

## DETERMINAÇÃO DO NÚMERO MÉDIO DE LEITURAS COM TDR PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO

Ruan Oliveira da Rocha Cruz<sup>1</sup>, Benedito Rios de Oliveira<sup>2</sup>, Eugenio Ferreira Coelho<sup>3</sup>, Laina Andrade Queros<sup>4</sup>, Fabio Tayrone Oliveira de Freitas<sup>5</sup>

### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi determinar qual o número médio de leituras de um equipamento Reflectometria no Domínio do Tempo (*Time Domain Reflectometer* - TDR) para obtenção de um modelo de estimativa de umidade em solo de diferentes texturas, considerando diferentes níveis de umidade em laboratório. Foram coletadas duas amostras de solo indeformadas na área experimental da Embrapa Mandioca e Fruticultura. Ambas as amostras foram saturadas e, por meio de guias de ondas construídas artesanalmente, realizou-se as leituras de TDR, utilizando uma média de quatro, seis, oito e dez leituras. Paralelamente, determinaram-se os valores umidade volumétrica. A partir desses dados, realizaram-se regressões polinomiais cúbicas. Em seguida, por meio das equações obtidas, estimaram-se os valores de umidade. Utilizando os valores de umidade volumétrica e umidade estimada, calculou-se o erro quadrado médio, considerando quatro intervalos de umidade distintos para cada solo e o número médio de leituras. A equação obtida a partir da média de quatro leituras apresentou maior exatidão na estimativa de umidade de ambos os solos em todos os intervalos de umidade observados.

**Palavras-chave:** Conteúdo de Água no Solo, Calibração, Instrumento de Medição, Propriedades Dielétricas.

## DETERMINATION OF THE AVERAGE NUMBER OF TDR READINGS FOR TWO SOIL MOISTURE ESTIMATES

---

<sup>1</sup> Graduando em Agronomia da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, Brasil. E-mail: [ruan.oliveira.rocha@gmail.com](mailto:ruan.oliveira.rocha@gmail.com)

<sup>2</sup> Mestrando em Eng. Agrícola (PGEA), da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, Brasil. E-mail: [Benedito.ta@hotmail.com](mailto:Benedito.ta@hotmail.com)

<sup>3</sup> Doutor, Pesquisador da Embrapa Mandioca e Fruticultura, Cruz das Almas, Bahia, Brasil. E-mail: [Eugenio.coelho@embrapa.br](mailto:Eugenio.coelho@embrapa.br)

<sup>4</sup> Graduanda em Agronomia da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, Brasil. E-mail: [Lainadandrad@hotmail.com](mailto:Lainadandrad@hotmail.com)

<sup>5</sup> Doutorando em Eng. Agrícola (PGEA), da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, Brasil. E-mail: [oibaf.freitas@hotmail.com](mailto:oibaf.freitas@hotmail.com)

## ABSTRACT

The objective of this work was to determine the average number of readings of a Time Domain Reflectometer (TDR) equipment to obtain a model of soil moisture estimation of different textures, considering different levels of humidity in the laboratory. Two undisturbed soil samples were collected in the experimental area of Embrapa Mandioca e Fruticultura. Both samples were saturated and, using hand-built waveguides, the TDR readings were used, using an average of four, six, eight and ten readings. At the same time, the volumetric moisture values were determined. From these data, cubic polynomial regressions were performed. Then, by means of the obtained equations, the values of humidity were estimated. Using the values of volumetric humidity and estimated humidity, the mean square error was calculated considering four different humidity ranges for each soil and the average number of readings. The equation obtained from the average of four readings presented greater accuracy in the estimation of humidity of both soils in all the observed humidity intervals.

**Keywords:** soil water content, calibration, measuring instrument, dielectric properties.

## INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada faz uso de grandes volumes de água e, por isso, assume o ônus de ser o maior usuário de água doce (CHRISTOFIDIS, 2013; GUIMARÃES; LANDAU, 2015) e necessita garantir eficácia de aplicação da mesma. As técnicas mais utilizadas para o correto manejo da água de irrigação são baseadas no uso de informações agrometeorológicas e ou do monitoramento do estado da água do solo (GAVA et al., 2016).

