

**CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTO DE TDR EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO E CAMPO PARA DOIS TIPOS DE TUBOS DE ACESSO¹**

Clinimar Oliveira Amaral², Mário Sérgio Paiva de Araújo³, Elias Fernandes de Sousa⁴, Flávio Gonçalves Oliveira⁵ & Cláudio Roberto Marciano⁶

1 - Trabalho adaptado de parte da tese de Doutorado do primeiro autor.

2 - Matemático, Doutor em Produção Vegetal, Técnico Agropecuário do IFF-RJ, *e-mail*: camaral@iff.edu.br.

3 - Engenheiro Agrícola e Ambiental, Doutorando em Produção Vegetal, CCTA/UENF, *e-mail*: pmariosergio@yahoo.com.br.

4 - Engenheiro Agrícola, Professor na UENF, CCTA/UENF, *e-mail*: sousa.elias.fernandes@gmail.com.

5 - Engenheiro Agrícola, Professor na UFMG, *e-mail*: flaviogoliveira.ufmg@hotmail.com.

6 - Engenheiro Agrônomo, Professor na UENF, CCTA/UENF, *e-mail*: marciano@uenf.br

Palavras-chave:

argissolo
cambissolo
constante dielétrica
reflectometria no domínio do tempo
umidade do solo

RESUMO

A reflectometria no domínio do tempo (TDR) se destaca entre as técnicas utilizadas para a determinação do conteúdo de água no solo em virtude de características como: alta precisão, manutenção da estrutura física do solo, facilidade de manuseio e portabilidade. Todavia, sua aplicação tem sido limitada à pesquisa devido ao alto custo do equipamento, tubos de acesso e a necessidade de calibração. Nesse sentido, objetivou-se com este trabalho calibrar o TDR, em condições de laboratório e em campo, com a utilização de tubos de acesso de TECANAT e de PVC. Os resultados em laboratório foram satisfatórios para todas as calibrações nos dois tipos de tubos, com a leitura do TDR sendo representativa para estimar a umidade do Cambissolo Háplico Eutrófico. Os resultados em campo foram razoáveis, para calibração da constante dielétrica nos dois tubos estudados em Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, isso devido a intempéries do ambiente, textura argilosa do solo e aderência do tubo ao solo. A utilização de tubos de TECANAT e PVC necessita de calibrações para cada solo, ficando a viabilidade de seu uso dependente ainda da qualidade de sua instalação no solo.

Keywords:

typic kandiudult
typic haplustept
dielectric constant
time domain reflectometry
soil moisture

TDR EQUIPMENT CALIBRATION IN LABORATORY AND FIELD CONDITIONS FOR TWO TYPES OF ACCESS PIPES**ABSTRACT**

The time domain reflectometry (TDR) stands out amongst the techniques used for the measurement of the water content in the soil due to characteristics such as high precision, conservation of the soil's physical structure, easiness of use and portability. However, due to the high cost of equipment and access tubes and the need to calibrate, its application has been limited to research. Thus, the aim of this work was to calibrate the TDR, in laboratory and field conditions, using TECANAT and PVC access tubes. The results in the laboratory were satisfactory for all calibrations in the two types of tubes, with the TDR reading representative for estimating the moisture of the Typic Haplustept. The field results were reasonable for calibration of the dielectric constant in the two tubes studied in Typic Kandiudult, due to environmental factors, from clayey texture of soil and adherence of the tube to the soil. The use of TECANAT and PVC tubes requires calibrations for each soil, being that the viability of its use still depends on the quality of its installation in the soil.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da umidade do solo consiste em informação técnica fundamental para estudos nas áreas de agricultura, ecologia e engenharia, bem como atividades relacionadas às áreas científicas como física do solo e hidrologia (SOUZA et al., 2013). A determinação da umidade do solo pode ser feita por meio de métodos diretos ou indiretos, podendo-se citar: o método gravimétrico, sonda de nêutrons, atenuação de raios gama, sondas de capacitância, tensiômetro, sensores eletrométricos, reflectometria no domínio do tempo (TDR), entre outros (SANTOS et al., 2010).

Devido à sua precisão, o método gravimétrico é considerado padrão para a quantificação da umidade do solo. Todavia, características como a necessidade da coleta de amostras de solo, intervalo de tempo para a obtenção dos resultados e impossibilidade de repetitividade e automação tornam este método pouco atrativo e seu uso mais restrito a estudos científicos (SOUZA et al., 2013).

Diante do exposto, a técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) se destaca devido à boa precisão, pela possibilidade de monitoramento de uma grande quantidade de pontos amostrais, pela rapidez, pela manutenção da estrutura física do solo, facilidade de manuseio, portabilidade, possibilidade de automação na coleta de dados e de monitoramento da frente de umedecimento e redistribuição da água no perfil do solo (BIZARI et al., 2011; ARSOY et al., 2013).

