.

No final cada amostra era retirada do recipiente de PVC, colocada em uma bandeja de alumínio e seca em estufa a 100°C durante 24 h para a determinação da umidade gravimétrica à base de volume (θ).

Procedimento para a medida da umidade

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 1502 C, 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 1502 B 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) calculada pela 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 1502 C com o WinTDR99, também pela conexão serial. Para o Trase existe um teclado no próprio equipamento e software residente 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 foram comparados e avaliados estatisticamente com os valores de referência de umidade gravimétrica, utilizando a relação universal de Topp et al. (1980) : $\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \epsilon - 5,5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4,3 \times 10^{-6} \epsilon^3$,

uma equação polinomial de 3^o grau obtida com os dados dos 19 solos estudados (*Poli 3*) e o Modelo de misturas dielétricas de 3 fases dado por (Dobson et al. 1985):

$$\varepsilon_{\text{solo}}^{\alpha} = \theta\varepsilon_{\text{ag}}^{\alpha} + (1 - \phi)\varepsilon_{\text{s}}^{\alpha} + (\phi - \theta)\varepsilon_{\text{ar}}^{\alpha} \dots\dots\dots [2]$$

onde ε_{ag} , ε_{s} e ε_{ar} são as constantes dielétricas da água, parte sólida (partículas + matéria orgânica) e ar, respectivamente, ϕ ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) a porosidade e α 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 foi realizada através do erro padrão da estimativa (Spiegel, 1985):

$$S = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y_{\text{est}})^2}{n}} \dots\dots\dots [3]$$

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 para os 19 solos estudados. Observa-se que alguns solos apresentaram densidades bem baixas, como o Organossolo, o Gleissolo e o Latossolo de Ribeirão Preto.

Os resultados da constante dielétrica em função da umidade para os 19 solos são apresentados nas Figuras 2, 3 e 4 para os conjuntos analisados em 2005, 2004 e 2003, respectivamente, e na Figura 5 para todos os solos em conjunto. São apresentados em a) os resultados para os 3 equipamentos individualmente e em b), c) e d) para o 1502 C, TDR 100 e Trase, respectivamente (diferenciando o resultado de cada solo individualmente). Observa-se uma tendência muito similar de variação da constante dielétrica com a umidade dos solos para os conjuntos dos solos analisados em 2005, 2004 e 2003. Para os equipamentos 1502 C e TDR 100 as respostas foram muito parecidas e, em geral, se aproximaram bastante da equação de Topp et al. (1980). No entanto, os resultados obtidos com o Trase mostraram um desvio significativo dos demais equipamentos e da equação geral de Topp.

Alguns solos apresentaram um deslocamento da tendência da equação de Topp, como o Organossolo (Figura 2) e o Gleissolo (Figura 3) principalmente. Esse comportamento pode ser explicado pelo alto teor de matéria orgânica característico desses solos, que causam uma diminuição das constantes dielétricas por efeito de matriz (parte sólida dos solo). Além disso,

verifica-se também que esses solos são os que possuem os menores valores de densidade (Tabela 1) e, portanto, esse parâmetro pode estar também contribuindo para essa diferença.

A diferença visual observada nas Figuras 2, 3, 4 e 5, entre as respostas do Trase e dos outros 2 equipamentos (TDR 100 e 1502 C) pode ser melhor avaliada comparando-se diretamente as constantes dielétricas medidas, conforme mostrado na Figura 6. Verifica-se que as respostas do 1502 C e TDR 100 aproximam-se bastante da linha 1:1, mas para o Trase observam-se valores significativamente menores de constantes dielétricas comparado com o 1502 C. Observou-se também uma maior dispersão dos dados devido à diferenças entre solos.

