

Comissão 2.2 - Física do solo

DESEMPENHO DE SONDAS DE TDR MANUFATURADAS DE DIFERENTES COMPRIMENTOS DE HASTES⁽¹⁾

José Antonio do Vale Sant'Ana⁽²⁾, Eugênio Ferreira Coelho⁽³⁾, João José da Silva Junior⁽²⁾, Edvaldo Bispo Santana Junior⁽⁴⁾ & Lucio Aderito dos Anjos Veinromber Junior⁽⁴⁾

RESUMO

A avaliação da umidade do solo com uso da reflectometria no domínio do tempo (TDR) tem sido feita a partir de sondas ou guias de onda de comprimento igual ou superior a 0,10 m, sendo poucas as informações na literatura para comprimentos inferiores. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de sondas manufaturadas de TDR de diferentes comprimentos de hastes na estimativa da umidade do solo a partir da constante dielétrica. Foram confeccionadas guias de onda de TDR manufaturadas, com diferentes comprimentos de hastes (0,30; 0,15; 0,12; 0,10; 0,08; 0,06; e 0,04 m). No laboratório, o solo foi colocado para secagem ao ar, destorroado, passado em peneira de 2 mm e acondicionado em tubos de PVC de diâmetro de 0,196 m. Logo após a saturação, foram realizadas leituras com um reflectômetro tipo TDR até a umidade atingir valores próximos do limite inferior da disponibilidade de água do solo. As análises dos valores de umidade para os diferentes comprimentos de haste mostraram que eles tiveram efeito nas leituras de umidade do solo para os valores acima de $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e abaixo de $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. As sondas com os comprimentos das hastes avaliados apresentaram leituras semelhantes para valores de umidade volumétrica constante no intervalo de 0,14 a $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. A sonda de comprimento de haste de 0,04 m apresentou desempenho satisfatório para umidades volumétricas maiores que $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Termos de indexação: constante dielétrica aparente, conteúdo de água no solo, calibração de TDR.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 20 junho de 2011 e aprovado em 11 de maio de 2012.

⁽²⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras - UFLA, Bolsista CAPES/FAPEMIG. CEP 37200-000 Lavras (MG). E-mail: jantonio@posgrad.ufla.br; jjsjunior@posgrad.ufla.br

⁽³⁾ Ph.D, pesquisador Embrapa-CNPMPF, CEP 44380-000 Cruz das Almas (BA).E-mail: eugenio@cnpmf.embrapa.br

⁽⁴⁾ Eng^o-Agrônomo, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. CEP 44380-000 Cruz das Almas, BA. E-mail: edvaldobispo@gmail.com; lithhare@gmail.com

SUMMARY: PERFORMANCE OF TDR PROBES WITH DIFFERENT ROD LENGTHS

Soil moisture using the time domain reflectometry (TDR) has been evaluated using probes or waveguides (length ≥ 0.10 m), with little information in the literature for lower lengths. The purpose of the study was to evaluate the estimation of soil moisture from the dielectric constant using TDR probes with different rod lengths. TDR waveguides were fabricated with different rod lengths (0.30, 0.15, 0.12, 0.10, 0.08, 0.06, and 0.04 m). In the laboratory, the soil was placed for drying in air, crumbled, passed through a sieve of 2 mm and filled in PVC tubes (diameter 0.196 m). Immediately after saturation, the readings were performed with a TDR reflectometer until the moisture values approached the lower limit of soil water availability. Analyses of moisture values using different rod lengths showed that the length had an effect on the soil moisture readings for values above $0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ and below $0.14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. The readings of the probes with the different rod lengths were similar for constant soil moisture values in the range of $0.14 - 0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. The performance of the TDR probe with a length of 0.04 m was satisfactory for volumetric water contents above $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Index terms: apparent dielectric constant, soil water content, TDR calibration.

INTRODUÇÃO

O conhecimento do teor de água do solo é imprescindível a qualquer estudo que envolva as propriedades do sistema solo-água-plantas. Sua determinação pela técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) é uma das mais exatas. O uso da TDR tem-se difundido na área de pesquisas principalmente por ser um método não destrutivo, por sua exatidão e pela possibilidade de automação da coleta dos dados (Coelho et al., 2006).