Basicamente, o princípio de funcionamento do TDR consiste na determinação de uma constante dielétrica a partir da emissão de uma sequência de pulsos harmônicos em uma linha de transmissão, composta de hastes introduzidas no solo (UMENYIORA et al., 2012). Esta constante é obtida da medição do tempo de deslocamento da sequência de pulsos; quanto maior o tempo de deslocamento, maior a constante dielétrica do solo (SANTOS et al., 2012). Logo, a estimativa do conteúdo de água no solo é obtida a partir da correlação entre a constante dielétrica do solo e os dados de conteúdo de água no solo obtidos no campo ou laboratório (ALMEIDA et al., 2012).

No caso específico do TDR modelo TRIME-PICO IPH/T3, estas hastes são substituídas por

uma sonda. A sonda é composta por um corpo cilíndrico em PVC, contendo quatro placas de alumínio montadas sobre molas, em lados opostos da sonda. Os pulsos gerados propagam-se ao longo dessas placas, gerando um campo magnético em torno da sonda até atingir a extremidade final e então é refletido. A partir desta constante dielétrica, pode-se calcular o conteúdo volumétrico de água. Esta sonda é introduzida no solo por meio de tubos de acesso em material plástico TECANAT (IMKO, 2018).

Todavia, o TDR apresenta algumas desvantagens, como o pouco conhecimento do comportamento em solos tropicais, alto custo de aquisição do equipamento, dos tubos de acesso e a necessidade de calibração (BERNARDO et al., 2006; SOUZA et al., 2013).

A necessidade de calibração para cada tipo de solo deriva dos resultados de pesquisas que apontam diferenças entre os valores da umidade do solo quando comparados os valores estimados pelo TDR utilizando a equação padrão do equipamento com os valores de umidade obtidos pelo método gravimétrico (TOMMASELLI E BACCHI, 2001; SILVA et al., 2005; SOUZA et al., 2006; SOUZA et al., 2013; JUNIOR et al., 2017).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi calibrar o TDR em condições de laboratório e de campo com a utilização de tubos de acesso tanto originais, em TECANAT, como em PVC.

MATERIAL E MÉTODOS

As calibrações foram realizadas em laboratório e posteriormente em área experimental, utilizando-se o equipamento TDR TRIME PICO IPH T3, produzido pela fábrica alemã IMKO Micromodultechnik GmbH, que estima o conteúdo volumétrico de água no solo a partir da equação padrão do equipamento, apresentada por TOPP et al. (1980), sendo indicada a calibração para cada tipo de solo (TOMMASELLI & BACCHI, 2001). Este equipamento é composto de um transmissor TRIME-PICO IPH conectado à sonda T3, que transmite os dados via *bluetooth* a um *palmtop* que tem instalado o *software* de leitura PICO-TALK. A medida é realizada em tubos de acesso fixos ao solo, originalmente feitos do material TECANAT,

que apresenta comprimento variável e com diâmetros externo e interno de 44,3 mm e 42 mm, respectivamente. Devido ao alto custo desses tubos de TECANAT, decidiu-se utilizar, também, tubos de PVC como alternativa mais econômica de tubo de acesso. O tubo de PVC foi escolhido levando-se em consideração a medida de diâmetro interno que mais se aproximasse à medida interna encontrada no tubo TECANAT.

Calibração em laboratório

A calibração em laboratório foi realizada no laboratório de Física do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, em Montes Claros-MG, nos meses de setembro e outubro do ano de 2013.

O solo utilizado foi Cambissolo Háplico Eutrófico (SANTOS, 2013), coletado de uma área cultivada, com teor de água em base gravimétrica na capacidade de campo igual a 35% e de textura argilosa, conforme demonstra a análise física do solo na Tabela 1. O solo foi seco em estufa a 105°C por 48 horas e em seguida foi destorroado e peneirado com malha de 2 mm.

Tabela 1. Análise física do solo

Elementos	Porcentagem no solo (%)
Areia grossa	3,00
Areia fina	25,00
Silte	26,00
Argila	46,00

Fonte: Laboratório de Análises de Solo do Instituto de Ciências Agrárias-UFMG.

As calibrações do TDR foram feitas utilizando-se o tubo de TECANAT e o tubo de PVC da linha predial para água fria que tem como características o diâmetro nominal de 40 mm, o diâmetro externo máximo de 50 mm, espessura da parede de 3 mm, diâmetro interno de 44 mm e pressão nominal de 750 kPa (75 mca).

