

## **CALIBRAÇÃO DE SONDAS FDR E TDR PARA A ESTIMATIVA DA UMIDADE EM DOIS TIPOS DE SOLO**

**CLAUDINEI FONSECA SOUZA; REGINA CÉLIA MATOS PIRES<sup>2</sup>; DAVIDSON BANDEIRA DE MIRANDA<sup>3</sup> E ANTONIO CLAUDIO TESTA VARALLO<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Professor Adjunto, Depto. de Recursos Naturais e Proteção Ambiental – CCA/UFSCar – [cfsouza@cca.ufscar.br](mailto:cfsouza@cca.ufscar.br)

<sup>2</sup>Pesquisadora, Centro de Ecofisiologia e Biofísica, Instituto Agrônomo (IAC) – [rcmpires@iac.sp.gov.br](mailto:rcmpires@iac.sp.gov.br)

<sup>3</sup>Engenheiro Ambiental e Sanitarista, Universidade de Taubaté – [davidsonbm@yahoo.com.br](mailto:davidsonbm@yahoo.com.br)

<sup>4</sup>Professor Mestre, Departamento de Engenharia Civil – UNITAU – [antonio.varallo@yahoo.com.br](mailto:antonio.varallo@yahoo.com.br)

### **1 RESUMO**

Existe a tendência de utilização de métodos indiretos para estimativa do teor de água no solo (umidade do solo -  $\theta$ ) em campo, devido à facilidade no manuseio e agilidade na obtenção dos dados. Na estimativa da umidade do solo recomenda-se a confecção de curva de calibração para cada tipo de solo. O objetivo do presente trabalho foi avaliar e calibrar sondas FDR (Diviner2000) e TDR para medida da umidade em dois tipos de solo, com diferentes texturas. Em condições de laboratório, comparou-se a variação da umidade do solo determinada pelos métodos: FDR, TDR e método padrão (gravimétrico). Os valores de umidade do solo medidos permitem concluir que as leituras com o FDR subestimaram os valores e as com o TDR superestimaram quando comparados com o método padrão. No entanto, as diferenças nos valores absolutos em relação à condição padrão foram menores para o TDR. Os resultados obtidos revelaram que os métodos indiretos podem substituir o método padrão quando a acurácia não for essencial, mostrando-se aceitáveis para monitoramento da água no solo.

**Palavras-chave:** reflectometria no domínio da frequência, reflectometria no domínio do tempo, capacitância.

**SOUZA, C. F.; PIRES, R. C. M.; MIRANDA, D. B. de; VARALLO, A. C. T.**  
**CALIBRATION OF FDR AND TDR PROBES TO ESTIMATE WATER CONTENT IN TWO TYPES OF SOIL**

### **2 ABSTRACT**

A tendency exists towards using indirect methods to estimate soil water content (soil moisture -  $\theta$ ) in the field, due to the easy of handling and agility for data acquisition. For soil moisture estimates, calibration curves are recommended for each type of soil. The objective of this study was to evaluate and calibrate FDR (Diviner2000) and TDR probes to measure moisture in two types of soil with different textures. Under laboratory conditions, variations in soil moisture determined by FDR, TDR and the standard (gravimetric) methods were compared. Values of soil moisture showed that readings using FDR method underestimated the values, and those using TDR method overestimated them when compared with those of the standard method. However, TDR values were lower to those of the standard method. Indirect methods proved to be acceptable for monitoring soil water, and the results showed that they can replace the standard method when accuracy is not essential.

**Keywords:** frequency domain reflectometry, time domain reflectometry, capacitance.

### 3 INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos é tema relevante para os diferentes setores da sociedade e crítico na agricultura, uma vez que está diretamente relacionado com produção e qualidade das culturas. O monitoramento da água no solo consiste, para a agricultura irrigada, em ferramenta essencial para o manejo da água nas culturas, minimizar perdas de água e de nutrientes por lixiviação no solo, e garantir a sustentabilidade da atividade.

Considerando-se a crescente preocupação com a escassez de água e a necessidade de economia tanto de água quanto de energia, os agricultores defrontam-se atualmente com o desafio de continuarem a desempenhar papel de importância social e econômica, porém com maior racionalidade no uso dos recursos naturais. Assim, a utilização de métodos de irrigação e de práticas de manejo que permitam maior eficiência no uso da água e menor consumo de energia são metas imprescindíveis para a agricultura moderna.

