



## IMPORTÂNCIA DO MODELO DE CALIBRAÇÃO EMPREGADO NA ESTIMATIVA DA UMIDADE DE UM SOLO, COM A TÉCNICA DA TDR

*Heraldo Takao Hashiguti<sup>1</sup>; Anderson Takashi Hara<sup>1</sup>; Alex Elpidio dos Santos<sup>1</sup>; Rafael Verri Tavore<sup>1</sup>; Antonio Carlos Andrade Gonçalves<sup>2</sup>.*

**RESUMO:** O conhecimento da umidade do solo em um determinado momento é essencial para o estabelecimento de estratégias de manejo de água em um sistema agrícola, o que tem promovido a busca por métodos eficazes para a sua avaliação. Dentre eles, o emprego da técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) tem ganhado espaço nas últimas décadas, em função da qualidade das estimativas realizadas. No entanto, também este método pode levar a erros graves, caso as condições de contorno não sejam adequadamente consideradas. Na busca desta qualidade, diferentes modelos de calibração têm sido propostos. No presente trabalho procurou-se avaliar a qualidade de um modelo ajustado para um solo muito argiloso, comparando os valores medidos com os estimados pelo modelo. Foi feita a comparação do modelo desenvolvido com outros de relevância para o emprego da técnica, como o modelo padrão de Topp et al. (1980), além de outros. Os resultados obtidos evidenciam que a técnica da TDR pode ser empregada na avaliação da umidade do solo desde que especificidades sejam adequadamente consideradas, por meio de uma curva de calibração obtida para as condições locais.

**PALAVRAS-CHAVE:** TDR; umidade do solo; regressão; modelos.

### INTRODUÇÃO:

Dentre os diversos métodos desenvolvidos para a determinação da umidade do solo ( $\theta$ ), destaca-se a técnica de time domain reflectometry (TDR), que mede a constante dielétrica do solo ( $K_a$ ), cujo valor é relacionado com os valores de  $\theta$ . A TDR foi empregada em meios porosos desde que Topp et al. (1980) propuseram uma relação empírica entre estas variáveis.

A evolução do conhecimento acerca do emprego desta técnica levou à compreensão de que diversas características locais podem induzir a erros de estimativa da umidade do solo. Jacobsen & Schjonning (1993) mostram efeitos positivos de se considerar a densidade do solo na curva de calibração.

Trintinalha (2000) desenvolveu um trabalho no qual procurou avaliar o efeito da densidade do solo ( $D_s$ ) sobre a curva de calibração da TDR, em um Nitossolo Vermelho distroférico, com elevado conteúdo de argila.

Tommaselli & Bacchi (2001) estabeleceram modelos de calibração para cinco solos do estado de São Paulo e concluíram que as características do solo influenciaram o modelo de calibração, não sendo possível a adoção de um modelo único.

<sup>1</sup>Mestrandos do programa de pós graduação em agronomia - PGA, UEM. htakaoh@hotmail.com; haratakashi@hotmail.com; alexelpidio@hotmail.com; tverri\_rafael@hotmail.com.

<sup>2</sup> Professor Adjunto, Universidade Estadual de Maringá - UEM. acagoncalves@uem.br.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade de quatro modelos empregados para descrever a relação entre  $\theta$  e  $K_a$ , para os dados obtidos por Trintinalha (2000), em um Nitossolo Vermelho distroférico. Foi adotado o modelo que incorpora  $D_s$  nos coeficientes (Trintinalha), um modelo de segundo grau entre  $\theta$  e  $K_a$ , o modelo de Topp et al. (1980) e um modelo desenvolvido por Tommaselli & Bacchi (2001) para o solo mais argiloso com o qual os autores trabalharam, ou seja, um Latossolo Vermelho escuro.

