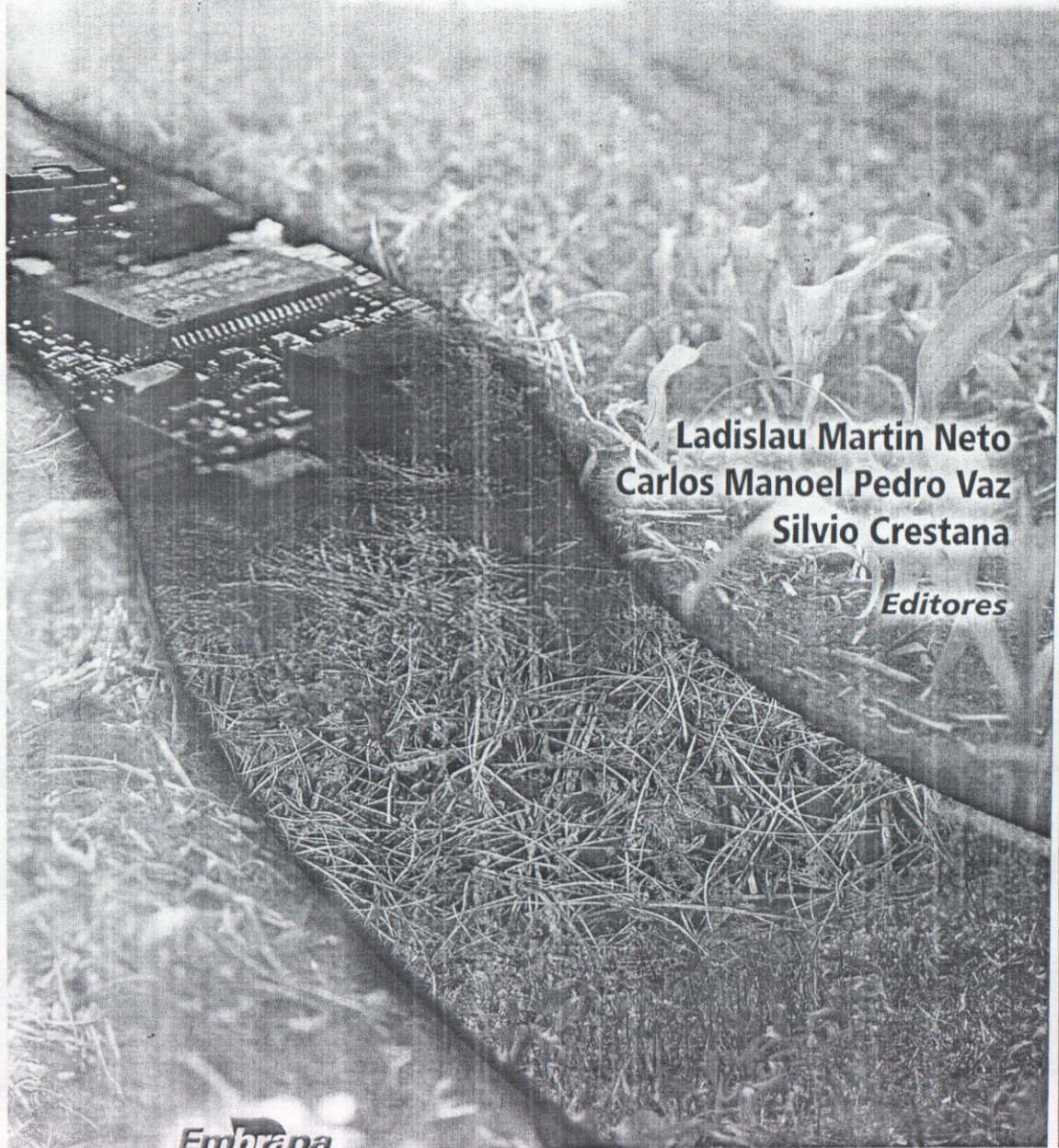


Instrumentação avançada em ciência do solo



Ladislau Martin Neto
Carlos Manoel Pedro Vaz
Silvio Crestana
Editores

Exemplares dessa publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação Agropecuária

Rua XV de novembro, 1452

Caixa Postal 741

CEP 13560-970 – São Carlos-SP

Fone: (16) 2107-2800

Fax: (16) 2107-2902

<http://www.cnpdia.embrapa.br>

e-mail: sac@cnpdia.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz

Membros: Dra. Débora Marcondes Bastos Pereira Milori,

Dr. João de Mendonça Naime,

Dr. Washington Luiz de Barros Melo,

Valéria de Fátima Cardoso

Membro Suplente: Dr. Paulo Sérgio de Paula Herrmann Júnior

Supervisor editorial: Dr. Victor Bertucci Neto

Normalização Bibliográfica: Valéria de Fátima Cardoso

Capa: Alex Paixão e Valentim Monzane

Foto da capa: Lúcio André do Castro Jorge e Valentim Monzane

Editoração eletrônica: Carlos Manoel Pedro Vaz e Emerson de Stefani

1ª edição

1ª impressão (2007): tiragem: 350

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

**CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.
Embrapa Instrumentação Agropecuária**

-
- I59 Instrumentação avançada em ciência do solo. / Ladislau Martin Neto, Carlos Manoel Pedro Vaz, Sílvio Crestana editores. – São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2007. 438 p.