A medida da umidade do solo consiste em informação técnica fundamental para uma série de atividades econômicas das áreas de agricultura, ecologia e engenharia, além de atividades relacionadas à áreas científicas como em física do solo. Existem vários métodos para avaliar o valor desse parâmetro, dentre eles estão os métodos diretos tal como método gravimétrico, considerado padrão, que, no entanto, é trabalhoso e requer tempo de reposta de pelo menos 24 horas para obtenção do resultado, não possibilitando a repetibilidade. Por isso, os métodos indiretos estão ganhando espaço no Brasil e no mundo. Técnicas como Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e a Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) consistem em alternativas para quantificação do conteúdo de água do solo, fornecendo leituras precisas, rápidas e em diferentes profundidades. Breve descrição e discussão sobre o tema é apresentada por Warrick & Or (2007).

A medida da umidade do solo por sonda FDR, também conhecida por sonda de capacitância, baseia-se em um par de eletrodos ou placas metálicas condutoras dispostas em paralelo e separadas por material isolante constituindo-se um capacitor. Quando ativado, a matriz solo-água-ar forma o meio dielétrico deste capacitor. A capacitância aumenta com o aumento do número de moléculas de água livre, e com os dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor (Paltineanu & Starr, 1997). O funcionamento das sondas de TDR baseia-se no efeito da umidade do solo na velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em cabos condutores envoltos pelo solo. Esta avaliação é possibilitada devido às diferenças entre as constantes dielétricas da água, do ar e da matriz do solo (Noborio, 2001). Os equipamentos de FDR e TDR baseiam-se na avaliação da constante dielétrica aparente ( $K_a$ ) do meio (matriz do solo, água e ar) para estimativa do conteúdo de água do solo (Fares & Alva, 2000; Silva et al., 2007), ambos podem ser utilizados de forma portátil ou com instalação permanente.

A sonda FDR é inserida em tubos de acesso que devem ser cuidadosamente instalados no solo. Apresenta como principais vantagens o fornecimento de leituras rápidas e precisas em profundidades diferentes; facilidade de operação. A sonda de marca Diviner, modelo 2000, destaca-se dentre os sensores portáteis de FDR, as sondas podem ser instaladas nas profundidades desejadas; tem boa precisão; é um método não destrutivo; não utiliza fonte radioativa; possibilita automação e acoplamento em sistema automático de dados; dentre outros aspectos (Topp et al. 1980; Souza et al. 2006a). A instalação em diferentes

profundidades requer cuidadosa instalação para o devido funcionamento. A seleção do equipamento a ser utilizado deverá considerar o objetivo, vantagens e limitações, necessidade de operador, custo, facilidade de operação dentre outros aspectos. A principal limitação do equipamento está sendo o custo para aquisição, o qual depende de importação por não haver similar nacional. Também, alguns autores têm verificado limitações quanto ao uso da equação para a medida da umidade com técnicas eletromagnéticas para solos com altos teores de matéria orgânica, solos expansivos, solos salinos e solos contendo minerais magnéticos como a magnetita, conforme revisão feita por Vaz (2008). Então, para melhor acurácia, o equipamento deve ser calibrado para o específico solo de estudo, seja em condições de laboratório ou em campo.

Vários autores tem determinado curva de calibração de sondas FDR (Morgan et al., 1999; Leib al., 2003; Fares et al., 2004; Silva et al., 2007) e de TDR (Tommaselli & Bacchi, 2001; Silva et al., 2005; Souza et al., 2006b), no entanto, para que se tenha informações precisas, é necessário a calibração do equipamento para cada tipo de solo. Para calibração do equipamento em condições de campo há necessidade de período relativamente longo sem a ocorrência de precipitações, para possibilitar a calibração com ampla variação da umidade do solo. No entanto, muitas vezes a distribuição das chuvas e a necessidade de uso do equipamento para monitoramento não viabiliza a calibração a tempo. Neste contexto, a calibração em laboratório com o solo do local de interesse pode viabilizar a operação conforme já verificado por Quemada et al. (2010).

