



Ciência Rural

ISSN: 0103-8478

cienciarural@mail.ufsm.br

Universidade Federal de Santa Maria

Brasil

Ivonir Gubiani, Paulo; Reinert, Dalvan José; Reichert, José Miguel; Somavila Gelain,  
Neiva

Condição de contorno para calibração de reflectômetro usado para medição de água no  
solo

Ciência Rural, vol. 45, núm. 8, agosto, 2015, pp. 1412-1417

Universidade Federal de Santa Maria

Santa Maria, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33142184011>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc



Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

## Condição de contorno para calibração de reflectômetro usado para medição de água no solo

Boundary conditions for calibration of reflectometer used to measure soil water

**Paulo Ivonir Gubiani<sup>I\*</sup> Dalvan José Reinert<sup>I</sup> José Miguel Reichert<sup>I</sup>  
Neiva Somavila Gelain<sup>II</sup>**

### RESUMO

A reflectometria no domínio do tempo (TDR, na sigla em inglês) é uma técnica indireta usada para estimar o conteúdo de água do solo ( $\theta$ ) em função de sua constante dielétrica aparente ( $K_a$ ). Neste estudo, o objetivo principal foi investigar as consequências de se incluir ou não medidas de  $K_a$  em água, na elaboração da curva de calibração do TDR. Foram avaliados horizontes de solo com  $0,13\text{kg kg}^{-1}$ ,  $0,23\text{kg kg}^{-1}$  e  $0,64\text{kg kg}^{-1}$  de argila. Para cada horizonte, a  $K_a$  foi medida em amostras desde solo seco até solo saturado. Adicionalmente, a  $K_a$  foi medida apenas em água. As medições foram feitas usando-se cabos coaxiais RGC58, 50Ohm e sensor dupla haste metálica de 19cm. Para cada horizonte, foram formados dois conjuntos de dados com  $\theta$  e  $K_a$ , um com e outro sem as medidas de  $K_a$  em água. Em cada conjunto, foi ajustada uma equação polinomial de terceiro grau, estimando  $\theta$  em função de  $K_a$ . Com a inclusão das medidas de  $K_a$  em água, o polinômio de terceiro grau se ajustou melhor ao extremo saturado e preveniu erros na estimativa de  $\theta$ . Como não há garantia de que as medidas de  $K_a$  de campo não serão maiores que as medidas de  $K_a$  das amostras saturadas em laboratório, recomenda-se a inclusão de medidas de  $K_a$  em água para obtenção da curva de calibração. Sem esse procedimento e sem verificação de campo das medidas de  $K_a$ , erros na estimativa de  $\theta$  da ordem de  $0,1\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  podem ocorrer facilmente.

**Palavras-chave:** medição de água no solo, reflectometria, constante dielétrica.

### ABSTRACT

The time domain reflectometry is a technique used to estimate soil water content ( $\theta$ ) as a function of its apparent dielectric constant ( $K_a$ ). In this study the main objective was to investigate the consequences of including or not measures of  $K_a$  in water on the TDR calibration curve. Three horizons with different clay content were used:  $0.13\text{kg kg}^{-1}$ ,  $0.23\text{kg kg}^{-1}$  and  $0.64\text{kg kg}^{-1}$ . In each horizon,  $K_a$  was measured from dry to saturated soil. Additionally,  $K_a$  was

measured in water. Measurements were made using coaxial cables RGC58, 50Ohms and double stainless rod of 19cm. For each soil two data sets with  $\theta$  and  $K_a$  were formed, one with and another without the addition of  $K_a$  measured in water. In each set a cubic polynomial equation was adjusted, estimating  $\theta$  as a function of  $K_a$ . With the inclusion of  $K_a$  measured in water the cubic polynomial adjusted better the extreme saturated and avoided errors in the estimated  $\theta$ . Since there is no certainty that the measures of  $K_a$  on field will not be greater than the measures of  $K_a$  in the saturated samples in the laboratory, it's recommend to include measures of  $K_a$  in water to obtain the calibration curve. Without this procedure and no field verification of  $K_a$  measurements, errors in estimated  $\theta$  of the order of  $0.1\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  can easily occur.

