

Foto: Gilmar Victorino



## Tomógrafo de Campo Dedicado a Estudos de Parâmetros Físicos da Infiltração da Água no Solo

João de Mendonça Naime<sup>1</sup>  
Álvaro Macedo da Silva<sup>2</sup>  
Silvio Crestana<sup>3</sup>

Imensas quantidades de insumos agrícolas são aplicados sobre o solo e grande parte destes degrada os recursos hídricos. Para uma investigação adequada do efeito destes insumos, estudam-se as propriedades hidráulicas do solo, que influem no transporte de solutos neste meio. Medir tais propriedades e modelar os parâmetros correlatos são tarefas extremamente complexas, devido ao tempo requerido, dinheiro, instrumentação e escala. As metodologias convencionais inferem as propriedades hidráulicas em amostras que estão em equilíbrio, através de técnicas invasivas e sob restrições especiais. Desde o trabalho pioneiro de Crestana (1985), reconhece-se o potencial da técnica tomográfica para o estudo da física da água no solo de forma qualitativa. O tomógrafo aqui apresentado contribuiu com a Ciência do Solo, como um instrumento que possibilitou o desenvolvimento de um novo método de estudo da infiltração da água na região não-saturada do solo (Naime, 2001a). A Tomografia computadorizada mede a umidade ( $\theta$ ) durante o fluxo não-saturado e, através da solução numérica da equação de Richards (Shcherbakov et al., 1986) e do modelo de Rossi-Nimmo (1994), obtém-se a

curva de retenção, asortividade, a condutividade hidráulica  $k(\theta)$  e a difusividade  $D(\theta)$ . Em comparação com os métodos convencionais, esta nova metodologia reduz o tempo de análise de dias para horas.

O tomógrafo portátil, com sistema de varredura de 3ª geração, de campo e de laboratório, desenvolvido e construído neste trabalho, tem a configuração apresentada no diagrama da Figura 1. É composto de um computador pessoal (PC) portátil, mecanismo de posicionamento, detector constituído de 2 arranjos de fotodiodos (PDA *photodiode array*) recobertos com cintilador e sistema eletrônico para controle da varredura, aquisição e tratamento dos dados. Um microcomputador padrão PC/104 gerencia o sistema eletrônico constituído de sistema de seleção de PDAs, conversor A/D, circuitos de comando dos motores de passo e circuito multiplex dos sinais da interface paralela do PC/104. Uma bateria automotiva de 12V, 36A.h, fornece energia para o sistema eletrônico. Optou-se pela utilização do PC/104 além do PC portátil, para além de ampliar a capacidade de interfaceamento com o mecanismo, permitir o processamento simultâneo das funções relacionadas à

<sup>1</sup> Eng. Eletrônico, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, Caixa Postal 741, CEP 13560-970, São Carlos-SP.

<sup>2</sup> Eng. Eletricista, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, Caixa Postal 741, CEP 13560-970, São Carlos-SP.

<sup>3</sup> Físico, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, Caixa Postal 741, CEP 13560-970, São Carlos-SP

## Programas de computador desenvolvidos para o tomógrafo

O PC/104 executa um programa desenvolvido em Assembler e C para o sistema operacional DOS. Sua finalidade é realizar tarefas básicas demandadas pelo PC através da interface serial RS-232. Estas tarefas são:

- Selecionar, acionar e temporizar os PDAs;
- Ler o conversor A/D sincronizado com o sinal de vídeo dos PDAs;
- Transferir ao PC os valores das 256 tensões integradas nos detectores e
- Controlar os movimentos de rotação e elevação.

O programa de varredura tomográfica do PC foi desenvolvido em Visual Basic 4.0, roda em ambiente Windows 32 bits e atua como interface homem-máquina para ajustar os parâmetros de varredura, comandar toda a seqüência de tomografias desejadas e gravar em arquivos os dados obtidos nas varreduras programadas.

Os 2 PDAs juntos apresentam 28 fotodiodos com baixa eficiência de conversão em relação aos demais, isto é, quando o ruído de fundo do detector é subtraído, a tensão lida é praticamente nula quando ocorre atenuação da radiação. O gráfico da Figura 5 mostra as tensões, integradas durante 1 segundo, do ruído de fundo (sem radiação), do feixe livre e a diferença entre as duas situações. As tensões dos fotodiodos defeituosos são substituídas pelas média das tensões dos vizinhos. Após as substituições, o ruído de fundo é subtraído. Para eliminar possíveis variações do ruído de fundo devido à temperatura e ao ruído eletrônico, a cada leitura ele é estimado tomando como referência o fotodiodo número 1, que está bloqueado para a radiação. Em seguida o programa normaliza as tensões para que a resposta seja homogênea quando os PDAs estão expostos ao feixe livre.