O objetivo deste trabalho foi avaliar e calibrar sondas FDR e TDR para estimativa do conteúdo de água do solo em Latossolo Vermelho-amarelo de textura média e Nitossolo Vermelho de textura argilosa em condições de laboratório.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi executado no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento da Engenharia Civil da UNITAU (Universidade de Taubaté), situada em Taubaté na região do Vale do Paraíba do estado de São Paulo.

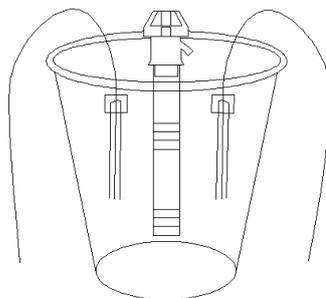
As amostras deformadas dos solos em estudo foram coletadas em novembro de 2008, nas cidades de Guaíra e Casa Branca no Estado de São Paulo. Os resultados de caracterização da composição granulométrica e a densidade do solo e dos sólidos dos dois solos avaliados encontram-se na Tabela 1. Os solos coletados nas regiões de Guaíra e de Casa Branca foram classificados como Nitossolo Vermelho, de textura argilosa e Latossolo Vermelho-amarelo, de textura média (Embrapa, 2003), respectivamente. Em ambos os locais as amostras foram coletadas no perfil do solo desde a superfície até 0,2 m de profundidade.

**Tabela 1.** Composição granulométrica e densidade do solo e dos sólidos dos solos coletados em Guaíra e em Casa Branca, no Estado de São Paulo.

Prof. m	Areia		Silte %	Argila	Densidade do solo	Densidade dos sólidos g cm <sup>-3</sup>
	grossa	fina				
Guaíra (argiloso)						
0-0,2	7,2	11,5	29,0	52,3	1,06	2,15
Casa Branca (textura média)						
0-0,2	33,5	21,0	18,0	27,5	1,48	2,27

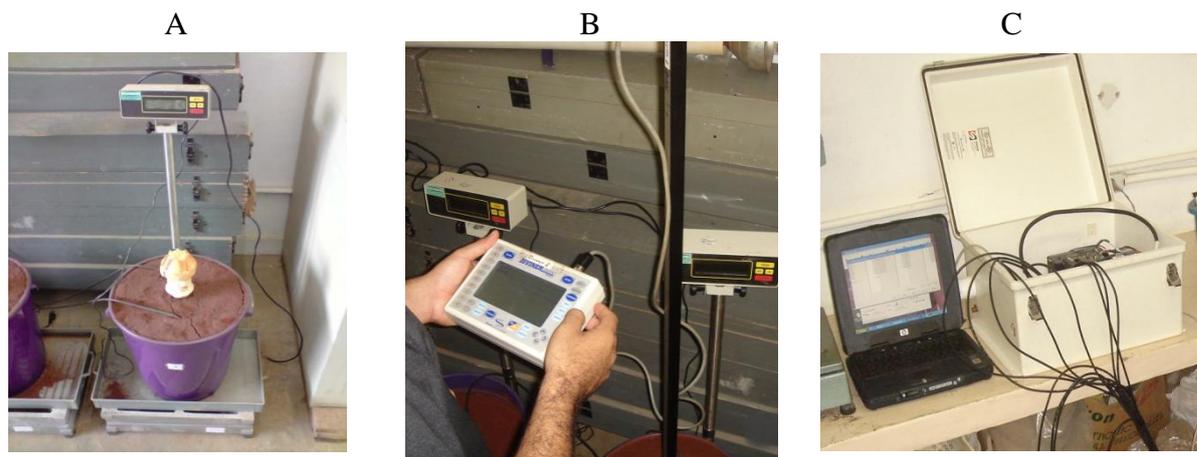
Após a coleta, ambos os solos foram expostos ao ar para secagem natural e, posteriormente, peneirados (peneira de malha de 2 mm) para a remoção do material de maior granulometria.

