

MONITORAMENTO DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO EM TEMPO REAL COM AS TÉCNICAS DE TDR E FDR

CLAUDINEI FONSECA SOUZA¹; CLAUDIO RICARDO DA SILVA²; ADERSON SOARES DE ANDRADE JÚNIOR³ E EUGÊNIO FERREIRA COELHO⁴

¹ Professor Adjunto da Universidade Federal de São Carlos – Rodovia anhanguera km 174 – CP. 153 – CEP 13600-970 - Araras-SP, Brasil. cfsouza@cca.ufscar.br;

² Professor Adjunto da Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia-MG. claudio@iciag.ufu.br;

³ Pesquisador Embrapa - Meio Norte, Teresina – PI. aderson.andrade@embrapa.br;

⁴ Pesquisador Embrapa - Mandioca e Fruticultura – Cruz das Almas – BA. eugenio.coelho@embrapa.br;

1 RESUMO

O conhecimento da umidade do solo é de fundamental importância para a agricultura, sobretudo na determinação de sua variação, na otimização do manejo da solução no solo. Para medidas de umidade do solo existe uma tendência de utilização de sondas amostradoras baseadas na técnica de TDR e FDR que, de certa forma, são novas no Brasil. As vantagens são a obtenção precisa das medidas, facilidade de acoplamento a um sistema de coleta de dados, rapidez e segurança ao operador. Entretanto, para que estes equipamentos apresentem desempenho satisfatório é indispensável observar uma série de cuidados e procedimentos simples no preparo, instalação, operação e manutenção. O objetivo deste trabalho foi reunir instruções de como instalar, usar, vantagens e desvantagens, entre outros, auxiliando assim, na difusão da técnica tanto no meio científico como também, em qualquer ambiente que se deseja realizar o monitoramento da umidade do solo em tempo real.

PALAVRAS-CHAVE: Umidade do solo; Manejo da água no solo; Irrigação; Técnica eletromagnética.

**SOUZA, C.F.; SILVA, C.R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; COELHO, E.F.
MONITORING OF SOIL WATER CONTENT IN REAL TIME WITH TDR AND
FDR TECHNIQUE**

2 ABSTRACT

Knowledge of soil moisture is of fundamental importance for agriculture, especially in determining their variation in optimizing the management of the soil solution. For measurements of soil water content there is a tendency to use equipment based on the technique of TDR and FDR that, in a way, are new in Brazil. The advantages are the obtention of precise measures, ease of coupling to a system of data collection, speed and operator safety. However, for these devices to exhibit satisfactory performance is essential to observe a series of simple procedures and care in the preparation, installation, operation and maintenance. The aim of this study was to collaborate with the diffusion of technology, providing instructions upon how to install, use and maintain these equipments in field, under optimal conditions of operation, aiming for real-time monitoring of irrigation.

Keywords: Soil water content; Water management; Irrigation; Electromagnetic technique.

3 INTRODUÇÃO

O teor de água no solo é um parâmetro extremamente variável, principalmente com o tempo, influenciado pelas chuvas, irrigações, drenagem ou pela evaporação e demais práticas de manejo da cultura. Desta forma, o conhecimento do teor de água no solo, sua dinâmica temporal e também espacial, sob diferentes condições de solo e práticas culturais, torna-se importante para o melhor uso da água na agricultura. Neste sentido, existe uma necessidade constante por métodos que permitam acessá-la na condição local do solo, de forma precisa, instantânea e, continuamente.

Existem métodos diretos e indiretos para a sua obtenção. No método direto, o gravimétrico é o padrão, sendo preciso e de custo relativamente baixo. Entretanto, este método é destrutivo (uma amostra de solo deve ser removida para cada medida), e não pode ser automatizado, tornando-o assim pouco adequado para monitorar o teor de água no solo. Já os métodos indiretos são aqueles que estimam o teor de água no solo a partir de propriedades físicas do solo, permitindo assim, que se façam muitas leituras em um mesmo local, sem retirar nenhuma amostra de solo.

O primeiro método indireto de monitoramento do teor de água no solo proposto foi pela sonda de nêutrons, um método radiativo, que teve um destaque muito grande na década de 80. Simultaneamente, outro método, mais seguro e simples, muito utilizado é a tensiometria. Porém, ambos com grandes inconvenientes, o primeiro, pelo risco ambiental e o segundo pela sua limitação em medir valores baixos de teor de água no solo.

Dois métodos indiretos têm-se destacado nos últimos anos devido a sua precisão, segurança ao operador e rapidez na obtenção da estimativa do teor de água no solo, os métodos eletromagnéticos: Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e a Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR), também conhecido como método por capacitância. Ambos baseiam-se na constante dielétrica da matriz do solo.

Neste texto, iremos discorrer sobre os métodos eletromagnéticos para o monitoramento do teor de água no solo, destacando princípio de funcionamento, equipamentos, calibrações, vantagens e desvantagens. Assim, o principal objetivo desta revisão bibliográfica é oferecer instruções de como instalar, usar e manter estes equipamentos no campo, em condições ótimas de funcionamento, visando o monitoramento da irrigação de áreas irrigadas e, conseqüentemente, evitar o desperdício de água. Para que estes equipamentos apresentem desempenho satisfatório é indispensável observar uma série de cuidados e procedimentos simples no preparo, instalação, operação e manutenção.

4. MÉTODOS INDIRETOS BASEADOS NA TÉCNICA ELETROMAGNÉTICA

Os métodos Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e da Frequência (FDR) ou método por capacitância baseiam-se na constante dielétrica do solo (K), porém cada método apresenta características específicas que resultam em algumas vantagens e desvantagens ao usuário final.

Dielétricos ou isolantes são materiais que não conduzem ou conduzem muito pouco corrente elétrica. Na prática, na sua maioria, os materiais dielétricos são sólidos, por exemplo,

porcelana (cerâmica), mica, vidros, plásticos e óxidos de vários metais, entretanto, mesmo líquidos e gases podem servir como bons materiais dielétricos.

