

## PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA CALIBRAÇÃO DE SENSORES E MEDIDORES DE UMIDADE DO SOLO (SOIL MOISTURE)

Patrícia L. O. Guimarães<sup>1</sup> - [patricia.guimaraes@cptec.inpe.br](mailto:patricia.guimaraes@cptec.inpe.br)  
Márcio A. A. Santana<sup>1,2</sup> - [marcio.santana@cptec.inpe.br](mailto:marcio.santana@cptec.inpe.br)  
Ianuska R. Oliveira<sup>1,3</sup> - [ianuska.oliveira@cptec.inpe.br](mailto:ianuska.oliveira@cptec.inpe.br)  
José Celso Thomaz Júnior<sup>1</sup> - [celso.thomaz@cptec.inpe.br](mailto:celso.thomaz@cptec.inpe.br)

<sup>1</sup> INPE / CPTEC / Laboratório de Instrumentação Meteorológica / Metrologia Ambiental, Cachoeira Paulista - SP, Brasil

<sup>2</sup> UNESP / CTIG - Campus de Guaratinguetá -SP

<sup>3</sup> Bolsista CNPQ / PCI /DTI

**Resumo:** A umidade do solo é uma variável fundamental no ciclo hidrológico, varia no espaço e no tempo e determina também a taxa pela qual a água é absorvida pela vegetação. Evaporação, infiltração e escoamento são regidos pela umidade do solo e pela área de solo não-saturado. Os fluxos de água e a energia entre a superfície das zonas continentais e a atmosfera também dependem fortemente da umidade do solo, sendo uma importante variável em modelos numéricos meteorológicos e climáticos e devem ser considerados no monitoramento hidrológico e da vegetação. Existem vários tipos de sensores para medição de umidade do solo que empregam diferentes princípios físicos de funcionamento, incluindo os que utilizam reflectometria no domínio do tempo ou da frequência. A heterogeneidade, densidade e matriz do solo são alguns dos fatores que influenciam na exatidão das medidas. Este artigo relata os experimentos em campo e em laboratório, as técnicas de utilização, a comparação de diferentes modelos e fabricantes, a compatibilidade das medições e propostas de metodologias para a realização de calibração de sensores de umidade do solo atendendo aos requisitos metrológicos.

**Palavras chave:** Metrologia Ambiental, umidade do solo, Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), calibração, Meteorologia.

### 1. INTRODUÇÃO

As medidas de umidade do solo estão relacionadas com o conteúdo de água do solo ou com o potencial de água do solo [1]. O conteúdo de água expressa a massa ou o volume de água presente no solo, enquanto que o potencial de água expressa o estado energético da água retida no solo.

O conteúdo de água do solo expresso em função da massa é denominado conteúdo de umidade gravimétrica do solo ( $\theta_g$ ) e é definido como sendo a relação entre a massa de água da amostra de solo ( $M_w$ ) e a massa de solo seco contida na amostra ( $M_s$ ).

Quando o conteúdo de água do solo é expresso em função do volume passa a ser denominado conteúdo de umidade volumétrica do solo ( $\theta_v$ ) e é definido como sendo a relação

entre o volume de água da amostra de solo ( $V_w$ ) e o volume total de solo seco + ar + água da amostra ( $V_s$ ).

Em meteorologia os valores de  $\theta_g$  e  $\theta_v$  são geralmente expressos em porcentagem.

A relação entre conteúdo de umidade volumétrico e gravimétrico é dada por:

$$\theta_v = \theta_g (\rho_b / \rho_w) \quad (1)$$

onde

$$\rho_b = M_s / V_s \quad (2)$$

é a densidade aparente do solo seco e  $\rho_w = 1$ , é a densidade da água.

O potencial de água no solo comanda os processos de transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera e representa o trabalho realizado quando a unidade de massa de água em estado padrão é levada isotérmica, isobárica e reversivelmente para o estado considerado no solo. Esse potencial é o somatório dos potenciais de pressão, de soluto ou osmótico, matricial e gravitacional. Para efeito de irrigação ou estudos de crescimento de culturas vegetais que precisam caracterizar a disponibilidade de água para as plantas, o potencial matricial torna-se o componente de maior influência e expressa a parte do potencial de água devido à interação com a matriz do solo, também chamado de tensão da água no solo. O potencial de água no solo ( $\Psi_m$ ) mede a sucção necessária para extrair uma unidade de volume de água dos poros do solo em hPa.

A relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial é denominada curva de retenção ou curva característica. Essa relação não é universal e depende das características do solo local, tais como densidade e textura.

Ao contrário de outros componentes do ciclo da água, tais como precipitação e escoamento superficial, a umidade do solo apenas recentemente começou a estabelecer e manter uma base de dados global da umidade do solo *in-situ*, através da ISMN - *International Soil Moisture Network*, coordenada pela *Global Energy and Water Cycle Experiment* (GEWEX) em cooperação com o *Group of Earth Observation* (GEO) e do *Committee on Earth*

*Observation Satellites* (CEOS). Atualmente apenas 4 países disponibilizam dados científicos de suas redes de umidade do solo: Austrália, Espanha, França e Itália [2].