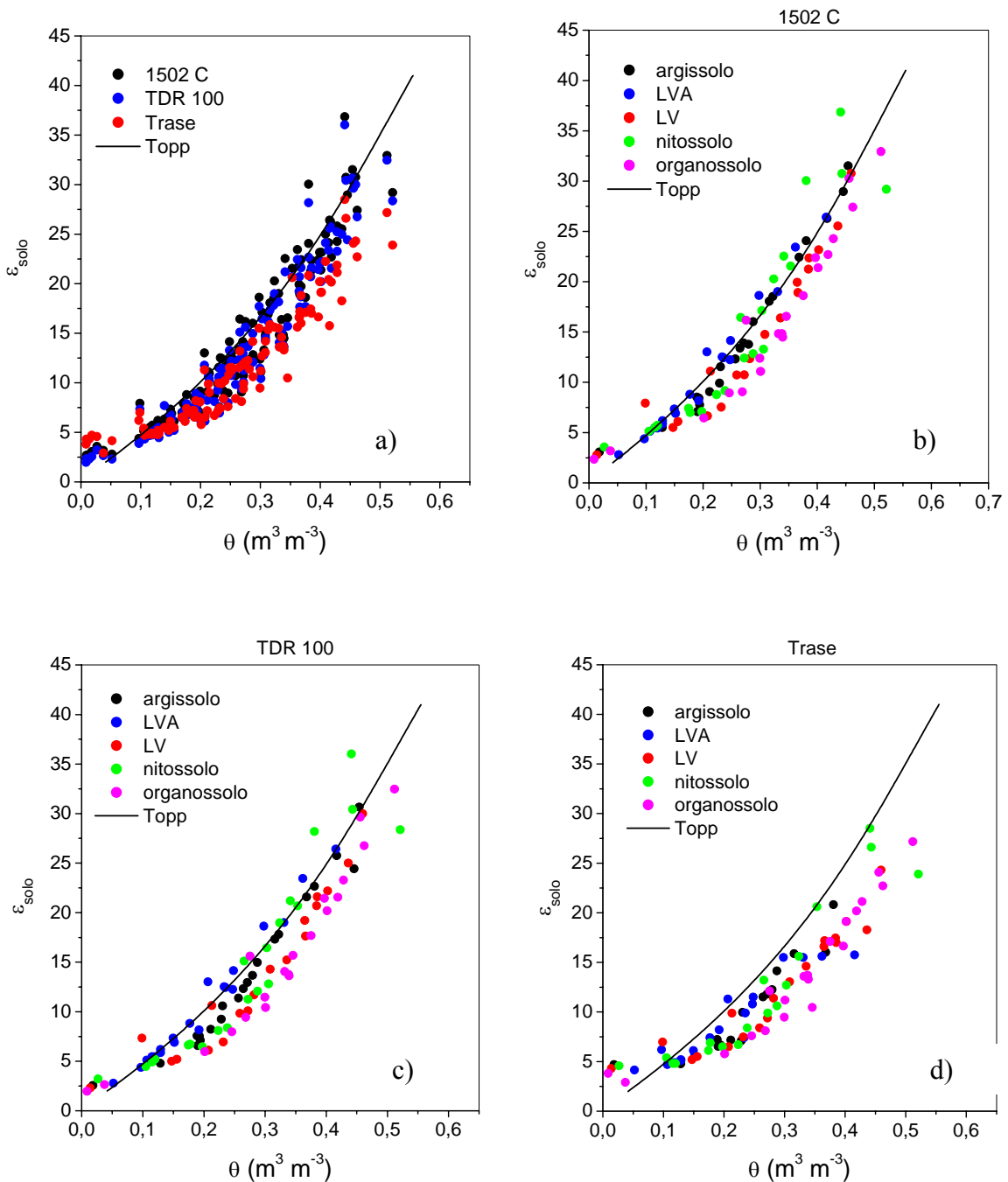


Figura 2. Variação da constante dielétrica medida com o TDR 1502 C (a, b), o TDR 100 (a, c) e o Trase (a, d) em função da umidade para os 6 solos avaliados em 2005.