Dentre os métodos indiretos para a estimativa do teor de umidade do solo, a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (*Time Domain Reflectometer* - TDR) se sobressai em relação aos demais por ser um método rápido, não destrutivo e torna possível a automação para aquisição dos dados (BIZARI et al., 2011; NARANJO; ATAROFF, 2015). Essa técnica consiste na propagação de ondas eletromagnéticas por meio de hastes condutoras envoltas pelo solo. Este acontecimento é devido as propriedades dielétricas do solo representadas pelas constantes dielétricas (K) da matriz do solo, da água e do ar. Na matriz do solo estas constantes oscilam entre 1 e 80 a 20°C. O ar tem o valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variam entre 3 e 11, e a água, o maior valor é de 80 (NOBORIO, 2001). A constante K medida no sistema ar-solo-água é chamada de constante dielétrica aparente (Ka), desta forma, conhecendo-a pode-se estimar a umidade volumétrica do solo mediante a curvas de calibração obtidas a partir de dados coletados

em campo ou de laboratório (SOUZA; MATSURA, 2003).

A calibração objetiva ajustar um modelo de estimativa da umidade em função da constante dielétrica aparente do solo, uma vez que o equipamento de TDR avalia a constante dielétrica aparente. Topp et al. (1980) recomendaram a equação polinomial cúbica para estimativa da umidade em função de Ka. Entretanto, os autores *op cit.* ressaltaram que as características da matriz, diferentes propriedades e atributos do solo e efeitos externos influenciam as suas fases e conseqüentemente as variações de Ka, o que levou a necessidade de calibrações específicas para cada classe de solo. Roth et al. (1992) revelaram que são necessárias calibrações diferentes para solos com minerais ferrosos ou orgânicos. As sondas industriais vendidas pelos fornecedores do equipamento têm sido importadas, com custos elevados, o que limita a compra e inviabiliza seu uso para estudos da dinâmica de água no solo. Devido a isso, sondas artesanais têm sido largamente usadas, uma vez que são de baixo custo e funcionais (COELHO et al., 2006). Em trabalhos realizados por Souza et al., (2016a), nos quais se avaliou a calibração de TDR em um Latossolo Vermelho Amarelo, observou-se que o modelo de TDR teve muita utilidade, pois a sua aplicação em campo possibilita, com um bom ajuste e baixos erros, a estimativa do conteúdo de água no solo. Além de mostrar-se eficaz para o acompanhamento da dinâmica da água no solo nas diferentes camadas.

## DETERMINAÇÃO DO NÚMERO MÉDIO DE LEITURAS COM TDR PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO

Nas avaliações de umidade com sondas artesanais em equipamento de TDR, Costa (2017) verificou variações das leituras de umidade ao longo do tempo com desvios indesejáveis, dificultando a análise dos dados gerados no equipamento. O equipamento assume cada leitura de umidade gerada como média de quatro avaliações para uma distância fixa. Em caso de variações em excesso das leituras, há recomendação de aumento no valor do número de avaliações por leitura.

O objetivo deste trabalho foi determinar em laboratório qual o número de avaliações por leitura de umidade de um equipamento TDR para obtenção de um modelo para estimativa de umidade mais eficaz em solo de diferentes texturas, considerando diferentes níveis de umidade.

### MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no laboratório de irrigação e fertirrigação da Embrapa Mandioca e Fruticultura, em Cruz das

Almas – BA, localizado a 12° 48' S; 39° 06' W e 225 m de altitude. Foram coletadas duas amostras de solo indeformadas na área experimental, em tubos de PVC, de massa conhecida, com 0,15 m de altura e 0,10 m de diâmetro. Na sequência a extremidade inferior dos tubos foi fechada com o auxílio de 0,25 m<sup>2</sup> de tecido do tipo estopa e barbante também anteriormente pesados. As amostras foram saturadas por 48 horas, com o objetivo de possibilitar a ascensão da água pelos poros do solo, alcançando o ponto de saturação. Decorrido esse tempo, elas foram retiradas do local e aguardou-se algumas horas para a drenagem do excesso de água.