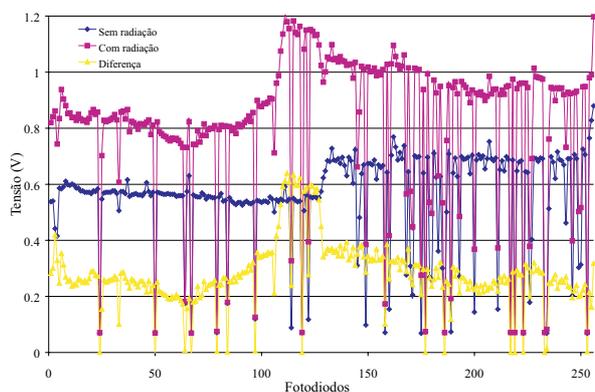


Figura 5 - Ruído de fundo dos fotodiodos (sem radiação), sinal obtido com o detector exposto ao feixe livre e a diferença entre as duas situações. O tempo de integração é de 1 s.

Devido à facilidade de programação, a parte gráfica do programa de reconstrução de imagem foi desenvolvida em Visual Basic 4.0. O algoritmo de reconstrução e as operações com os arquivos de dados e imagens foram implementados em um arquivo de funções executáveis tipo "dll" (biblioteca de ligação dinâmica), escrito em C++ Builder 4.0 porque a velocidade de execução é 16 vezes maior que em Visual Basic.

Alterações foram introduzidas no algoritmo de reconstrução de imagem a fim de corrigir distorções geométricas causadas pelo fato da fonte radioativa

utilizada neste projeto ter dimensão de 15mm e o desenvolvimento do algoritmo apresentado na literatura é baseado em fonte radioativa puntual. Para tanto, na reconstrução, utiliza-se um misto de geometria de feixes paralelos e feixe em forma de leque. A tela principal do programa de reconstrução pode ser vista na Figura 6.

O programa de reconstrução desenvolvido tem as seguintes características:

- Gravação de imagens tipo "bitmap" com 256 tons de cinza ou 512 tons de cores;
- Reconstrução de imagens em seqüência para um conjunto de arquivos selecionados;
- Subtração de imagens;
- Padronização de escala para um conjunto de imagens selecionadas;
- Segmentação de imagens com tons de marrom para o solo seco e tons de azul para região úmida do solo;
- Exibição do valor correspondente à célula apontada pelo cursor e também das duas células vizinhas em todas as direções;
- Calibração para a apresentação de valores de massa específica;
- Cálculos estatísticos como média, desvio padrão e coeficiente de variação sobre uma região de interesse, circular ou retangular, selecionada sobre a imagem;
- Medição de distância sobre a imagem;
- Ampliação da imagem em até 4 vezes e geração de arquivos no padrão VTK<sup>5</sup> para reconstrução 3-D no programa PowerVis<sup>6</sup>.

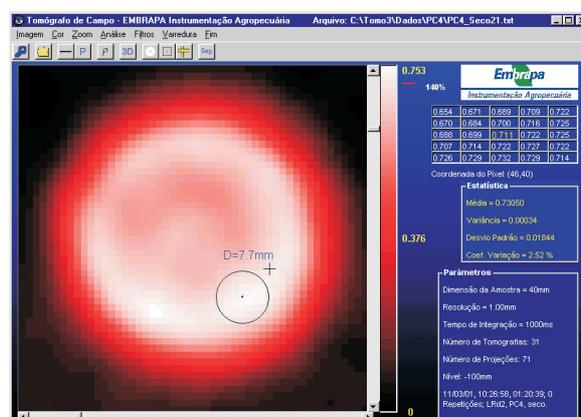


Figura 6 - Tela principal do programa de reconstrução e visualização de imagem.

## Calibração do tomógrafo e verificação do funcionamento

A Tabela 2 mostra os dados da reta de calibração da Figura 7. As imagens das amostras utilizadas na calibração são apresentadas na Figura 8. A reta de calibração do tomógrafo relaciona o coeficiente de atenuação linear ( $\text{cm}^{-1}$ ) com as unidades tomográficas (UT) calculadas pelo programa de reconstrução de imagem. Foram realizadas tomografias com amostras homogêneas de água, solo, teflon, PVC e alumínio. As unidades tomográficas foram obtidas calculando-se a

<sup>5</sup>VTK Visualization Toolkit: é um programa gratuito de código aberto para computação gráfica 3-D, processamento e visualização de imagens.

<sup>6</sup>PowerVis: Programa de reconstrução de imagens 3-D desenvolvido pelo grupo de Computação Gráfica e Processamento de Imagens do ICMC-USP ([www.lcad.icmc.sc.usp.br/~powervis/](http://www.lcad.icmc.sc.usp.br/~powervis/)).

aquisição e à reconstrução de imagem. Desse modo, durante uma aquisição pode-se reconstruir a imagem da aquisição anterior.