**Key words:** measurement of soil water, reflectometry, dielectric constant.

### INTRODUÇÃO

O monitoramento do conteúdo de água no solo é necessário em estudos sobre a dinâmica da água no solo e para planejamento do uso racional da água nas atividades agrícolas. Métodos diretos de medição do conteúdo de água por meio da coleta de amostras de solo são laboriosos e destrutivos, o que inviabiliza estudos detalhados sobre a dinâmica da água no solo. Diferentemente, os métodos indiretos não destrutivos são, na maioria, automatizados e fornecem medidas detalhadas do conteúdo de água no solo no espaço e no tempo.

Entre os métodos indiretos, a reflectometria no domínio do tempo (TDR, na sigla em inglês) é um

<sup>I</sup>Departamento de Solos, Centro de Ciências Rurais (CCR), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: paulogubiani@gmail.com. <sup>\*</sup>Autor para correspondência.

<sup>II</sup>Agrosul Assessoria Agrônômica, Itaqui, RS, Brasil.

método bastante usado no monitoramento do conteúdo de água no solo. Conforme descrito em JONES et al. (2002), a aplicação dessa técnica em solos baseia-se na mudança da constante dielétrica aparente do solo ( $K_a$ ), causada pela mudança no conteúdo de água. Essa interferência é capturada pelo TDR por meio de medidas da velocidade de propagação de um pulso elétrico em guias metálicas inseridas no solo, onde a velocidade é inversamente proporcional ao valor de  $K_a$ . O valor de  $K_a$  de um solo seco fica entre 3 e 5, dependendo de sua composição mineralógica e orgânica, enquanto que a água pura tem valor de  $K_a$  em torno de 81.

À medida que aumenta o conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta$ ,  $m^3 m^{-3}$ ), a  $K_a$  (adimensional) também aumenta. A relação entre  $\theta$  e  $K_a$  é conhecida como curva de calibração, a qual possibilita estimar  $\theta$  em função de  $K_a$ . Normalmente, os TDR para medição da  $K_a$  em solos já fornecem de fábrica uma curva de calibração genérica, a equação proposta por TOPP et al. (1980). Porém, a curva de calibração genérica fornecida pelo fabricante pode não estimar adequadamente o  $\theta$  (TOMAZELLI & BACCHI, 2001; COELHO et al., 2006; ELAIUY et al. 2009; KAISER et al., 2010; SANTOS et al., 2010).

Em alguns casos, há necessidade ainda de corrigir a calibração obtida em laboratório com medidas posteriores de campo (STANGL et al., 2009), procedimento que pode ser feito individualmente por guia de TDR (SERRARENS et al., 2000). O aumento no comprimento do cabo entre o emissor do pulso elétrico e a guia de medição instalada no campo pode atenuar o sinal refletido e alterar o valor de  $K_a$  (COELHO et al., 2005). Assim, a obtenção de curva de calibração específica para cada solo e comprimento de cabo usado no campo é uma prática recomendada para melhorar a acurácia da estimativa de  $\theta$ .

Para obtenção de uma curva de calibração representativa, a  $K_a$  deve ser medida desde solo com mínimo (solo praticamente sem água) até máximo  $\theta$  (solo saturado). Além disso, a inclusão no conjunto de dados da  $K_a$  medida apenas em água fornece uma condição de contorno para o ajuste da equação de calibração que previne erros de estimativa no campo, principalmente para  $\theta$  próximos da saturação.

Devido à incapacidade de representar toda a variabilidade da estrutura do solo do campo nas amostras usadas para a calibração, a  $K_a$  medida em solo saturado no campo pode ser maior que a  $K_a$  medida nas amostras de solo saturadas usadas para a calibração. Por isso, é importante garantir que a extrapolação da curva de calibração estime conteúdos de água que sigam uma tendência coerente

em direção à  $K_a$  medida apenas em água. Assim, o objetivo deste trabalho é investigar a interferência da inclusão de medidas de  $K_a$  em água na curva de calibração do TDR100.