Para a montagem do experimento, utilizaram-se tubos de PVC com 150 mm de diâmetro e 50 cm de altura, os quais serviam de suporte para o solo e os tubos de acesso. Em cada suporte foi colocado o solo seco e em seguida foram realizadas

as leituras com o TDR, utilizando-se os dois tipos de tubos de acesso. Após essas leituras, o solo foi pesado, umidificado em 7% (peso peso⁻¹), homogeneizado, colocado nos suportes para em seguida serem vedados e deixados em repouso por 24 horas, semelhante à metodologia utilizada por TOMMASELLI & BACCHI (2001). Para umidificar o solo, foi utilizada água proveniente do poço artesiano que abastece a irrigação do instituto.

Ao todo foram realizadas medições em seis níveis de umidade, as quais apresentaram os valores próximos a 0%, 7%, 14%, 21%, 28% e 35% de umidade na base gravimétrica. Foram realizadas cinco repetições, para cada tubo de acesso, em cada faixa de umidade.

Calibração em campo

A calibração em campo foi conduzida em uma área experimental do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense, em Bom Jesus do Itabapoana, RJ, latitude 21° 08,3' S, longitude 41° 39,3' W, com altitude de 88 m, no período de 16 de outubro de 2017 a 15 de janeiro de 2018.

O clima, de acordo com a classificação de Köppen, é Aw, com uma estação quente e chuvosa e outra seca. A precipitação média anual é de 1.100 mm e a temperatura média anual é de 23,6°C (RAMOS *et al.*, 2009).

O solo, pelo “Sistema Brasileiro de Classificação de Solos” (SANTOS *et al.*, 2013), é um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, com textura argilosa no horizonte A e muito argilosa no horizonte B, com características físico-hídricas apresentadas na Tabela 2.

As calibrações do TDR foram feitas utilizando-se o tubo de TECANAT e o tubo de PVC diferente do utilizado em laboratório, com o objetivo de averiguar a resposta do PVC com outro diâmetro comercial. Foi utilizado o tubo de PVC da linha irrigação, que tem como características: diâmetro nominal de 50 mm, diâmetro externo de 50,8 mm, diâmetro interno de 48,1 mm e pressão de serviço de 400 kPa (40 mca). Para a instalação dos tubos de TECANAT, foi utilizado um conjunto de perfuração especialmente desenvolvido pelo fabricante do TDR. Os tubos de PVC foram instalados com a utilização de sondas, semelhantes às utilizadas

Tabela 2. Composição granulométrica, densidade das partículas (Dp), densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (macr) e microporosidade (micr) para os horizontes do Argissolo Vermelho-Amarelo, Bom Jesus do Itabapoana –RJ

Hor.	Prof.	g kg ⁻¹			mg m ⁻³		PT	Macr	Micr
		Areia	Silte	Arg.	Dp	Ds			
Ap	0-0,20	421	127	452	2,695	1,470	0,455	0,126	0,328
BA	0,20-0,55	272	111	617	2,717	1,406	0,482	0,120	0,362
Bt1	0,55-0,90	247	84	669	2,848	1,337	0,531	0,129	0,402
Bt2	0,90-1,20	289	84	627	2,841	1,415	0,502	0,104	0,398
Bt3	1,20-1,60	340	115	545	2,863	1,478	0,484	0,117	0,367
C	1,60-2,20	499	178	323	2,817	1,589	0,436	0,100	0,336

Fonte: Laboratório de Solos, LSOL, da Universidade Estadual do Norte Fluminense.

para coleta de amostras de solo, com diâmetro externo de 50 mm, visando a um bom contato do tubo de acesso com o solo. Ambos os tubos foram instalados com 2 m de comprimento.

Para a instalação do experimento, foram delimitadas três parcelas próximas, espaçadas em 1,8 m, sendo instalados em cada uma um tubo de PVC e um tubo de TECANAT, respeitando-se uma distância mínima de 60 cm entre os tubos, de forma a não haver interferências nas medições. Os tubos foram introduzidos no solo até uma profundidade de 1,5 m, sendo as medições realizadas em cinco camadas (0,00 – 0,20; 0,20 – 0,40; 0,40 – 0,60; 0,60 – 0,80 m de profundidade).