A reflectometria no domínio do tempo apresenta vantagens como a rapidez na obtenção da umidade volumétrica (Tommaselli, 1997), a repetitividade das leituras, a não destruição da região amostrada, a não emissão de radiações ionizantes (Noborio, 2001) e a possibilidade de uso em sistema de aquisição de dados, permitindo o armazenamento das leituras instantâneas e a ampliação de leituras por meio de multiplexadores. Pode ser utilizada ainda em aplicações para o desenvolvimento de métodos para determinação da condutividade hidráulica do solo (Libardi & Melo Filho, 2006). A principal desvantagem do equipamento tem sido o custo - ainda alto, comparado com o de outros métodos de monitoramento da umidade do solo. Para reduzir erros atribuídos à variabilidade espacial no manejo da irrigação ou para acompanhar a frente de molhamento no perfil do solo, é necessário expressiva quantidade de sondas de TDR, o que tem sido inviabilizado pelo elevado custo de aquisição delas, sobretudo por serem acessórios importados (Souza et al., 2006). Os preços dessas guias de onda industriais, associados aos custos de importação, têm sido limitantes para o uso desses equipamentos (Coelho et al., 2006). Uma alternativa tem sido o uso de guias de onda de construção artesanal (Conciani et al., 1997; Souza et al., 2001; Villwock et al., 2004; Coelho et al., 2005) construídas a custos relativamente baixos, que, quando adequadamente

calibradas, funcionam da mesma forma que as sondas industriais.

O equipamento de TDR utilizado na agricultura é composto por um testador de cabo e por guias de onda ou sondas de TDR que se constituem basicamente no prolongamento de um cabo coaxial RG58 de 50 ohms, conectado normalmente a três hastes de aço inoxidável, onde a malha externa (negativo) conecta-se a duas hastes externas e o fio interno (positivo), à haste central. Um pulso eletromagnético é emitido pelo testador de cabos e percorre o cabo coaxial até as hastes, que se constituem num circuito aberto (Coelho Filho et al., 2004). O tempo transcorrido t (s) e o retorno do pulso ressonante ao longo da haste de comprimento L (m) são dados pela equação de Topp et al. (1980):

$$K = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

em que c é a velocidade da luz no espaço livre ($3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$) e K , a constante dielétrica relativa do meio.

Para utilização do equipamento, há necessidade de calibrá-lo a fim de que sejam obtidos valores acurados, devendo-se sempre respeitar as peculiaridades de cada solo para que o processo de calibração ocorra de forma correta (Villwock et al., 2004). O erro de medição de umidade do solo pela TDR está relacionado a três aspectos: erro de calibração; instalação de sondas; e erro de leitura do tempo causado pelo próprio sistema eletrônico do dispositivo (Skierucha, 2000). Tommaselli & Bacchi (2001) classificaram os modelos de calibração em modelos empíricos, semiempíricos e físicos e ajustaram modelos polinomiais cúbicos para calibrações realizadas em condições de laboratório com cinco solos distintos, incluindo a densidade e a porosidade do solo nos modelos. Villwock (2003) empregou o modelo em um Latossolo com alto teor de argila para realizar calibrações de um equipamento TDR em campo,

concluindo que modelos polinomiais cúbicos ajustam bem os dados experimentais. Esse modelo tem sido usado por outros autores (Topp et al., 1980; Baker & Allmaras, 1990; Coelho & Or, 1996; Souza et al., 1999; Coelho et al., 2006; Milani et al., 2008).