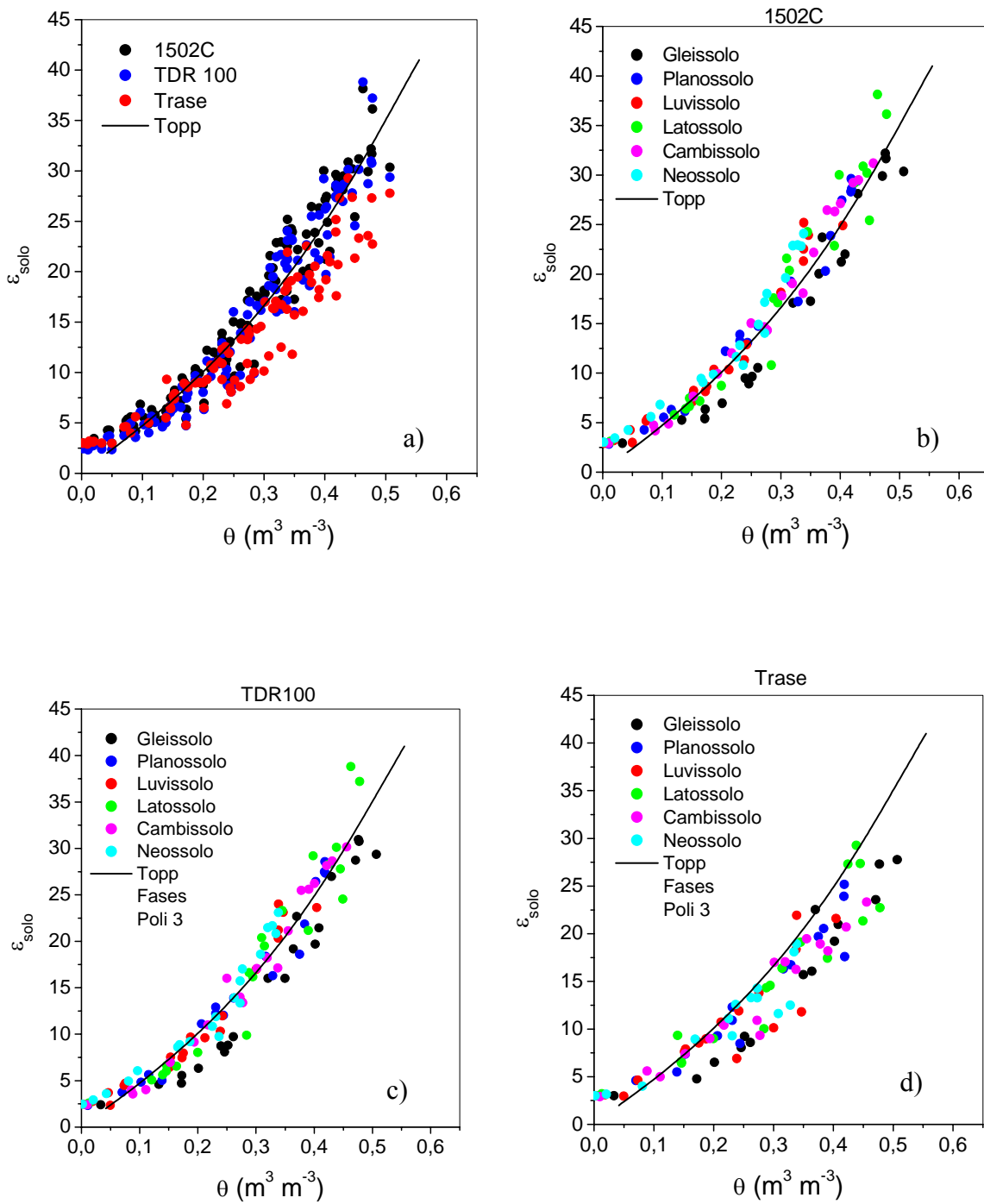


Figura 3. Variação da constante dielétrica medida com o TDR 1502 C (a, b), o TDR 100 (a, c) e o Trase (a, d) em função da umidade para os 6 solos avaliados em 2004.

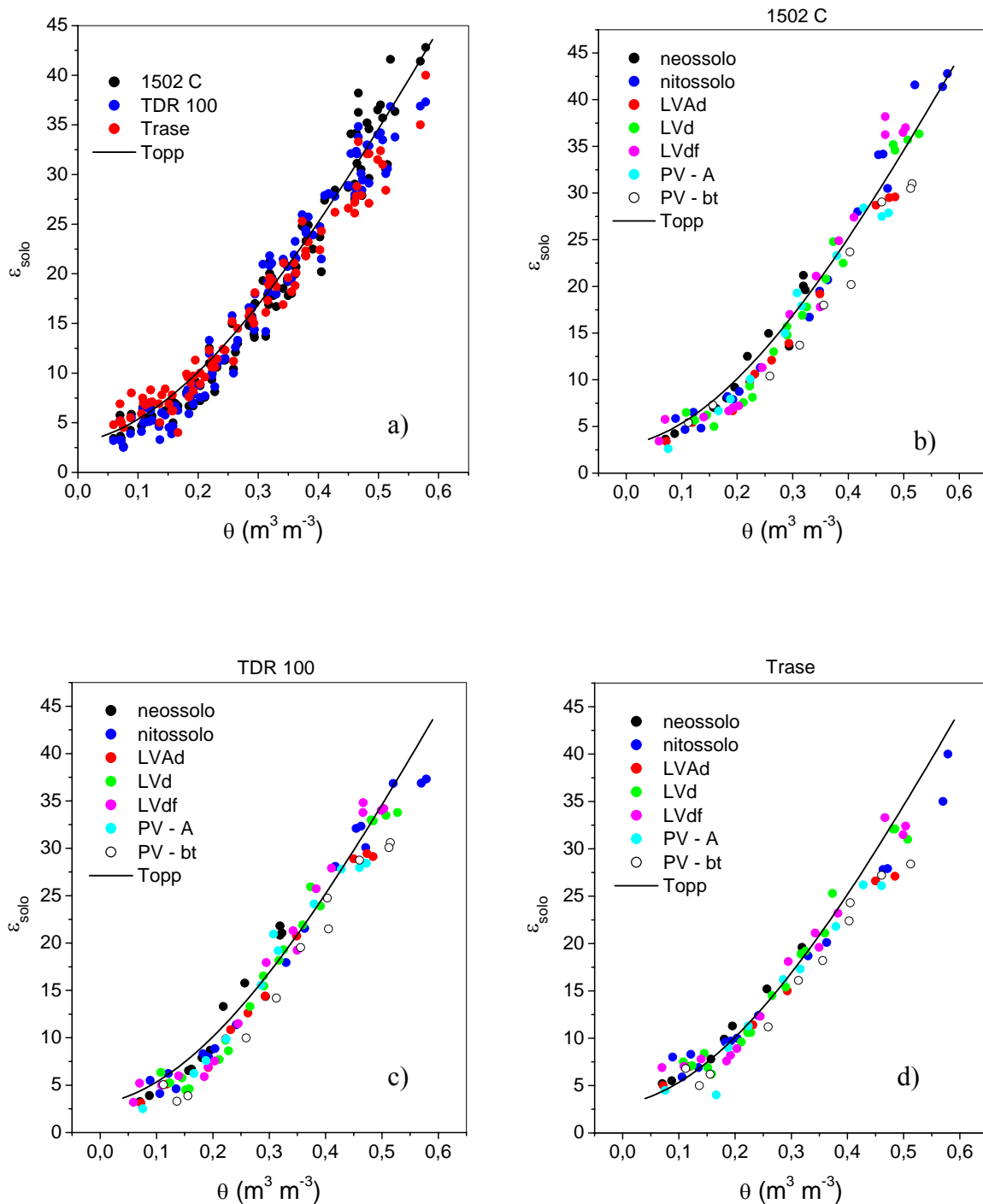


Figura 4. Variação da constante dielétrica medida com o TDR 1502 C (a, b), o TDR 100 (a, c) e o Trase (a, d) em função da umidade para os 7 solos avaliados em 2003.