Após a instalação dos tubos, as áreas foram inundadas e deixadas em repouso por 24 horas, visando à estabilização do contato solo-tubo e à uniformização da distribuição da água no perfil do solo a ser avaliado. Finalizado este período, foram realizadas oito medições utilizando-se o equipamento TDR, por um período de um mês para cada profundidade avaliada. Imediatamente após cada uma das medições, foram coletadas amostras deformadas de solo de cada profundidade avaliada, para a quantificação da umidade do solo a partir do método gravimétrico. As amostras foram pesadas e levadas para a estufa a 105-110°C e deixadas nesta condição por 24 horas. Em seguida, foram colocadas em dessecador e deixadas esfriar e então pesadas. Após a pesagem, as amostras foram novamente levadas para a estufa e após 1 hora novamente pesadas, sendo repetido o processo até a obtenção de peso constante.

Análise dos dados

A partir dos resultados obtidos nos dois tipos de calibração, foram realizadas análises de regressão para a obtenção das equações de calibrações para os diferentes materiais utilizados como tubo de acesso. Foram também realizadas regressões entre os valores percentuais de umidade obtidos pelo método gravimétrico e os valores estimados pelo TDR para os tubos, utilizando-se a equação calibrada para cada tubo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração em laboratório

A Figura 1 apresenta a regressão entre os valores de umidade (%) do solo obtidos pelo método gravimétrico e os valores das constantes dielétricas nas leituras do TDR para os dois tubos de acesso. Pode-se notar que as curvas de regressão e a distribuição dos pontos apresentaram comportamento similar às encontradas por JUNIOR et al. (2017), calibrando TDR de haste em diferentes texturas de solos. Essa característica também foi obtida por BATISTA et al. (2016), em que se pode observar que, quando o solo tem umidade próxima a zero, a constante dielétrica fica próxima de 3, devido às interferências do solo e do ar presente na matriz do solo. O aumento de umidade do solo tende a aumentar a constante dielétrica, apresentando uma correlação positiva.

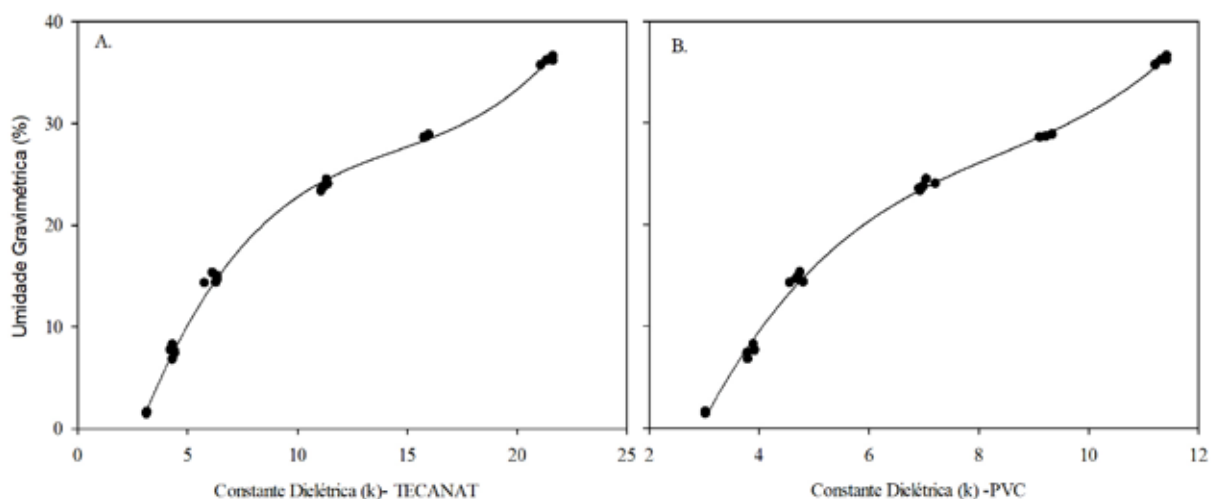


Figura 1. Constante dielétrica estimada pelo TDR, em tubos de acesso de TECANAT (A) e PVC (B), em relação aos valores de umidade determinados pelo método gravimétrico, em amostra de Cambissolo Háplico Eutrófico

As equações de calibrações do TDR para os dois tipos de tubos de acesso são apresentadas na Tabela 3. Verifica-se que os modelos encontrados são significativos a 99%, tendo coeficientes de determinação superiores a 0,96, semelhante ao que foi obtido por BATISTA *et al.* (2016). TOMMASELLI & BACCHI (2001), calibrando o TDR em laboratório, encontraram valores satisfatórios de umidade utilizando modelos por eles gerados, semelhantes aos resultados obtidos quando foram determinadas as umidades pelos modelos para o PVC e o TECANAT. As equações de calibração geradas pelas regressões são satisfatórias para a faixa de umidade do solo estudada, sendo necessário fazer correções na equação em faixa de umidade superior a essa, conforme orientam GUBIANI *et al.* (2015).