### 1.1. Métodos de Medida

Segundo o Guia N° 8, publicado pela Organização Mundial de Meteorologia em 2008 [1], os métodos e instrumentos disponíveis para avaliar o estado da água no solo podem ser classificados de diversas formas, sendo que uma delas leva em consideração a determinação de conteúdo de água e a determinação do potencial de água.

A determinação do conteúdo de água no solo pode ser feita direta ou indiretamente. O método gravimétrico e a lisimetria (medida gravimétrica não destrutiva) são métodos diretos. Técnicas radiológicas, como a dispersão de nêutrons e a absorção gama; e medidas derivadas das propriedades dielétricas do solo, como a reflectometria no domínio do tempo são exemplos de medidas indiretas.

Para a determinação do potencial de água no solo são utilizados métodos indiretos através de instrumentos como tensiômetros, blocos de resistência e psicrômetros.

Finalmente, através de técnicas de sensoriamento remoto também é possível determinar a umidade do solo nas camadas mais superficiais do solo. Como consequência, as medidas de umidade do solo utilizando estações meteorológicas de superfície ganham maior importância, uma vez que as medidas remotas precisam ser validadas e demonstradas. Em 2005 foi criado o *International Soil Moisture Working Group* (ISMWG), um grupo de trabalho formado com o objetivo de prover cooperação internacional em pesquisa e aplicações em apoio às missões de satélite para medidas de umidade do solo. Em 2009 aconteceu o terceiro encontro do ISMWG, em Lisboa, Portugal. Com a criação de rede internacional (ISWN) a comunidade geocientífica poderá validar e melhorar as observações por satélite e dos modelos globais da superfície da Terra.

Dentre todos esses métodos e técnicas de medida aqueles que utilizam a reflectometria no domínio do tempo (TDR) ou da frequência (FDR), apesar do seu alto custo, vêm ganhando cada vez mais espaço na preferência dos pesquisadores, pois apresentam boa precisão e resolução, resposta rápida, é uma técnica não-destrutiva, não emitem radiação ionizante e podem efetuar medidas contínuas por longos períodos. Esses instrumentos registram a umidade do solo por meio da análise da constante dielétrica do solo e da água, que é a técnica utilizada para medir o tempo de reflexão de uma onda eletromagnética no solo [3].

Métodos como o gravimétrico são experimentos que não exigem materiais de alto custo, sendo uma técnica direta de medida, é realizado por meio de pesagem e secagem de amostras de solo. Como um método usado em laboratório, esta técnica é tida como um método padrão comparativo para se conhecer o conteúdo de água presente em uma determinada amostra.

Por serem estes últimos os métodos mais amplamente estudados e devido à disponibilidade dos equipamentos para experimentos na área de Metrologia Ambiental do

Laboratório de Instrumentação Meteorológica - LIM, doravante serão o foco deste estudo.

### 1.2. Calibração

No meio científico quando se fala em calibração de sensores de umidade do solo entende-se a palavra ‘calibração’ como sendo a relação entre o conteúdo de água ( $\theta$ ) e a constante dielétrica aparente do solo ( $\epsilon$ ) medida por um instrumento tipo TDR [4]. O procedimento adotado tradicionalmente é empírico e refere-se somente ao tipo de solo que lhe deu origem ou eventualmente a algum outro experimento que tenha sido realizado sob as mesmas condições. Através destes modelos obtém-se uma ‘curva de calibração’ do equipamento, como é impropriamente denominada, pois não há qualquer caracterização do ponto de vista metroológico, apenas um ajuste de curva através de regressão linear ou não-linear. Dentro deste conceito de ‘calibração’, em 1980, foi formulada a equação universal de Topp, determinada empiricamente através dos experimentos realizados com cinco tipos de solos indo desde os argilosos até os arenosos [5], conforme segue:

$$\theta_v = -0,053 + 0,029 \epsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \epsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \epsilon^3 \quad (3)$$

onde  $\epsilon$  é a constante dielétrica do sistema água + solo.

Embora seja denominada como universal, para solos com baixa densidade ou altas concentrações de material orgânico uma ‘calibração’ para solo específico é preferida à utilização da equação de Topp [1].

Atualmente não existem padrões de calibração comerciais para calibrar as sondas ou sensores do tipo TDR [6]. Algumas normas [6-9] fornecem diretrizes básicas para a determinação do conteúdo de água no solo através de métodos clássicos e podem servir de base para a avaliação e determinação dos procedimentos a serem adotados para a calibração destes sensores.

O objetivo deste trabalho é efetuar diversas medições em laboratório e em campo, com equipamentos de diferentes modelos e fabricantes, avaliar a compatibilidade destas medições e comparar algumas metodologias com a finalidade de embasar a escolha de um procedimento de calibração para sensores de medida de umidade do solo que leve em consideração os requisitos metroológicos necessários para que se obtenha uma incerteza de medição apropriada à finalidade a que se destina.

## 2. OS EXPERIMENTOS

Para estudar o comportamento de medidas registradas por diferentes sensores de umidade do solo foram realizadas duas análises distintas: uma considerando as medidas realizadas em laboratório e outra considerando as medidas realizadas em campo.

Os experimentos de campo foram conduzidos nas imediações do Laboratório de Instrumentação Meteorológica, do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, LIM/CPTEC/INPE, na cidade de Cachoeira Paulista-SP (Latitude: 22°41'19" S e longitude: 45°00'22" O). Os

experimentos de laboratório foram realizados nos laboratórios da Metrologia Ambiental, do LIM.