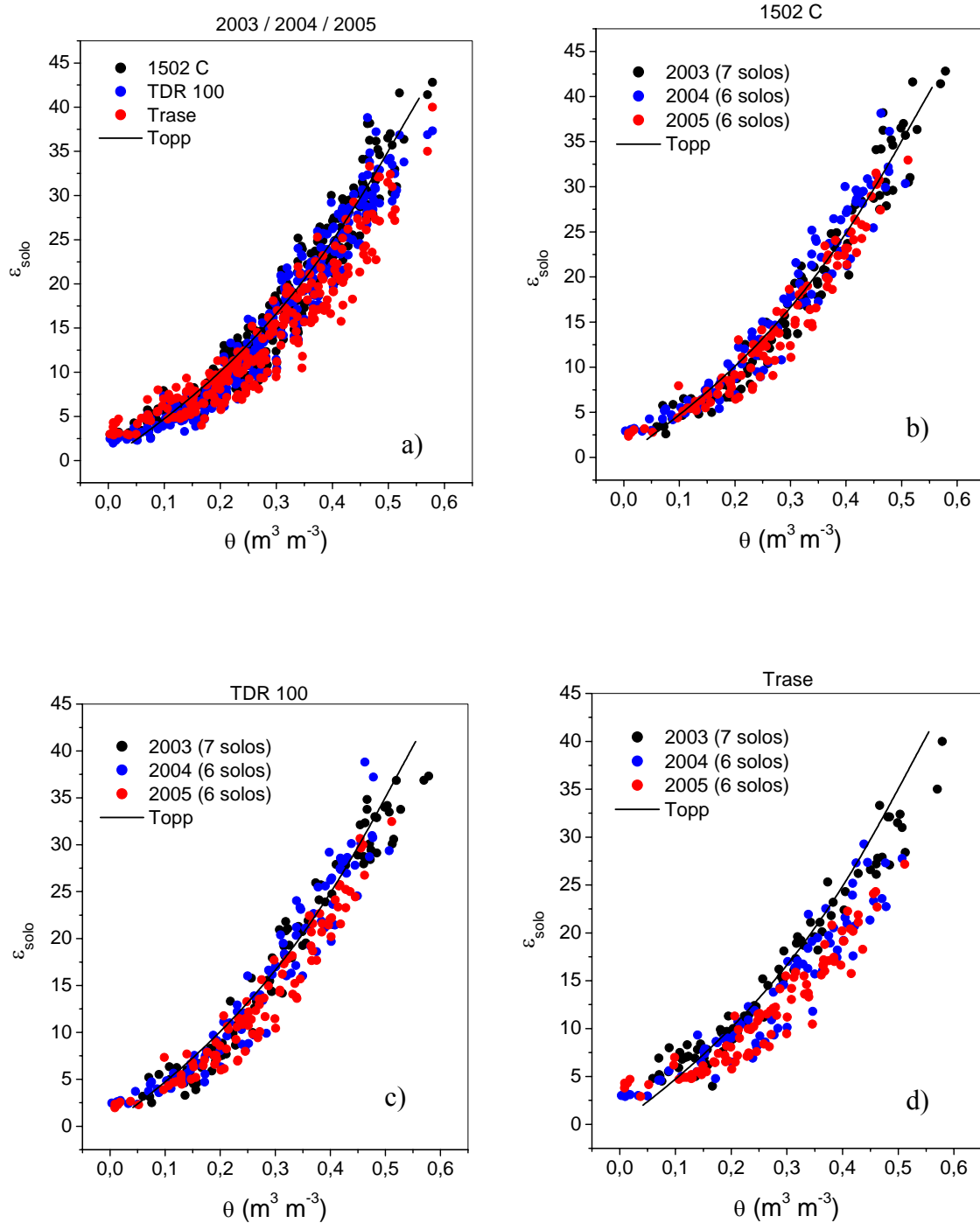


Figura 5. Variação da constante dielétrica medida com o TDR 1502 C (a, b), o TDR 100 (a, c) e o Trase (a, d) em função da umidade para os 19 solos avaliados em 2003, 2004 e 2005.