O experimento foi conduzido em seis vasos de volume 30 L e 400 mm de profundidade, onde três foram preenchidos com solo argiloso e três com solo de textura média. O preenchimento dos vasos foi realizado em camadas de 0,05 m de solo, sendo que para cada camada foi necessário uma leve compactação para compor a mesma densidade do solo original. Junto com esse processo instalou-se tubo de acesso com diâmetro de 52 mm e comprimento de 342 mm ao centro de cada vaso para uso com a sonda FDR. Além disso, duas sondas de TDR foram instaladas ao redor do tubo de acesso, a 50 mm de distância deste, para a comparação entre os métodos de estimativa da umidade do solo. A Figura 1 apresenta o esquema de instalação do tubo de acesso para medida com o aparelho Diviner 2000 e as sondas de TDR ambos para avaliação da umidade do solo a 150 mm de profundidades a partir da superfície do solo. Para possibilitar a drenagem da água foram abertos furos ao fundo dos vasos.



**Figura 1.** Esquema de posicionamento do tubo de acesso do Diviner 2000 e das sondas TDR para avaliação da umidade do solo nos vasos.

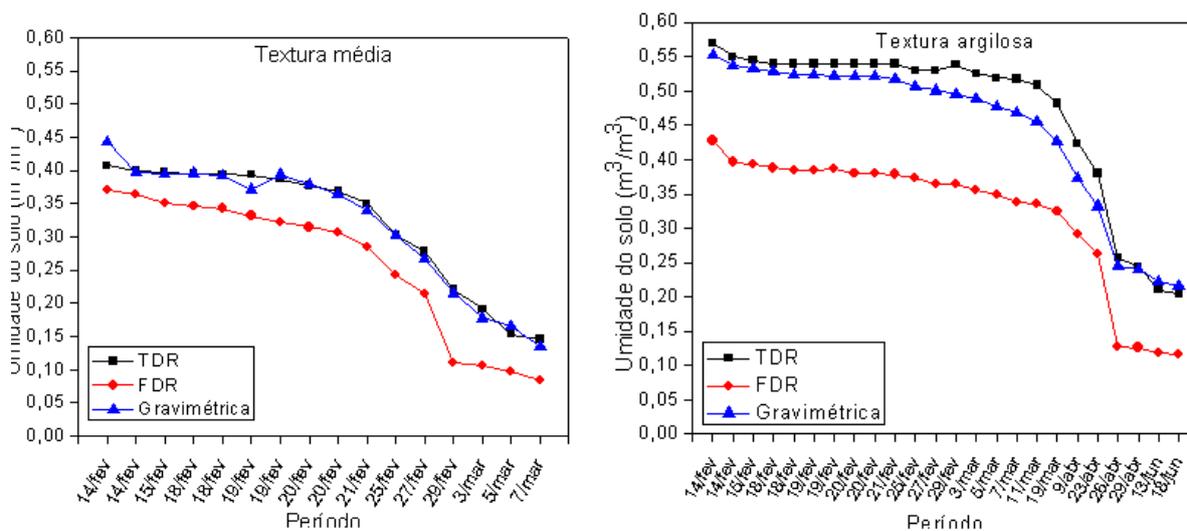
Para determinação da variação da umidade do solo pelo método gravimétrico os vasos foram montados e colocados sobre seis balanças independentes (capacidade máxima de 50 kg, mínima de 250 g e precisão de 10 g). O experimento iniciou-se com a aplicação de volume excessivo de água nos vasos para saturação do solo. Após a saturação do solo, foram abertos os drenos em cada vaso para possibilitar a drenagem. As medições iniciaram-se em 14 de fevereiro de 2009, as avaliações de variação de massa (método gravimétrico), frequência relativa (FDR) e constante dielétrica aparente (TDR) do solo ocorreram duas vezes ao dia nos primeiros 2 dias do experimento e, posteriormente, aumentou-se o intervalo entre as medições. No solo de textura argilosa a finalização das medidas ocorreu em 18 de junho de 2009 e no solo de textura média em 7 de março de 2009 devido à não ocorrência de variação na umidade do solo. A Figura 2 apresenta o esquema experimental adotado. As estimativas obtidas foram comparadas com o método padrão (gravimétrico), utilizando diagrama de dispersão e coeficiente de correlação.



**Figura 2.** Monitoramento do conteúdo de água do solo pelo método gravimétrico (A), do FDR (Diviner 2000) (B) e do TDR (C) durante o período experimental.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os valores de umidade volumétrica do solo obtidos pelos três métodos de leitura, gravimétrico, FDR e TDR para os dois tipos de solo avaliados.