Simultaneamente, coletou-se amostras deformadas nas mesmas áreas com a finalidade de determinar a classe textural e a densidade dos solos por meio do método do densímetro e do método do cilindro volumétrico respectivamente (EMBRAPA, 2017) no laboratório de física do solo da Embrapa Mandioca e Fruticultura (Tabela 1).

**Tabela 1.** Composição granulométrica (g kg<sup>-1</sup>) e classe textural dos solos coletados em Cruz das Almas, no estado da Bahia.

Solo	Areia <sup>1</sup> (g kg <sup>-1</sup> )						Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Classe Textural	Densidade do Solo (g cm <sup>-3</sup> )
	MG	G	M	F	MF	Total				
1	25	119	171	123	37	475	140	385	Argila Arenosa	1,45
2	21	116	213	157	64	571	105	324	Franco Argilo Arenoso	1,65

<sup>1</sup> MG – muito grossa; G – grossa; M – média; F – fina; MF – muito fina.

Foram construídas guias de onda de TDR utilizando três hastes de aço inoxidável de 0,003 m de diâmetro, com comprimento espaçado de 0,022 m, isoladas com resina de poliéster, com cabos coaxiais RG58 (50 ohms) de 1,5 metros de comprimento (COELHO et al., 2005). Posteriormente, as guias de onda com peso registrado foram inseridas nas colunas e iniciaram-se as leituras de umidade com um o reflectômetro TDR, ajustando o número de avaliações que gera a média do visor em quatro valores: quatro, seis, oito e dez. Após a saturação as amostras com as guias de onda

inseridas foram deixadas para secagem do solo, com as leituras de umidade com a TDR e pesagens simultâneas realizadas no intervalo de 1 h, mas após três dias as amostras foram colocadas diariamente na estufa por 1,5 h a 65 °C, tanto no período da manhã como no da tarde. Sendo que, após a retirada da estufa, as amostras ficaram em ambiente para resfriamento e pesagem com leituras da umidade. Esse procedimento foi realizado até as umidades atingirem valores constantes.

Ao final do processo, os solos das amostras foram retirados dos tubos e levados a

estufa para a secagem a uma temperatura de 105 °C durante 24 horas, obtendo-se, assim, a massa dos solos secos, cujas as densidade aparente foram 1,45 e 1,65 g cm<sup>-3</sup>,

$$K_a = \left( \frac{\theta + 0,1758}{0,1138} \right)^2 \quad (1)$$

Em que:

$\theta$  = leitura da TDR

$K_a$  = constante dielétrica do solo

As umidades em base volume do solo avaliadas a cada leitura com o equipamento

$$\theta_i = \frac{MU - MS}{V} \quad (2)$$

Em que:

$\theta_i$  = umidade volumétrica (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);

MU = massa do solo úmido (g);

MS = massa do solo seco (g);

V = volume do solo (cm<sup>3</sup>).

$$\theta_i = a + bK_a + cK_a^2 + dK_a^3 \quad (3)$$

Em que:

$\theta_i$  = umidade volumétrica (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);

$K_a$  = constante dielétrico do solo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\theta_i - E_i)^2} \quad (4)$$

Em que:

RMSE = raiz quadrada do erro quadrático médio;

$\theta_i$  = umidade volumétrica (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);

$E_i$  = umidade estimada (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>)

O delineamento experimental utilizado foi o fatorial 4 x 4, adotando quatro níveis de umidade para cada solo e quatro números médios de leituras (média de quatro leituras, de seis leituras, de oito leituras e de dez leituras), com dez repetições.