Desenvolveram-se 3 programas de computador: (i) programa de controle do mecanismo e aquisição de dados; (ii) programa interface usuário-máquina e (iii) programa de reconstrução da imagem tomográfica, algoritmo de reconstrução de imagem para geometria de feixe em leque, apresentado por Kak & Slaney (1987), para o caso onde os detectores são igualmente espaçados.

A fonte radioativa de Amerício-241 foi blindada em castelo de chumbo com espessura de 5mm. Esta blindagem garante proteção segura o suficiente, segundo normas da CNEN<sup>4</sup>, para o operador trabalhar a pelo menos 10cm da fonte, durante 40 horas semanais. Também se deve acrescentar que a dose típica de radiação a ser absorvida pelo meio material (amostra, coluna, monolito, planta, dentre outros) é extremamente reduzida não causando efeitos nocivos sobre este ou sobre o ambiente vizinho.

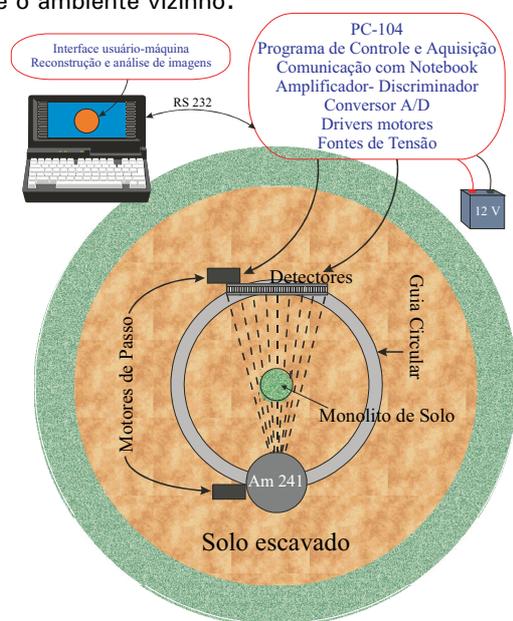


Figura 1 - Esquema do TC portátil, com sistema de varredura de 3ª geração, instalado em torno de um monolito de solo.

O detector de radiação é composto de 2 arranjos de fotodiodos (PDA), produzidos pela Hamamatsu modelo S6493-128G, com especificações apresentadas na Tab.1.

Tabela 1 - Especificações mecânicas dos PDAs.

Parâmetro	S6493-128G
Número de fotodiodos	128
Passo entre fotodiodos (P)	0,4mm
Largura de difusão dos fotodiodos (W)	0,25mm
Altura do fotodiodo (H)	0,4mm
Comprimento da área ativa	51,2mm

O comprimento da área ativa do PDA é igual à largura da placa de circuito impresso onde ele está montado. Dispondo uma placa ao lado da outra, elas compõem um arranjo de 256 detectores com 102,4mm de comprimento.

O dispositivo da série S6493 é constituído de fotodiodos de silício combinados com um circuito de processamento de sinal, que é montado em um único circuito integrado de tecnologia CMOS. Inclui um registrador de deslocamento, circuito de amostragem e armazenamento e um arranjo de amplificadores de carga. As correntes de cada fotodiodo, proporcionais à intensidade de luz, fluem para o arranjo de amplificadores de carga, conectados a cada elemento, onde são convertidas em tensões. As tensões são amostradas, armazenadas e finalmente lidas pelo registrador de deslocamento formando um sinal de vídeo composto de amplitudes de tensões dos fotodiodos. A tensão de cada fotodiodo é obtida através do método de armazenamento de carga, portanto o sinal de saída é proporcional ao produto entre o nível de luz incidente e o tempo de integração.

Quando fótons radioativos incidem sobre um cintilador, ocorrem choques de partículas. Uma pequena parte da energia cinética dissipada pela partícula carregada em um cintilador é convertida em energia fluorescente. O restante da energia é dissipada em forma de calor gerado pelas vibrações da rede cristalina. A energia fluorescente emitida pelo cintilador é luz visível (400 a 700nm), enquanto que o espectro das ondas eletromagnéticas da radiação gama está entre  $10^4$  e  $10^2$ nm. A resposta espectral dos fotodiodos situa-se na faixa de 200 a 1100nm com o pico em 720nm.

Os circuitos de interface (C6785) de cada PDA operam com 5V de tensão e têm os seguintes sinais de entrada (e) e saída (s) para controle e leitura:

- *Clock* (e) - base de tempo para o sincronismo dos sinais do PDA;
- *Start* (e) - primeiramente envia as tensões dos fotodiodos para o sinal de vídeo e em seguida, anula estas tensões e inicia uma nova integração. O intervalo de tempo entre dois Start determina o tempo de integração dos fotodiodos;
- *Trigger* (s) - sinal para disparar o processo de leitura da tensão de cada fotodiodo através do conversor A/D;
- *EOS* (s) - indica fim do sinal de vídeo e
- *Video* (s) - sinal serial analógico com as tensões de cada fotodiodo dispostas em seqüência, em intervalos de dois períodos do Clock.