Apesar de conduzirem pouca ou nenhuma corrente elétrica, alguns materiais dielétricos contendo moléculas dipolares (e.g. a água), quando sob a ação de um campo elétrico sofrem polarização, resultando em uma redistribuição e alinhamento das cargas no dielétrico.

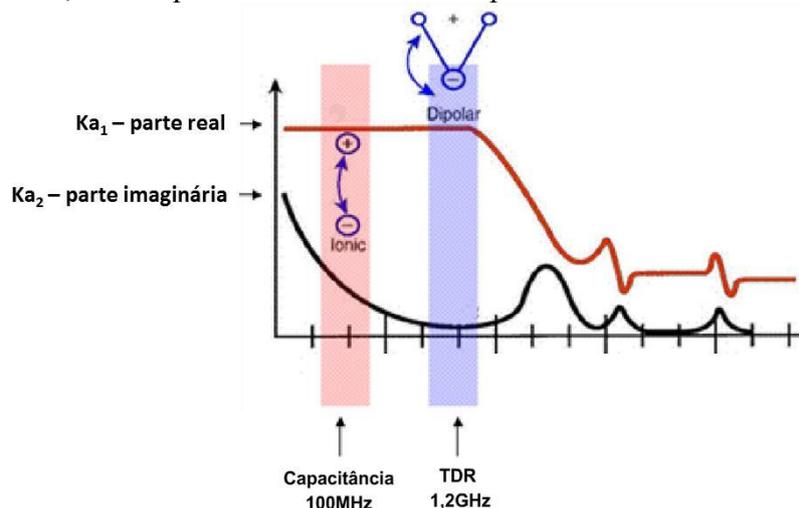
Entretanto, os materiais dielétricos variam quanto a sua capacidade de ser polarizado por um campo elétrico. Isto é descrito pela permissividade do meio (ϵ). A constante dielétrica (K) é um índice que expressa a permissividade do meio em relação a permissividade do vácuo (ϵ_0). Portanto, $K = \epsilon/\epsilon_0$. Logo para o vácuo, $K = 1$ (SILVA et al. 2007).

Para o ar, K é praticamente 1, para um solo seco, varia de 2 a 5, enquanto para água (20 °C) seu valor é de aproximadamente 81. No solo, a constante K medida neste sistema ou matriz (ar-solo-água) é denominada de constante dielétrica aparente (K_a). Assim, dado a grande diferença no valor de K_a com a presença de água no sistema, conhecendo-se esta variável pode-se determinar a umidade volumétrica do solo indiretamente (SOUZA et al. 2006a).

Porém, a presença de íons livres, variações na temperatura podem alterar o meio dielétrico e, conseqüentemente o valor da constante dielétrica aparente. Isto pode ser levado em conta escrevendo a constante dielétrica aparente (K_a) como uma medida da constante dielétrica real (K_{a1}) mais a constante dielétrica imaginária (K_{a2}).

A influência da parte imaginária, que está associada com as perdas, na constante dielétrica aparente depende da frequência de oscilação da onda no campo magnético, como apresentado na Figura 1. Assim, de maneira geral quanto maior a frequência de oscilação, menor será a influencia da parte imaginária ainda que em frequências superiores (> 3 GHz) há perda significativa da parte real, prejudicando a resolução e sensibilidade de medir pequenas variações no teor de água no solo. Assim, em solos com maior condutividade elétrica, o método TDR, que trabalha em frequências de GHz, é mais indicado do que o método FDR (frequência de MHz), pela menor sensibilidade aos íons na determinação da constante dielétrica aparente.

Figura 1. Frequência de operação das diferentes técnicas (capacitância e TDR) em um solo saturado, sendo que $K_a = K_{a1} + K_{a2}$. Adaptado de Schonhals e Kremer, 2002



4.1 Reflectometria no Domínio do Tempo – TDR

A Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) é uma técnica eletrônica complexa, inicialmente utilizada para testar rompimentos em cabos elétricos. Posteriormente, a técnica foi

utilizada para medir a umidade volumétrica (TOPP, DAVIS; ANNAN, 1980) e condutividade elétrica do solo (DALTON; VAN GENUCHTEN, 1986). A técnica, basicamente, consiste em medir dois parâmetros: t_1 – o tempo de propagação da onda no início da sonda e; t_2 - o tempo de propagação no final da sonda.

Desta forma, $t_2-t_1 = t$ é o tempo necessário para que um pulso eletromagnético se propague através de um cabo coaxial de impedância constante (50Ω) até chegar a uma haste de transmissão paralela de metal (sonda), no final do cabo, cravada no solo. O solo neste caso age como o meio dielétrico. O pulso, pelas alterações no início da haste sofre uma reflexão, continuando o percurso nas hastes da sonda até o final da mesma, em que, é definitivamente refletido de volta ao testador de cabos. Quanto maior a constante dielétrica do solo, menor a velocidade do pulso, como demonstra a relação entre as duas variáveis desenvolvida por Topp, Davis e Annan (1980):

$$v = \frac{c}{\sqrt{Ka}} \quad (1)$$

em que:

c - a velocidade propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$).

O tempo (t , segundos) para uma onda ir e retornar na sonda, de comprimento L (metros) é:

$$t = \frac{2L}{v} = \frac{2L\sqrt{Ka}}{c} \quad (2)$$

Logo, a constante dielétrica aparente, pode ser determinada, da seguinte maneira:

$$Ka = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (3)$$

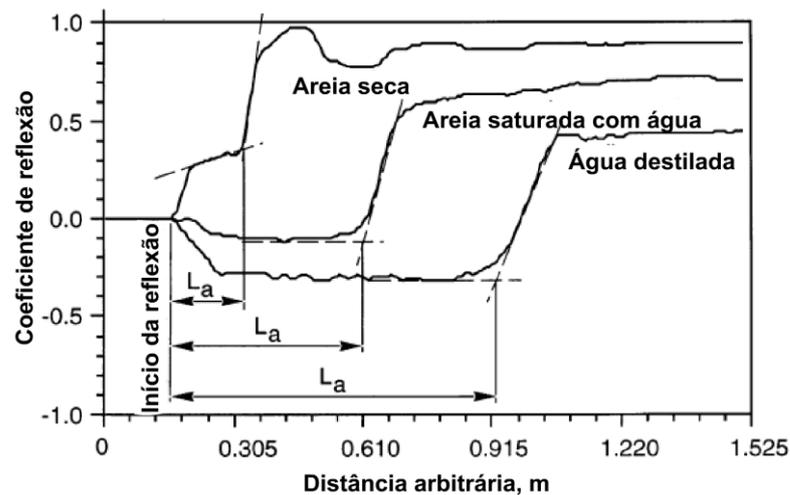
No testador de cabos como, por exemplo, o modelo 1502B/C da Tektronics, no gráfico gerado pelo osciloscópio, o tempo (t) é convertido em unidades de distância aparente (La) baseado na velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas na haste ($ct/2=La$), visualizada no equipamento. A velocidade de propagação da onda deve ser corrigida, uma vez que sua velocidade é menor do que no vácuo, daí a inserção de Vp (a razão entre a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas na haste e no vácuo). Normalmente, os valores usuais de Vp variam de 0,67 a 0,99, sendo que, quanto maior, melhor a resolução da medida. Logo, a constante dielétrica aparente, pode ser determinada por:

$$Ka = \left(\frac{La / Vp}{L} \right)^2 \quad (4)$$

A distância aparente (La) pode ser obtida, medindo-se a reflexão inicial e final do gráfico. A Figura 2 apresenta as curvas adquiridas usando um testador Tektronics modelo 1502C sob areia e água. Note que quanto maior a presença de água, maior a constante dielétrica aparente, maior o tempo de reflexão, maior La . O Coeficiente de reflexão, no eixo Y é definido como a razão entre a amplitude refletida do sinal do cabo em relação à amplitude aplicada no

cabo (NOBORIO, 2001). Se no percurso do pulso existe um circuito aberto (i.e. impedância infinita), praticamente toda a energia será refletida de volta ao testador do cabo, logo, o coeficiente de reflexão será igual a 1, com a mesma polaridade do sinal de origem. Entretanto, sob circuito fechado (diminuição da impedância inicial), a polaridade do coeficiente é invertida.

Figura 2. Exemplos de comportamentos do sinal para 3 diferentes tipos de meio (solo arenoso seco, saturado e água destilada) usando uma sonda com três hastes ($L=0,145$ m). L_a indica o comprimento aparente. V_p foi fixado em 0,66. Adaptado de Noborio (2001)



4.2 Estimativa da umidade volumétrica do solo pela sonda TDR

Uma vez conhecida a constante dielétrica aparente do solo (K_a), a umidade será determinada por meio de modelos matemáticos, dos quais o mais comum é o modelo cúbico, da forma apresentada por Topp, Davis e Annan (1980):

$$\theta_v = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} K_a - 5,5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (5)$$

A equação de calibração proposta por Topp, Davis e Annan (1980) tem sido utilizada em diversos estudos, mostrando-se adequada para a determinação da umidade. Entretanto, diversos autores têm verificado limitações quanto ao uso da equação para a medida da umidade com o TDR para solos com altos teores de matéria orgânica, solos expansivos, solos salinos e solos contendo minerais magnéticos como a magnetita (VAZ, 2008). Então, para melhor acurácia, o equipamento deve ser calibrado para o específico solo de estudo, seja de maneira laboratorial ou em campo.

De maneira geral, as calibrações feitas no Brasil apontam que o modelo cúbico é o que mais se ajusta aos dados de umidade como função da constante dielétrica, mesmo que os coeficientes não sejam os mesmos obtidos por Topp, Davis e Annan (1980). Tommaselli e Bacchi (2001) que estudaram diversos solos com texturas variadas (Neossolo, Argissolo, Latossolos e Nitossolo), em laboratório, verificaram que a equação de Topp não apresentou um bom desempenho para umidades acima de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, mas que, os melhores ajustes foram obtidos com equações polinomiais de terceiro grau específicas a cada solo.

Coelho et al. (2006) avaliaram seis modelos de ajuste de K_a versus umidade volumétrica com dois modelos de TDR (Trase e TDR 100) em três solos (Latosolo vermelho eutrófico, Neossolo fúlvico, Latossolo amarelo distrófico coeso). Verificaram que os modelos pré-

instalados nos equipamentos foram os que forneceram os piores desempenhos enquanto que os melhores foram os modelos cúbicos específicos para cada solo.

A TDR pode ser também usada para estimar a condutividade elétrica aparente do solo (CE_b), sendo descrito pioneiramente por Topp, Davis e Annan (1980) e sistematizado por Nadler (1991) e Heimovaara (1993).

Tradicionalmente, a condutividade elétrica da solução no solo (CE_s , $dS\ m^{-1}$) é medida por um condutivímetro com uma amostra de solo deformado misturado com uma certa quantidade padrão de água, extraindo-se a solução desta amostra por filtragem ou centrifugação (EMBRAPA, 1997).

A TDR, entretanto, mede a CE_b ($dS\ m^{-1}$), o qual varia com a umidade do solo. No entanto, existem formas de se correlacionar indiretamente a CE_s com a CE_b , como os modelos de correlação pelo fator geométrico de tortuosidade da transmissão das ondas eletromagnéticas na sonda TDR, propostos por Rhoades et al. (1989).