## MATERIAL E MÉTODOS:

Os valores medidos de umidade do solo ( $\theta$ ) e constante dielétrica ( $K_a$ ) empregados neste trabalho foram obtidos de acordo com a metodologia descrita por Trintinalha (2000). Este modelo incorporou a densidade do solo ( $D_s$ ) nos seus coeficientes, conforme apresentado na equação 1:

$$\theta = [0,842538 - 0,725175D_s] + [-0,049601 + 0,060353D_s]K_a + [0,001044 - 0,001061D_s]K_a^2 \quad (1)$$

Este modelo foi utilizado para o cálculo de valores estimados de  $\theta$  a partir dos valores de  $K_a$  medidos, nas condições experimentais estabelecidas pelo autor. Estas condições envolveram a utilização de TFSA obtida de um Nitossolo Vermelho distroférico comumente encontrado na região Noroeste do estado do Paraná. Este solo apresentou  $756,8 \text{ gkg}^{-1}$  de argila,  $120,6 \text{ gkg}^{-1}$  de silte e  $122,6 \text{ gkg}^{-1}$  de areia.

Trintinalha (2000) gerou também um modelo polinomial de segundo grau sem a incorporação de  $D_s$  nos seus coeficientes. Por meio de regressão linear múltipla, o modelo teve definidos os coeficientes, conforme a equação 2:

$$\theta = 0,025563 + 0,018678K_a - 0,000159K_a^2 \quad (2)$$

Em função da importância do modelo construído por Topp et al. (1980) e de seu generalizado emprego em todo o mundo, este modelo também foi utilizado para se estimar a umidade do solo em função de  $K_a$ , para as condições experimentais descritas. Este modelo pode ser expresso na forma da equação 3:

$$\theta = [530 + 292K_a - 5,5K_a^2 + 0,043K_a^3]10^{-4} \quad (3)$$

Este modelo foi proposto com a premissa de ser válido para qualquer condição, sendo desnecessária a calibração local, como se supunha inicialmente.

Tommaselli & Bachi (2001) desenvolveram um trabalho com cinco solos de diferentes composições granulométricas e geraram modelos de calibração específicos. Para o presente trabalho foi selecionado o modelo referente ao solo caracterizado como Latossolo Vermelho Escuro (LE), o qual continha  $386 \text{ gkg}^{-1}$  de argila;  $232 \text{ gkg}^{-1}$  de silte;  $382 \text{ gkg}^{-1}$  e areia. Este modelo, conforme apresentado na equação 4, foi selecionado por estar definido para o solo com maior conteúdo de argila dentre os selecionados pelos autores e, portanto, ser supostamente mais semelhante ao Nitossolo Vermelho distroférico empregado por Trintinalha (2000).

$$\theta = 2.10^{-5} K_a^3 - 0,0015K_a^2 + 0,0393K_a - 0,0333 \quad (4)$$

Os quatro modelos descritos foram utilizados para a determinação da umidade, a partir das leituras de  $K_a$ . Os resultados obtidos permitiram a comparação entre eles, para a avaliação da qualidade dos mesmos. Esta qualidade foi avaliada em primeiro lugar com base no modelo linear ajustado aos valores de umidade medidos e estimados, para o qual se estabelece máxima qualidade em coeficiente angular igual à unidade e coeficiente linear igual a zero. O coeficiente de determinação obtido no ajuste do modelo também expressa a habilidade do modelo em descrever os valores obtidos, sendo também utilizado como um indicador de qualidade.

Para avaliar o desempenho dos modelos das equações foi aplicado o índice estatístico "c", denominado índice de confiança, que mostra o desempenho um método

em relação a valores padrões, a partir das indicações de dois coeficientes, calculado conforme a equação:

$$c = rd \quad (5)$$

Sendo (r) o coeficiente de correlação, o qual indica a precisão do modelo. O índice d é o coeficiente de concordância (Willmott et al, 1981), conforme equação 6, e indica o grau de exatidão entre os valores estimados e observados com variação entre zero (nenhuma concordância) e a unidade, que expressaria concordância perfeita entre os valores estimados e os observados.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (6)$$

em que,

Pi - valor estimado;

Oi - valor observado e

O - média dos valores observados.

Os critérios empregados para a avaliação do desempenho dos métodos são mostrados na Tabela 1, a partir da apresentação dos mesmos feita por Camargo & Sentelhas (1997).

Tabela 1 – Critérios para análise de desempenho de um modelo por meio do índice c.