Devido à influência do ruído térmico sobre o sinal dos fotodiodos, os PDAs são refrigerados por um sistema TEC (refrigerador termoelétrico), construído neste projeto. É constituído de uma placa de efeito Peltier, dissipador de calor com ventilação forçada e circuito eletrônico de controle de temperatura que mede a temperatura sobre os PDAs e monitora a corrente do TEC.

### Sistema eletrônico

O sistema eletrônico constitui-se de uma unidade de processamento central padrão PC/104 (Figura 2), de uma fonte de alimentação padrão PC/104 (Figura 3) e de um circuito eletrônico (Figura 3) desenvolvido para comandar as interfaces dos detectores, o conversor analógico/digital e o sistema mecânico de posicionamento através dos 2 motores de passo e sensores ópticos de posição.

<sup>4</sup>Comissão Nacional de Energia Nuclear estabelece taxa de exposição menor que 25Sv/h.

Produzido por mais de trezentos fabricantes, o padrão PC/104 é a versão miniaturizada do computador pessoal (IBM-PC). Basicamente, o PC/104 tem somente as dimensões alteradas; todas as outras características e funções do PC são mantidas, com a vantagem de ser compacto, robusto e modular. Os componentes eletrônicos empregados em sua construção permitem utilização na faixa de temperaturas de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ , sendo assim adequado para instrumentos embarcados e em ambientes industriais.



Figura 2 - Placa CPU do PC/104.

As placas padrão PC/104 medem  $91\text{mm} \times 96\text{mm}$  e têm um conector de 104 pinos que permite acesso aos dutos de dados e endereço como também o empilhamento de tantas placas quantas forem necessárias para atender às necessidades de projeto. Diversas unidades de processamento e uma grande variedade de interfaces são produzidas neste padrão, como por exemplo: CPU (386, 486 ou Pentium), conversor DC/DC, interfaces analógicas e digitais, modem, sistema de posicionamento global via satélite (GPS), placas de vídeo e etc.

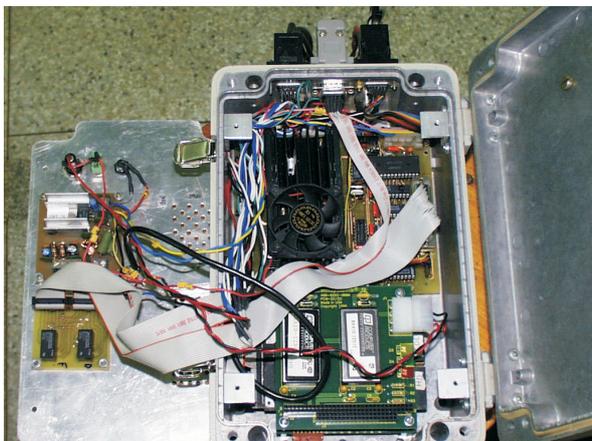


Figura 3 - Foto da montagem do sistema eletrônico do tomógrafo. Acima, à direita, está a placa de comando dos motores e do detector; abaixo à direita está a montagem do PC/104 com a placa de alimentação conectada sobre a CPU. À esquerda, na tampa, vêem-se as fontes reguladas.

O PC/104 utilizado neste projeto é constituído de dois módulos:

- CPU 386SX 33MHz, 8Mbytes de RAM, disco rígido de estado sólido (SSD "Solid State Disk") de 2Mbytes, 2 interfaces seriais RS-232, uma interface paralela, controlador de disco rígido, controlador de disco flexível 3,5" e interface para teclado e
- PCM-DC/DC-12-512, conversor DC/DC com entrada entre 12V e 48V e saídas reguladas em 5V e 12V.

Na fase de desenvolvimento do programa do PC/104, utilizou-se um módulo com disco rígido e uma unidade de disco flexível, uma placa de vídeo modelo PCM-FPVGA e um teclado.

O computador portátil comanda o PC/104 através da interface serial. Os comandos são relativos aos movimentos circular e vertical do mecanismo de varredura ou ao controle e à leitura dos 2 PDAs. Através de sua interface paralela, o PC/104 comanda os motores de passo, lê os sensores ópticos de indexação, seleciona, controla e lê os PDAs.

### Sistema mecânico de posicionamento

Foi desenvolvido e construído um mecanismo de posicionamento circular, e bipartido (Figura 4). Além do movimento circular em torno da amostra, o mecanismo permite o deslocamento vertical da fonte radioativa e do detector em até 270mm. A construção do sistema foi baseada em uma guia circular e dois carros deslizantes produzidos pela HEPCO. A guia circular é constituída de 2 setores de  $180^{\circ}$ , sendo dentada na face externa e seu diâmetro mede 510mm. O carro desliza sobre o trilho retificado da guia circular, acionado por um motor de passo acoplado a uma engrenagem que está em contato com os dentes da guia. Sobre o carro da guia circular está apoiado o sistema de elevação do conjunto fonte e detector. O sistema de elevação é constituído de um motor de passo, um fuso, uma porca de rolamento de esferas e uma guia linear com um carro. O motor de passo gira o fuso que movimenta a porca acoplada ao carro da guia linear. A porca e o carro sustentam um arco de  $180^{\circ}$  onde estão apoiados a fonte e o detector.