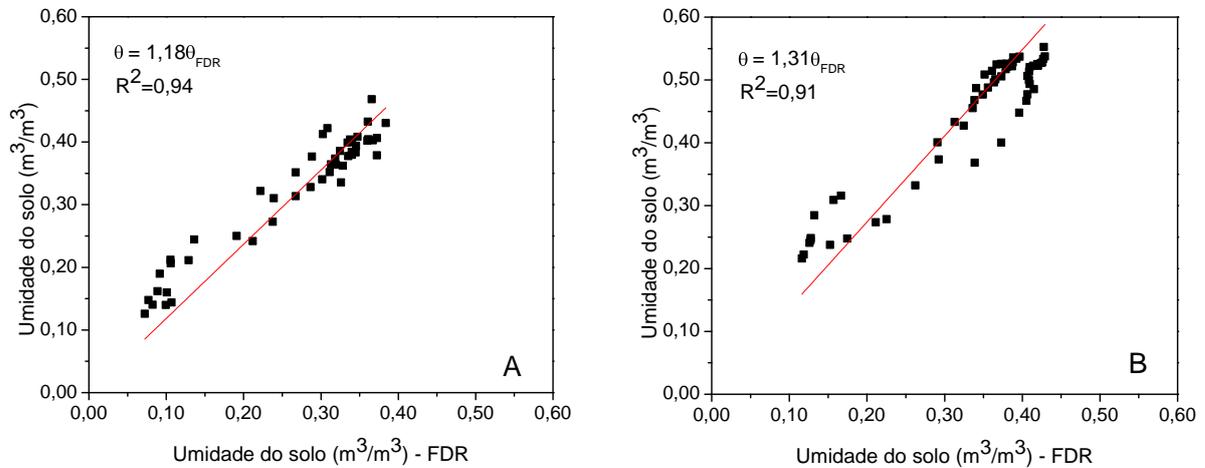


**Figura 3.** Umidade dos solos de textura média e argilosa medida por gravimetria, FDR e TDR provenientes de Casa Branca e Guaíra, respectivamente.

Pela Figura 3 é possível observar que os valores obtidos com o FDR (Diviner2000) subestimaram aqueles avaliados pelo método gravimétrico e pela técnica do TDR, nos dois tipos de solos analisados. No solo argiloso observou-se maior diferença no valor absoluto obtido em relação à gravimetria do que no solo de textura média quando utilizado o FDR.

A Figura 4 apresenta os valores da umidade do solo obtida por gravimetria em função dos valores de frequência relativa observados com a leitura do FDR (Diviner 2000), as equações de ajuste e o coeficiente de determinação nos dois tipos de solo avaliados. De

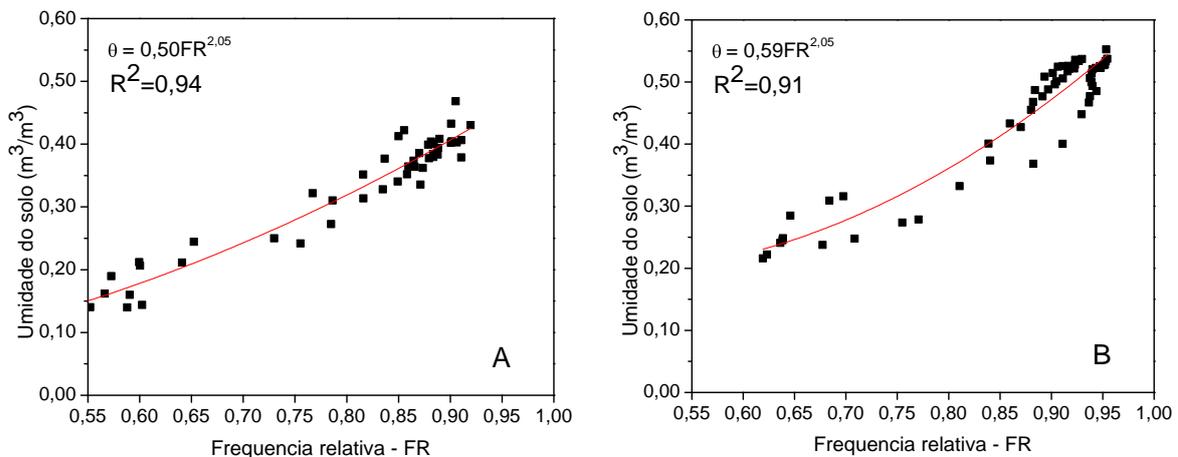
acordo com os resultados notou-se que o equipamento Diviner 2000 apresentou correlação quando comparado com o método gravimétrico.