ISBN: 85-86463-14-0

1. Solos. 2. Métodos Avançados. 3. Equipamentos. 4. Instrumentos. 5. Modelamento
6. Imagem. I. Martin Neto, Ladislau. II. Vaz, Carlos Manoel Pedro. III. Crestana, Sílvio.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Instrumentação Agropecuária
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

5
)
7
)

1
3
)

)
3

Instrumentação avançada em ciência do solo

5
4
5

Editores

5

Ladislau Martin Neto
Carlos Manoel Pedro Vaz
Sílvio Crestana

5
7
0

1
1

3
6

7

Embrapa Instrumentação Agropecuária
São Carlos, SP

8
9

2007

7

Arya and Paris water retention model for Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 577-583, 2005a.

VAZ, C. M. P.; MATSURA, E. E.; VIDAL-TORRADO, P.; BACCH, O. O. S. Método para a estimativa da condutividade elétrica dos solos pela técnica de TDR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 3.; 2005, Recife. **Anais...** Recife: SBCE/UFPE/Embrapa Solos, 2005b. 1 CD-ROM.

VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; MACEDO, A. Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, n. 6, p. 403-410, 1999.

VAZ, C. M. P.; OLIVEIRA, J. C. M.; REICHARDT, K.; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E.; BACCHI, O. O. S. Soil mechanical analysis through gamma ray attenuation. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 5, p. 319-325, 1992.

VAZ, C. M. P.; PATRIZZI, V. C.; MATSURA, E. E.; VIDAL-TORRADO, P.; BACCHI, O. O. S. Desempenho de 3 equipamentos da TDR para a medida da umidade e condutividade elétrica dos solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29.; 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 1 CD-ROM.

WEAST, R. C. **Handbook of physics and chemistry**. 63th ed. Stanford: CRC Press, 1982.

WILLIFORD, J. R.; WOOTEN, O. B.; FULGHAM, F. E. Tractor mounted field penetrometer. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI. v. 15, n. 2, p. 226-227, 1972.

WRAITH, J. M.; OR, D. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, Madison, v. 27, p. 13-19, 1998.

YOUNG, G. D.; ADAMS, B. A.; TOPP, G. C. A portable cone index and water content meter. In: ANNUAL Meeting Abstracts. Baltimore, Maryland: ASA-CSSA-SSSA, pp. 180, 1998.

Capítulo 4

Tomografia computadorizada de raios X e gama para investigação não-invasiva do solo

Álvaro Macedo da Silva

João de Mendonça Naime

Carlos Manoel Pedro Vaz

Silvio Crestana

Paulo Estevão Cruvinel

Breve histórico

Quando Wilhelm Conrad Röntgen, em 1895, descobriu o raio X, numa primeira instância não sabia da natureza do fenômeno e, no momento seguinte ao da descoberta, não tinha idéia da importância que ela teria para o futuro da ciência, em inúmeras áreas do saber. Mais de sessenta anos depois, em 1956, o sul-africano Allan McLeod Cormack, convidado a ser o físico responsável pelo Hospital Groote Schur, da Cidade do Cabo, entendeu que seria importante desenvolver um método que permitisse medir os coeficientes de atenuação dos meios heterogêneos, entre os quais o corpo humano. Os conhecimentos e a aplicação relativos à radiologia e radioterapia já estavam desenvolvidos havia muito tempo e Cormack concluiu que essas medidas seriam importantes, não somente no primeiro caso, para obter informações detalhadas do corpo, mas também no segundo, quando é necessário aplicar certa dosagem de radiação em determinadas partes de órgãos, sem atingir as demais.

Cormack supunha que o tratamento matemático desse problema já devia ter sido desenvolvido por alguém e, de fato, J. H. Radon (RADON, 1917) já havia proposto uma solução para o problema de se obter a função que descreve uma imagem no espaço n-dimensional a partir de suas integrais de linha. Por não encontrar esse material, Cormack julgou que ele não existisse e formulou a solução para, a partir das integrais de linha de um corpo heterogêneo atravessado por um feixe monoenergético, obter-se a

distribuição da função $f(x,y)$ que caracteriza os coeficientes de atenuação ao longo desse corpo. Esse desenvolvimento não será repetido aqui, mas pode ser encontrado na literatura correlata (CORMACK, 1963; CORMACK, 1964; BROOKS e DI CHIRO, 1976; HOUNSFIELD, 1973; HENDEE, 1983; HENDEE, 1984; AHLUWALIA, 1989; ROSENFELD e KAK, 1982).