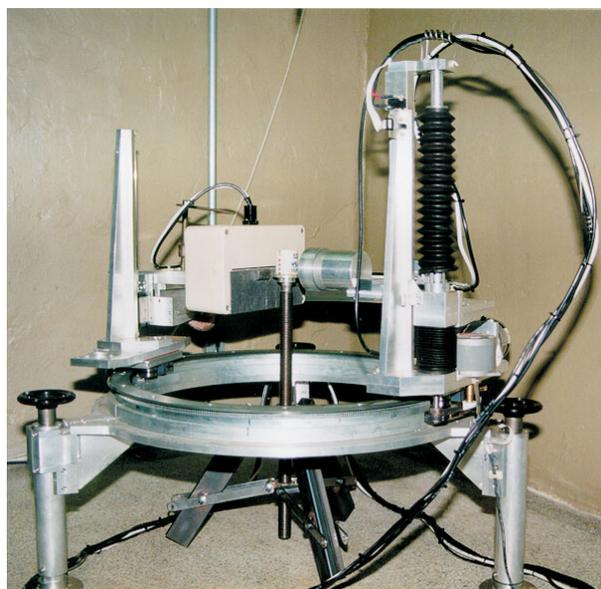


Figura 4 - Sistema mecânico de varredura do tomógrafo.

média dos valores de cada célula que compõe a área da imagem da amostra. Os valores dos  $\mu$ s da água, PVC e teflon foram obtidos de tabelas (Hubbel, 1969), enquanto que para o solo e o alumínio, os  $\mu$ s foram medidos por transmissão direta num sistema de espectrometria gama (Vaz et al., 1999 e Naime et al., 2001b), com fonte  $^{241}\text{Am}$  e detector cristal de  $\text{NaI(Tl)}$ .

Tabela 2 - Dados da reta de calibração do tomógrafo e o coeficiente de variação em torno do valor médio de UT.

Amostra	$\mu(\text{cm}^{-1})$ 60keV	UT	C.V. %
Água	0,205	4,870	1,61
Alumínio	0,755	19,558	3,09
PVC	0,465	12,468	0,76
Teflon	0,406	9,981	3,25
Solo	0,380	9,151	1,80

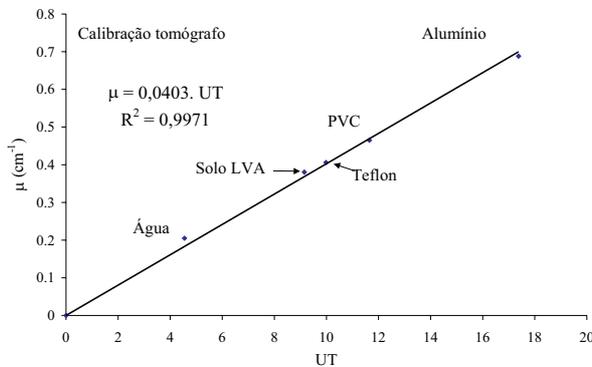


Figura 7 - Reta de calibração do tomógrafo, equação da reta e coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

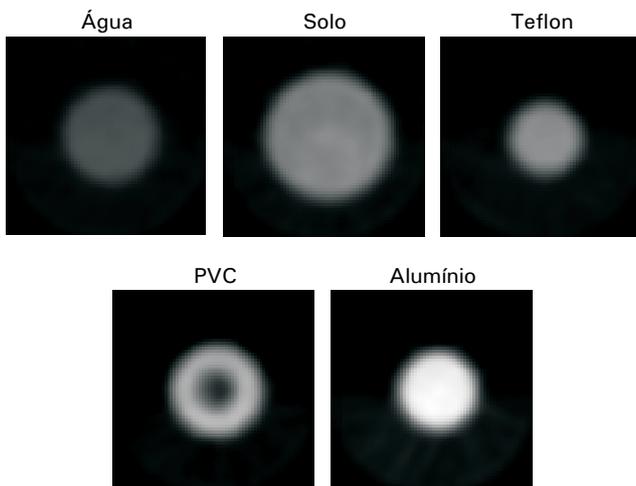


Figura 8 - Imagens tomográficas de amostras homogêneas de água, solo, teflon, tubo de PVC e alumínio, utilizadas para calibração do tomógrafo.

#### Repetibilidade das medidas

A Tabela 3 apresenta os valores médios dos  $\mu$ 's, calculados em uma área circular de 3,5cm de diâmetro, e o coeficiente de variação dos valores contidos nesta área. O coeficiente de variação dos valores médios das 30 varreduras é de 0,86%, o que mostra uma boa repetibilidade dos valores de  $\mu$  nas tomografias.