A CE_b é estimada pela relação de amplitudes dos sinais da TDR ao longo da sonda inserida no solo (GIESE; TIEMANN, 1975).

$$CE_b = \frac{Z_0}{120\pi LZ_u} \left(\frac{2V_0}{V_{inf}} - 1 \right) \quad (6)$$

em que,

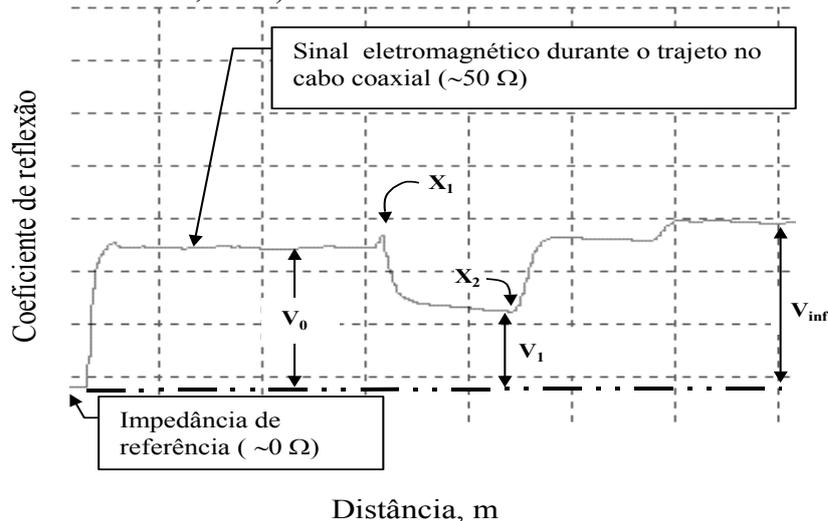
Z_0 - impedância característica da Sonda;

Z_u - Impedância no cabo $\sim 50\ \Omega$;

V_0 - Amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR;

V_{inf} - Amplitude do sinal de retorno depois de reflexões múltiplas (Figura 3);

Figura 3. Esquema de interpretação da onda eletromagnética. X_1 é a distância no início da sonda (logo após o final do cabo coaxial) e X_2 é a distância no final da sonda. (SANTORO et al., 2008)



A impedância característica (Z_0, Ω) é o modo de expressar a lei que relaciona a variação de voltagem e corrente com distância ao longo de uma linha de transmissão uniforme, sendo geralmente utilizada para avaliar a performance de sondas TDR. Em geral, sondas com Z_0 superior a $200\ \Omega$ são inadequadas para determinação da umidade do solo, pois neste caso a

reflexão prejudica a interpretação do sinal eletromagnético inviabilizando a técnica (SOUZA et al., 2006b). Segundo Zegelin et al. (1989) e Heimovaara (1993), pode-se medir Z_0 por determinação do coeficiente de reflexão da sonda (p), isso quando a mesma está envolta por um material dielétrico uniforme.

$$Z_0 = Z_u * K^{0,5} * \frac{(1+p)}{(1-p)} \quad (7)$$

em que,

$$p = \left(\frac{V_1}{V_0} \right) - 1 \quad (8)$$

V_1 - Amplitude do sinal eletromagnético depois da reflexão do início da sonda;

K - Constante dielétrica. Geralmente, o material dielétrico usado é água destilada a 20 °C ($K=81$).

Desta forma, a agricultura de precisão ganha um forte aliado no monitoramento e na otimização do manejo da fertirrigação.

4.3 Equipamentos de TDR

Atualmente, no mercado, existem diversos fabricantes, como: Tektronix* (modelos 1502B/C, www.tek.com), Campbell Scientific* (modelo TDR 100 e CS 615, www.campbellsci.com), Dynamax* (modelo Vadose TDR, www.dynamax.com), Soil Moisture Equipment Corporation* (modelo Trase system, www.soilmoisture.com), IMKO* (Trime FM e Trime T3, www.imko.de) e Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences* (modelo Easy Test, www.ipan.lublin.pl).

O equipamento da Tektronix e da Soil Moisture Equipment, apesar da portabilidade, não fazem a leituras automaticamente, ainda que possam permitir o armazenamento dos dados (Trase System). O modelo TDR100 da Campbell difere da Trase quanto à operação da mesma, uma vez que por meio de um aplicativo computacional "PCTDR" permite operar a TDR. Ao acionar o aplicativo obtém-se uma janela de trabalho, onde há locais para inserção dos critérios necessários a estimativa da condutividade elétrica e da umidade do solo. A velocidade de propagação do pulso eletromagnético requerida varia de 0,67 a 0,9. O valor de V_p em si não afeta as leituras da TDR, afeta o comprimento do cabo que aparece na janela. Pode-se no caso de desconhecer o V_p , assumir igual a 1. O início do gráfico emitido pelo PCTDR deve corresponder à distância entre a TDR e o início da sonda menos 0,5. O comprimento dependerá do sinal, devendo ser suficiente para representar todo o comprimento da guia de onda e parte da reflexão no final da mesma.

4.4 Sondas de TDR

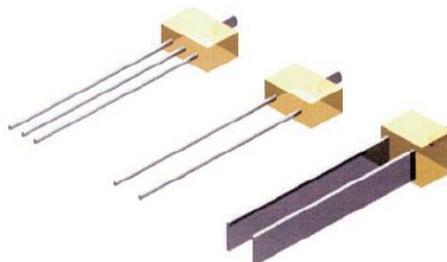
Distintos tipos de sonda podem ser utilizados, como as sondas de cabo paralelo e as que emulam cabo coaxial (três hastes) contínuas (Figura 4) ou segmentadas. As sondas de cabo coaxial têm a vantagem de possuírem a menor perda de sinal, devido ao menor valor de

* Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores.

impedância e devido ao confinamento da propagação da onda eletromagnética, por todo o comprimento da haste, conforme Souza et al. (2004).

Logo, um equipamento de TDR é uma combinação de um gerador de pulso, um osciloscópio que captura o pulso refletido, cabos coaxiais e a sonda (haste).

Figura 4. Três tipos de sondas contínuas. Fonte: Robinson et al. (2003)



4.5 Reflectometria no domínio da frequência (FDR) ou método por capacitância

Apesar da técnica TDR ser amplamente difundida, principalmente pela sua acurácia e praticidade, a técnica capacitiva recentemente tem atraído a atenção, principalmente, pelo fato de que a maioria dos equipamentos são sondas perfiladeiras, ou seja, as leituras no perfil do solo são mais práticas de serem obtidas do que no caso do TDR. Além disso, apesar de trabalharem em uma faixa de frequência mais suscetível a erros na determinação da constante dielétrica aparente do solo resultados na literatura apontam para acurácia próxima ao TDR (STARR; PALTINEANU, 1998). Outra facilidade é que possibilitam monitorar o teor da água no solo a uma distância de até 500 m entre o sistema de coleta automático de dados e o sensor (modelo Enviroscan) enquanto que no TDR o comprimento máximo do cabo é de 25 m.