Depois de deixar essa pesquisa estacionada por alguns anos, Cormack, agora trabalhando na *Tufts University*, Medford/MA, EUA, ao ver a repercussão que a reconstrução de imagens começava a ter no meio científico, publicou seus trabalhos em dois artigos científicos (CORMACK, 1963; CORMACK, 1964).

Outro grande interessado na reconstrução de imagens a partir de suas projeções, e não menos importante na história da tomografia computadorizada, foi Godfrey Newbold Hounsfield, um engenheiro eletricitista britânico, chefe da divisão de pesquisa médica da *Electric and Musical Industries* - EMI, Middlesex, Inglaterra. Hounsfield, desde sua adolescência, sempre envolvido e intrigado com o funcionamento dos equipamentos elétricos e mecânicos existentes na fazenda de seu pai. A falta de outros interesses, comuns aos jovens da área urbana, mas totalmente ausentes para os habitantes do campo, fez que mergulhasse a fundo no estudo desses equipamentos e desenvolvesse uma criatividade muito grande. Anos depois, após passar pela *Royal Air Force* - RAF, onde se interessou por rádio e foi Instrutor Mecânico de Radar, transferiu-se para o *Royal College of Science*, ocupado pela RAF, mais tarde para a *Cranwell Radar School*. Finalmente diplomou-se em engenharia elétrica na *Faraday House Electrical College*, em Londres. Nos primeiros momentos na EMI, em 1951, Hounsfield trabalhou com radares e armas de guerra, para em seguida interessar-se por computadores, que ainda estavam nos primórdios de seu desenvolvimento. Hounsfield trabalhou muito no aprimoramento dos computadores, que ainda eram construídos com válvulas. Ele foi o primeiro a utilizar transistores na sua construção. Mas os transistores, por essa época, eram mais lentos que as válvulas. Hounsfield conseguiu aprimorar a polarização dos transistores até que eles atingissem as mesmas velocidades das válvulas. Em 1958, ele liderou a equipe que construiria o primeiro computador transistorizado da Inglaterra, o EMIDEC 1100. Ao final do projeto, foi transferido para o *EMI Central Research Laboratories*, onde seus primeiros projetos, apesar de muito bem sucedidos, mostraram-se comercialmente pouco interessantes. Começou, então, a trabalhar com reconhecimento automático de padrões.

Ao explorar os vários aspectos desse reconhecimento, acabou, em 1967, caminhando para o que se tornaria o primeiro tomógrafo computadorizado da EMI e do mundo. Em 1968, ele descreveu seu equipamento em seu pedido de patente, que lhe foi concedida em 1972.

Por desconhecer o trabalho de Cormack, Hounsfield desenvolveu a técnica sozinho e os dois, no ano de 1979, foram laureados com o prêmio Nobel de Medicina pelo desenvolvimento da Tomografia Assistida por Computador (TAC ou CAT em inglês, para *Computer Assisted Tomography*), também chamada de Tomografia Computadorizada - TC. Os trabalhos dos dois, portanto, foram independentes. Cormack teve seu desenvolvimento teórico reconhecido, mas Hounsfield foi citado pela *Nobel Assembly of Karolinska Institute* como a figura central da tomografia computadorizada. Na seqüência das pesquisas, ele trabalhou ativamente no desenvolvimento que levou as gerações seguintes de tomógrafos até a quarta geração. Essas gerações serão descritas mais adiante.

Além da tomografia computadorizada de raios X e gama, outros tipos de tomografias foram desenvolvidas, estando entre elas a tomografia de Ressonância Magnética Nuclear ou RMN, a tomografia sísmica e a tomografia de nêutrons. A aplicação do tomógrafo tem sido, indubitavelmente, mais intensa na medicina, para qual trouxe avanços de grande monta, mas a necessidade de investigar o interior de amostras, de modo não invasivo, sempre esteve presente em todas as áreas do conhecimento. Uma dessas áreas é a Ciência do Solo.