A maioria dos equipamentos de TDR requer guias de onda para transmitir pulsos eletromagnéticos, que permitem determinar a constante dielétrica aparente do solo (Or & Wraith, 1997). As empresas que trabalham com a construção das sondas de TDR têm recomendado o uso de sondas com hastes acima de 0,10 m. Topp et al. (1984) relataram que erros na determinação do conteúdo de água usando uma sonda de 0,05 m de comprimento foram significativos com desvio-padrão de $0,037 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e sugeriram o uso de sonda com 0,1 m para alcançar precisão de desvio-padrão de $0,022 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Sondas de TDR industriais de comprimento de haste com 0,021 m (Amato & Ritchie, 1995) e 0,025 m (Kelly et al., 1995) foram avaliadas, tendo apresentado desvios-padrão das leituras de 0,023 e $0,021 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente - valores esses próximos ao desvio de $0,022 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ com sondas de 0,1 m de comprimento, obtido por Topp et al. (1984). Informações sobre o uso de guias de ondas de TDR artesanais com comprimento de haste inferior a 0,10 m são limitadas na literatura. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de sondas de TDR artesanais de diferentes comprimentos de haste para serem usadas na estimativa da umidade do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Irrigação e Fertirrigação da Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, em Cruz das Almas - BA, $12^\circ 48' \text{ S}$; $39^\circ 06' \text{ W}$ e 225 m. Amostras de solo deformadas foram retiradas na profundidade de 0 a 0,20 m em um Latossolo Amarelo distrófico (Quadro 1), classificado como franco-arenoso (Souza & Souza, 2001).

Foram construídas guias de onda de TDR, artesanalmente, com três hastes de aço inoxidável de 0,003 m de diâmetro, com diferentes comprimentos (0,30; 0,15; 0,12; 0,10; 0,08; 0,06; e 0,04 m), espaçadas

de 0,022 m, isoladas com resina de poliéster, com cabos coaxiais RG58 (50 ohms) de 1,0 m de comprimento (Figura 1). Além dos materiais mencionados, a construção de uma sonda de três hastes para uso com reflectômetros requer os seguintes materiais: conector BNC de clipagem, catalisador de resina, solda elétrica e liga de estanho Sn 63/37, ácido fosfórico 1 %, alicate decapador e alicate de clipagem (Coelho et al., 2005). O solo foi seco, destorroado e passado em peneira de 2 mm (TFSA), sendo acondicionado em tubos de PVC com diâmetro de 0,196 m e alturas de 0,07; 0,09; 0,11; 0,13; 0,15; 0,18; e 0,33 m, para os comprimentos de haste de 0,04; 0,06; 0,08; 0,10; 0,12; 0,15; e 0,30 m, respectivamente; para cada tratamento avaliado, foram utilizadas três repetições.

Conhecendo o volume do recipiente, calculou-se a massa de solo seco necessária para atingir densidade de $1,67 \text{ kg dm}^{-3}$ em cada recipiente. As amostras foram colocadas para saturação durante 48 h; posteriormente, foram inseridas as guias de onda em cada amostra de solo. As colunas de solo com as guias de ondas de TDR foram sucessivamente pesadas a partir da saturação e ficaram expostas no laboratório até ser atingido o limite inferior de umidade disponível. As leituras de umidade foram feitas diariamente, seguidas de pesagens das colunas. Quando a umidade do solo das colunas atingiu valores próximos do limite inferior da disponibilidade de água, as colunas foram levadas à estufa a 105° C até atingirem massa constante. As umidades em base volumétrica (θ_i) foram determinadas paralelamente a cada leitura do equipamento de TDR, pela equação:

$$\theta_i = \frac{\text{PU} - \text{PS}}{\text{V}} \quad (2)$$

em que:

PU = massa do solo úmido + PE (g);

PS = massa do solo seco em estufa + PE (g);

PE = massa da coluna de PVC + peso da guia de onda + duas telas de náilon (g); e

V = volume do solo (cm^3).

O modelo ajustado aos dados de umidade volumétrica e constante dielétrica aparente foi o polinomial cúbico, por apresentar melhor desempenho, conforme Milani (2008).

Quadro 1. Características físico-hídricas do solo na profundidade de 0 a 0,2 m

Textura			Porosidade total		Densidade do solo	Umidade volumétrica na tensão		Condutividade hidráulica saturada
Areia	Silte	Argila	Macro	Micro		-10kPa	-1500kPa	
g kg^{-1}			m ³ m ⁻³		kg dm ⁻³	m ³ m ⁻³		m s ⁻¹ 10 ⁻⁷
732	87	181	0,1390	0,2021	1,67	0,1785	0,0980	160,00



Figura 1. Exemplares de sondas de TDR utilizadas no experimento.