A Figura 2 apresenta a relação entre os valores de umidade (%) do solo obtidos pelo método gravimétrico e pelos modelos de calibração encontrados. Nota-se que as leituras de umidade tiveram uma relação próxima de 1 para 1, evidenciando que os modelos de calibração explicam satisfatoriamente a variação de umidade do Cambissolo Háplico Eutrófico em condições de laboratório. Esse resultado também foi encontrado em trabalhos utilizando TDR de haste (TOMMASELLI & BACCHI, 2001; BATISTA

et al., 2016; JÚNIOR *et al.*, 2017). Diante desses resultados, comprova-se que é possível e viável a utilização do tubo de PVC como tubo de acesso do TDR TRIME em condições de laboratório, respeitando-se as especificações aqui citadas. É importante salientar que essas medições foram feitas para uma condição de profundidade variando de 0-30cm.

As equações de calibração geradas pelas regressões foram satisfatórias para os níveis de umidade do solo estudados. Para valores de umidade superiores a esses, é necessário fazer ajuste na equação (GUBIANI *et al.*, 2015).

Calibração em campo

A Figura 3 mostra a regressão entre os valores de umidade do solo (%) obtidos pelo método gravimétrico e os valores da constante dielétrica pelo TDR utilizando-se os dois tubos de acesso. O modelo polinomial cúbico foi o que apresentou o melhor ajuste para a determinação da umidade em função das constantes dielétricas, baseado na ANOVA da regressão, no coeficiente de determinação e na significância dos coeficientes da regressão. O mesmo foi observado por VILLWOCK *et al.* (2004). Na Figura 3 A, pode ser observado que a variação da constante dielétrica medida pelo tubo TECANAT é maior que as leituras feitas no PVC (Figura 3B), semelhante ao ocorrido no

Tabela 3. Modelos de calibrações para os tubos de acesso em função da constante dielétrica e modelos de calibrações em função da umidade calibrada em amostra de Cambissolo Háplico Eutrófico

Tipo de tubo	Equação calibrada	R ² aj.	Erro Pad.	Prob>F
TECANAT	$\theta=0,0112k^3-0,4903k^2+7,9161k-8,573$	0,9978	0,5670	0,0001
PVC	$\theta=0,09088k^3-2,2754k^2+1,273k-44,969$	0,9974	0,6157	0,001
TEC.cal.	$\theta_{GRAV.} = 1,0029\theta_{TECANAT}$	0,9649	0,5380	0,001
PVC cal.	$\theta_{GRAV.} = 0,9979\theta_{PVC}$	0,9648	0,5833	0,001

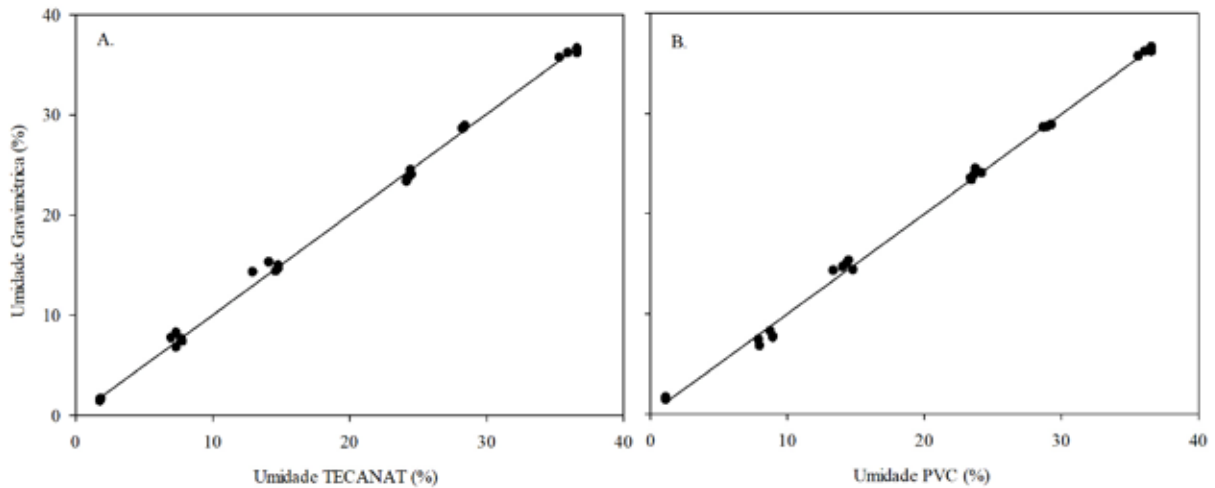


Figura 2. Umidade calibrada estimada pelo TDR, em tubos de acesso de TECANAT (A) e PVC (B), em relação aos valores de umidade determinados pelo método gravimétrico, em amostra de Cambissolo Háplico Eutrófico