## MATERIAL E MÉTODOS

A curva de calibração do TDR100 foi obtida para a camada de solo de 0-0,8m do horizonte A e da camada de 1,5-2,0m do horizonte Bt de um Argissolo, respectivamente, denominados de Argissolo-A ( $0,13\text{kg kg}^{-1}$  de argila,  $0,10\text{kg kg}^{-1}$  de silte e  $0,77\text{kg kg}^{-1}$  de areia) e Argissolo-Bt ( $0,23\text{kg kg}^{-1}$  de argila,  $0,13\text{kg kg}^{-1}$  de silte e  $0,64\text{kg kg}^{-1}$  de areia) e da camada de 0-0,3m do horizonte A de um Latossolo, denominado de Latossolo-A ( $0,64\text{kg kg}^{-1}$  de argila,  $0,24\text{kg kg}^{-1}$  de silte e  $0,12\text{kg kg}^{-1}$  de areia).

Em cada horizonte, aproximadamente 50kg de solo foi coletado, colocado para secar ao ar e passado por peneira de 2mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA). O conteúdo gravimétrico de água da TFSA foi quantificado em estufa a  $105^\circ\text{C}$  por 24 horas. Na sequência, quatro amostras de 3,5kg da TFSA foram colocadas na estufa a  $105^\circ\text{C}$ . A mudança de massa dessas amostras foi monitorada ao longo do tempo, a fim de se obter amostras com conteúdos de água diferentes entre si e menores que o conteúdo de água da TFSA. Em várias outras amostras de 3,5kg da TFSA, água foi adicionada de modo a aumentar gradativamente o seu conteúdo até a condição de umidade que ainda possibilitava a homogeneização da amostra. Devido ao aumento da retenção de água com o aumento no teor de argila, o número de amostras foi crescente na sequência Argissolo-A (10 amostras), Argissolo-B (11 amostras) e Latossolo-A (15 amostras), a fim de se manter um intervalo de aproximadamente  $0,05\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  entre uma amostra e outra.

As amostras foram transferidas para colunas de PVC, com diâmetro de 10cm e altura de 30cm. A quantidade de solo transferida e acondicionada nas colunas de PVC (em camadas de 2cm de espessura) foi calculada para que as amostras ficassem com densidade mais próxima da densidade de campo ( $1590\text{kg m}^{-3}$  para o Argissolo-A,  $1555\text{kg m}^{-3}$  para o Argissolo-Bt e  $1300\text{kg m}^{-3}$  para o Latossolo-A). Também foi preparada uma amostra de solo saturado numa coluna de PVC e outra coluna de PVC contendo apenas água.

No centro de cada coluna de PVC foi inserida verticalmente uma sonda de TDR, construída com duas hastes de aço inoxidável de 0,5cm de diâmetro e 19cm de comprimento. O corpo de fixação

da sonda foi construído de resina epóxi, que manteve o paralelismo das guias espaçadas 4,5cm.

A constante dielétrica das amostras foi medida com diferentes comprimentos de cabo. Para o Argissolo, foi usado cabo coaxial RGC58, 50Ohm, com comprimento de 3, 10 e 25m. Para o Latossolo, foi usado apenas o cabo de 3m, porque não se tinha evidências de efeito do comprimento do cabo e porque a calibração para o Latossolo foi feita em período anterior ao da calibração para o Argissolo. Após indícios de campo, com o uso da curva de calibração do Latossolo, de que poderia haver efeito do comprimento do cabo, optou-se por investigar esse fator no Argissolo.