Os resultados de umidade volumétrica estimada pelo modelo de calibração das sondas de TDR foram comparados por meio de uma regressão linear simples, do tipo $y=ax$, em que o coeficiente angular próximo de 1,0 com R^2 elevado indica maior precisão do modelo ajustado. Os indicativos estatísticos MEA (média dos erros), RMSE (raiz quadrada da média dos quadrados dos erros) e "d" (índice de concordância de Willmott) foram também utilizados na avaliação do modelo abordado (Gomes et al., 2002), além do cálculo da eficiência do modelo de calibração segundo Nash & Sutcliffe (1970), os quais são obtidos pelas equações a seguir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (3)$$

$$MEA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2 \quad (4)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i + \bar{O}|)^2} \right] \quad (5)$$

$$E_f = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (6)$$

em que:

E_f = eficiência do modelo;

n = número de dados;

O_j = valor observado;

\bar{O} = média do valor estimado; e

E_j = valor estimado.

O teste t de Student foi aplicado a 5 %, comparando os resultados das médias das umidades para os diferentes comprimentos das hastes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na faixa de umidade avaliada, houve diferença entre as médias de umidade obtidas para os

comprimentos de hastes testados ($p < 0,05$). As médias de umidade obtidas com tamanhos de hastes de 0,06, 0,10 e 0,15 m não diferiram entre si pelo teste t. As hastes de 0,08 e 0,12 também não diferiram. A maior umidade média ($0,198 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) foi obtida com a sonda de comprimento de hastes de 0,10 m; a que apresentou a menor umidade média ($0,162 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) foi obtida com a sonda de tamanho de haste de 0,04 m (Quadro 2). De acordo com Zegelin et al. (1989), teoricamente, sondas com três ou mais hastes fornecem um sinal equilibrado e apresentam melhor distribuição do campo elétrico. Segundo Coelho Filho et al. (2004), a TDR emite um pulso eletromagnético que percorre o cabo coaxial até transferir para as hastes, que se constituem num circuito aberto, de modo que o sinal eletromagnético emitido seja refletido ao chegar ao final da haste. Essa afirmação de Coelho Filho et al. (2004) pode justificar as diferenças encontradas entre os tratamentos, já que cada sinal eletromagnético, teoricamente, é refletido em posições diferentes para uma mesma amostra de solo.

Esses resultados mostram que as sondas de diferentes comprimentos de haste estimaram de forma diferente a umidade do solo. Na figura 2, observa-se como os valores de umidade estimados pelos modelos de calibração para os diferentes comprimentos de hastes em função da constante dielétrica aparente do solo variaram de acordo com o tamanho de haste avaliado. As sondas de diferentes comprimentos de haste aproximaram suas leituras para as umidades volumétricas situadas no intervalo de 0,14 a $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, exceto para o comprimento de haste de 0,04 m (Figura 2). Para este comprimento de haste (0,04 m), as leituras aproximaram-se das demais a partir da umidade volumétrica de $0,179 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (umidade referente à capacidade de campo do solo em estudo). Esse comportamento indica que guia de onda com esse

Quadro 2. Comparação de médias da umidade estimada entre os tratamentos, segundo o teste t de Student

Comprimento de haste	Médias da umidade	Variância
m	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	
0,04	0,162a	0,007
0,06	0,193b	0,005
0,08	0,184c	0,003
0,10	0,198b	0,003
0,12	0,185c	0,003
0,15	0,196b	0,004
0,30	0,177d	0,004

Médias seguidas de mesmas letras não diferem entre si a 5 %.

comprimento de haste tem melhor desempenho para conteúdo de água mais elevado, o que está de acordo com Persson & Wraith (2002), os quais afirmam que guias de onda de curto comprimento de haste podem ser usadas com sucesso em solo com elevada umidade. Esses autores, avaliando um novo modelo de sonda com comprimentos de 0,03 e 0,04 m em vários fluidos com diferentes constantes dielétricas, obtiveram medidas de constantes dielétricas com a mesma precisão das sondas-padrão de 0,20 m de três hastes.