4.6 Princípio de funcionamento

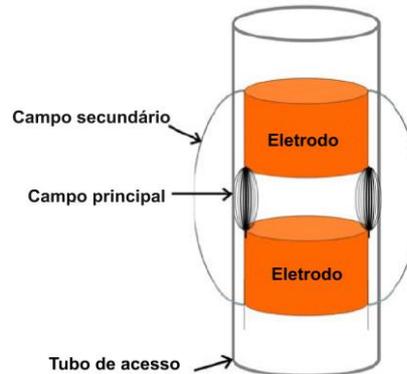
Basicamente, neste tipo de equipamento, a sonda funciona como parte de um capacitor eletrônico. Quando ativado, a matriz solo-água-ar forma o meio dielétrico deste “capacitor”. Desde que a área dos anéis (eletrodos) e distância entre eles são fixas na sonda, a capacitância aumenta consideravelmente com um aumento no número de moléculas de água livres e, com seus dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor (DEAN; BELL; BATY, 1987; PALTINEANU; STARR, 1997).

O “capacitor” é conectado a um circuito LC (L = indutor; C = capacitor) formando um oscilador. Quando ligado é gerado um campo elétrico entre os dois eletrodos estendendo-se para fora e atingindo a matriz do solo, polarizando as moléculas de água. Desta forma, a frequência do oscilador (≈ 100 MHz) ocorre livremente dependendo apenas das trocas de capacitância na matriz do solo, ou seja, quanto maior a umidade do solo, maior será K_a e a capacitância e conseqüentemente, menor será frequência (F, em Hertz) do circuito, que pode ser medida pela fórmula universal, $F = [2\pi\sqrt{LC}]^{-1}$ (PALTINEANU; STARR, 1997). Por isso, serem chamados também, de sondas capacitivas.

Na maioria dos equipamentos, de maneira similar à sonda de nêutrons, o sensor é inserido no solo via tubo de acesso. A matriz do solo próximo ao tubo, o plástico envolvendo o sensor e a parede do tubo de acesso, contribuem para a capacitância total (Figura 5).

Note que, apesar de basear na constante dielétrica aparente do solo este equipamento não determina o valor da constante, diferentemente do TDR, mas sim, a frequência relativa.

Figura 5. Esquema ilustrativo do sensor capacitivo dentro do tubo de acesso. O campo eletromagnético secundário que penetra para fora do tubo no solo e o campo principal localizado entre os dois eletrodos. Adaptado de Evett e Cepuder (2008)

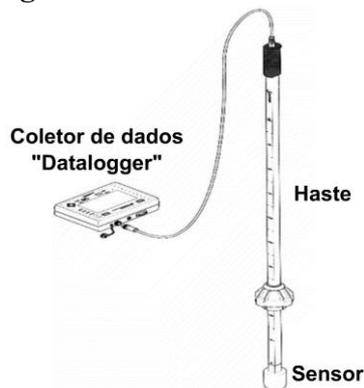


4.7 Equipamentos de FDR

Atualmente, o principal fabricante de sondas por capacitância é a empresa australiana Sentek Pty Ltd* (www.sentek.com.au), que no seu portfólio de produtos, incluem a multisonda semi-portátil Enviroscan e a sonda portátil Diviner 2000, além outros modelos.

A sonda portátil Diviner 2000 apresenta um visor digital com teclado e coletor de dados acoplado via cabo a uma haste que na sua extremidade apresenta o sensor (envolvido em plástico), que ao ser inserido no tubo de acesso no solo por um operador, provê automaticamente leituras do teor de água a cada 10 cm de profundidade à medida que a sonda é inserida no tubo (Figura 6). Comercialmente o equipamento apresenta três comprimentos para hastes: 0,7, 1,0 e 1,6 m. A grande vantagem deste modelo é a sua portabilidade, ou seja, com apenas uma sonda, um operador pode monitorar e registrar valores de umidade de perfis de solo (até 99 perfis). Além disso, as leituras são rápidas e o equipamento é leve.

Figura 6. Sonda Diviner 2000 com seus componentes



Já o modelo Enviroscan (Figura 7), consiste de uma sonda fixa permitindo o acoplamento de vários sensores em uma haste, no espaçamento desejado pelo usuário. Um total de 32 sensores pode ser acoplado ao sistema possibilitando o monitoramento do teor de água de forma instantânea. O tempo de varredura pode ser programável (1 a 999 minutos). Como dito anteriormente, uma das grandes vantagens deste modelo é que a sonda pode estar distante

125 m do datalogger que a perda de sinal no cabeamento não é significativa (STARR; PALTINEANU, 1998). Segundo o Fabricante o comprimento pode ser de até 500 m. O tubo de acesso é o mesmo do utilizado para o modelo Diviner 2000.

Figura 7. Multisonda Enviroscan. Foto: (www.sentek.com.au). Catálogo do fabricante



Outro fabricante é a Delta T Devices (www.delta-t.co.uk), com duas sondas perfiladoras (PR2/4 e PR2/6, variando apenas a profundidade) que funcionam de maneira similar a sonda Diviner 2000, diferindo por apresentar várias sondas em posições fixas na haste. A sonda Sentry 200 CP (Troxeer, www.troxlerlabs.com) é a mais antiga e menos atualizada nesta técnica, funcionando também de maneira similar a sonda Diviner 2000.

Nestas sondas da Sentek, uma vez que não há exatidão nos valores da contagem da frequência realizada por cada sonda, o fabricante sugere fazer uma normalização das medidas.

Para tanto, primeiramente devem-se registrar as leituras dentro de um tubo de PVC exposto separadamente do ar e água. A saída dos dados é então denominada de frequência relativa (FR), definida pela seguinte equação:

$$FR = \frac{(F_a - F_s)}{(F_a - F_w)} \quad (9)$$

em que:

F_a - a contagem da frequência da sonda no tubo de PVC, totalmente suspenso no ar;

F_s - a contagem da frequência da sonda no tubo de PVC no solo;

F_w - a contagem da frequência da sonda no tubo de PVC imerso em água.