Desempenho	Ótimo	Muito bom	Bom	Mediano	Ruim	Mau	Péssimo
Valor c	>0,85	0,85-0,76	0,75-0,66	0,65-0,61	0,60-0,51	0,50-0,41	<0,40

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

O resumo estatístico para os cerca de 720 valores de umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) e de constante dielétrica ( $K_a$ ), obtidos nos 23 recipientes utilizados do experimento de Trintinalha (2000), é apresentado na Tabela 2. Apresenta-se também, nesta Tabela, o resumo estatístico para os 23 valores de densidade do solo ( $D_s$ ), obtidos, respectivamente, nos recipientes. Pode-se observar que  $\theta$  variou de valores maiores que aquele referente à capacidade de campo para este solo ( $\theta_{cc} = 0,44 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ) até valores menores que aquele referente ao ponto de murcha ( $\theta_{pm} = 0,34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ), de acordo com a curva de retenção de água no solo.

Tabela 2 – Resumo estatístico dos valores medidos da umidade do solo,  $\theta$ , ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ) da constante dielétrica,  $K_a$ , e da densidade do solo,  $D_s$ , ( $\text{Mgm}^{-3}$ ).

Estatística	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
$\theta$	0,14	0,57	0,38	0,10	26,76
$K_a$	7,70	41,46	24,72	8,66	35,05
$D_s$	0,95	1,38	1,15	0,15	13,41

A variação da  $D_s$  provavelmente contribuiu para esta maior amplitude de valores de  $K_a$ , o que expressaria o efeito de  $D_s$  sobre o modelo de calibração, conforme evidenciado estatisticamente no modelo estabelecido por Trintinalha (2000).

A Tabela 3 apresenta os valores dos coeficientes angular e linear do modelo linear ajustado na Figura 1, bem como o coeficiente de determinação  $R^2$  obtido a partir da análise de regressão linear estabelecida.

Tabela 3 – Coeficiente angular (a), linear (b) e de determinação ( $R^2$ ) para os quatro modelos.

Coefficiente	Trintinalha	Topp	Polinomial	Tommaselli
a	0,934	0,870	0,891	0,537
b	0,027	0,160	0,043	0,142

Na Figura 1 são apresentados os quatro modelos lineares obtidos para os modelos avaliados no trabalho. Pode-se observar a tendência do modelo de Topp em superestimar fortemente os valores de umidade, em toda a faixa de valores estudada, o que torna este modelo inadequado para as condições locais. Essencial destacar que o erro sistemático, correspondente à distancia entre a linha 1:1 e a linha referente ao modelo, neste caso, é da ordem de  $0,15 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ , em média. Considerando os valores de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha apresentados para este solo, a faixa de água disponível no mesmo corresponde a  $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ . Assim, evidencia-se que a utilização do modelo de Topp et al. (1980) está associada a um erro sistemático, em média, da ordem de 150% da água disponível.

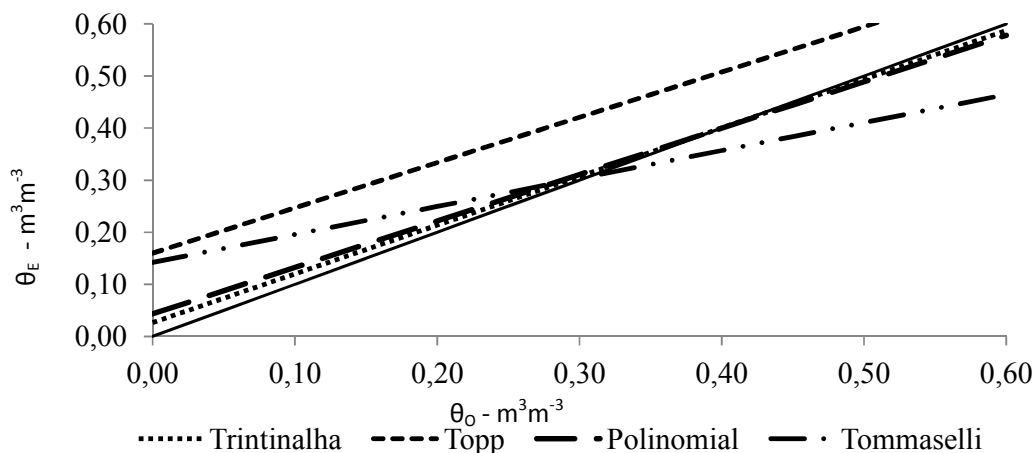


Figura 1 – Retas referentes aos modelos lineares ajustados aos pares de valores de umidade, para os quatro modelos adotados, em relação à reta 1:1.