### 2.1. Experimento em laboratório

Para o experimento em laboratório através do método gravimétrico, foi utilizada amostra de solo deformada, em quantidade suficiente para a inserção dos sensores, extraídas da camada mais superficial do solo nas imediações do LIM, em locais próximos aos do experimento de campo. A temperatura do laboratório permaneceu em  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e a umidade relativa em  $(50 \pm 10) \%$ ur.

O objetivo deste experimento era analisar o comportamento de dois medidores de umidade do solo de mesmo modelo e números de série diferentes utilizando uma mesma metodologia. Os materiais utilizados seguem abaixo listados:

- 01 balança de precisão MARTE, modelo AC 10K, número de série 257163, com resolução de 0,1 g, e incerteza de  $\pm 0,0030$  kg, calibrada no INPE/LIT (INPE / Laboratório de Integração e Testes), com rastreabilidade à RBC (Rede Brasileira de Calibração);
- 02 sensores de umidade do solo *Delta-T Devices*, modelo *ThetaProbe ML2x*, números de série 157/013 e 157/014, mostrados na Figura 1(a), com a especificação técnica resumida da Tabela 1;
- 02 medidores de umidade *Delta-T Devices*, modelo *HH2*, números de série HH2 29/82 e HH2 29/81, com precisão de  $\pm(0,13\%$  da leitura em mV + 1,0 mV) e resolução de 1 mV, mostrados na Figura 1(b);
- 01 forno elétrico, marca *Fischer*, modelo, com graduação variando de 0 a  $270^\circ\text{C}$ ; e
- Receptivo de vidro com capacidade de 700 ml.



Fig. 1. Sensor de conteúdo de umidade no solo *ThetaProbe* (a) em conjunto com sistema de aquisição de dados *HH2* (b), ambos da *Delta-T Devices*

Os sensores utilizados para medida do conteúdo de água no solo neste experimento, utilizam o princípio de funcionamento da reflectometria. A sonda gera um sinal senoidal de 100 MHz que é estendido para o interior do solo através das 4 (quatro) hastes de aço inoxidável. A impedância da disposição das hastes varia com a impedância do solo, que tem duas componentes: constante dielétrica e

condutividade iônica. O sinal de frequência de 100 MHz atua no sentido de minimizar os efeitos desta última. Uma vez que a constante dielétrica da água ( $\sim 81$ ) é muito maior que a constante do solo (entre 3 e 5) e do ar (1), a constante dielétrica do solo é determinada em função do seu conteúdo de água. As medidas realizadas por estes sensores podem ser afetadas por variações na densidade e composição do solo, rochas próximas às hastes, raízes, buracos (bolsas de ar) feitos por minhocas ou outros bichos, dejetos no subsolo e, em menor escala, devido às perdas por transpiração e evaporação. A saída do *ThetaProbe* também é influenciada pela condutividade iônica dos sais dissolvidos na umidade do solo. Este efeito é limitado a níveis de salinidade abaixo de  $250 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ . Se o sensor for utilizado em situações onde a salinidade varie consideravelmente torna-se necessário medir a salinidade e corrigir os dados através de equação fornecida pelo manual do fabricante.

Para o experimento em questão considerou-se desprezível o efeito da sanidade da amostra de solo coletada.

Tabela 1. Especificação técnica resumida do *ThetaProbe*

Parâmetro medido	Conteúdo de umidade volumétrica do solo, $\theta_v$ ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ou %vol.)	
Escala	0,05 a $0,6 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ (fundo de escala de $0,0$ a $1,0 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ )	
Precisão*	$\pm 0,01 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ , 0 a $40^\circ\text{C}$ $\pm 0,02 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ , 40 a $70^\circ\text{C}$	após a 'calibração' para um tipo específico de solo
* sujeito a erros de salinidade	$\pm 0,05 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ , 0 a $70^\circ\text{C}$	utilizando a 'calibração' generalizada
Erros devido à salinidade do solo	$0,0$ a $250 \text{ m}\cdot\text{Sm}^{-1}$ , $< -0,0001 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ por $\text{m}\cdot\text{Sm}^{-1}$ $250$ a $2000 \text{ m}\cdot\text{Sm}^{-1}$ , nenhuma alteração significativa	
Volume de amostragem do solo	$> 95\%$ de sensibilidade considerando um cilindro de $4,0$ cm de diâmetro e $6$ cm de extensão ( $\sim 75 \text{ cm}^3$ ) em volta da haste central.	
Tempo de estabilização	1 a 5 s, dependendo da precisão necessária	
Tempo de resposta	$< 0,5$ s para 99% de variação	
Material das hastes	Aço inoxidável	
Comprimento do cabo	Padrão: 5 m	Comp.Máx.: 100 m

O procedimento teve início com uma amostra de solo de 969,5 g, submetida à secagem em forno elétrico à temperatura de  $105^\circ\text{C}$ , por um período diário de sete horas. Foram realizadas pesagens periódicas até que o peso da amostra apresentasse massa constante, o que foi confirmado após três medidas sucessivas de igual valor. O tempo total de secagem da amostra foi de quatro semanas, totalizando ao final deste período, uma amostra com massa constante de 777,1 g de solo seco. A amostra foi então preenchida com um volume conhecido de água (10 % da massa da amostra de solo seco) e aguardou-se um intervalo de 60 (sessenta) minutos para que a água penetrasse totalmente à amostra. Realizou-se três medições com intervalo de 5 (cinco) minutos com cada medidor separadamente e configurados para leitura em conteúdo volumétrico percentual. Acrescentou-se mais 10% de água e assim sucessivamente até 80 %.