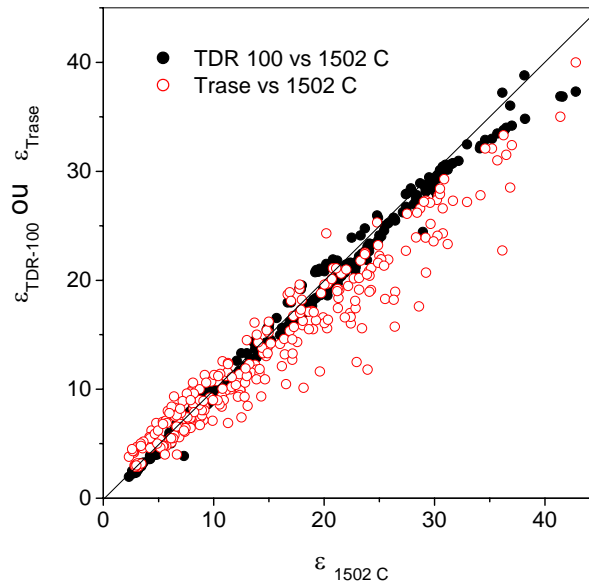


Figura 6. Comparação entre as constantes dielétricas medidas com o 1502 C e TDR 100, e o Trase, para os 19 solos.

O ajuste do modelo de misturas dielétricas de 3 fases (parâmetro α) nos dados apresentados nas Figuras 2, 3, 4 e 5 foi realizado por mínimos quadrados, utilizando a ferramenta *Solver* do *Excell*, da Eq. [2] nos dados de ϵ_{solo} vs θ medidos para os 2 conjuntos de equipamentos (TDR 100-1502 C e Trase). Para o ajuste do parâmetro α , do modelo de misturas dielétricas de 3 fases, considerou-se $\epsilon_s = 4$, $\epsilon_{\text{ag}} = 80$ e $\epsilon_{\text{ar}} = 1$ (Vaz et al. 2001) e os valores da porosidade estimados para cada amostra, por meio da medida das densidades. Os valores de α obtidos para os 2 conjuntos foram: 0,5958 (1502 C e TDR 100) e 0,4917 (Trase). As equações de ajuste obtidas pelos 3 métodos, com os respectivos parâmetros de ajuste são apresentados abaixo:

$$\text{Topp: } \theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \epsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \epsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \epsilon^3 \quad (\text{TDR 100, 1502 C e Trase})$$

$$3 \text{ fases: } \theta = (\epsilon^{0,5958} - 1,5236) / 12,6101 \quad (\text{TDR 100 e 1502 C})$$

$$\theta = (\epsilon^{0,4917} - 1,4084) / 7,6248 \quad (\text{Trase})$$

$$\text{Poli 3: } \theta = -3,166 \cdot 10^{-2} + 3,317 \cdot 10^{-2} \epsilon - 9,178 \cdot 10^{-4} \epsilon^2 + 1,130 \cdot 10^{-5} \epsilon \quad (\text{TDR 100 e 1502 C})$$

$$\theta = -7,28 \cdot 10^{-2} + 4,102 \cdot 10^{-2} \epsilon - 1,21 \cdot 10^{-3} \epsilon^2 + 1,527 \cdot 10^{-5} \epsilon \quad (\text{Trase})$$

A Figura 7 mostra uma comparação das equações de calibração obtidas e utilizadas (Fases, Poli3 e Topp) com todos os dados obtidos para os 19 solos para o TDR 100 e 1502 C em conjunto (a) e Trase (b) individualmente. Para o TDR 100 e 1502 C observa-se um bom desempenho das 3 equações (7a), mas para o Trase verifica-se que a equação de Topp não fornece bons resultados (7b). As Tabelas 2 e 3 apresentam os erros padrão da estimativa (Eq. 3) obtidos com a aplicação de cada um dos modelos de ajuste, respectivamente. No caso do conjunto TDR 100 e 1502 C obteve-se um erro menor para a estimativa da umidade com a equação polinomial de terceiro grau (Poli 3) obtida com os dados experimentais dos 19 solos ($S = 0,029 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e a equação de Topp e modelo de fase forneceram S muito próximos ($0,037$ e $0,038 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). No caso do Trase os erros para a estimativa da umidade foram de $0,048 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ com o uso da eq. de Topp e de $0,038 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para os modelos de misturas dielétricas de 3 fases e Poli3.

Conforme já mencionado anteriormente, observou-se um desvio maior de alguns solos, como o Gleissolo e o Organossolo. A Figura 8 apresenta a variação dos valores de S (Tabela 2 e 3) com a densidade média das amostras cada solo (Tabela 1). Observa-se um aumento significativo de S com a diminuição das densidades das amostras, fator este que muito provavelmente está relacionado com um maior teor de matéria orgânica e argila dos solos.