Na Ciência do Solo, a tomografia que se mostrou mais eficiente até o momento é a de raios X e gama. Suas primeiras aplicações ocorreram na década de 80, com os trabalhos de Petrovic et al. (1982), Hainsworth e Aylmore (1983) e Crestana et al. (1985). Petrovic et al. (1982) demonstraram que a TC poderia ser aplicada para medir a densidade global do solo. Hainsworth e Aylmore (1983) determinaram a distribuição espacial da água no solo e Crestana et al. (1985), além de demonstrarem que é possível utilizar a TC para medir umidade do solo e seu movimento neste meio, também calibraram o tomógrafo em termos de Unidades Hounsfield - UH versus umidade e densidade. Os números Hounsfield são normalmente utilizados na tomografia médica e são dados por:

$$UH = 1000(\mu - \mu_a) \mu_a \dots\dots\dots [1]$$

onde μ (cm^{-1}) é o coeficiente de atenuação linear da amostra, e μ_a (cm^{-1})

é o coeficiente linear da água. Essa escala foi definida por Hounsfield, estabelecendo $HU = 0$, para a água, e $UH = -1000$, para o ar.

Outros trabalhos se seguiram aos pioneiros do uso da TC no solo, desde a construção de um minitomógrafo dedicado a estudos no solo (CRUVINEL, 1987), tomógrafo de campo (NAIME, 1994), tomógrafo de resolução micrométrica (MACEDO et al., 1997) e tomógrafo de campo de terceira geração (NAIME, 2001) a trabalhos de aplicação da técnica (CRESTANA et al., 1986; CRESTANA et al., 1988; VAZ et al., 1989; WARNER et al., 1989; CRESTANA et al., 1990; AYLMOORE, 1993; CRESTANA et al., 1996; FLANNERY et al., 1987; CESAREO et al., 1993; GRANT et al., 1993; APPOLONI e CESAREO, 1994; ASSIS et al., 1994; CESAREO et al., 1994; entre outros), alguns dos quais serão tratados nesse capítulo. Dado o alto custo dos tomógrafos comerciais, alguns grupos de pesquisa envidaram esforços para construir equipamentos dedicados para aplicação em ciências agrônômicas. Atualmente, vários grupos utilizam equipamentos construídos para esse fim: na Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos/SP; na Coordenadoria de Pós-Graduação e Projetos Especiais-COPPE, Rio de Janeiro/RJ; no Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba/SP; na Universidade Western Australia, Austrália; na Universidade de Roma, Itália; na Universidade de Oklahoma, EUA; e na Universidade Federal de Pelotas, Pelotas/RS.

Tomógrafos desenvolvidos na Embrapa Instrumentação Agropecuária

Desde que a tomografia computadorizada provou ser uma metodologia interessante para a ciência do solo, evidenciou-se a ausência de tomógrafos comercialmente disponíveis para esta aplicação, uma vez que o foco do mercado era quase exclusivo da medicina. Os tomógrafos médicos são sofisticados, custam acima de 500 mil dólares e não têm versatilidade suficiente para utilização em pesquisa do solo. Por isso, tornou-se necessário o desenvolvimento de equipamentos dedicados e economicamente acessíveis para dar continuidade à linha de pesquisa pioneira iniciada por Crestana em 1985.

Em 1987, com apenas dois anos de existência, a então Unidade de Apoio à Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária (UAPDIA) concluiu o desenvolvimento e a construção do primeiro equipamento brasileiro dedicado à ciência do solo, o minitomógrafo de

raios X e raios gama para pesquisas na área agrícola (CRUVINEL, 1987). O minitomógrafo viabilizou diversos trabalhos relevantes de pesquisa básica e aplicada à Física do Solo. Como consequência, esses resultados motivaram o desenvolvimento de outros equipamentos com diferentes características como portabilidade, escala de observação e tempo de varredura. A seguir, estão descritos os tomógrafos desenvolvidos pela Embrapa Instrumentação Agropecuária.

Minitomógrafo de raios X e gama

Tomógrafo de primeira geração e de resolução milimétrica que foi construído para operar em laboratório, tanto com fonte de raios X como com radioisótopos que emitem raios gama como, por exemplo, o Césio-137 e o Amerício-241 (Figura 1). Sua versatilidade permite realizar tomografia de dupla energia (CÁSSARO e CRESTANA, 1995) ou tomografia Compton (BALOGUN e CRUVINEL, 2003). O sistema mecânico translada e rotaciona a amostra de solo, exposta a um feixe fino de radiação, com resoluções de 0,05 mm e 0,01 graus, respectivamente. Dois colimadores de chumbo, um defronte à fonte e o outro defronte ao detector, limitam o diâmetro do feixe radioativo. Dessa forma, o colimador do detector determina a melhor resolução espacial do tomograma.