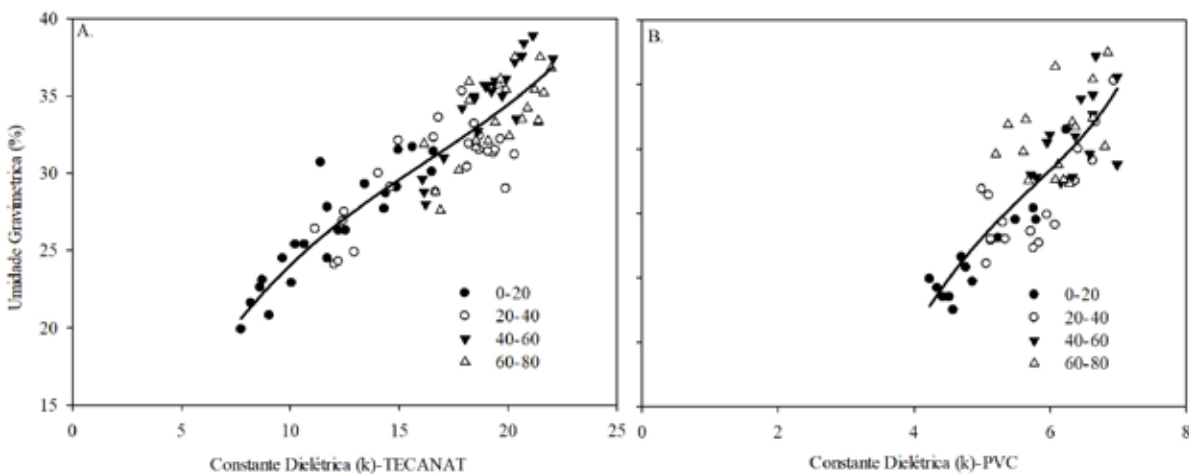


Figura 3. Constante dielétrica estimada pelo TDR, em tubos de acesso de TECANAT (A) e PVC (B), em relação aos valores de umidade determinados pelo método gravimétrico, em um Argissolo Vermelho-Amarelo

trabalho em laboratório. Por ser um experimento em campo, sofre interferência das intempéries do ambiente, sendo difícil aumentar a variação de umidade no solo, o que acarretaria maior dispersão

dos dados e modelos satisfatórios.

As equações de calibrações do TDR para os dois tipos de tubos de acesso são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Modelos de calibrações para os tubos de acesso em função da constante dielétrica e modelos de calibrações em função da umidade calibrada, em um Argissolo Vermelho-Amarelo

Tipo de tubo	Equação calibrada	R ² aj.	Erro Pad.	Prob>F
TECANAT	$\theta = 0,0044k^3 - 0,2094k^2 + 4,227k - 1,61$	0,7855	1,9786	0,0001
PVC	$\theta = 0,6105k^3 - 0,381k^2 + 63,828k - 112,77$	0,6454	3,1327	0,001
TEC.cal.	$\theta_{\text{GRAV.}} = 1,0019\theta_{\text{TECANAT}}$	0,8002	1,9696	0,001
PVC cal.	$\theta_{\text{GRAV.}} = 1,0024\theta_{\text{PVC}}$	0,6625	3,0870	0,001

Observando-se a Tabela 4 e a Figura 3, fica evidente que, devido a ser um ambiente não controlado e com maiores profundidades, houve uma maior concentração dos dados em uma mesma faixa de umidade, acarretando um erro padrão maior que o obtido em laboratório. A curva de calibração apresentou-se razoável para o Argissolo em que a equação foi explicada por 79% das leituras no TECANAT e 64% no PVC; esses valores são próximos ao encontrado por PIZETTA et al. (2017) trabalhando em Argissolo. Os autores alegaram que devido à textura argilosa as leituras de constante dielétrica ficam comprometidas. LACERDA et al. (2005) observaram que o TDR em condições de campo apresenta discrepância em leitura mais profunda e com maiores umidades, indicando a necessidade de uma calibração mais controlada. O mesmo é indicado por MUÑOZ-CARPENA et al. (2004) e SANTOS et al. (2010), e também afirmam que a textura do solo pode influenciar no desempenho do TDR. Segundo os autores, solos com alto teor de argila possuem uma quantidade maior de água adsorvida e uma menor quantidade de água livre na matriz do solo, apresentando uma constante dielétrica baixa. SOUZA et al. (2016) concluíram que as estimativas de umidade apresentaram o menor desempenho e maior erro nos solos de textura argilosa em comparação aos solos com menores teores de argila.