Nesta etapa, deve-se tomar cuidado para se obter valores consistentes de F_a e F_w , pois do contrário, constitui-se na primeira fonte de erro do equipamento. Os valores sugeridos de F_a e F_w pelo fabricante devem ser próximos de 160.000 e 120.000, respectivamente.

Estes valores de FR são convertidos em altura de água (mm) para cada camada de solo (10 cm) utilizando a calibração sugerida pelo fabricante ou outra adicionada pelo usuário.

Para testar a variação provocada por leituras de FR no mesmo perfil com sondas diferentes, Starr e Rowland (2007) compararam os valores obtidos com a sonda Diviner 2000 e Enviroscan, para três tipos de solo e verificaram que ambas as leituras tiveram alto coeficiente de determinação ($R^2 > 0,98$) apesar de que a sonda Diviner 2000 superestimou os valores, em média, com 5 %, a qual foi corrigida e resultou em valores idênticos de teor de água no solo medido por ambas as sondas.

4.8 Instalação dos tubos de acesso

As sondas Diviner 2000 e Enviroscan não fazem a leitura diretamente no solo e sim, por meio de um tubo de acesso, sendo feitos de policloreto de vinila ou PVC porém, este tubo permite a propagação do campo eletromagnético para fora (≈ 10 cm radialmente). O diâmetro do tubo permite o livre deslocamento do sensor no tubo de acesso, porém com mínimo espaço entre o sensor e a parede do tubo. Ainda, no Brasil, não foram testadas tubulações de PVC comerciais que poderiam ser usadas para a sonda, portanto, deve-se importar os tubos juntamente com a sonda.

Na instalação do tubo é extremamente importante evitar qualquer “bolha de ar” entre o tubo e solo, em virtude do pequeno volume de solo considerado entre os dois anéis (eletrodos) do capacitor e pelo fato da constante dielétrica do ar ser praticamente igual a 1. Desta maneira, um espaço de ar entre eles seria quantificado pela sonda como sendo volume de solo sem umidade. Outro fator importante é procurar evitar interferir na estrutura do solo próximo ao tubo.

Na instalação dos tubos, faz-se necessário a utilização de um equipamento específico (também comercializado pelo importador da sonda no Brasil) que consiste basicamente em um trado de ferro, tipo Holandês, martelo de borracha, espátula, tripé para favorecer a inserção do tubo no solo de forma nivelada, base para proteger o tubo das batidas com o martelo de borracha e demais ferramentas para limpeza do tubo após a instalação.

De maneira breve, os tubos devem ser enterrados em prumo em intervalos de 0,10 m usando um martelo de borracha e após cada incremento na profundidade, utilizando-se o trado (47 mm) para escavar e retirar o solo do interior do tubo. Ao final da instalação, os tubos devem ser limpos internamente com auxílio de uma esponja acoplada ao trado. Um cap deve ser firmemente colocado na extremidade superior do tubo, bem como deve ser realizada a vedação da extremidade inferior do tubo com a colocação de um anel de borracha (ambos adquiridos com o fabricante). Uma boa instalação deve manter o tubo firme ao solo.

4.9 Calibração da sonda

A relação entre o teor de água no solo e os valores de FR (conhecida como curva de calibração universal) vem embutida no sistema coletor de dados. Esta calibração foi feita pelo fabricante com base em determinações feitas experimentalmente para alguns tipos de solo, principalmente arenosos.

Entretanto, existe uma grande variabilidade nos valores de K_a para com base na tipo de mineral de argila do solo, matéria orgânica tornando-se necessário calibrar os sensores para uma situação particular (BAUMHARDT; LASCANO; EVETT, 2000) e, se possível, para cada camada de solo (FARES et al., 2004).

Além disso, dados experimentais têm mostrado que os sensores capacitivos são muito influenciados pela densidade do solo. A compactação do solo geralmente aumenta a densidade do solo, diminui a macroporosidade e a taxa de infiltração da água. A variabilidade na densidade do solo é mais visível em solos desestruturados, principalmente em áreas intensamente cultivadas (POLYAKOV; FARES; RYDER, 2005).

Outro problema enfrentado se refere ao efeito da temperatura nas leituras, uma vez que K da água livre varia inversamente com a temperatura (WEAST, 1986 citado por POLYAKOV; FARES; RYDER, 2005), ou seja, um aumento da temperatura da matriz do solo irá diminuir a capacitância e conseqüentemente aumenta a frequência de oscilação. Baumhardt, Lascano e Evett (2000) observaram que a variação no teor de água no solo estimado pela sonda por

capacitância acompanhou as flutuações da temperatura do ar diurnamente. Efeito similar foi obtido com a sonda TDR, porém com uma intensidade menor.

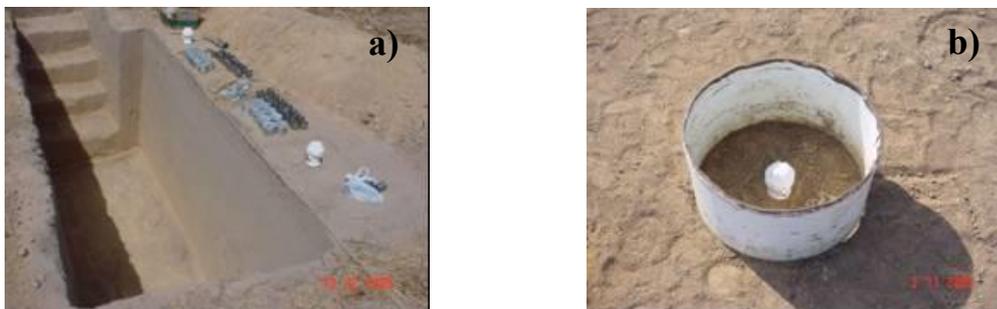
Para a correção do efeito da temperatura nas leituras, Polyakov, Fares e Ryder (2005) sugerem que esta deve ser feita juntamente com a calibração do equipamento nas condições de solo locais.