## 2.2. Experimento de campo

O objetivo destes experimentos é analisar o comportamento de dois tipos de sensores de umidade diferentes instalados em campo (*in situ*) e relativamente próximos um do outro. Os materiais utilizados seguem abaixo listados:

- 01 sensor de medida de perfil de umidade do solo *Delta-T Devices*, modelo *Profile Probe PR1/6*, número de série 9-003 (Figura 2), com especificação técnica resumida constante na Tabela 2;
- 01 sensor de umidade do solo *Campbell Scientific*, modelo CRS615, número de série # 8688, versão 8221-07 (Figura 2), com precisão de  $\pm 2\%$  e resolução determinada pela programação do sistema de aquisição de dados; e
- 01 sistema de aquisição de dados (*datalogger*), modelo CR1000, número de série 13219 (Figura 3), com rastreabilidade à RBC/INPE/LIT [21] (Rede Brasileira de Calibração / INPE / Laboratório de Integração e Testes).



Fig. 2. Sensor de perfil de umidade do solo *Profile Probe PR1/6* da *Delta-T Devices* e sensor de umidade do solo CS615 da *Campbell Scientific*



Fig. 3. *Datalogger CR1000* da *Campbell Scientific* (Foto: *Campbell Scientific*)

O sensor de umidade do solo *Profile Probe* possui uma haste selada com aproximadamente 25 mm de diâmetro, com sensores eletrônicos em forma de anéis em aço inoxidável arranjados e fixos em intervalos regulares ao longo de seu comprimento. A saída de cada sensor é um sinal analógico de tensão contínua. Esta saída é convertida em umidade do solo através das ‘calibrações de solo’ fornecidas pelo fabricante ou através de uma ‘calibração’ para solo específico com a ajuda de um *ThetaProbe*.

Quando um sinal é aplicado ao *Profile Probe* este gera um sinal de 100 MHz. Este sinal é aplicado aos pares de anéis de aço que por sua vez geram um campo eletromagnético que se estende por aproximadamente 100 mm para dentro do solo. O conteúdo de água no solo nas vizinhanças dos anéis determinam suas propriedades dielétricas. Se as

propriedades dielétricas do solo são diferentes da sonda eletrônica, parte do sinal de 100 MHz será refletido. A parte refletida do sinal combina com o sinal aplicado e a tensão resultante age como uma medida sensível ao conteúdo de umidade do solo.

Assim como o *ThetaProbe*, o *Profile Probe* também sofre influência de fatores como: variações na densidade e composição do solo, rochas próximas às hastes, raízes, buracos (bolsas de ar), salinidade do solo e inserção inadequada no solo.

O sensor CS615 é um reflectômetro de duas hastes e sua saída é uma onda quadrada, com amplitude de 2,5 V e período de 0,7 a 1,6 ms. Ao ser conectado a um sistema de coleta de dados, como um *datalogger* por exemplo, a medida do período pode ser convertida em conteúdo volumétrico de água utilizando as equações de ‘calibração’ fornecidas pelo fabricante. Sua saída sofre influência da condutividade elétrica do solo, quantidade de matéria orgânica e argila, comprimento do cabo e temperatura do ar. Duas propriedades afetam sensivelmente a resposta do CS615: alta quantidade de argila (>30%) e alta condutividade elétrica (> 1 dS·m<sup>-1</sup>). Se inserida verticalmente na superfície do solo a sonda irá indicar o teor de água nos 30 cm superiores do solo.

O experimento de campo foi conduzido próximo à estação meteorológica 83835 do CPTEC/INPE, em Cachoeira Paulista (Latitude: 22°41'19" S e longitude: 45°00'22" O). Os dois sensores foram instalados no início do mês de setembro de 2009 e o *datalogger* foi programado para coletar as medidas a cada 30 minutos. O CS615 foi instalado na posição vertical próximo ao *Profile Probe*. Para este trabalho foram consideradas as leituras efetuadas até o último dia do mês de fevereiro de 2010.

Tabela 2. Especificação técnica resumida do *Profile Probe PR1/6*

Parâmetro medido	Conteúdo de umidade volumétrica do solo, $\theta_v$ (m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> ou %vol.)	
Escala	0,05 a 0,6 m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> (fundo de escala de 0,0 a 1,0 m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )	
Precisão	0,0 a 0,4 m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	após a ‘calibração’ para um tipo específico de solo
	0,4 a 0,6 m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	
0,0 a 0,6 m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	$\pm 0,05$ m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> , 0 a 40 °C	utilizando a ‘calibração’ generalizada
Erros devido à salinidade do solo	0,0 a 800 m·Sm <sup>-1</sup> , < -0,0001 m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> por m·Sm <sup>-1</sup>	
Volume de amostragem do solo	Verticalmente: ~95% de sensibilidade com 40 mm acima e abaixo de cada par de anéis. Horizontalmente: ~95% de sensibilidade considerando um cilindro de 100 mm de raio em volta da sonda.	
Tempo de estabilização	1s	
Tempo de resposta	< 0,5 s para 99% de variação	
Comprimento do cabo	Padrão: 2 m	Comp.Máx.: 100 m
Tamanho	1246 mm	

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Experimento de laboratório

Convertendo-se os valores de conteúdo de água gravimétrico para conteúdo de água volumétrico, através das equações (1) e (2), foi possível comparar os resultados obtidos pelos sensores, com os medidores configurados para saída em percentual volumétrico de conteúdo de água, conforme Tabela 3, e desta maneira obter os gráficos das Figuras 4, 5 e 6.