Tabela 3 -  $\mu$  médio de 30 tomografias repetidas em uma única seção transversal de um solo LVA.

Tomografia	$\mu(\text{cm}^{-1})$	C.V.(%)	Tomografia	$\mu(\text{cm}^{-1})$	C.V.(%)
1	0,366	3,14	16	0,371	2,23
2	0,365	2,97	17	0,372	2,41
3	0,362	2,86	18	0,371	2,13
4	0,361	2,95	19	0,369	2,24
5	0,363	2,92	20	0,367	2,81
6	0,361	3,25	21	0,362	2,17
7	0,363	2,92	22	0,365	2,72
8	0,365	3,15	23	0,362	2,80
9	0,365	2,73	24	0,365	2,79
10	0,367	3,43	25	0,367	2,40
11	0,370	3,19	26	0,366	2,39
12	0,363	2,75	27	0,363	2,51
13	0,369	3,06	28	0,369	3,05
14	0,369	3,21	29	0,369	2,70
15	0,367	2,45	30	0,368	2,60

#### Verificação da resposta do tomógrafo em função da variação da umidade do solo

A Tabela 4 apresenta a variação de  $\mu$  em função da umidade para 21 amostras com teores de umidade diferentes, determinados pelo método gravimétrico.

Tabela 4 - Umidade das amostras, médio de 6 tomografias em cada amostra, em posições diferentes, e coeficiente de variação das 6 medidas.

$\theta$ (%)	$\mu(\text{cm}^{-1})$	C.V. (%)	$\theta$ (%)	$\mu(\text{cm}^{-1})$	C.V. (%)
0,0	0,363	0,57	21,2	0,407	1,90
3,3	0,367	1,21	23,9	0,413	1,67
5,5	0,379	2,01	25,9	0,413	0,92
7,2	0,375	1,41	27,0	0,417	1,12
8,4	0,380	2,51	29,5	0,422	1,18
9,9	0,386	2,14	31,3	0,424	1,42
10,4	0,389	2,78	32,6	0,425	0,99
12,9	0,400	1,08	34,2	0,432	0,72
14,1	0,397	2,57	35,7	0,437	1,18
15,6	0,406	1,80	38,4	0,443	2,07
17,8	0,404	1,23			

Estes dados são apresentados no gráfico da Figura 9, do qual obtém-se a curva de calibração, dada por:

$$\mu = 0,194\theta + 0,366 \quad (1)$$

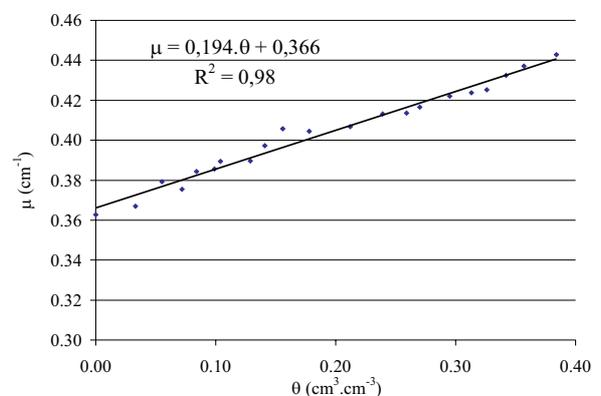


Figura 9 - Gráfico da variação do  $\mu$  em função da umidade para um solo LVA.

A equação esperada para  $\mu$  em função de  $\theta$  é:

$$\mu = \mu_{H_2O} \cdot \theta + \mu_{solo\_seco} = 0,205\theta + 0,363 \quad (2)$$

onde 0,205 e 0,3628 são, respectivamente, os  $\mu$ 's da água e do solo seco para a energia de 60keV.

Comparando a eq.(1) com a eq.(2), o erro na determinação do valor de  $\theta$  em função da umidade do solo é apresentado no gráfico da Figura 10.

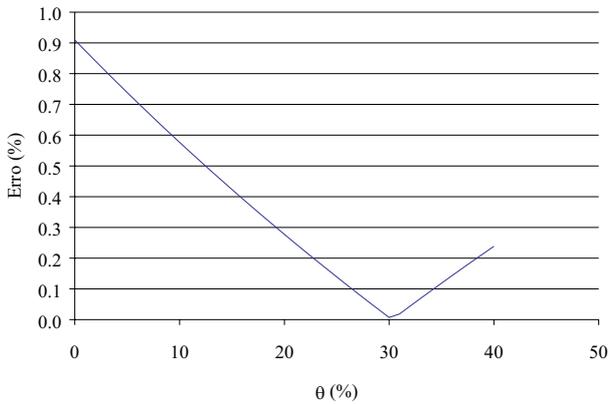


Figura 10 - Erro percentual na determinação de  $\theta$  em função da umidade.