O valor de K da água também pode ser alterado ainda, se a solução do solo for salina. Este efeito é por causa de que a frequência de oscilação (principalmente, menores que 30 MHz) polariza os íons presentes na solução do solo e, assim, aumentam a constante dielétrica aparente, K_a . Para amenizar o problema, as sondas foram projetadas de modo a oscilar próximo a 100 MHz (dentro do tubo de acesso) para reduzir o efeito da acidez e salinidade do solo (GARDNER et al., 2001). O fabricante recomenda a utilização das sondas (Diviner 2000 e Enviroscan) em solo com condutividade elétrica de no máximo ($6,0 \text{ dS m}^{-1}$).

Diante do exposto, fica claro que os sensores de capacitância necessitam ser calibrados para o solo específico e de preferência, em campo, para fornecer leituras precisas da umidade do solo. Diversos os resultados na literatura (PALTINEANU; STARR, 1997; BAUMHARDT; LASCANO; EVETT, 2000; MORGAN et al., 1999; FARES et al., 2004; GROVES; ROSE, 2004; POLYAKOV; FARES; RYDER, 2005; ANDRADE JR; SILVA; DANIEL, 2007 e SILVA; ANDRADE JR; SOUZA, 2008) recomendam que calibrações individuais melhoram a precisão e exatidão do equipamento.

Adaptando as recomendações efetuadas por Gardner et al. (2001) e pelo fabricante Sentek (2001), sugere-se o seguinte roteiro para calibração do equipamento: a) Instalar seis tubos de acesso na área, em duas linhas, usando uma disposição de 5 por 2 metros. Após 15 dias (tempo mínimo para acomodação do solo), abrem-se três trincheiras ($4 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ de profundidade), distante $0,4 \text{ m}$ de cada tubo (Figura 8a); b) três níveis de umidade são utilizados para cobrir toda a amplitude nos valores do teor de água no solo, denominados de saturado, úmido e seco. Inicia-se o procedimento de calibração no período seco do solo, pois é mais fácil e rápido adicionar água ao solo. Dois tubos são utilizados para cada nível de umidade. Para o nível de saturação, pode-se aplicar água com ajuda de um anel de infiltração (Figura 8b) até que, visualmente, a frente de molhamento atinja toda a extensão do tubo. No dia seguinte a aplicação de água, faz-se as leituras com a sonda e a coleta das amostras de solo. Para o nível úmido, aplica-se a mesma quantidade de água, porém leituras e amostragens são realizadas após um período de secamento do solo (4 a 6 dias).

Figura 8. Trincheira aberta próxima aos tubos de acesso (a). Anel de infiltração utilizado para umedecer o solo próximo ao tubo e em profundidade (b)



Neste processo, sugere-se realizar três leituras de FR para cada camada de solo ($0,1 \text{ m} - 1,0 \text{ m}$), gerando-se um valor médio de FR para cada camada de solo. Imediatamente após a realização das leituras procede-se a coleta do solo para as determinações da umidade

gravimétrica e densidade. Para isto, a cada 0,1 m de profundidade, uma amostra de solo deformada deve ser retirada bem adjacente ao tubo (no máximo 10 cm, devido à distância máxima atingida pelo campo elétrico gerado pelo oscilador) e colocada em uma lata de alumínio com tampa. Concomitantemente, para determinar a densidade do solo, sugere-se retirar três amostras indeformadas por camada, retiradas com um amostrador tipo Uhland. As amostras são pesadas e secas em estufa (105°C) e pesadas novamente após 48 h. A umidade volumétrica (θ_v , $m^3 m^{-3}$) em cada camada de solo será determinada multiplicando a umidade gravimétrica pela média do resultado do quociente entre a densidade do solo e a densidade da água.

Os valores de θ_v e as correspondentes leituras de FR são relacionados de maneira não-linear, com dois ou três parâmetros, conforme os dados obtidos em diversas calibrações em campo e em laboratório como segue abaixo:

$$\theta_v = aFR^b \text{ ou } \theta_v = aFR^b + c \quad (10)$$

em que:

θ_v - Umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$)

FR - Frequência relativa determinada pela sonda (adimensional);

a, b e c são coeficientes gerados pela regressão.

Um resumo de algumas calibrações relatadas na literatura está presente na Tabela 1. Andrade Jr, Silva e Daniel (2007) testaram a calibração fornecida pelo fabricante e outras calibrações realizadas em campo (MORGAN et al., 1999 ;FARES et al., 2004) e verificaram que as curvas de Fares e Morgan superestimaram a umidade do solo em relação à calibração local em 36,8 % e 38,7 %, em média, respectivamente. Entretanto, a calibração sugerida pelo fabricante foi muito próxima daquela obtida para este solo, não diferindo significativamente pelo teste F ($p>0,05$).

Tabela 1. Calibrações obtidas em condições de campo e laboratório relatadas na literatura

FONTE	Granulometria (g kg ⁻¹)			Densidade do solo (kg m ⁻³)	Equação	R ²
	Areia	Silte	Argila			
Sentek	-	-	-	-	$\theta_v=0,494FR^{3,017}$	0,99
Groves e Rose (2004)	280	280	440	1,09	$\theta_v=0,514FR^{3,371}$	0,93
Fares et al. (2004)	394	122	484	1,52	$\theta_v=0,440FR^{1,549}-0,040$	0,88
Hidalgo et al.(2003)	70	410	520	1,28	$\theta_v=0,382FR^{1,616}$	0,81
Morgan et al. (1999)	950	-	-	-	$\theta_v=0,451FR^{2,121}$	0,83
Groves e Rose (2004)	650	230	120	1,44	$\theta_v=0,440FR^{2,756}$	
Andrade Jr et al. (2007)	846	58	95	1,45	$\theta_v=0,397FR^{2,533}$	0,97
Silva et al. (2007)	669	100	231	1,59	$\theta_v=0,492FR^{2,757}$	0,93
Groves e Rose (2004)	180	510	310	1,39	$\theta_v=0,530FR^{3,815}$	
Paltineanu e Starr (1997)	350	560	90	1,41	$\theta_v=0,490FR^{2,167}$	0,99

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento em tempo real do teor de água no solo baseado na constante dielétrica aparente do solo já é uma realidade no meio científico brasileiro e aos poucos avança para as grandes propriedades agrícolas irrigadas brasileiras, nas quais, sua utilização se justifica para fins de manejo de irrigação.