De acordo com o apresentado na Figura 1, o modelo polinomial ajustado às condições locais permite que, em média, as estimativas não apresentem erro sistemático de medida e que o modelo com a incorporação da Ds seja ainda melhor, conforme a proximidades das retas em relação à reta 1:1. Por outro lado, o modelo de Tommaselli revela uma forte tendência de superestimar os valores de umidade na faixa de menores valores e de subestimar, na condição de solo mais úmido, mostrando-se fortemente inadequado para o solo do presente trabalho.

Na tabela 4 são apresentados os valores calculados para os quatro modelos, dos índices d de Willmott (1981), verifica-se que o modelo de Trintinalha, incorporando a Ds, foi o melhor modelo, sendo seguido de perto pelo modelo polinomial. Isto sugere que, em termos médios, a incorporação da Ds não significou grande ganho de qualidade. Por outro lado, o índice d para o modelo de Topp revela a presença do erro sistemático diagnosticado, assumindo o menor valor, 0,75. Este índice apresentou relativa sensibilidade à inadequação do modelo de Tommaselli, assumindo o valor de 0,86. Isto conjugado com a maior dispersão dos valores em torno do modelo, expresso pelo coeficiente de correlação, promoveu o segundo menor índice de desempenho, igual a 0,79, que foi maior apenas que o identificado para o modelo de Topp, igual a 0,71.

Tabela 4 – Valores do índice (d) de Willmott, de correlação (r) e índice de desempenho (c).

Indicadores	Trintinalha	Topp	Polinomial	Tommaselli (LE)
d	0,98	0,75	0,98	0,86
r	0,97	0,96	0,96	0,92
c	0,95	0,71	0,93	0,79

De acordo com a Tabela 1, os modelos polinomial e de Trintinalha podem ser caracterizados como Ótimos, enquanto o de Tommaselli seria classificado como Muito Bom e o de Topp como Bom. Para o fenômeno em estudo, no entanto, um cuidado adicional precisa ser tomado, pois esta classificação perde sustentação frente à evidência dos fatos. Os erros associados aos modelos de Topp e de Tommaselli, quando empregados neste solo, podem ser maiores que o equivalente a toda a faixa de água disponível, o que os torna, na verdade, inadequados para a utilização neste caso.

## **CONCLUSÕES:**

Dentre os modelos avaliados, o que incorpora a Ds nos coeficientes apresentou melhor desempenho, seguido do modelo polinomial de segundo grau ajustado localmente;

O emprego do modelo geral de Topp revelou-se completamente inadequado;

O emprego de um método desenvolvido para outro solo argiloso revelou-se inadequado, explicitando-se o risco de se utilizar um modelo desenvolvido em outras condições, para a condição local;

O indicador de qualidade baseado no índice “d” de Willmott revelou-se útil para a análise comparativa de modelos de calibração para a TDR. A classificação geral existente, no entanto, não pode ser empregada no contexto do presente trabalho.

## **REFERÊNCIAS:**

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.5, p.89-97, 1997.

JACOBSEN, O.H. & SCHJONNING, P. A laboratory calibration of time domain Reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. J. Hydrol., 151:147-157, 1993.

TOMASELLI, J. T. & BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. Pesq. Agropec. Bras. v.36, n.9, p.1145-1154. 2001.

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

TRINTINALHA, A. T.; GONGALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; TORMENA, C. A.; BERTONHA, A.; TSUKADA, J. Efeito da instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica TDR em um Nitossolo Vermelho Distroférico. Acta Scientiarum, v.23, p.1165-1171. 2001.

TRINTINALHA, M.A. Avaliação da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) na determinação da umidade em um Nitossolo Vermelho eutroférico. Maringá, Universidade Estadual de Maringá, 2000. 64p. (Tese de Mestrado)

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