As sondas foram conectadas a um multiplexador SDMX50, ligado ao TDR100, e este a um datalogger CR10X para o armazenamento dos dados (Campbell Scientific, Inc.). Em cada amostra, a constante dielétrica ( $K_a$ , adimensional) foi medida no mínimo cinco vezes. O conteúdo de água de cada amostra foi expresso em base volumétrica ( $\theta$ ,  $m^3 m^{-3}$ ). Aos dados medidos foi ajustado o modelopolinomial de terceiro grau:  $\theta = a + bK_a + cK_a^2 + dK_a^3$  (1) em que  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são os parâmetros de ajuste do modelo, respectivamente, para o termo constante, de primeiro, segundo e terceiro grau.

A equação (1) foi ajustada com e sem as medidas de  $K_a$  feitas em água, por análise de regressão, e a significância dos parâmetros do modelo foi avaliada pelo teste t a 5%. As equações de calibração obtidas foram comparadas com a equação polinomial

de terceiro grau obtida por TOPP et al. (1980), na qual o valor dos parâmetro são:  $a = -5,3 \cdot 10^{-2}$ ;  $b = 2,92 \cdot 10^{-2}$ ;  $c = -5,5 \cdot 10^{-4}$ ;  $d = -4,3 \cdot 10^{-6}$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O número de amostras que pode ser preparado foi diferente para cada solo, devido às diferenças do intervalo de conteúdo de água entre solo seco e solo saturado ( $\theta_s$ ) (Tabela 1). O  $\theta_s$  aumentou na sequência Argissolo-A ( $0,44 m^3 m^{-3}$ ), Argissolo-B ( $0,45 m^3 m^{-3}$ ) e Latossolo-A ( $0,58 m^3 m^{-3}$ ), na mesma sequência do aumento no teor de argila (0,13, 0,23, e, 0,64 kg kg<sup>-1</sup>, respectivamente).

Na amostra de solo seco em estufa a 105°C por 24h do Latossolo-A, o sinal de reflexão do pulso elétrico não teve resolução suficiente para a medição da  $K_a$  pelo TDR100. Excluindo-se essa amostra, a  $K_a$  média ficou em torno de 3,5 para todos os solos na condição de mínimo  $\theta$ , mas, na saturação, ela foi bem diferente entre os solos (27,39 no Argissolo-A; 35,60 no Argissolo-B e 42,50 no Latossolo-A) devido às diferenças no  $\theta_s$  (Tabela 1).

No Latossolo-A, o desvio padrão da  $K_a$  foi pouco alterado em toda a faixa de  $\theta$  (Tabela 1). Diferentemente, no Argissolo-A e no Argissolo-B, houve aumento do desvio padrão da  $K_a$  com o aumento de  $\theta$ , indicando aumento da variabilidade de  $K_a$  por efeito do comprimento dos cabos.

A equação (1) ajustou-se bem aos dados medidos, pois o  $R^2$  foi maior que 0,97 para todos os

Tabela 1 - Médias e desvio padrão da constante dielétrica ( $K_a$ ) para cada conteúdo de água ( $\theta$ ) da série de amostras de cada solo.

Argissolo-A <sup>(1)</sup>		Argissolo-Bt <sup>(1)</sup>		Latossolo-A <sup>(2)</sup>	
$\theta, m^3 m^{-3}$	$K_a$	$\theta, m^3 m^{-3}$	$K_a$	$\theta, m^3 m^{-3}$	$K_a$
0,00	3,75 (0,19)	0,00	3,34 (0,07)	0,01	3,85 (0,01)
0,02	4,03 (0,24)	0,04	4,8 (0,35)	0,12	5,35 (0,02)
0,05	4,54 (0,11)	0,09	5,68 (0,19)	0,13	6,25 (0,03)
0,10	6,94 (0,17)	0,11	5,96 (0,17)	0,17	6,95 (0,03)
0,17	12,20 (0,37)	0,14	6,46 (0,17)	0,21	8,39 (0,01)
0,22	15,83 (0,58)	0,15	8,24 (0,22)	0,22	10,50 (0,04)
0,26	17,92 (0,36)	0,17	10,37 (0,33)	0,27	13,88 (0,04)
0,31	20,74 (0,73)	0,24	12,89 (0,49)	0,31	17,30 (0,05)
0,44	27,39 (1,01)	0,30	16,72 (0,82)	0,34	21,39 (0,05)
1,00	83,56 (1,27)	0,45	35,60 (1,81)	0,39	27,19 (0,3)
-	-	1,00	84,78 (1,31)	0,41	33,54 (0,09)
-	-	-	-	0,45	35,54 (0,12)
-	-	-	-	0,47	35,17 (0,25)
-	-	-	-	0,58	42,50 (0,23)
-	-	-	-	1,00	80,94 (0,03)