Tabela 3. Experimento em laboratório considerando a massa de solo seco de  $M_s = 777,1$  g

$M_w$ [g]	$M_s+M_w$ [g]	$\theta_g(\%)$	$\rho_b$	$\theta_v(\%)$	$\theta_v(\%)$	
					ThetaProbe 013	ThetaProbe 014
77,7	854,8	10	1,6	15,9	17,5	16,8
155,4	932,5	20		31,7	31,0	29,1
233,1	1010,2	30		47,6	46,4	46,2
310,8	1087,9	40		63,4	43,1	43,4
388,6	1165,7	50		79,3	41,7	42,0
466,3	1243,4	60		95,2	39,7	40,1
544,0	1321,1	70		111,0	39,5	39,7
621,7	1398,8	80		126,9	40,3	40,4

As curvas obtidas, na realidade, referem-se a um ajuste de curva considerando os valores de saída em tensão já convertidos para conteúdo volumétrico pelo equipamento medidor, ou seja, utilizando a conversão fornecida pelo fabricante. O que se observa é que para conteúdo de água até 30% o equipamento responde linearmente e tem uma boa exatidão para este tipo de solo. Para conteúdo de água acima deste valor é muito interessante a utilização das equações de ajuste de 4º grau da Figura 5 para este solo específico. Se for considerada toda a faixa de conteúdo de água, de 10% a 80%, as equações de ajuste passam a ser de 6º grau, como exemplificado na Figura 6. Esses resultados são compatíveis com a especificação do fabricante que sugere que as especificações são válidas para a faixa até  $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  (ou 60% de conteúdo de água). Para o solo estudado aparentemente ocorre a saturação com 40% de conteúdo de água.

Segundo o manual do fabricante dos sensores [10] bastaria realizar a ‘calibração’ para solo específico apenas para um sensor, obtendo desta maneira uma equação de ajuste que poderia ser utilizada por um outro sensor de mesmo modelo, isto porque os sensores responderiam com a mesma estabilidade e uniformidade à constante dielétrica, o que, metrologicamente falando, não se justifica, uma vez que qualquer calibração deve referir-se somente ao equipamento sob teste não podendo ser estendida a quaisquer outros mesmo que de mesmo lote ou fabricante [11].

Alguns cuidados devem ser observados na realização dos experimentos em laboratório, tais como:

- controle das condições ambientais (temperatura e umidade relativa);
- para que não haja perda de matéria orgânica por oxidação a temperatura do forno deve ser mantida em  $(105 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  e para amostras de solo com quantidade

considerável de matéria orgânica deve-se diminuir a temperatura para  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  [1];

- preferencialmente, proceder à secagem da amostra em ambiente arejado, não exposto diretamente a luz solar;
- a inserção dos instrumentos deve ser realizada com o máximo de cuidado para não ocorra a criação de espaços de ar entre a amostra e as hastes.

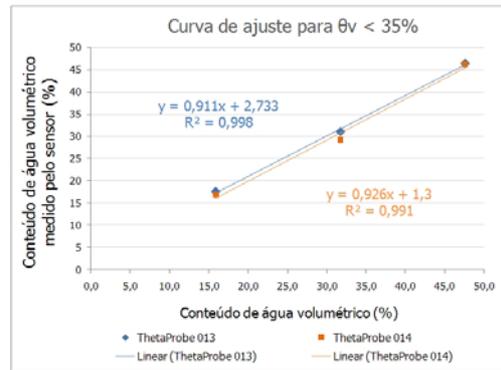


Fig. 4. Curva comparativa entre os sensores *ThetaProbe* para resposta em conteúdo volumétrico com relação às medidas obtidas pelo método gravimétrico considerando a faixa abaixo de 35%

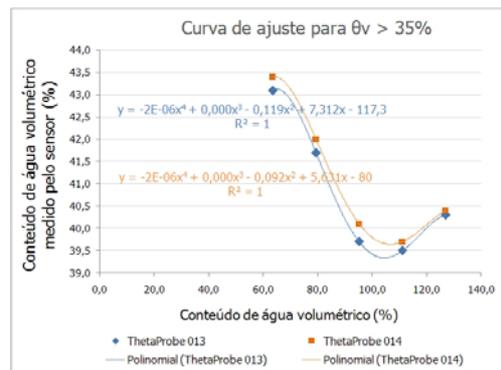


Fig. 5. Curva comparativa entre os sensores *ThetaProbe* para resposta em conteúdo volumétrico com relação às medidas obtidas pelo método gravimétrico considerando a faixa entre 35% e 80%