Foram realizadas quarenta leituras ao longo do período. A partir dos valores máximos e mínimos de umidade volumétrica de cada

respectivamente para o solo 1 e 2 (Tabela 1). As constantes dielétricas foram obtidas da equação de Ledieu et al., (1986) com as leituras de TDR conforme a equação 1.

TDR durante a fase de secamento da amostra, foram determinadas pela diferença entre o peso úmido e o peso seco do solo dividido pelo volume do solo, considerando a massa específica da água igual a 1,0 g cm<sup>-3</sup> (equação 2).

Os valores de  $K_a$ , provenientes das leituras de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), e os dados obtidos volumetricamente foram ajustados ao modelo matemático polinomial do terceiro grau (equação 3) e expressos graficamente.

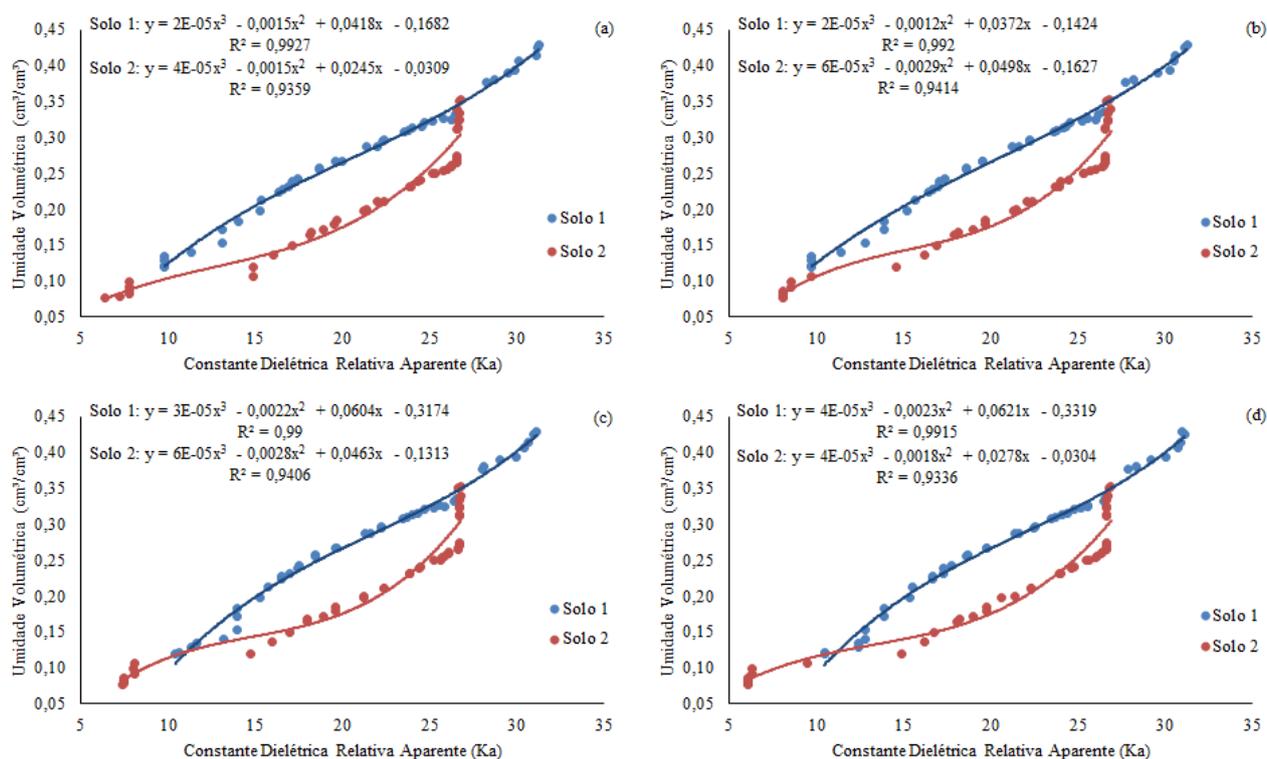
A acurácia do modelo cúbico de estimativa da umidade com base na constante dielétrica foi avaliada pela raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) (equação 4).