Um detector de radiação de cristal cintilador de iodeto de sódio dopado com tálio - NaI(Tl), recebe a radiação ionizante que não foi absorvida pela amostra e a converte em luz visível. Uma fotomultiplicadora, polarizada com alta tensão, acoplada ao cristal converte a luz em fotoelétrons multiplicados por um alto fator. Os pulsos elétricos emitidos pela fotomultiplicadora têm amplitude proporcional à energia da radiação ionizante, e a quantidade de pulsos é proporcional à quantidade de fótons que atravessaram a amostra. Um pré-amplificador, montado na mesma base da fotomultiplicadora, compatibiliza a impedância e a amplitude dos pulsos para serem enviados ao amplificador. O ajuste de ganho do amplificador permite ao usuário posicionar convenientemente o espectro de energia na faixa de 0 a 10 V. O sinal de saída do amplificador é conectado à entrada do discriminador monocal para selecionar o intervalo de energia de interesse, definido através do ajuste do nível inferior de tensão e da amplitude da janela ou do nível de tensão superior. A saída do monocal é uma onda quadrada de nível TTL, onde cada nível alto corresponde a um fóton que atravessou a amostra e dura aproximadamente 1 μ s (CRUVINEL, 1987).

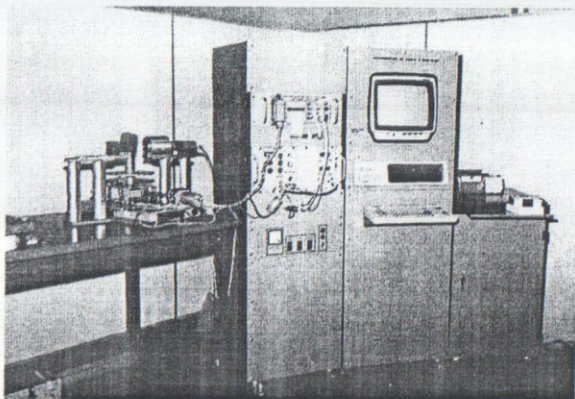


Figura 1. Foto do minitomógrafo desenvolvido na Embrapa Instrumentação Agropecuária (CRUVINEL, 1987).

Dois racks verticais com rodas acondicionam o computador (PC), a cadeia nuclear, o comando dos motores de passo e o painel de comando das tensões de alimentação dos módulos, conforme mostrado na Figura 1. Os componentes da cadeia nuclear: detector, fonte de alta tensão, pré-amplificador, amplificador e discriminador monocanal são módulos comerciais montados no rack padrão NIM-Bin, que por sua vez está instalado no rack vertical do minitomógrafo. Dois contadores e um temporizador, programáveis, baseados no circuito integrado (CI) 8254, foram projetados e construídos numa placa padrão PCI conectado a um dos slots da placa mãe do computador pessoal.

O CI 8254 também é utilizado para o controle dos motores de passo que movimentam a amostra. Ele recebe o número de passos via barramento de endereços do PC e gera o trem de pulsos para os circuitos de potência. Ambos os motores têm resolução de $1,8^\circ$ e seus enrolamentos são energizados no modo unipolar. No rack do minitomógrafo está instalada a unidade que abriga os circuitos das fontes de baixa tensão contínua, dos circuitos de lógica digital e dos transistores de potência que energizam os enrolamentos dos motores de passo.

No computador estão instalados dois programas desenvolvidos para o minitomógrafo, o TOMO e o MTACREC. Ambos devem ser executados no sistema operacional DOS. O programa TOMO controla automaticamente o processo de varredura tomográfica, a partir dos parâmetros definidos pelo usuário: passo linear, translação, passo angular e tempo de contagem. O resultado da varredura é um arquivo, formato

texto, que contém uma matriz das contagens de fótons, onde cada linha representa uma projeção em determinada posição angular. O programa MTACREC lê o arquivo de dados e faz a reconstrução matemática da imagem, baseado no método da retroprojeção filtrada para feixes paralelos (KAK e SLANEY, 1987). Conceitualmente, a transformada discreta inversa de Fourier é utilizada para calcular o valor do coeficiente de atenuação linear em cada ponto da área da seção transversal da amostra. Em seguida, o programa gera um arquivo com estes valores organizados em forma de matriz e também gera um arquivo formato imagem, por meio da atribuição linear a cada pixel um tom de cinza proporcional. Nesta escala, o máximo coeficiente de atenuação linear corresponde ao branco e o mínimo ao preto. A análise conjunta desses dois arquivos permite avaliações quantitativas e qualitativas da amostra porque as posições dos valores de coeficiente de atenuação na matriz guardam correspondência direta com as posições dos elementos da imagem. Maiores detalhes do equipamento podem ser encontrados em Cruvinel (1987).