<sup>(1)</sup>As medidas de  $K_a$  foram feitas com cabos coaxiais 50Ohm de 3, 10 e 25m. <sup>(2)</sup>As medidas de  $K_a$  foram feitas somente com cabos coaxiais 50Ohm de 3m. Números entre parênteses representam o desvio padrão.

ajustes. Porém, em seis dos 14 ajustes (Argissolo-A-3-c, Argissolo-A-10-c, Argissolo-A-25-c, Argissolo-Bt-3-c, Argissolo-Bt-10-c e Argissolo-Bt-25-c), um ou mais parâmetros de ajuste não tiveram efeito significativo no modelo (Tabela 2). Apesar disso, optou-se pela manutenção de todos os parâmetros da equação (1), o que proporcionava aumento do coeficiente de determinação  $R^2$ , indicando melhoria na estimativa do modelo. Outro motivo foi a decisão de se obter equações com todos os termos até o terceiro grau, para compará-las com a equação sugerida por TOPP et al. (1980), que também tem todos os termos até o terceiro grau.

Com a inclusão das medidas de  $K_a$  em água, as equações obtidas geraram curvas que acompanharam a tendência da curva definida pela equação de TOPP et al. (1980) em toda a faixa de  $K_a$  (Figura 1). Diferentemente, sem a inclusão das medidas de  $K_a$  em água, as equações geraram curvas que iniciaram desvio expressivo em relação à curva definida pela equação de TOPP et al. (1980), a partir de valores de  $K_a$  em torno de 30 (Figura 1), que são menores que os  $K_a$  medidos em solo saturado para o Argissolo-B e Latossolo-A (Tabela 1).

A inclusão de medidas de  $K_a$  em água é aconselhável, mesmo para curvas de uso restrito ao solo para o qual ela é elaborada. Caso as medidas da  $K_a$  em solo próximo à saturação no campo forem maiores que a  $K_a$  da amostra saturada da qual se obteve a curva de calibração, o uso da curva de calibração sem a condição de contorno pode resultar superestimativa (Figuras 1b e 1f) ou subestimativa (Figura 1d) do conteúdo de água no solo. Essas

diferenças podem aumentar bruscamente a partir de  $K_a = 27$  no Argissolo-A,  $K_a = 37$  no Argissolo-Bt e  $K_a = 40$  no Latossolo-A (Figura 2), que são quase todos menores que os valores de  $K_a$  medidos nas amostras saturadas (Tabela 1).

Para os três solos usados na calibração, o erro no conteúdo de água estimado, incluindo possíveis efeitos do comprimento de cabo e da obtenção de curvas de calibração sem a inclusão de medidas de  $K_a$  em água, pode ser maior que  $0,1\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , se o TDR100 medir, no campo,  $K_a$  com 5 unidades a mais que a  $K_a$  medida no solo saturado no laboratório (Figura 2). Isso pode acontecer se o solo no campo onde a sonda de TDR é inserida estiver saturado e sua porosidade total for maior que a porosidade total da amostra usada na calibração. Tendo em vista que a condição de solo saturado não é a mais frequente no campo, a ocorrência e a magnitude desses erros podem ser pequenas. Para que elas sejam quantificadas, é necessário uma análise de séries de medições de campo.