O modelo de calibração gerado para o PVC foi significativo e apresentou um coeficiente de determinação de 0,64, sendo inferior ao modelo gerado para o TECANAT (0,78). Essa discrepância foi maior que a observada em laboratório e pode ser explicada devido ao diâmetro interno do tubo de PVC usado ser cerca de 4 mm maior que os diâmetros internos do TECANAT e do tubo de

PVC utilizado em laboratório. Outro fator que pode contribuir para a subestimativa dos valores lidos pelo TDR com a utilização de tubos em PVC ou TECANAT, quando comparados com a calibração em laboratório, pode ser atribuído à falta ou irregularidade no contato entre o tubo de acesso e o solo e entre a sonda e o tubo. Segundo IMKO (2018), a necessidade de um contato próximo entre o tubo e o solo é essencial para medições confiáveis, uma vez que a sensibilidade de medição é mais alta perto do tubo de acesso e diminui exponencialmente à medida que se afasta dele. Para um teor de água no solo de 15%, um espaço de ar de 1 mm, ao redor do tubo, resultaria em uma subestimativa de 1% a 2%. Com um teor de água de 25%, o erro seria de 5% e, para conteúdos muito elevados (acima de 50%), os erros podem atingir 10%.

A Figura 4 apresenta a relação entre os valores de umidade (%) do solo obtidos pelo método gravimétrico e pelo modelos de calibração encontrados. Observa-se que, assim como encontrada em laboratório, apresentam equações ajustadas com a relação 1 para 1, embora os coeficientes de determinação tenham sido mantidos próximos aos valores obtidos nos modelos de constante dielétrica para os dois tubos. Esse fato demonstra novamente os efeitos das interpéries do ambiente nas calibrações ocasionando erros padrões altos, principalmente no tubo de PVC.

Diversos estudos observaram a necessidade de utilização de curvas de calibração, entre eles BATISTA et al. (2016), SOUZA et al. (2016) e SOUZA et al. (2013), os quais verificaram que o modelo linear apresentou o melhor ajuste para a determinação da umidade gravimétrica em função da umidade estimada pelo TDR.

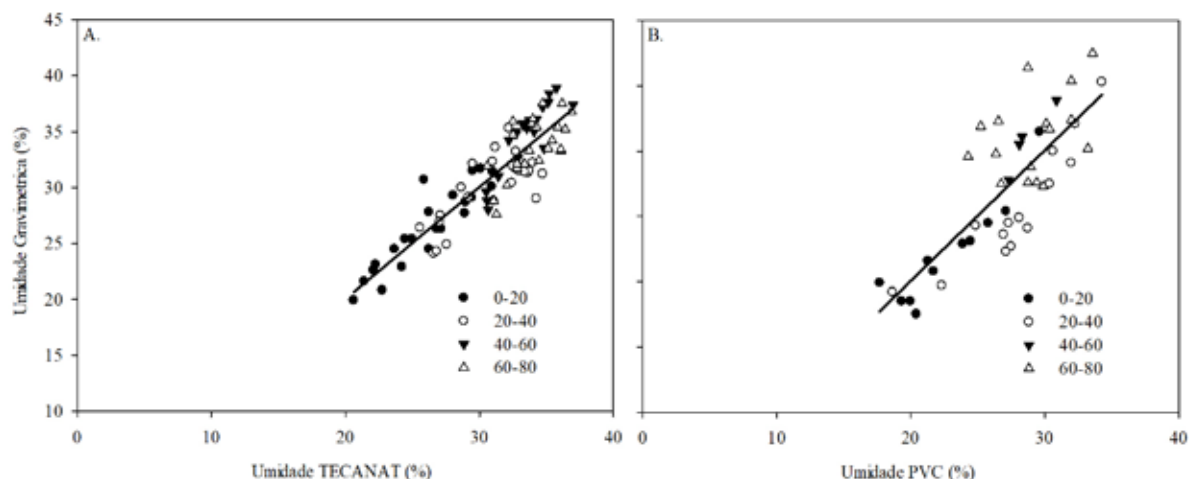


Figura 4. Umidade calibrada estimada pelo TDR, em tubos de acesso de TECANAT (A) e PVC (B), em relação aos valores de umidade determinados pelo método gravimétrico, em um Argissolo Vermelho-Amarelo

CONCLUSÕES

Os resultados indicam a viabilidade da utilização do TDR modelo TRIME-PICO IPH/T3 usando tubos de acesso original do equipamento, TECANAT, e com tubos de acesso de PVC, como alternativa para redução de custos. A utilização fica condicionada à aplicação da curva de calibração para os solos estudados, bem como à adoção de uma metodologia adequada para introdução do tubo de acesso de forma a proporcionar um bom contato entre este e o solo quando for instalado no campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C.A.B.; ANTONINO, A.C.D.; PIMENTEL, R.M.M.; LIRA, C.A.B.O.; LIMA, J.R.S. Influência da Densidade na Estimativa da Umidade Volumétrica em um Latossolo Vermelho-Amarelo (Influence of Density in Estimation of Volumetric Moisture an Oxisol). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.5, n.5, p.1056-1068, 2012.