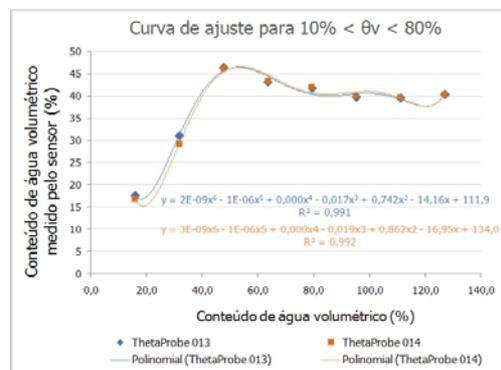


Fig. 6. Curva comparativa entre os sensores *ThetaProbe* para resposta em conteúdo volumétrico com relação às medidas obtidas pelo método gravimétrico considerando toda a faixa

### 3.2. Experimento de campo

Os dados climáticos obtidos através da Estação Meteorológica de Cachoeira Paulista permitiram uma melhor avaliação do comportamento dos sensores e do solo em estudo. Foram utilizados dados de precipitação acumulada diária entre o período de setembro de 2009 a fevereiro de 2010.

Para converter a saída do *Profile Probe* para conteúdo volumétrico de água no solo, o fabricante [12] oferece três métodos: a) conversão polinomial, b) conversão linear, e c) conversão através de tabela de linearização. Para o experimento em estudo escolheu-se a conversão polinomial, através da equação (4). Esta equação é sugerida pelo fabricante do sensor e é utilizada para solos minerais com conteúdo de água no solo até  $0,7 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  (70%), ou 400 mV.

$$\theta_v(V) = -0,113 + 1,62 \cdot V - 3,56 \cdot V^2 + 8,63 \cdot V^3 \quad (4)$$

onde  $V$  é a saída do sensor em volts e  $\theta_v$  o conteúdo volumétrico de água no solo em  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ .

Para o CS615 foi utilizada a equação (5) para solos minerais, constante no manual do fabricante do sensor [13]:

$$\theta_v(\tau) = -0,207 + 0,097 \cdot \tau + 0,288 \cdot \tau^2 \quad (5)$$

onde  $\tau$  é a saída do sensor em milisegundos e  $\theta_v$  o conteúdo volumétrico de água no solo em  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ .

Os gráficos ilustrados nas Figuras 7 a 12 ilustram a precipitação acumulada diária e as medidas dos sensores mês a mês de setembro de 2009 a fevereiro de 2010.