**Figura 4.** A. Correlação entre umidade do solo (gravimetria) e umidade do solo (FDR) em solo textura média; B. Correlação entre umidade do solo (gravimetria) e umidade do solo (FDR) em solo Argiloso.

O coeficiente de determinação obtido para o solo argiloso (Figura 4B) foi menor quando comparado ao obtido no solo de textura média (Figura 4A). Os valores atingiram diferença máxima de 31% abaixo dos obtidos pelo método gravimétrico. Assim observa-se que há necessidade de cuidado maior em solos argilosos, em especial quando a obtenção do valor absoluto for necessária, com procedimento de calibração. Tal fato decorre principalmente devido ao fato das sondas FDR trabalharem com baixas frequências na faixa de MHz, aumentando sua permissividade e, conseqüentemente, a constante dielétrica aparente, isto é, a seqüência dos distúrbios ocorridos durante a polarização dos íons.

A Figura 5 apresenta a equação de calibração do equipamento Diviner2000 obtida a partir de análises de regressão não-linear, modelo tipo potência entre a contagem da frequência relativa FR, e da umidade do solo ( $\theta$ ), determinada mediante método gravimétrico.



**Figura 5.** Umidade do solo medida por gravimetria e frequência relativa (FR) obtida com a leitura do FDR, equações de calibração de modelo tipo potência e os coeficientes de determinação obtidos no solo de textura média (A) e argilosa (B).

Alguns estudos relatam diferenças entre os valores obtidos de  $\theta$  quando se faz calibrações locais com sondas FDR quando comparado com valores estimados com a adoção da equação recomendada pelo fabricante. Tal fato foi associado à granulometria e à estrutura do solo (Morgan et al., 1999; Fares et al., 2004).

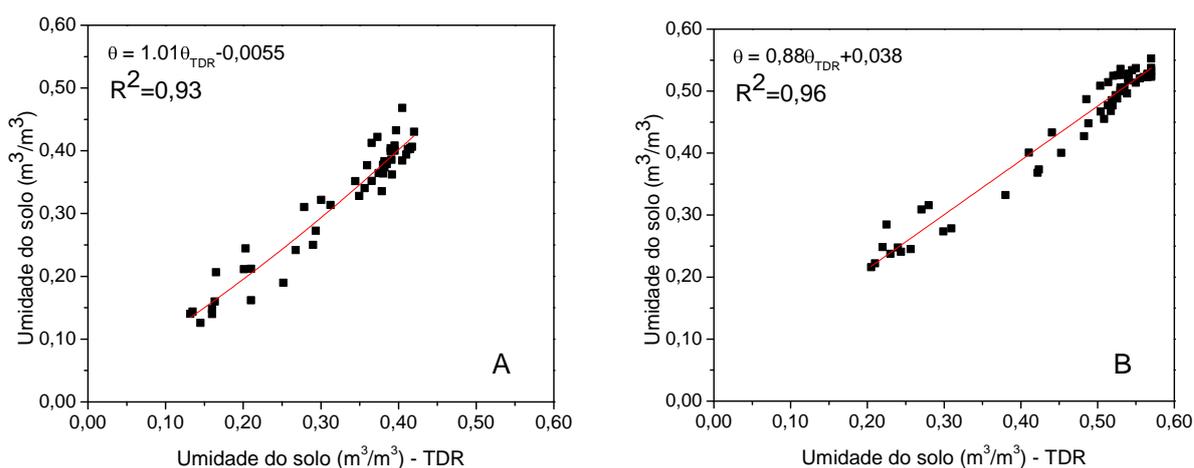
As equações de calibração da sonda FDR (Diviner 2000) obtidas no presente estudo e em outros trabalhos na literatura em diferentes tipos de solo encontram-se na Tabela 2.