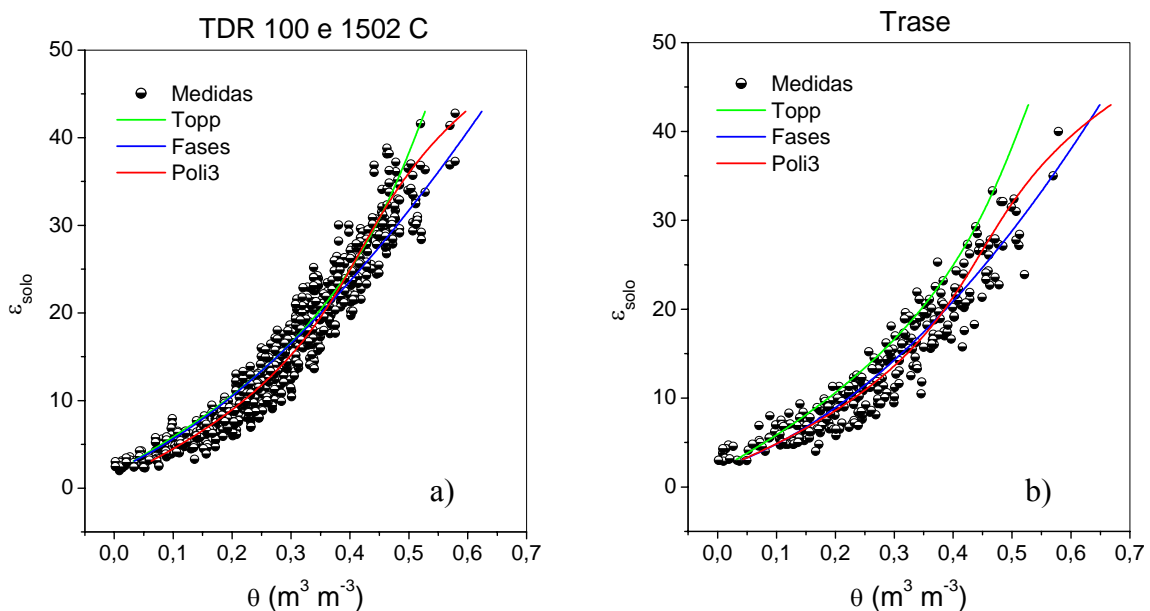


Figura 7. Equações ajustadas (misturas dielétricas de 3 fases e Poli3) e equação de Topp para o conjunto TDR 100 e 1502 C (a) e Trase (b) e dados medidos.

Tabela 2. Erros padrões da estimativa (Eq. 3) obtidos com os 3 modelos de ajuste para o 1502 C e TDR 100.

Ano da medida	Solo	S : Erro padrão da estimativa ($m^3 m^{-3}$)		
		Topp	3 Fases	Poli3
2005	Argissolo	0,034	0,033	0,018
	LVA	0,026	0,024	0,021
	LV	0,052	0,049	0,037
	Nitossolo	0,050	0,054	0,038
	Organossolo	0,063	0,059	0,046
	LA	0,029	0,026	0,018
2004	Gleissolo	0,056	0,051	0,038
	Planossolo	0,020	0,027	0,024
	Luvissolo	0,025	0,028	0,030
	Latossolo	0,037	0,050	0,034
	Cambissolo	0,023	0,030	0,025
	Neossolo	0,028	0,032	0,040
2003	Neossolo	0,037	0,036	0,031
	Nitossolo	0,035	0,037	0,024
	LVAd	0,038	0,032	0,022
	LVd	0,040	0,040	0,026
	LVef	0,037	0,048	0,028
	PV-A	0,036	0,034	0,027
	PV-bt	0,037	0,038	0,029
Média todos solos		0,037	0,038	0,029

Tabela 3. Erros padrões da estimativa (Eq. 3) obtidos com os 3 modelos de ajuste para o Trase.

Ano da medida	Solo	S : Erro padrão da estimativa ($m^3 m^{-3}$)		
		Topp	3 Fases	Poli3
2005	Argissolo	0,060	0,038	0,036
	LVA	0,053	0,033	0,032
	LV	0,074	0,047	0,044
	Nitossolo	0,065	0,045	0,043
	Organossolo	0,089	0,057	0,054
	LA	0,050	0,024	0,023
2004	Gleissolo	0,074	0,044	0,043
	Planossolo	0,043	0,030	0,028
	Luvissolo	0,051	0,043	0,041
	Latossolo	0,050	0,041	0,038
	Cambissolo	0,048	0,029	0,029
	Neossolo	0,038	0,030	0,032
2003	Neossolo	0,015	0,047	0,051
	Nitossolo	0,039	0,039	0,042
	LVAd	0,030	0,024	0,029
	LVd	0,026	0,042	0,039
	LVef	0,031	0,049	0,043
	PV-A	0,042	0,041	0,042
	PV-bt	0,043	0,025	0,026
Média todos solos		0,048	0,038	0,038