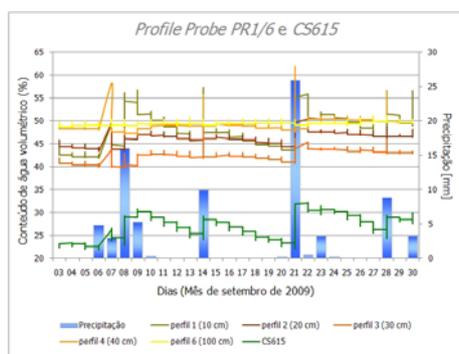


Fig. 7. Dados amostrados durante o mês de setembro de 2009

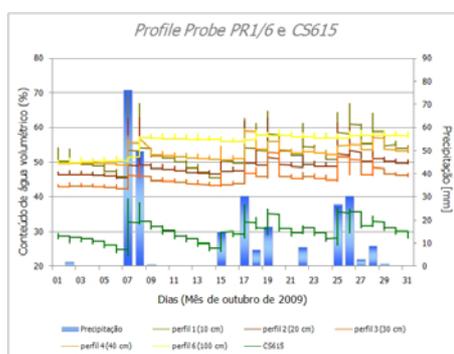


Fig. 8. Dados amostrados durante o mês de outubro de 2009

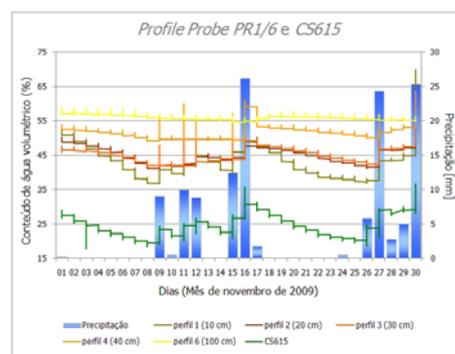


Fig. 9. amostrados durante o mês de novembro de 2009

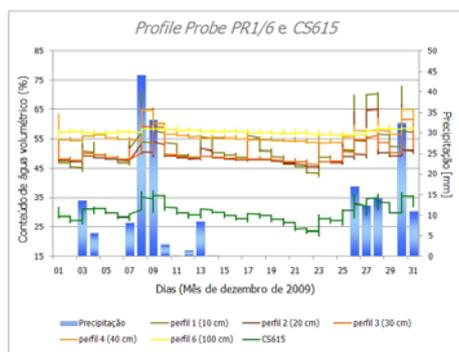


Fig. 10. Dados amostrados durante o mês de dez/09

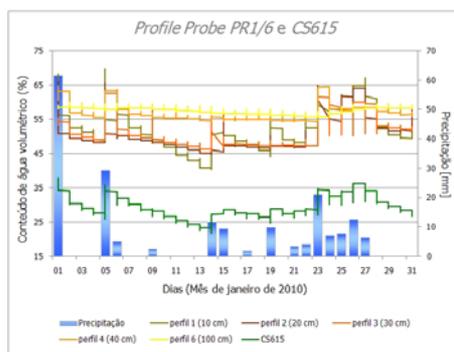


Fig. 11. Dados de amostrados durante o mês de jan/10

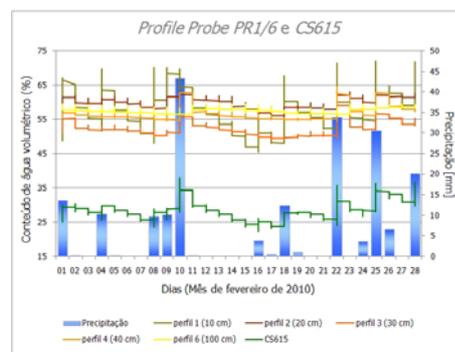


Fig. 12. Dados amostrados durante o mês de fev/10

Observando os gráficos e comparando o perfil 3 do *Profile Probe*, equivalente à profundidade de 30 cm, e a saída do CS615, percebe-se que os dois sensores respondem rapidamente aos dias de elevado índice pluviométrico, mas apresentaram significativa diferença em magnitude entre um e outro (entre 35 a 47%). Em ambos os casos utilizou-se as equações fornecidas pelos manuais dos fabricantes e diante da falta de rastreabilidade dos instrumentos a dúvida sobre qual instrumento está medindo corretamente ou qual deles apresenta um erro sistemático persiste. Fica evidente a necessidade de se estabelecer um parâmetro de referência para esta variável, o que só poderá ser obtido através de uma

análise metroológica e um cálculo aprimorado de incertezas envolvidas considerando como contribuições:

- uma possível calibração da resposta de saída destes instrumentos em grandezas elétricas ou tempo e frequência;
- a incerteza associada à aproximação do ajuste de curvas, seja aplicando uma 'calibração' generalizada ou específica pelo método de regressão linear ou não-linear, através de análise de variância e covariância;
- análise estatística dos efeitos sistemáticos através da repetitividade das medidas;

- d) a resolução do sistema de coleta de dados, se for o caso;
- e) entre outras.

#### 4. DISCUSSÃO

Observa-se que os sensores respondem de maneira personalizada à constante dielétrica do solo, como era de se esperar, e utilizar uma única equação de ajuste para sensores de diferentes números de série pode contribuir para conclusões errôneas. Independente do tipo de procedimento de calibração a ser adotado para essa variável (umidade do solo) é fundamental a análise de incertezas envolvidas no processo de calibração para que se utilize as equações de 'calibração' de forma adequada.

Apesar de existirem normas específicas que tratam da calibração destes sensores e muito se tenha discutido a respeito de uma calibração através de metodologias já muito exploradas por diversos autores [14-19], a questão metrológica sequer é mencionada, talvez pelo fato de que os principais usuários deste tipo de equipamento sejam de áreas do conhecimento humano onde a metrologia ainda está longe de ser considerada como base fundamental de todas as medidas. São áreas como: Agronomia, Agricultura, Clima, Meteorologia, entre outras, onde, pelo menos no Brasil, não se atentou com o devido rigor sobre a importância de se obter as incertezas de calibração e aplicar esta informação aos dados obtidos, produzindo resultados confiáveis e com rastreabilidade ao Sistema Internacional de modo que possa haver assim comparabilidade entre dados científicos em qualquer parte do planeta.

Considerando ainda a técnica de reflectometria no domínio do tempo diversas comparações têm sido feitas entre equipamentos e métodos diferentes no intuito de verificar ou definir a aplicabilidade do TDR em escala, mas em nenhum desses trabalhos se observa uma avaliação metrológica para essas considerações[20]. Uma das primeiras iniciativas neste sentido é um trabalho desenvolvido no *Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione*, da *Università del Salento*, na Itália, que relata uma metodologia de calibração para sensores tipo TDR, utilizados para medida da umidade em grãos [20]. É uma proposta a ser estudada e analisada no sentido de verificar a aplicabilidade para medida de umidade no solo.

Outra alternativa é utilizar a norma ASTM D 6565 para calibrar um instrumento tipo *ThetaProbe* através de amostras em laboratório e análise gravimétrica e utilizá-lo como padrão de trabalho para calibrar outros instrumentos como o *Profile Probe*, por exemplo. Dentro desta perspectiva, diversos experimentos devem ser realizados para determinar qual a melhor metodologia: utilizar equações genéricas e emitir um Certificado de Calibração com incertezas relacionadas ao pior erro; ou determinar uma equação para cada tipo de solo clássico conhecido e emitir um "relatório de adequação" como parte integrante do Certificado de Calibração, onde conste instruções a respeito de como obter a incerteza de medição para um solo diferente dos tipos "clássicos" relatados no certificado, ou determinar uma curva específica para o solo onde será utilizada a sonda e emitir um Certificado de Calibração "temporário", válido somente para utilização da sonda no solo relatado.

#### 5. CONCLUSÃO

Na área de pesquisa ambiental relacionada aos eventos de interação solo-água-atmosfera, onde a determinação da umidade do solo na maioria das vezes requer uma boa precisão, muito provavelmente uma calibração isolada, considerando apenas o princípio de funcionamento dos sensores, como por exemplo, uma calibração meramente "eletrônica", não fornecerá a confiabilidade necessária. As calibrações consideradas como tendo os resultados mais exatos, embora não considerem a análise de incerteza, são aquelas que individualizam o procedimento de calibração para cada tipo de solo sob teste. Talvez a resposta seja aliar a calibração tradicional a ensaios, como na área de Química Analítica. Fazer ensaios com diversos tipos de solos, baseando-se na Classificação Internacional de Solos ou na classificação brasileira de solos (SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação, desenvolvido pela Embrapa) e utilizá-los como referência ou material de referência para uma calibração 'adaptada' ao resultado esperado.