O uso de curva de calibração sem condição de contorno (sem medidas de  $K_a$  em água) requer maior atenção com as estimativas do  $\theta$  em solo próximo da saturação e aumenta a chance de necessidade de correção da curva de calibração, procedimento recomendado por SERRARENS et al. (2000) e STANGL et al. (2009). Portanto, a validade da curva é restrita para o intervalo de  $K_a$  medidos no campo, que permanecem dentro do intervalo de  $K_a$  usados na curva de calibração.

Cabe ressaltar que o uso de curva decalibração, incluindo medidas de  $K_a$  em água não

Tabela 2 - Valores estimados dos parâmetros da equação (1) ajustada com e sem condição de contorno para as diferentes combinações de solo e comprimentos de cabo.

Combinação <sup>(1)</sup>	a	b	c	d	$R^2$
Argissolo-A-3-c	-4,4430E-02	1,7360E-02	0,68780E-04	-1,5300E-06	0,9982
Argissolo-A-10-c	-5,1720E-02	1,7540E-02	288,00E-04	-0,74665E-06	0,9977
Argissolo-A-25-c	-4,1930E-02	1,6830E-02	22,350E-04	-0,89448E-06	0,9978
Argissolo-A-3-s	-10,484E-02	3,7810E-02	-16,000E-04	36,290E-06	0,9970
Argissolo-A-10-s	-11,916E-02	3,8660E-02	-15,900E-04	32,880E-06	0,9955
Argissolo-A-25-s	-9,8970E-02	3,4860E-02	-13,400E-04	27,720E-06	0,9946
Argissolo-Bt-3-c	-7,4950E-02	3,2770E-02	-6,6973E-04	5,1500E-06	0,9934
Argissolo-Bt-10-c	-6,2420E-02	2,9470E-02	-5,7684E-04	4,4000E-06	0,9955
Argissolo-Bt-25-c	-4,0200E-02	2,6360E-02	-4,6996E-04	3,5900E-06	0,9948
Argissolo-Bt-3-s	-8,4260E-02	3,4450E-02	-7,0863E-04	4,8600E-06	0,9834
Argissolo-Bt-10-s	-4,1160E-02	2,4160E-02	-2,2727E-04	-1,6900E-06	0,9831
Argissolo-Bt-25-s	-0,65100E-02	1,7920E-02	0,97120E-04	-6,6200E-06	0,9817
Latossolo-A-3-c	1,9170E-02	2,1250E-02	-3,4048E-04	2,8200E-06	0,9776
Latossolo-A-3-s	-8,6740E-02	4,4300E-02	-15,800E-04	21,360E-06	0,9874

(1) A sequência de informações representa o solo (Argissolo e Latossolo), o horizonte (A e Bt), o comprimento do cabo (3, 10 e 25m) e a condição de ajuste da equação (1) com (c) e sem (s) as medidas de  $K_a$  em água.