No quadro 3 são apresentados os modelos polinomiais cúbicos ajustados aos valores de $\theta = f(ka)$; percebe-se pelo coeficiente de determinação (R^2) que houve bom ajuste para todos os comprimentos de haste. Os ajustes dos modelos cúbicos aos dados indicaram que acima de 97,4 % das variações da umidade volumétrica podem ser explicadas pelas variações da constante dielétrica para todos os comprimentos de haste. Esses resultados estão de acordo com os de Milani et al. (2008), que observaram viabilidade de emprego de sondas manufaturadas

com comprimento de haste variando entre 0,170 e 0,416 m.

As sondas com comprimento inferior a 0,08 m tiveram desempenho satisfatório, embora as calibrações com comprimentos de haste de 0,04 e 0,06 m tenham apresentado menor precisão na estimativa da umidade, pelo coeficiente de determinação da regressão (Quadro 3), pela RMSE e MEA, uma vez que, quanto menor o valor absoluto de RMSE e MEA, melhor o ajuste do modelo (Quadro 4), quando comparado aos tratamentos com comprimentos de haste de 0,30; 0,15; 0,12; 0,10 e 0,08 m. Persson & Haridy (2003), trabalhando com sondas de duas hastes com 0,02 m de comprimento para determinação de umidade em solos com valores constantes de condutividade elétrica, concluíram que se pode estimar de forma precisa a umidade do solo com guias de ondas de curto comprimento nas condições trabalhadas. Segundo Campbell Scientific (2001), o encurtamento das hastes das sondas pode ser uma solução para problemas de atenuação do sinal eletromagnético, principalmente para solos com condutividade elétrica mais elevada.

No quadro 4 é apresentada a avaliação das equações de calibração obtida para tratamentos (tamanho de haste) com base na raiz quadrada da média dos quadrados dos erros, na média dos erros, no índice de concordância e na eficiência do modelo. Em geral, os tratamentos apresentaram valores para o índice de concordância e eficiência do modelo iguais ou próximos da unidade (1,00), o que sinaliza para o bom desempenho dos modelos (Quadro 4).

Todas as sondas, independentemente do comprimento das hastes, apresentaram coeficientes angulares da regressão ($\theta_{ES} = a\theta$, em que "a" é o coeficiente angular, " θ_{ES} " é a umidade volumétrica estimada pelo modelo e " θ " é a umidade volumétrica observada) da umidade estimada em função da umidade medida próximos de 1,0 (coeficiente angular próximo de 1,0 com R^2 elevado indica maior precisão do modelo ajustado), com coeficiente de determinação das funções acima de 0,97 (Quadro 5), o que reafirma o desempenho de todas as sondas.

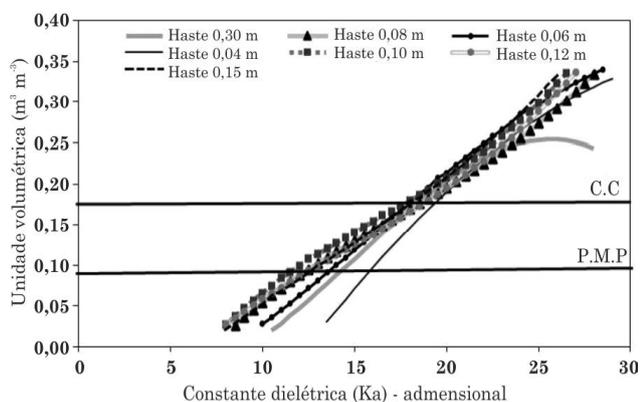


Figura 2. Valores de umidades volumétricas estimados para os diferentes comprimentos de hastes, em função da constante dielétrica aparente do solo, em que PMP (ponto de murcha permanente) e CC (capacidade de campo do solo).