A boa correlação ( $R^2=0,98$ ) da curva de calibração e o erro RMS igual a  $0,019\text{m}^3.\text{m}^{-3}$  demonstram que o método é plenamente viável para medidas de umidade. A Tabela 5 apresenta uma comparação da técnica tomográfica com outras modernas técnicas, como TDR e GPR (*ground-penetrating radar*), com dados obtidos por outros autores na calibração destes instrumentos, quando empregados para a medida de umidade.

Tabela 5 - Comparação da tomografia com TDR e GPR aplicados à medida de umidade.

Técnica de medida	RMSE ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ )	$R^2$
Tomografia	0,019	0,98
GPR (Huisman et al., 2001)	0,024	-
TDR (Huisman et al., 2001)	0,024	-
TDR (Starr et al., 2000)	0,039	0,90

Para demonstrar a capacidade de análise qualitativa, mostra-se a seguir o contraste provocado pelo umedecimento do solo. Uma amostra de solo foi acondicionada em um recipiente de acrílico com seção transversal quadrada, sendo que, no sentido da diagonal, uma placa com a mesma altura do recipiente o divide em duas partes. Um lado foi umedecido e outro foi mantido seco. A tomografia desta amostra é mostrada na Fig.11.

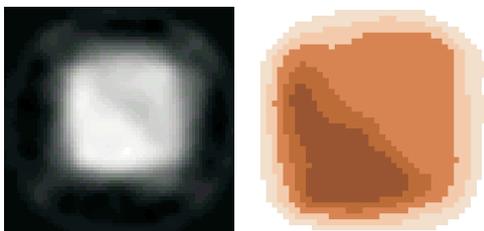


Figura 11 - Tomografia de uma coluna de solo de seção quadrada com uma placa de separação na direção diagonal. A região superior à diagonal está seca e a inferior úmida. No lado direito é apresentada a imagem segmentada.

A umidade do solo da Figura 11, calculada com a eq.(1), resultou em 36,9% enquanto através do método gravimétrico foi obtido 36,6%, o que representa um erro de 0,82%.

Os resultados dos testes realizados na calibração, repetibilidade, medida de umidade assim como a Figura 11 demonstram que o tomógrafo desenvolvido permite medir a massa específica global, o conteúdo da água no solo e visualizar a região umedecida das seções transversais por meio da subtração das imagens do solo seco das imagens do solo úmido.

**Infiltração: tomografias em posição fixa**

A Figura 12 apresenta os perfis de massa específica, obtidos com o tomógrafo e com um sistema de transmissão direta de raios gama, da amostra de latossolo roxo, deformada, utilizada no experimento de infiltração. No sistema de transmissão direta, as medidas de atenuação foram feitas em passos de 1mm e as tomografias foram feitas em passos de 5,5mm.

Com o tomógrafo posicionado a 93,5mm abaixo da superfície do solo, as 21 tomografias iniciaram-se juntamente com a infiltração. A Figura 13 mostra a variação da umidade ao longo do tempo. A Figura 14, ilustra com algumas imagens que representam a diferença entre o solo úmido e o solo seco em estufa, o processo de umedecimento da área da seção escolhida.

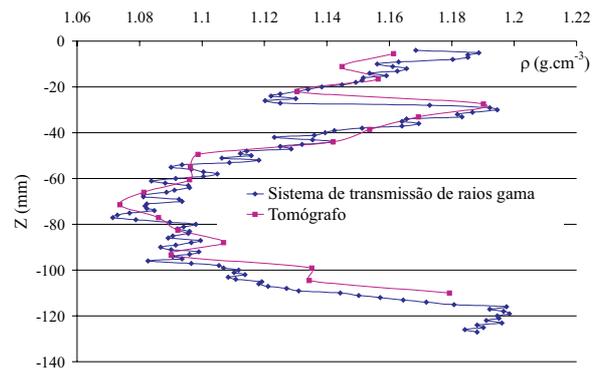


Figura 12 - Perfis de massa específica da amostra obtidos com o tomógrafo e com o analisador granulométrico.

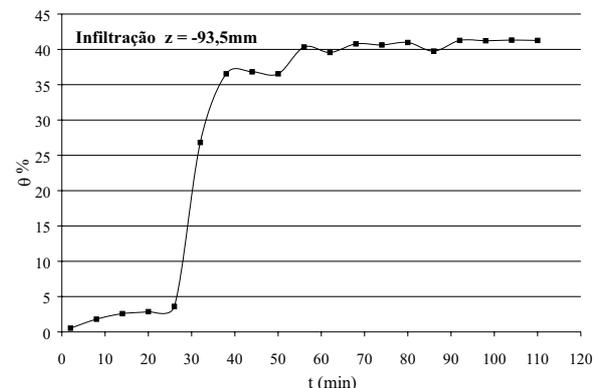


Figura 13 - Variação da umidade a 93,5mm abaixo da superfície durante a infiltração da água.