solo, obteve-se a amplitude da mesma, dividindo-a, em seguida, em quatro faixas de umidades correspondentes com dez repetições cada. Com base nesses valores, calculou-se o RMSE (equação 4) para cada uma das faixas de umidade dos solos estudados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 estão apresentados os ajustes do modelo polinomial cúbico para estimativa da umidade volumétrica do solo de textura argilo arenosa e franco argilo arenosa, respectivamente, em função da constante dielétrica obtida por meio do TDR.

## DETERMINAÇÃO DO NÚMERO MÉDIO DE LEITURAS COM TDR PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO



**Figura 1.** Curvas de calibração do modelo cúbico para determinação de umidade volumétrica de solo de textura argilo arenosa e de textura franco argilo arenosa, em função da constante dielétrica obtida a partir da média de 4 (a), 6 (b), 8 (c) e 10 (d) avaliações do equipamento de TDR para cada leitura.

Tratando-se do solo de textura argilo arenosa, observou-se que todas as curvas de calibração apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,99, o que indica que as equações podem determinar com precisão a umidade do solo, isto é, os modelos explicam pelo menos 99% das variações da umidade estimada em relação as variações da constante dielétrica aparente. Já no solo de textura franco argilo arenosa, notou-se que as curvas de calibração apresentaram coeficientes de determinação que variaram entre 0,93 e 0,94, indicando que entre 93 e 94% das variações da umidade do solo são explicadas pelas variações da constante dielétrica pelos modelos nesse tipo de solo, confirmando a precisão e a adequação dos modelos cúbicos na estimativa do teor de umidade. De acordo com vários autores (SANTANA et al., 2012; SOUZA et al., 2016b; SANTOS et al., 2010), o modelo cúbico é o que melhor ajusta os dados experimentais. Sendo assim, ele é o mais recomendado para estimar a umidade do solo.

As umidades do solo em base volumétrica obtidas pelo método gravimétrico referentes ao solo Franco argilo arenoso superiores a  $26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  corresponderam a um valor constante da constante dielétrica aparente, o que não ocorreu no solo argilo arenoso, onde os aumentos de umidade corresponderam a aumentos da constante dielétrica aparente. Isso se deve a capacidade de retenção dos dois solos, função do tamanho das partículas, relacionado a maior capacidade de retenção no solo argilo arenoso, classificado como de textura fina (Costa et al., 2013) em relação a menor capacidade de retenção do solo Franco argilo arenoso que é de textura moderadamente fina com maior tamanho de partículas que o solo Argilo arenoso. A maior capacidade de retenção implica em maiores valores de umidade próximos da saturação. Como consequência, a constante dielétrica aparente que depende mais da fase líquida do solo que da fase sólida e gasosa tem valores máximos maiores no solo argilo arenoso, em concordância com outros

autores (COELHO et al., 2006; ROTH et al., 1990). Como pode ser visto na Tabela 2, a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) das estimativas no solo argilo arenoso foi menor para a média de quatro e seis leituras pelo equipamento de TDR. De forma análoga,

verificou-se que para o solo franco argilo arenoso o erro quadrático médio foi menor para a média de quatro leituras.

Tais resultados demonstram que as umidades estimadas a partir desses modelos são mais próximas às umidades na base de volume.

**Tabela 2.** Valores da Raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) das leituras do TDR de acordo com o número médio de leituras e o tipo de solo.