Tomógrafo de campo de primeira geração

Tomógrafo de resolução milimétrica projetado para operar no campo agrícola (NAIME, 1994) com a finalidade de obter imagens tomográficas de monolito de solo (Figura 2a) e de árvore (Figura 2b). Conceitualmente é uma versão de campo do minitomógrafo e difere no sistema mecânico que translada e rotaciona a fonte e o detector em torno da amostra, na tecnologia do detector e na eletrônica embarcada. Além disso, seu mecanismo bipartido e desmontável permite instalação em torno de uma árvore com dimensão transversal máxima de 25 cm. Esse tomógrafo é composto por computador portátil, sistema eletrônico microprocessado, sistema mecânico de varredura e bateria automotiva. Como o tempo de varredura é de várias horas, ela ocorre independente do computador, isto é, durante esse período o computador pode estar desconectado e desligado. O computador só precisa estar ligado em dois momentos: antes do início da varredura, para enviar os parâmetros para o sistema eletrônico, e após o seu término, para receber o arquivo de dados. Com esse arquivo, a reconstrução da imagem pode ser feita no campo.

A fonte radioativa é o Césio-137, energia 662 keV e atividade 111 MBq, blindada em um castelo de chumbo com espessura mínima de 5,5 cm. Essa fonte e as dimensões do mecanismo permitem realizar tomografias de amostras de solo com dimensão transversal máxima de 25 cm.

Considerando-se a segurança do operador, a 10 cm de distância da fonte a dose é menor que $2,5 \mu\text{Sv h}^{-1}$, o limite recomendado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) para trabalhar 40 horas semanais próximo ao equipamento é de $10,4 \mu\text{Sv/h}^1$, caso fosse necessário. O usuário precisa apenas permanecer próximo no máximo durante o total de 1 hora para montar, operar e desmontar o tomógrafo.

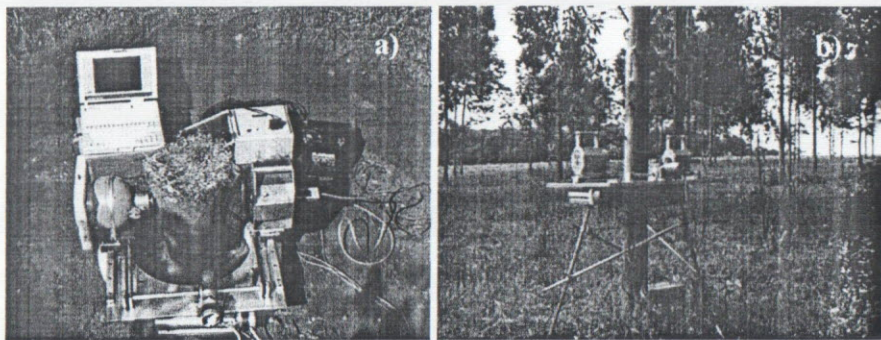


Figura 2. Fotos do tomógrafo de campo de primeira geração analisando uma amostra de solo (a) e o tronco de uma árvore (b).

O detector de radiação é semicondutor, CdTe (Zn) - telureto de cádmio dopado com zinco, e detecta raios γ e raios X com energia entre 50 keV e 1,33 MeV. É adequado para operar no campo porque sofre pouca influência da temperatura, necessita baixa tensão de polarização (60V) e tem baixo consumo de corrente (292 nA). O pré-amplificador tem um ganho de $-1,5 \text{ mV/keV}$ e sua blindagem conecta-se diretamente ao corpo do detector. Os demais componentes da cadeia nuclear foram desenvolvidos e integrados ao sistema eletrônico do tomógrafo.

O estágio amplificador é um filtro ativo passa altas com frequência de corte de 500 Hz e ganho de tensão 10. O sinal de saída do amplificador está conectado à entrada de um estágio comparador de tensão que satura sua saída em 12 V para fótons de energia maior que 50 keV ou tem saída 0 V para energia menor que esse limite. A saída do comparador é ajustada em nível TTL, com largura de pulso fixa em 2 μs , para ser conectada à entrada do contador interno do microcontrolador 80C31.

O duto de dados (D0 a D7) do microcontrolador controla, através de uma

interface paralela 8255, os dois motores de passo e recebe sinais de entrada de dois sensores ópticos, correspondentes às posições de referência da translação e da rotação. Um mostrador de cristal líquido apresenta mensagens, posição do equipamento e a contagem de fótons durante a varredura.

No microcontrolador é executado um programa que tem as seguintes funções: controlar os motores de passo, temporizar contagem de fótons, armazenar as contagens na memória de forma indexada e comunicar com computador via interface serial RS232 com a finalidade de receber parâmetros e transmitir a matriz de dados. No computador é executado o programa de interface com o usuário para ajuste dos parâmetros da varredura, para verificações do status do mecanismo e para gravação da matriz de dados recebida do sistema eletrônico após o término da varredura.

Todas as tensões do equipamento: 60 V, 5 V e $\pm 12 \text{ V}$ são geradas a partir dos 12 V da bateria automotiva. Com bateria de 36 A h o tomógrafo de campo tem autonomia de 48 horas de operação contínua. Mais detalhe do equipamento pode ser obtido em Naime (1994).