**Tabela 2.** Equações de calibração obtidas em solos com texturas diferenciadas com o uso de sondas FDR.

Fonte de dados	Textura do solo	Equação	R <sup>2</sup>
Calibração do fabricante	-	$\theta=0,494FR^{3,017}$	0,99
Equação obtida (Casa Branca)	Média	$\theta=0,50FR^{2,05}$	0,94
Equação obtida (Guaíra)	Argilosa	$\theta=0,59FR^{2,05}$	0,91
Morgan et al.(1999)	Arenosa	$\theta=0,451FR^{2,121}$	0,83
Fares et al.(2004)	Argilosa	$\theta=0,440FR^{1,549}-0,040$	0,88
Groves & Rose (2004)	Siltosa	$\theta=0,531FR^{3,815}$	0,96
Andrade Junior (2007)	Arenosa	$\theta=0,397FR^{2,533}$	0,97
Silva et al. (2007)	Arenosa	$\theta=0,492FR^{2,757}$	0,93

De acordo com a Tabela 2 observa-se que os valores de coeficiente de determinação obtidos nas duas calibrações no presente trabalho, em solo de textura média e argilosa, alcançaram valores próximos e até superiores aos observados por diversos autores (Morgan et al., 1999; Fares et al., 2004; Groves & Rose, 2004; Andrade Junior et al., 2007; Silva et al., 2007).

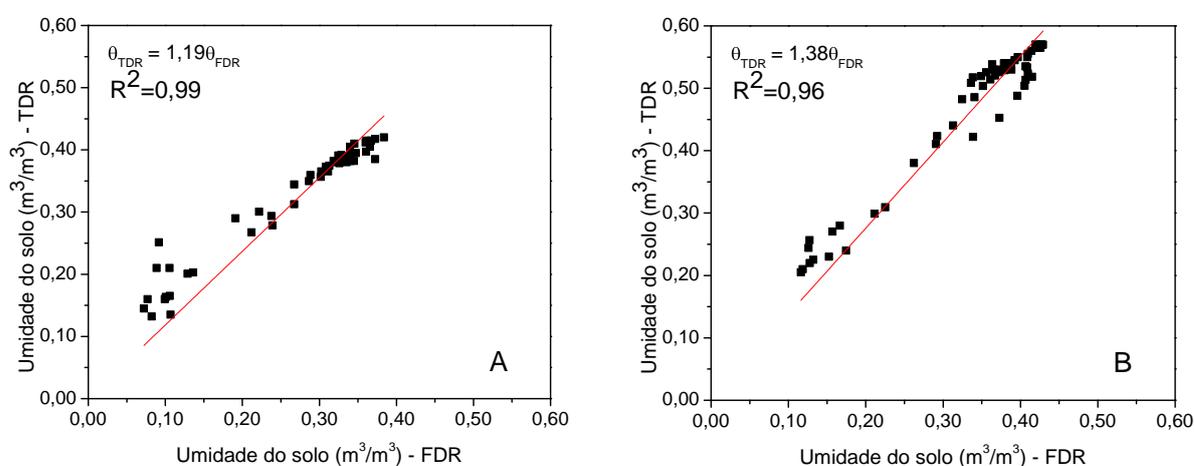
A Figura 6 apresenta os resultados e as equações de calibração e os respectivos coeficientes de ajustes considerando as medidas gravimétricas e as obtidas com TDR. O ajuste obtido foi melhor no solo argiloso (Guaíra) quando comparado ao solo de textura média (Casa Branca), diferindo do observado com o uso do FDR (Figuras 4 e 5).



**Figura 6.** Umidade do solo medida por gravimetria e por TDR, equação de calibração e o coeficiente de determinação obtidos no solo de textura média (A) e argilosa (B).