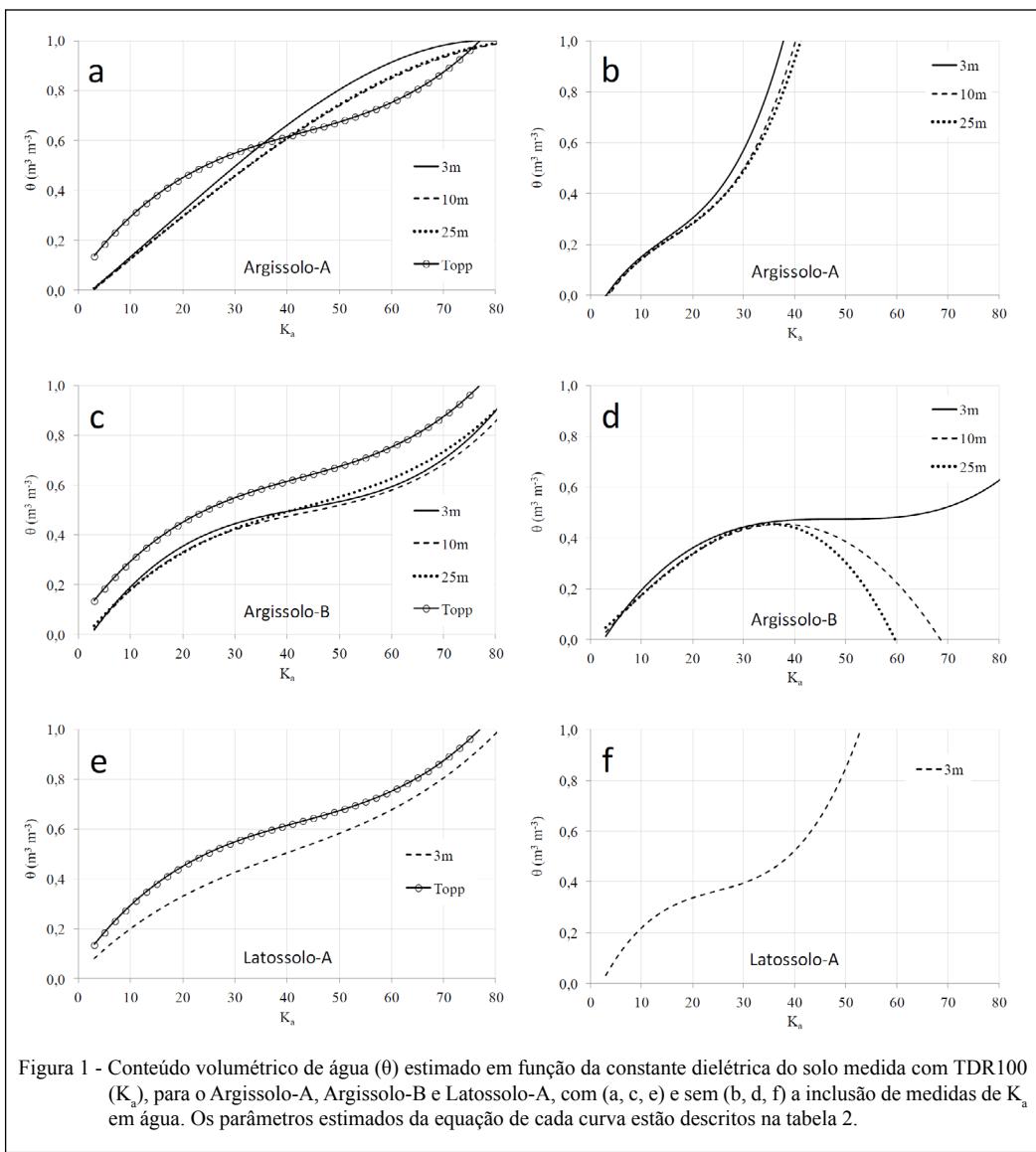


Figura 1 - Conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) estimado em função da constante dielétrica do solo medida com TDR100 ( $K_a$ ), para o Argissolo-A, Argissolo-B e Latossolo-A, com (a, c, e) e sem (b, d, f) a inclusão de medidas de  $K_a$  em água. Os parâmetros estimados da equação de cada curva estão descritos na tabela 2.

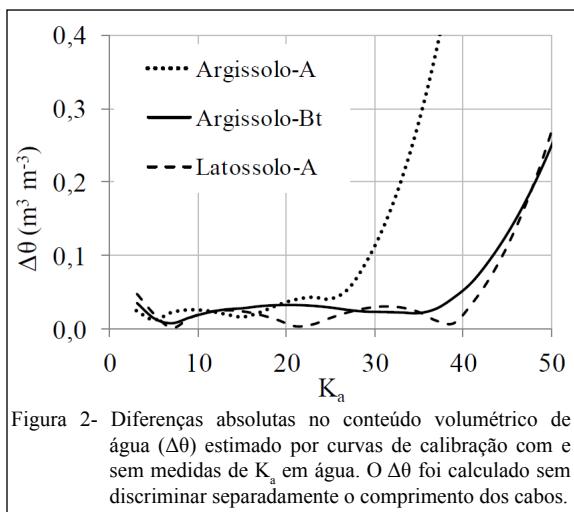
dispensa a verificação de campo, nem garante que a curva obtida com a equação (1) será concordante com a de TOOP et al. (1980), fato observado neste estudo (Figura 1) e já conhecido de estudos anteriores (TOMAZELLI & BACCHI, 2001; COELHO et al., 2006; ELAIUY et al. 2009; KAISER et al., 2010; SANTOS et al., 2010).