Quadro 3. Ajuste do modelo polinomial cúbico aos dados de umidade volumétricas (q), em função da constante dielétrica (Ka), para diferentes comprimentos de haste da sonda de TDR

Comprimento haste (m)	Modelo	R^2
0,30	$\theta = -6,048712E-05Ka^3 + 0,002713029 Ka^2 - 0,019817304 Ka - 0,001206742$	0,989
0,15	$\theta = 1,94653E-05 Ka^3 - 0,00076563 Ka^2 + 0,04940700 Ka - 0,13966962$	0,998
0,12	$\theta = 2,84187E-05 Ka^3 - 0,00123889 Ka^2 + 0,030972366 Ka - 0,15615410$	0,997
0,10	$\theta = 4,19971E-05 Ka^3 - 0,00204122 Ka^2 + 0,046042492 Ka - 0,23256464$	0,995
0,08	$\theta = 2,93488E-05 Ka^3 - 0,00152297 Ka^2 + 0,039288755 Ka - 0,21557561$	0,991
0,06	$\theta = -2,0832E-05 Ka^3 + 0,001019485 Ka^2 + 0,002582615 Ka - 0,07903077$	0,981
0,04	$\theta = -3,9739E-06 Ka^3 - 0,00034357 Ka^2 + 0,039467586 Ka - 0,42972771$	0,974

Quadro 4. Determinação dos indicativos estatísticos para os comprimentos de haste avaliados

Índices*	Tamanho de hastes (m)						
	0,30	0,15	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04
RMSE	$7,15 \cdot 10^{-3}$	$3,79 \cdot 10^{-3}$	$4,29 \cdot 10^{-3}$	$7,86 \cdot 10^{-3}$	$9,47 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$2,03 \cdot 10^{-2}$
MEA	$5,12 \cdot 10^{-5}$	$1,43 \cdot 10^{-5}$	$2,42 \cdot 10^{-5}$	$6,18 \cdot 10^{-5}$	$8,96 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$4,10 \cdot 10^{-4}$
d	$9,99 \cdot 10^{-1}$	$1,00 \cdot 10^0$	$9,99 \cdot 10^{-1}$	$1,00 \cdot 10^0$	$1,00 \cdot 10^0$	$9,99 \cdot 10^{-1}$	$9,99 \cdot 10^{-1}$
E	$9,99 \cdot 10^{-1}$	$1,00 \cdot 10^0$	$9,99 \cdot 10^{-1}$	$1,00 \cdot 10^0$	$1,00 \cdot 10^0$	$9,99 \cdot 10^{-1}$	$9,99 \cdot 10^{-1}$

*MEA: média dos erros; RMSE: raiz quadrada da média dos quadrados dos erros; "d": índice de concordância de Willmott; E: eficiência do modelo.

Quadro 5. Valores da umidade estimada pelo polinômio de terceiro grau, em função da umidade volumétrica

Comprimento haste (m)	Equação	R ²
0,30	$\theta_{ES} = 0,99720$	0,989
0,15	$\theta_{ES} = 0,99950$	0,998
0,12	$\theta_{ES} = 0,99930$	0,997
0,10	$\theta_{ES} = 0,99860$	0,995
0,08	$\theta_{ES} = 0,99800$	0,992
0,06	$\theta_{ES} = 1,00980$	0,993
0,04	$\theta_{ES} = 0,98980$	0,9703

CONCLUSÕES

1. O comprimento de hastes de sondas de TDR tem efeito na constante dielétrica e na estimativa da umidade volumétrica do solo.

2. As sondas com os comprimentos das hastes avaliados apresentaram leituras semelhantes para valores de umidades volumétricas no intervalo de 0,14 a 0,25 m³ m⁻³.

3. A sonda de comprimento de haste de 0,04 m apresenta desempenho satisfatório para umidades volumétricas maiores que 0,20 m³ m⁻³.

LITERATURA CITADA

- AMATO, M. & RITCHIE, J.T. Small spatial scale soil water content measurement with time-domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:325-329, 1995.
- BAKER, J.M. & ALLMARAS, R.R. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:1-6, 1990.
- CAMPBELL SCIENTIFIC INC. Reducing TDR probe Rod length to improve water content measurements in soils with high electrical conductivity. App note code: 2S-H. Logan, 2001.