Tomógrafo de campo de terceira geração

A expressiva redução do tempo de varredura tomográfica de horas para poucos segundos é a principal vantagem do tomógrafo de terceira geração em relação às gerações anteriores. O equipamento de campo descrito nesta seção opera com esquema de varredura de terceira geração, mas seu tempo de varredura típico é de 4 minutos, devido ao baixo desempenho do sistema de detecção utilizado. Na época deste desenvolvimento, optou-se, para viabilizar o projeto, por sistema detector 60 vezes mais barato do que os utilizados nos tomógrafos comerciais. Entretanto, quatro minutos é um tempo suficientemente pequeno para acompanhar a infiltração da água em solos argilosos realizando-se uma sequência vertical de cortes tomográficos, espaçados de 5 mm, ao longo de uma coluna de solo estruturado.

Este tomógrafo (NAIME, 2001), apresentado na Figura 3, é composto por fonte de raios gama, 256 detectores linearmente dispostos, sistema eletrônico de controle dos detectores, sistema eletrônico de controle do sistema mecânico, computador portátil e bateria automotiva.

A fonte radioativa é o Amerício 241 (Am-241), energia da radiação gama 60 keV e atividade de 11,1 Gbq, blindada com 10 mm de chumbo e 5

¹ De acordo com a norma NN-3.01, a dose anual limite para o trabalhador é de 20 mSv/h, média ponderada em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

mm de alumínio. A 10 cm da fonte, a dose é de $2,5 \mu\text{Sv h}^{-1}$, portanto valem também para esta fonte as mesmas considerações de segurança da fonte de Césio do item anterior. A retirada da tampa da fonte libera o feixe em forma de leque capaz de envolver toda a amostra com dimensão transversal máxima de 4 cm.

O sistema detector é baseado em dois arranjos lineares de fotodiodos (PDA) com 128 fotodiodos cada um. Sobre o cristal transparente que protege os fotodiodos foram depositadas camadas do cintilador, oxisulfeto de gadolínio dopado com térbio ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$), que converte a radiação ionizante em luz na faixa do visível. Os dois PDAs montados, alinhados e eletricamente conectados, compõem um arranjo de 256 detectores com 102,4 mm de comprimento. Cada fotodiodo tem 0,4 mm de altura e 0,25 mm de largura, o espaçamento é de 0,15 mm.

A luz incidente sobre o fotodiodo provoca acúmulo de carga elétrica no respectivo circuito de armazenamento de carga. Desse modo, cada fotodiodo gera uma tensão proporcional ao produto entre o nível de luz incidente e o tempo de integração. A cada sinal de comando de leitura recebido, o PDA gera pulsos analógicos em série correspondentes às tensões dos fotodiodos, sincronizados com pulsos digitais de gatilho. Em seguida, os circuitos de carga dos fotodiodos são descarregados e um novo processo de carga é iniciado. Portanto, o tempo de integração é determinado pelo intervalo entre dois comandos de leitura (Start Pulse).

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

O sistema eletrônico (Figura 3b) constitui-se de uma unidade de processamento central padrão PC/104, de fontes de alimentação, de circuitos de comando das interfaces dos detectores, de conversor analógico/digital (A/D) e de circuito de comando dos motores de passo. O conversor A/D opera sincronizado com o trem de pulsos de gatilho respectivos às tensões dos fotodiodos. O PC/104 é comandado através da interface serial para executar comandos relativos ao movimento circular e vertical do mecanismo de varredura ou ao controle e leitura dos detectores. 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.

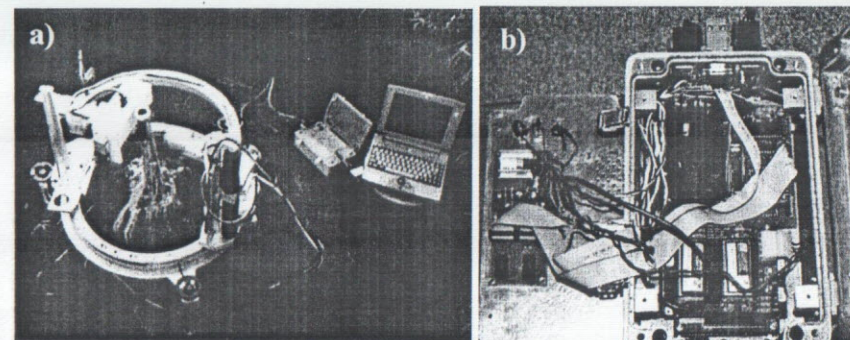


Figura 3. Foto do tomógrafo de campo de terceira geração (a) e detalhe do sistema eletrônico (b).

O sistema mecânico de posicionamento da fonte e do detector é circular e bipartido para permitir instalação em torno de árvore. Além do movimento circular em torno da amostra, o mecanismo permite o deslocamento vertical do plano fonte-detector em até 27 cm ao longo da amostra. Os carros de apoio da fonte e do detector deslizam sobre uma guia circular de 51 cm de diâmetro, acionados por motor de passo.