Solo	Classe Textural	Número de Leituras			
		4	6	8	10
1	Argilo Arenosa	0,0266	0,0224	0,0410	0,0792
2	Franco Argilo Arenoso	0,0225	0,0473	0,0419	0,0826

As raízes quadradas do erro quadrático médio (RMSE) observados no solo de textura argilo arenosa (Tabela 3) apresentaram aumento conforme os intervalos de umidades, independentemente do número de leituras, com menores valores para média de umidade de  $0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e maiores para a média de  $0,37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Observou-se que os valores de RMSE referentes às médias de quatro, seis e oito leituras nas médias de umidade de  $0,17 \text{ cm}^3$

$\text{cm}^{-3}$  e  $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  foram menores. Para a média de  $0,31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , o RMSE referente a dez leituras apresentou uma grande discrepância em relação aos demais, apresentando um maior valor e, portanto, uma maior diferença entre a umidade estimada a partir da equação e a umidade volumétrica. Para a média de  $0,31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , essas diferenças entre RMSE aumentam para as leituras de umidade médias de oito e dez leituras.

**Tabela 3.** Valores da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) das leituras do TDR de um solo argilo arenoso em função de diferentes intervalos de umidade, umidades médias e das médias de 4, 6, 8 e 10 leituras.

Intervalo de Umidade ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	Umidade Média ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	Médias de Leituras			
		4	6	8	10
0,12 – 0,22	0,17	0,0125	0,0151	0,0130	0,0212
0,22 – 0,29	0,25	0,0062	0,0088	0,0190	0,0350
0,29 – 0,33	0,31	0,0250	0,0261	0,0327	0,0789
0,33 – 0,43	0,38	0,0456	0,0325	0,0728	0,1332

O comportamento do RMSE com o aumento das umidades médias para o solo de textura franco argilo arenosa seguiu o mesmo comportamento observado no solo argilo arenoso, isto é, os valores do RMSE cresceram com o aumento da umidade, em menor proporção para quatro leituras e em maior proporção para 10 (Tabela 4). Fixando a umidade média, para a média de umidade de  $0,11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , constatou-se que não houve diferença expressiva entre RMSE para os

números de leituras usados pelo equipamento para gerar as leituras de umidade. Houve diferença do RMSE nas demais faixas de umidade do solo, sendo que os maiores valores ocorreram com uso de dez leituras, que diferiu dos demais RMSE considerando as médias de umidade de seis e oito leituras.

O RMSE para esses dois números de leituras foram similares, mas foram superiores ao valor encontrado para a umidade média de quatro leituras.

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO MÉDIO DE LEITURAS COM TDR PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO

**Tabela 4.** Valores da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) das leituras de TDR de um solo franco argilo arenoso em função de diferentes intervalos de umidade, umidades médias e das médias de 4, 6, 8 e 10 leituras.

Intervalo de Umidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	Umidade Média (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	Médias de Leituras			
		4	6	8	10
0,07 – 0,16	0,11	0,0108	0,0067	0,0078	0,0130
0,16 – 0,23	0,19	0,0067	0,0333	0,0309	0,0629
0,23 – 0,27	0,25	0,0319	0,0352	0,0287	0,0770
0,27 – 0,36	0,31	0,0261	0,0820	0,0730	0,1317

A faixa de umidade de menor desvio entre valores estimados pelos modelos cúbicos e observados correspondeu a média de 0,17 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para o solo argilo arenoso e a de 0,11 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para o solo franco argilo arenoso, independentemente do número de leituras usado para obtenção da leitura gerada pelo equipamento de TDR. Em geral, o número de leituras para obtenção da umidade com a TDR influenciou a acurácia dos modelos cúbicos, isto é, o aumento do número de leituras reduziu a acurácia dos modelos cúbicos, principalmente para umidades obtidas com 10 leituras. As faixas de elevados valores de umidade são naturalmente as de maior sensibilidade dos modelos de calibração (LEDIEU et al., 1986) devido aos maiores gradientes de umidade nessa faixa. A indicação de que o aumento do número médio de leituras do equipamento TDR para estimar o valor de umidade pode proporcionar valores mais exatos não foi observada.