Contudo, neste estudo, ela previne erros de magnitude maior que as diferenças causadas pela mudança no comprimento dos cabos, que foram, no máximo, de  $0,035 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (Argissolo-A), quando comparados os cabos de 3m e 25m. Além de prevenir erros de magnitude considerável, o uso da condição de contorno, por evitar desvios bruscos, confere mais chances de

a curva obtida ser utilizada em solos semelhantes ao usado na calibração.

## CONCLUSÃO

O uso de curvas de calibração do TDR100, obtidas em laboratório, só é confiável para valores de  $K_a$  medidos no campo, restritos ao intervalo de  $K_a$  usados na elaboração da curva de calibração. A inclusão de medidas de constante dielétrica em água para elaboração da curva de calibração aumenta a acurácia da estimativa do conteúdo de água no campo. Sem esse procedimento e sem verificação de campo das medidas de  $K_a$ , erros na estimativa de  $\theta$  da ordem de  $0,1 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$  podem ocorrer facilmente.



## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro (Edital MCT/CNPq nº014/2010 - Universal).

## REFERÊNCIAS

COELHO, E.F. et al. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, n.1, p.23-30, 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832006000100003](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832006000100003&lng=pt&nrm=iso&tlang=pt)>. Acesso em: 13 maio 2014. doi:10.1590/S0100-06832006000100003.

COELHO, E.F. et al. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.4, p.475-480, 2005. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662005000400006](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662005000400006&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 13 maio 2014. doi: 110.1590/S1415-43662005000400006.

ELAIUY, M. et al. Desenvolvimento e avaliação de sonda de TDR para o manejo racional da água em substratos utilizados na

produção de mudas florestais. *Revista Ambiente & Água*, v.4, n.1, p.117-131, 2009. Disponível em: <<http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/188>>. Acesso em: 13 maio 2014. doi: 10.4136/1980-993X.

JONES, S.B. et al. Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrological Processes*, v.16, n.1, p.141-153, 2002. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.513/abstract>>. Acesso em: 13 maio 2014. doi: 10.1002/hyp.513.

KAISER, D.R. et al. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, n.3, p.649-658, 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-6832010000300006&lng=pt&nrm=iso&tlang=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-6832010000300006&lng=pt&nrm=iso&tlang=en)>. Acesso em: 13 maio 2014. doi:10.1590/S0100-06832010000300006.

SANTOS, M.R. et al. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, n.2, p.299-308, 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832010000200003](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832010000200003&script=sci_arttext)>. Acesso em: 13 maio 2014. doi:10.1590/S0100-06832010000200003.

SERRARENS, D. et al. Soil moisture calibration of TDR level probes. *Scientia Agricola*, v.57, n.2, p.349-354, 2000. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-90162000000200024&lng=pt&nrm=iso&tlang=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162000000200024&lng=pt&nrm=iso&tlang=en)>. Acesso em: 13 maio 2014. doi:10.1590/S0103-90162000000200024.

STANGL, R. et al. Field use and calibration of a TDR-based probe for monitoring water content in a high-clay landslide soil in Austria. *Geoderma*, v.150, n.1-2, p.23-31, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706109000020>>. Acesso em: 13 maio 2014. doi:10.1016/j.geod.2011.03.031.

TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida da umidade de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, n.9, p.1145-1154, 2001. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2001000900008&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2001000900008&script=sci_arttext)>. Acesso em: 13 maio 2014. doi:10.1590/S0100-204X2001000900008.

TOPP, G.C. et al. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, v.16, n.3, p.547-582, 1980. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR016i003p00574/abstract>>. Acesso em: 13 maio 2014. doi: 10.1029/WR016i003p00574.