ARSOY, S.; OZGUR, M.; KESKIN, E.; YILMAZ, C. Enhancing TDR based water content measurements by ANN in sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.195, p.133-144, 2013.

BATISTA, L.S.; COELHO, E.F.; PEREIRA,

F.A.C.; SILVA, M.G.; GOMES FILHO, R.R.; GONÇALVES, A.A. Calibração de sonda artesanal de uso com tdr para avaliação de umidade de solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.10, n.2, p.522, 2016.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. Manual de irrigação. 8°. Ed. Editora UFV, Viçosa-MG, 2006.

BIZARI, D.R.; MATSURA, E.E.; SOUZA, C.F.; ROQUE, M.W. Haste portátil para utilização de sondas de TDR em ensaios de campo. **Revista Irriga**, Botucatu, v.16, n.1, p.31, 2011.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; GELAIN, N.S. Condição de contorno para calibração de reflectômetro usado para medição de água no solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.45, n.8, p.1412-1417, 2015.

IMKO–IMKO Micromodultechnik GmbH. (2017): < <https://imko.de/en/products/soilmoisture/soilmoisture-sensors/trimepicoipht3>> acesso em 10/01/2018.

LACERDA, R.D.; GUERRA, H.O.C.; BARROS JUNIOR, G.; CAVALCANTI, M.L.F. Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v.5, n.1, p. 1-13, 2005.

- MUÑOZ-CARPENA, R.; SHUKLA, S.; MORGAN, K. **Field devices for monitoring soil water content**. University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, EDIS, 2004.
- NÓIA JÚNIOR, R.S.; PEZZOPANE, J.E.M.; CECÍLIO, R.A.; CHRISTO, B.F.; VINCO, J.S.; XAVIER, T.M.T. Calibração de sonda TDR para a estimativa da umidade em diferentes tipos de substratos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.11, n.8, p.2132, 2017.
- PIZETTA, S.C.; RODRIGUES, R.R.; PEREIRA, G.M.; PACHECO, F.E.D.; VIOLA, M.R.; LIMA, L.A. Calibração de um sensor capacitivo para estimativa da umidade em três classes de solos. **Revista Irriga**, Botucatu, v.22, n.3, p.458-468, 2017.
- RAMOS, A.M.; SANTOS, L.A.R.; FONTES, L.T.G. (ed.). **Normais climatológicas do Brasil, 1961-1990**. Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento-MAPA, p.465, 2009.
- SANTOS, D.B., CECÍLIO, R.A., COELHO, E.F., BATISTA, R.O., SILVA, A.J.P. Calibração de TDR: desempenho de alguns métodos e equações de calibração. **Agrarian**, Dourados, v.5, n.16, p.131-139, 2012.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.dos; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.de; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 3 ed., p.353, 2013.
- 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**, Campinas, v.34, n.2, p.299-308, 2010.
- SILVA, C.R.; SOUZA, C.F.; ATARASSI, R.T.; FERREIRA NETO, M.; MATSURA, E.E.; FOLEGATTI, M.V. Calibração de equipamentos para medida da umidade do solo com sistema eletrônico de aquisição de dados “Data Logger”. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.16, n.2, p.9-13, 2005.
- SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; FOLEGATTI, M.V.; COELHO, E.F.O.R.D. (Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Revista Irriga**, Botucatu, v.11, n.1, p.12-25, 2006.
- SOUZA, C.F.; PIRES, R.C.M.; MIRANDA, D.B.; VARALLO, A.C.T. Calibração de sonda FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Revista Irriga**, Botucatu, v.18, n.4, p.597, 2013.
- 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, 2016.
- TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v.36, n.9, p.1145-1154, 2001.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v.16, n.3, p.574-582, 1980.
- UMENYIORA, C.A.; DRUCE, R.L.; CURRY, R.D.; NORGARD, P.; MCKEE, T.; BOWDERS, J.J.; BRYAN, D.A. Dielectric constant of sand using TDR and FDR measurements and prediction models. **IEEE Transactions on Plasma Science**, Santa Fé, v.40, n.10, p.2408-2415, 2012.
- VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F.; VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Revista Irriga**, Botucatu, v.9, n.1, p.82-88, 2004.