Resultados de calibrações locais com a sonda por capacitância divulgados na literatura, além de melhorar a precisão nas estimativas, indicam que a técnica fornece leituras confiáveis e rápidas. Porém, ainda são escassos os trabalhos que avaliem a durabilidade e a resistência sob condições severas de trabalho, comumente encontradas nas propriedades irrigadas.

Muito embora essas técnicas são capazes de monitorar a umidade em tempo real, grande parte do manejo de irrigação ainda tem sido feito de forma semanal ou diário. Ainda precisa popularizar e ajustar a técnica eletromagnética para as condições de campo no Brasil, para que a mesma possa auxiliar em condições de incertezas dentro do manejo de água no solo em tempo real. Além disso, a evolução do equipamento no mundo já indica plataformas amigáveis com o usuário (agricultor) e custo reduzido, principalmente para equipamentos FDR. Com a crescente comercialização é provável que se inicie no Brasil a fabricação destes sensores, reduzindo os custos de importação que tanto limitam a utilização em larga escala.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelos auxílios concedidos (Processo Fapesp 2005/00906-3 e 2010/20081-7) e ao CNPq.

7 REFERÊNCIAS

ANDRADE JR, 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, p. 303-307, 2007.

BAUMHARDT, R. L.; LASCANO, R. J.; EVETT, S. R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p.1940-1946, 2000.

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**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 41-48, 2006.

DALTON, F. N.; van GENUCHTEN, M. T. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 38, p. 237-250, 1986.

DEAN, T. J.; BELL, J. P.; BATY, A. J. B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique: Part I. Sensor design and performance. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 93, p. 67-78, 1987.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

EVETT, S.; CEPUDER, P. Capacitance sensors for use in access tubes. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Field estimation of soil water content: a practical guide to methods, instrumentation and sensor technology**. Vienna, 2008. p. 73-89.

- FARES, A.; BUSS, P.; DALTON, M.; EL-KADI, A. I.; PARSONS, L. R. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking-swelling clay soil. **Valdese Zone Journal**, Madison, v. 4, p. 1390-1399, 2004.
- GARDNER, C. M. K.; ROBINSON, D. A.; BLYTH, K.; COOPER, J. D. Soil water content measurement. In: SMITH, R. A.; MULLINGS, C. E. (Ed.). **Soil and environmental analysis: physical methods**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2001. chap.1. p. 1-64.
- GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry: Improved analysis of the step response waveform. **Advances in Molecular Relaxation Processes**, Amsterdam, v.7, p.45-59, 1975.
- 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**, New Jersey, v. 20, n. 1, p. 96-97, 2004.
- HEIMOVAARA, T.J. Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.57, p.1410-1417, 1993.
- HIDALGO, J.; PASTOR, M.; HIDALGO, J.C. Evaluacion de una sonda FDR para la estimación del contenido de água em el solo para el control de riegos em Olivar. In: Álvarez-Benedí, J.; Marinero, P., eds. **Estudios de La Zona No Saturada del Suelo (6)**, Gainesville: University of Florida, 2003, p. 171-176.
- MORGAN, K. T.; PARSONS, L. R.; WHEATON, T. A.; PITTS, D. J.; OBREZA, T. A. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 987-989, 1999.
- NADLER, A. Effect of soil structure on bulk electrical conductivity (EC) using the TDR and 4P techniques. **Soil Science**, Philadelphia, v.152, p.199-203, 1991.
- NOBORIO, K. Measurement of soil mater content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, n. 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, p. 1576-1585, 1997.
- POLYAKOV, V.; FARES, A.; RYDER, M. H. Calibration of capacitance system form measuring water soil content of tropical soil. **Valdese Zone Journal**, Madison, v. 4, p. 1004-1010, 2005.
- RHOADES, J.D.; MANTEGHI, N.A.; SHOUSE, P.J. ALVES, W.J. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p.433-439, 1989.

ROBINSON, D. A.; JONES, S. B.; WRAITH, J. A.; OR D.; FRIEDMAN, S. P. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. **Valdese Zone Journal**, Madison, v. 2, p. 444–475, 2003.

SANTORO, B. L.; LOPES, L. N.; VARALLO, A. C. T.; SOUZA, C.F. Experiência do grupo de estudos em engenharia ambiental na confecção e utilização de sondas de TDR. In: SOUZA, C. F. (Ed.) **Aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental**. Taubaté: Unitau, 2008. 1 CD-ROM.

SCHONHALS, A.; KREMER, F. Analysis of dielectric spectra. In: Kremer, F.; Schonhals, A., Eds. **Broadband dielectric spectroscopy**, 1ª ed., Berlin: Springer, 2002, p. 59–98.

SENTEK. **Calibration of Sentek Pty Ltd soil moisture sensors**. Stepney: Sentek Pty Ltd, 2001.

SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUSA, A. B. de.; MELO, F. B. de; COELHO FILHO, M. A. Calibration of Diviner 2000® capacitance probe in a Rhodic Paleudult. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 636-640, 2007.

SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, C.F. Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem. In: SOUZA, C. F. (Ed.) **Aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental**. Taubaté: Unitau, 2008. 1 CD-ROM.

SOUZA, C. F.; OR, D.; MATSURA, E. E. A variable-volume multi-wire TDR probe for measuring water content distribution in large soil volumes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 25-31, 2004.

SOUZA, C. F.; FOLEGATTI, M. V.; MATSURA, E. E.; OR, D. Calibração da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para a estimativa da concentração da solução no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, p. 282-291, 2006a.

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, p. 12-25, 2006b.

STARR, J. L.; PALTINEANU, I. C. Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 47, p. 43-49, 1998.

STARR, J. L.; ROWLAND, R. Soil water measurement comparisons between semi-permanent and portable capacitance probes. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 71, n. 1, 2007.

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. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v. 16, 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. 1 CD-ROM.

ZEGELIN, S.J.; WHITE, I.; JENKINS, D.R. Improved fields probes for soil water content and electrical conductivity measurements using TDR. **Water Resources Research**, Washington, v. 25, n. 11, p. 2367 – 2376, 1989.