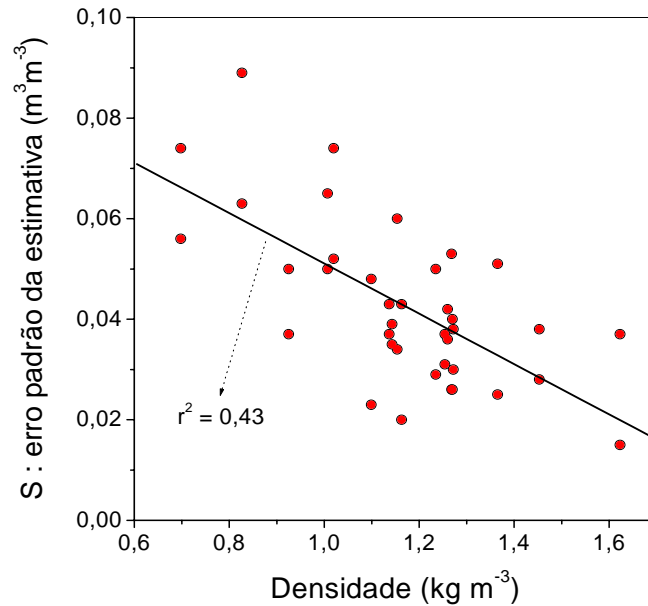


Figura 8. Valores de S (Tabela 2 e 3) e densidades médias (Tabela 1) para cada um dos solos, considerando o erro obtido pela uso da equação de Topp.

Os resultados obtidos mostraram que para as classes de solos mais representativos do país, pode-se utilizar a técnica da TDR com uma calibração única para todos os solos, obtendo-se um erro médio para todos os solos de 3 % para a medida da umidade. O modelo polinomial de 3^o grau apresentado forneceu os melhores resultados para os 3 equipamentos e deveria ser adotado, mas não descarta-se a utilização dos outros modelos. Deve-se apenas restringir o uso da equação de Topp para o Trase, onde o erro obtido foi de cerca de 5%, na média.

Conclusões

A resposta da constante dielétrica (ϵ) com a umidade (θ) obtida para os 19 solos analisados foi muito próxima daquela obtida para um conjunto representativo de amostras de solos de regiões temperadas, conforme publicado por Topp et al. (1980) e utilizado como referência na maioria dos trabalhos com TDR. Assim, conclui-se que não há diferença significativa da resposta da constante dielétrica da TDR entre a maioria dos solos tropicais e temperados. Apenas os solos orgânicos apresentam um desvio da resposta média representada pela equação de Topp, da mesma forma como já observado em outros trabalhos com solos das regiões temperadas. Dentre os 3 equipamentos testados, o TDR 100 e o 1502 C apresentaram

respostas de ε vs θ muito próximas e o Trase apresentou valores um pouco menores de ε , principalmente para as amostras de solos mais úmidos. Os resultados mostraram que a melhor equação de calibração foi obtida com o modelo polinomial de 3º grau ajustado com os dados experimentais dos 19 solos, com as seguintes equações:

$$\theta = -3,166.10^{-2} + 3,317.10^{-2} \varepsilon - 9,178.10^{-4} \varepsilon^2 + 1,130.10^{-5} \varepsilon \quad (\text{TDR 100 e 1502 C})$$

$$\theta = -7,28.10^{-2} + 4,102.10^{-2} \varepsilon - 1,21.10^{-3} \varepsilon^2 + 1,527.10^{-5} \varepsilon \quad (\text{Trase})$$

Com essas equações, os erros médios obtidos para a medida da umidade foram de cerca de 3% para o TDR 100 e 1502 C e 4% para o Trase, considerando todos os solos em conjunto.

Referências Bibliográficas

- Alharthi, A.; Lange, J. Soil water saturation: dielectric determination. **Water Resour. Res.** v.23, p.591-595, 1987.
- Ansoult, M.; De Backer, L.W.; Declercq, M. Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content in porous media. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.49, p.47-50, 1985.
- Bridge, B.J.; Sabburg, J.; Habash, K.O.; Ball, J.A.R.; Hancock, N.H. The dielectric behavior of clay soils and its application to time domain reflectometry. **Aust. J. Soil Res.** v.34, p.825-835, 1996.
- Coelho, E. F.; Vellame, L. M.; Coelho-Filho, M. A.; Ledo, C. A. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **R. bras. Ci. Solo**, v.30, n.1, p.41-48, 2006.
- Dalton, F.N.; Dasberg, S.; Rhoades, J.D.; Nadler, A. Time domain reflectometry: simultaneous in-situ measurement of soil water content and salinity BARD final report. Project n. US-868084. Bet Began, Israel, 1990.
- Dasberg, S.; Hopmans, J.W. Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.49, p.293-297, 1992.
- Davis, J. L.; Chudobiak, W.J. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. **Geol. Surv. Can. Part A Paper 75-1**, p.75-79, 1975.
- Dirksen, C.; Dasberg, S. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.57, p.660-667, 1993.