COELHO, E.F. & OR, D. A parametric model for two-dimensional water uptake by corn roots under drip irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1039-1049, 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*, 30:23-30, 2006.

COELHO, E.F.; VELLAME, L.M. & COELHO FILHO, M.A. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 9:475-480, 2005.

COELHO FILHO, M.A.; VELLAME, L.M.; COELHO, E.F. & SOUZA, C.F. Instalação e operação de sistema de aquisição e armazenamento de dados para o monitoramento do sistema solo-planta-atmosfera. Cruz das Almas, Embrapa/CNPMF, 2004. p.136. (Documentos, 143)

CONCIANI, W.; CARNEIRO, B.J.; SOARES, M.M.; HERMANN, P.S.P. & CRESTANA, S. Emprego de TDR com sondas multihastes segmentadas para medida de umidade de um perfil de solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 1., São Carlos, 1997. Anais... São Carlos, Embrapa/CNPDI, 1997. p.169-173.

GOMES, E.N.; ESCOBEDO, J.F.; FRISINA, V.A. & ANGELA, R. Modelos de estimativa da par global e difusa em função da radiação de ondas curtas e da transmissividade atmosférica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., Foz de Iguaçu, 2002. Anais... Foz de Iguaçu, 2002. p.2.936-2.941.

KELLY, S.F.; SELKER, J.S. & GREEN, J. Using short soil moisture probes with high-bandwidth time domain reflectometry instruments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:97-102, 1995.

LIBARDI, P.L. & MELO FILHO, J.F. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica, em um experimento de perfil instantâneo. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:197-206, 2006.

MILANI, D.I.C.; TAVARES, M.H.F. & CLEMENTINA, S. Calibração de sondas TDR em condições de laboratório. *R. Amb. Água*, 3:68-75, 2008.

NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10:282-290, 1970.

- NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. *Comp. Electr. Agr.*, 31:213-237, 2001.
- OR, D. & WRAITH, J.M. *Agricultural and environmental soil physics*. Logan, Utah State University, 1997. 218p.
- PERSSON, M. & HARIDY, S. Estimating water content from electrical conductivity measurements with short time-domain reflectometry probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:478-482, 2003.
- PERSSON, M. & WRAITH, J.M. Shaft-mounted time domain reflectometry probe for water content and electrical conductivity measurements. *Vadose Zone J.*, 1:316-319, 2002.
- SKIERUCHA, W. The accuracy of soil moisture measurement by TDR technique. *Int. Agrophysics*, 14:417-426, 2000.
- SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; FOLEGATTI, M.V.; COELHO, E.F. & OR, D. Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. *Irriga*, 11:12-25, 2006.
- SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. & TESTEZLAF, R. Desempenho de sondas multihaste segmentada para o monitoramento da umidade do solo por meio da técnica de TDR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28., Pelotas, 1999. Anais... Pelotas, SBEA/UFPel, 1999. CD-Rom.
- SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. & TESTEZLAF, R. Electromagnetic determination of water content: Measurements in multi-wire probes with electrical impedance discontinuities. In: INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE, 2001, Belém. Proceedings... Belém, IEEE, 2001. p.133-136.
- SOUZA, L.S. & SOUZA, L.D. Caracterização físico-hídrica de solos da área do Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura. Cruz das Almas, Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2001. 56p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 20).
- TOMMASELLI, J.T.G. Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (time domain reflectometry). Piracicaba, Universidade de São Paulo, 1997. 109p. (Tese de Doutorado).
- TOMMASELLI, J.T.G. & BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 36:1145-1154, 2001.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. & ANNAN, A. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Res. 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.*, 64:313-321, 1984.
- VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F. & VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. *Irriga*, 9:82-88, 2004.
- VILLWOCK, R. Construção, calibração e avaliação de sondas de TDR em condições de laboratório e de campo. Cascavel, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2003. 82p. (Tese de Mestrado)
- ZEGELIN, S.J.; WHITE, I. & JENKINS, D.R. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurements using time domain reflectometry. *Water Res. Res.*, 25:2367-2376, 1989.