A Figura 7 apresenta a comparação entre os dois métodos indiretos (FDR e TDR) para estimar o conteúdo de água do solo. As medidas realizadas com o método FDR apresentaram valores inferiores aos obtidos com o TDR (Figura 3). O método da capacitância indicou um

valor de umidade 38% abaixo do observado pelo TDR para o solo argiloso, que por sua vez quando relacionado com a umidade obtida pela gravimetria, obteve uma correlação com  $R^2 > 0,93$  e com um erro padrão de  $S = \pm 0,002 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  como mostra a Figura 6. Os resultados obtidos no experimento corroboram com a literatura, sobre a maior precisão das medidas obtidas com TDR quando comparada com a FDR (Baumgartner et al., 1994). Entretanto, a técnica da FDR, semelhante a técnica da TDR, constitui-se em boa opção, pois pode ser calibrada em laboratório ou em campo com obtenção de bons resultados. É importante ressaltar que o custo para a utilização do TDR é superior à técnica de capacitância e requer mais conhecimento técnico para sua utilização, o que o torna uma boa opção para a utilização na estimativa da umidade do solo em pesquisa. O uso de sonda FDR tem menor custo e facilidade de operacionalização, podendo ser adotada em pesquisa e em área de cultivo comercial.



**Figura 7.** Comparação entre duas técnicas indiretas diferentes (TDR e FDR). A- Solo de textura média (Casa Branca) e B – Solo argiloso (Guaíra).

## 6 CONCLUSÕES

As sondas FDR e TDR mostraram-se aceitáveis para monitoramento da água no solo, quando a acurácia não for essencial. Os valores de umidade do solo medidos pelo método gravimétrico e os avaliados com os equipamentos com suas equações padrões permitem concluir que as leituras com o FDR subestimaram os valores e as de TDR os superestimaram. No entanto, as diferenças dos valores absolutos em relação à condição padrão foram menores para o TDR. Tais diferenças foram maiores no solo argiloso do que no de textura média quando utilizado o FDR. A metodologia proposta no presente trabalho possibilitou a obtenção de equações de calibração com uma razoável qualidade de ajuste.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE JUNIOR, A. S.; SILVA, C. R.; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 2, n. 4, p. 303-307, 2007.

BAUMGARTNER, N.; PARKIN, G. W.; ELRICK, D. E. Soil water content and potencial measured by time domain reflectometry. **Soil Science Society America Journal**, Madson, v. 58, p. 315-318, 1994.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. Brasília, DF, 2003.

FARES, A.; ALVA, A. K. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. **Irrigation Science**, New York, v. 19, p. 57-64, 2000.

FARES, A. et al. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shirinking-swelling clay soil. **Vadose Zone Journal**, Madson, v. 4, p.1390-1399, 2004.

GROVES S. J. L.; ROSE S. C. L. Calibration equations for Diviner 2000 capacitance measurements of volumetric soil water content of six soils. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 20, n. 1, p. 96-97, 2004.

LEIB, B. G.; JABRO, J. D.; MATTHEWS, G. R. Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. **Soil Science**, Baltimore, v. 168, n. 6, p. 396-408, 2003.

MORGAN, K. T. et al. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 4, p. 987-989, 1999.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 31, p. 213-237, 2001.

PALTINEANU, I. C.; STARR, J. L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n.6 , p.1576-1585, 1997.

QUEMADA, M.; GABRIEL, J. L.; LIZASO, J. Calibration of Capacitance Probes: Laboratory versus Field Procedures. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SOIL WATER MEASUREMENT USING CAPACITANCE, IMPEDANCE AND TDT, 3., 2010, Murcia. **Transactions...** Murcia: ASABE, 2010. p. 1-9.

SILVA, C. R. et al. Calibração de equipamentos para medida da umidade do solo com sistema eletrônico de aquisição de dados. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 16, n. 2, p. 9-13, 2005.

SILVA, C. R. et al. Calibration of a capacitance probe in a Paleudult. **ScientiaAgricola**, Piracicaba, v. 64, n. 6, p. 636-640, 2007.

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**, Botucatu, v. 11, n. 1, p. 12-25, 2006a.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. ; OR, D. Calibração do equipamento da TDR para um latossolo vermelho distroférrico. **Engenharia Rural**, v. 17, n. 1, p. 29-33, 2006b.

TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 9, p. 1145-1154, 2001.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980.

VAZ, C. M. P. Aplicabilidade e limitações da TDR para a medida da umidade em solos brasileiros. In: SOUZA, C. F. (Ed.). **Aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental**. Taubaté: Unitau, 2008.

WARRICK, A. W.; OR, D. Soil water concepts. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. (Ed.). **Microirrigation for crop production, design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 27-59.