### CONCLUSÕES

Para os solos argilo arenosos e franco argilo arenosos, a sonda TDR (*Time Domain Reflectometer*) realiza melhores estimativas de umidade do solo quando o solo encontra-se com umidade abaixo de 29% e 23% respectivamente. Esses solos com umidade acima desses valores apresentam maior variabilidade em sua estimativa.

Em ambos os solos e para todos os intervalos de umidades, a estimativa da umidade mais próxima da obtida foi com a média de quatro leituras, segundo a raiz quadrada do erro quadrático médio. Sendo assim, recomenda-se a sua adoção para o

monitoramento do teor de água em solos argilo arenosos e franco argilo arenosos.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; SOUZA, C. F.; ROQUE, M. W. Haste portátil para utilização de sondas de TDR em ensaios de campo. *Irriga*, v. 16, n. 1, p. 31-41, 2011. <https://doi.org/10.15809/irriga.2011v16n1p31>

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. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 4, p. 475-480, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662005000400006>

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. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 1, p. 23-30, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000100003>

CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. *Revista de Política Agrícola*, Brasília, v. 22, n. 1, p. 115-136, 2013.

COSTA, B. F. D. *Reflectometria no domínio do tempo (TDR) para determinação do conteúdo de água em solos tropicais do Distrito Federal*. 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de

Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. Brasília. 2017.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; PERTILE, P.; SILVA, F. R. Water retention and availability in soils of the State of Santa Catarina-Brazil: effect of textural classes, soil classes and lithology. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1535-1548, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000600010>.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2017.

GAVA, R.; SILVA, E. E.; BAILO, F. H. R. Calibração de sensor eletrônico de umidade em diferentes texturas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 10, n. 2, p.154-162, 2016. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2016v10n2p154-162>

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C. Monitoramento da agricultura irrigada em tempo real. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: INPE, 2015. p. 3519-3525.

LEDIEU, J.; RIDDER, P.; CLERCK, P. A Method of Measuring Soil Moisture by Time-Domain Reflectometry. **Jornal of Hydrology**, v. 88, p. 319-328, 1986. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90097-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90097-1)

NARANJO, M. R.; ATAROFF, M. Calibración de equipos TDR su usos en suelos no disturbados. **Asociación Interciencia**, v. 40, n. 6, p. 416-422, 2015.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain, reflectometry: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 31, n. 3, p. 213 – 237, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00184-8)

ROTH, C.H.; SCHULIN, R.; FLUHLER, H.; ATTINGER, W. Calibration of time-domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach. **Water Resources Research**, v. 26, p. 2267-2273, 1990. <https://doi.org/10.1029/WR026i010p02267>

ROTH, C. H.; MALICKI, M. A.; PLAGGE, R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. **Journal of Soil Science**, Reading, v.43, p.1-13, 1992. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1992.tb00115.x>

SANTANA, J. A. V.; COELHO, E. F.; SILVA JUNIOR, J. J.; SANTANA JUNIOR, E. B.; VEINROMBER JUNIOR, L. A. A. Desempenho de Sondas de TDR Manufaturadas de Diferentes Comprimentos de Hastes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.4, p.1123-1129, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000400007>

SANTOS, M. R.; ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A. 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, p.299-307, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000200003>

SOUZA, C. F.; SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; COELHO, E. F. Monitoramento do Teor de Água no Solo em Tempo Real com as Técnicas de TDR e FDR. **Irriga**, Edição Especial, p.26-42, 2016b. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p26-42>

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. Determination of the wetting front in drip irrigation using TDR Multi-wire probe. **Agricultural Water Management**, v. 59, n. 3, p. 205- 216, 2003.

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO MÉDIO DE LEITURAS COM TDR PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO

SOUZA, J. M.; REIS, E. F.; BONOMO, R.; PEREIRA, L. R. Calibração de sonda TDR em um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 10, n. 6, p. 1049 - 1055, 2016a. <https://doi.org/10.7127/rbai.v10n600504>

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, p.574-582, 1980. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>