Outra alternativa é desenvolver um procedimento padrão que possa ser estendido facilmente a diversas condições experimentais (diferentes tipos de sondas e/ou tipos de solos), levando-se em consideração uma análise metrológica.

Ainda há um longo caminho a percorrer no sentido de encontrar a solução que melhor se enquadre para a calibração desta variável. Muitos ensaios e experimentos precisam ainda serem feitos, observando rigorosamente as normas e recomendações técnicas das áreas de Metrologia, Meteorologia, Agronomia, Agricultura, Química, entre outros, para que se chegar a um consenso na determinação da incerteza de medição.

*"...o segredo é quebrar os problemas em pequenos pedaços administráveis..."*  
by Calvin & Haroldo

#### AGRADECIMENTOS

À equipe do LIM/CPTEC. Ao Programa de Capacitação Institucional do CNPq, pelo projeto "Implementação do Sistema de Metrologia de Umidade do Solo". Ao MCT, FINEP, INPE e INMETRO pelo incentivo à implantação da área de Metrologia Ambiental no INPE e à CAPES pela disponibilização das normas técnicas.

#### REFERÊNCIAS

- [1] World Meteorological Organization; "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation", seventh edition, 2008.
- [2] *International Soil Moisture Network*. Disponível em: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/insitu/index.php/in-situ-networks.html>, acesso em: 19 de abril de 2010.
- [3] D. Cassel; "Time Domain Reflectometer", Version 2.1, *Department of Soil Science North Carolina State University*, North Carolina State, EUA,1992.
- [4] J. Tommaselli, O. Bacchi; "Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos", *Pesq. agropec. Bras.*, vol. 36, n. 9, pp. 1145-1154, 2001.

- [5] G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan; "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines", *Water Resources Research*, vol. 16, n. 3, pp. 574-582, June 1980.
- [6] ASTM International; "*Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Time-Domain Reflectometry (TDR) Method*", ASTM D 6565-00 (Reapproved 2005), 2005.
- [7] ASTM International; "*Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*", ASTM D 2216-05, 2005.
- [8] ASTM International; "*Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Microwave Oven Heating*", ASTM D 4643-08, 2008.
- [9] ASTM International; "*Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content by Direct Heating*", ASTM D 4959-07, 2007.
- [10] Delta-T Devices Ltd.; "*ThetaProbe Soil Moisture Sensor. Type ML2x. User Manual*", Cambridge, England, 1999.
- [11] ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005; "*Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração*", 2005.
- [12] Delta-T Devices Ltd.; "*User Manual for the Profile Probe type PR1*", v.1.2, Cambridge, England, 2001.
- [13] Campbell Scientific, Inc.; "*CS615 Water Content Reflectometer Instruction Manual. Version v.8221-07*", rev.10/96, USA, 1996.
- [14] M. A. Alfaro Soto, D. M. Kumayama, H. K. Chang, "Calibração de um Reflectômetro para Estudos do Fluxo de Água em Solo Não Saturado", *Geociências*, v.26, n.4, p. 357-368, 2007.
- [15] R. Lacerda, H. O. Guerra, G. Barros Jr., M. L. Cavalcanti, "Avaliação de um TDR para a determinação do conteúdo de água no solo", *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, Brasil, 2005
- [16] C. F. Souza, M. V. Folegatti, E. E. Matsura, D. Or; "Calibração da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para a Estimativa da Concentração da Solução no Solo", *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.26, n.1, p. 282-291, jan/2006.
- [17] W. R. Batista, J. E. G. Santos; "Avaliação das Técnicas TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) na Determinação do Teor de Água em Diferentes Classificações de Solo"; *Energ.Agríc.*, Botucatu, v.20, n.1, p. 103-112, 2005.
- [18] R. D. Lacerda, H. O. C. Guerra, G. B. Junior, M. L. F. Cavalcanti; "Avaliação de um TDR para Determinação do Conteúdo de Água no Solo", *Rev. Bio. e Ciências da Terra*, v.5, n.1, 2005.
- [19] A. Cataldo, G. Cannazza, E. Benedetto, L. Tarricone, E. PiuZZi, "Moisture content measurements through TDR: a metrological assessment for industrial applications", *Symposium*, Florence, Italy, 2008.
- [20] A. Cataldo, G. Cannazza, E. Benedetto, L. Tarricone, M. Cipressa, "Metrological assessment of TDR performance for moisture evaluation in granular materials", *Università del Salento*, Lecce, Italy, 2008
- [21] M. A. A. Santana, P. L. O. Guimarães, Carlos T. Assumpção, Michelly K. A. Santana, Jorge L. M. Nogueira, Paulo R. A. Arlino. "A demanda, os requisitos e a calibração de dataloggers utilizados no monitoramento ambiental no Brasil", *METROLOGIA 2009*, Salvador-BA, novembro de 2009.

"A opinião dos autores não reflete necessariamente as opiniões das instituições inseridas neste trabalho."