- 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. GE-** v.23, p.35-46, 1985.
- Drungil, C.E.C.; Abt, K.; Gish, T.J. Soil moisture determination in gravely soils with time domain reflectometry. **Trans. ASAE**, v.32, p.177-180, 1989.
- Embrapa. **Manual de Métodos de Análise de Solos**, 2a edição. Embrapa-CNPS, Rio de Janeiro, p.153-164, 1997.
- Ferré, P.A.; Rudolph, D.L.; Kachanoski, R.G. Spatial averaging of water content by time domain reflectometry: implications for twin rod probes with and without coating. **Water Resour. Res.** v.32, p.271-279.
- Giese, K.; Tiemann. Determination of the complex permittivity from thin sample time domain reflectometry. Improved analysis of the step response waveform. **Adv. Mol. Relax. Processes**, v.7, p.45-59, 1976.
- Grantz, D.A.; Perry, M.H.; Meizer, F.C. Using time-domain reflectometry to measure soil water in Hawaiian sugarcane. **Agron. J.** v.82, p.144-146, 1990.
- 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 Resour. Res.** v.27, p.857-864, 1991.
- Ledieu, J.; De Ridder, P.; De Clerck, P.; Dautrebande, S. A method measuring soil water moisture by time domain reflectometry. **J. Hydrol.** v.88, p.319-328, 1986.
- Malicki, M.A.; Plagge, R.; Roth, C.H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. **Eur. J. Soil Sci.** v.47, p.357-366, 1996.
- Melo-Filho, J. F.; Libardi, P. L. Estabilidade temporal de medidas do teor e do potencial mátrico da água no solo em uma transeção. **R. bras. Ci. Solo**, v.29, n.4, p.497-506, 2005.
- Mualem, Y.; Friedman, S.P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resour. Res.**, v.27, p.2771-2777, 1991.
- Nadler, A. Effect of soil structure on bulk electrical conductivity (EC) using the TDR and 4P techniques. **Soil Sci.** v.152, p.199-203, 1991.
- Nadler, A.; Dasberg, S.; Lapid, I. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.55, p.938-943, 1991.
- Nissen, H.H.; Moldrup, P.; Henriksen, K. Time domain reflectometry of nitrate transport in manure-amended soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.62, p.99-109, 1998.

- Noborio, K.; McInnes, K.J.; Heilman, J.L. Field measurement of soil electrical conductivity and water content by time domain reflectometry. **Comput. Electron. Agri.** v.11, p.131-142, 1994.
- Oliveira, R. S.; Bezerra, L.; Davidson, E. A.; Pinto, F.; Klink, C.A.; Nepstad, D.C.; Moreira, A. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil. **Functional Ecology**, v.19, p.574-581, 2005.
- Or, D.; Wraith, J.M. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: a physical model. **Water Resour. Res.** v.35, p.371-383, 1999.
- Pepin, S.; Plamondon, A.P.; Stein, J. Peat water content measurement using time domain reflectometry. **Can. J. For. Res.** v.22, p.534-540, 1992.
- Robinson, D.A.; Bell, J.P.; Bahelor, C.H. Influence of iron minerals on the determination of soil water content using dielectric techniques. **J. Hydrol.** v.161, p.169-180, 1994.
- 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. **J. Soil Sci.** v.43, p.1-13, 1992.
- Sen, P.N.; Scala, C.; Cohen, M.H. A self-similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads. **Geophysics**, v.46, p.781-795, 1981.
- Spiegel, M. **Estatística**, 2a edição, Mc Graw-Hill, 454p. 1985.
- Teixeira, C. F. A.; Moraes, S. O.; Simonete, M. A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **R. bras. Ci. Solo**, v.29, n.2, p.161-168, 2005.
- Teixeira, W. G.; Schroth, G.; Marques, J. D.; Huwe, B. Sampling and TDR probe insertion in the determination of the volumetric water content. **R. bras. Ci. Solo**, v.27, n.4, p.575-582, 2003.
- Tommaselli, J. T. G.; Bacchi, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesq. Agrop. bras.**, v.36, n.9, p.1145-1154, 2001.
- Topp G.C.; Davis, J.L. Detecting infiltration of water through soil cracks by time domain reflectometry. **Geoderma**, v.26, p.13-23, 1981.
- Topp G.C.; Davis, J.L.; Annan, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resour. Res.** 16, 574-582, 1980.
- Topp G.C.; Davis, J.L.; Bailey, W.G.; Zebchuk, W.D. The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe. **Can. J. Soil Sci.** v.64, p.313-321, 1984.

- Topp, G.C.; Watt, M.; Hayhoe, H.N. Point specific measurement and monitoring of soil water content with an emphasis on TDR. **Can. J. Soil Sci.** v.76, p.307-316, 1996.
- Vaz, C.M.P., J.W. Hopmans. Simultaneous measurement of soil strength and water content with a combined penetrometer-moisture probe. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.65, n.1, p.4-12, 2001.
- Vogeler, I.; Clothier, B.E.; Green, S.R.; Scotter, D.R.; Tillman, R.W. Characterizing water and solute movement by time domain reflectometry and disk permeametry. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.60, p.5-12, 1996.
- Weitz, A.M.; Grauel, W.T.; Keller, M.; Veldkamp, E. Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin. **Water Resour. Res.** v.33, p.1241-1249, 1997.
- Wraith, J.M.; Or, D. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: experimental evidence and hypothesis development. **Water Resour. Res.** v.35, p.361-369, 1999.
- Wyseure, G.C.L.; Mojid, M.A.; Malik, M.A. Measurement of volumetric water content by TDR in saline soils. **Eur. J. Soil Sci.** v.48, p.347-354, 1997.
- 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 Resour. Res.** v.33, p.2417-2421, 1997.