Os resultados apresentados na Figura 13 e na Figura 14 demonstram a viabilidade do tomógrafo desenvolvido para acompanhar a infiltração da água no solo de forma quantitativa e qualitativa. As imagens permitem distinguir diferentes níveis de umidades, as regiões mais claras representam teores de umidade mais

elevados. Os dados obtidos nos experimentos de infiltração podem ser utilizados para a solução numérica da equação de Richards e a partir do modelo de Rossi-Nimmo determinar a curva de retenção da água no solo em cerca de 4 horas de experimento.

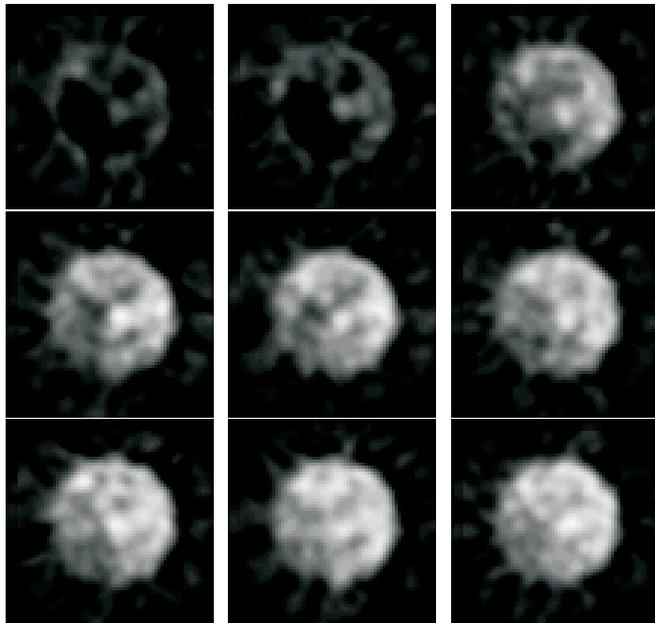


Figura 14 - Evolução do umedecimento da seção do solo situada a 93,5mm abaixo da superfície.

## Referências Bibliográficas

- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R.S. (1985b). Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning. *Soil Science*, Baltimore, v.140, n.5, p.326-32.
- HUBBEL, J.H. (1969). *Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10keV to 100GeV*. National Bureau of Standards - U.S. Department of Commerce. NSRDS-NBS 29, Washington, 85p.
- HUISMAN, J.A.; SPERL, C.; BOUTEN, W.; VERSTRATEN, J.M. (2001). Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology*, v.245, p.48-58.
- KAK, A.C.; SLANEY, M. (1987). *Principles of computerized tomographic imaging*. New York, IEEE Press. 329p.
- NAIME, J.M. (2001a). *Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não-saturada do solo*. São Carlos, 2001. 145p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- NAIME, J. M.; VAZ, C.M.P.; MACEDO, A. (2001b). Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation. *Computers and Electronics in Agriculture*, Amsterdam, v.31, n.3, p.295-304.
- ROSSI, C.; NIMMO, J.R. (1994). Modeling soil water retention from saturation to oven dryness. *Water Resources Research*, v.30, p.701-8.
- SHCHERBAKOV, R.A.; PACHEPSKY, Y.A.; KUZNETSOV, M.Y. (1986). Comparison of methods of calculating one-dimensional moisture transport in soils. *Water Resources Research*, v.13, p.11-20.
- STARR, G.C.; LOWERY, B.; COOLEY, E.T. (2000). Soil water content determination using a network analyzer and coaxial probe. *Soil Science Society of America Journal*, v.64(3), p.867-72.
- VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; MACEDO, A. (1999). Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. *Soil Science*, Baltimore, v.164, n.6, p.403-10, Jun.

### Comunicado Técnico, 42

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:  
**Embrapa Instrumentação Agropecuária**  
 Rua XV de Novembro, 1542 - Caixa Postal 741  
 CEP 13560-970 - São Carlos-SP  
**Fone:** 16 274 2477  
**Fax:** 16 272 5958  
**E-mail:** sac@cnpdia.embrapa.br  
 www.cnpdia.embrapa.br



1a. edição  
 1a. impressão 2001: tiragem 300

### Comitê de Publicações

**Presidente:** Dr. Luiz Alberto Colnago  
**Secretária Executiva:** Janis Aparecida Baldovinotti  
**Membros:** Dr. Clovis Isberto Biscegli,  
 Dr. Ladislau Martin Neto,  
 Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz,  
 Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso,  
 Dr. José Dalton Cruz Pessoa,  
 Dr. Paulo Sérgio de Paula Herrmann Jr.  
**Membro Suplente:** Elomir Antonio Perussi de Jesus

### Expediente

**Supervisor editorial:** Dr. Luiz Alberto Colnago  
**Revisão de texto:** Véra Lucia de Campos Octaviano  
**Tratamento das ilustrações:** Valentim Monzane  
**Editoração eletrônica:** Valentim Monzane