O computador portátil executa o programa desenvolvido para desempenhar a interface homem-máquina e a reconstrução da imagem tomográfica especialmente desenvolvida para este tomógrafo baseada no método da retroprojeção filtrada a partir de projeções em leque com detectores igualmente espaçados (KAK e SLANEY, 1987). Nos computadores atuais, o tempo de reconstrução é menor que 3 segundos. Durante a execução de uma sequência de varreduras, reconstruções de cortes já concluídas podem ser feitas simultaneamente. Maiores detalhes do equipamento podem ser obtidos em Naime (2001).

Tomógrafo com resolução micrométrica

O tomógrafo com resolução micrométrica (MACEDO, 1997) foi desenvolvido para possibilitar a análise da estrutura do solo em escala submilimétrica. Desse modo, macroporos, poros e partículas podem ser observados detalhadamente. O comportamento da água no solo sofre grande influência da estrutura de distribuição dos poros. Tal como o índice de vazios, a conectividade entre os poros é fator determinante da retenção da água no solo. Esse tomógrafo (Figura 4) possui arquitetura de terceira geração e opera com raios-X industrial, filtros de radiação, detector cintilador, placa multicanal instalada no computador, mesa

posicionadora e circuitos de comando dos motores de passo.

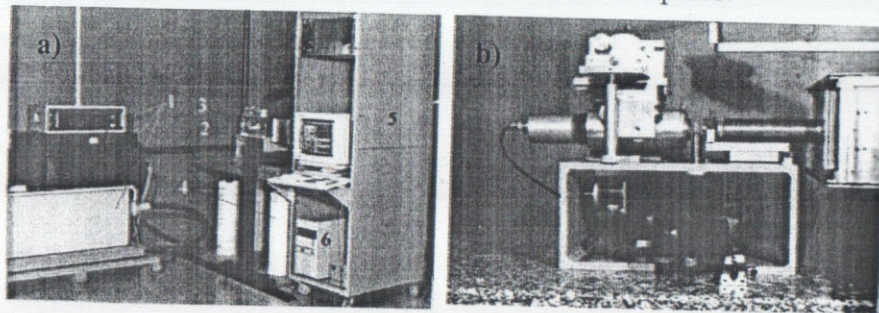


Figura 4. Imagens mostrando: (a) Foto do tomógrafo de raios-X com resolução micrométrica (a), onde aparece o gerador de raios X e painéis de controle (1), os estágios de posicionamento (2), o sistema de alinhamento do detector (3), o suporte contra vibração (4), o rack das fontes e do microcomputador (5) e o microcomputador (6); (b) detalhe da mesa posicionadora.

A fonte de raios X industrial foi produzida pela Philips GmbH, modelo MG164, tensão máxima de 160 kV, corrente máxima de saída 45 mA e potência máxima de 3 kW. O equipamento possui uma blindagem de chumbo de 6 mm que impede fuga de radiação espalhada.

A cadeia nuclear é composta de detector cristal NaI (TI) de 1,5" x 1,5", com base fotomultiplicadora e pré-amplificador; fonte de alta tensão, fonte de baixa tensão e placa multicanal padrão PCI para conexão em computador pessoal.

A mesa posicionadora (Figura 4b) é composta das seguintes partes: estágio linear com resolução de 1,25 μm e deslocamento máximo de 100 mm; estágio rotativo com resolução de 0,01° e um controlador eletrônico para cada estágio. O sistema mecânico também conta com dispositivo de ajuste da colimação e do paralelismo do feixe, em relação à mesa posicionadora, com 3 graus de liberdade e resolução da ordem de 10 μm . A colimação é um fator extremamente crítico em um tomógrafo de primeira geração com resolução da ordem de 60 μm .

O computador pessoal executa dois programas correspondentes às seguintes tarefas: controle do equipamento e reconstrução/análise da imagem. O programa de controle é responsável pelos movimentos de varredura, centralização da mesa, leitura da placa multicanal e armazenamento dos dados em disco. Através da interface gráfica, o

usuário pode ajustar os parâmetros da varredura e definir os nomes dos arquivos de saída dos dados.

O programa de reconstrução de imagens, MICROVIS, utiliza o método da retroprojeção filtrada para esquema de varredura de feixes paralelos (1ª geração). O MICROVIS representou uma evolução em relação ao MTACREC (minitomógrafo) nos seguintes aspectos: capacidade de reconstruir matrizes de dados com mais de 6.400 elementos, de modo que está limitada somente pela memória RAM do computador; reconstrução da imagem em escala de 256 tons de cinza e interface gráfica amigável com ferramentas de análise estatística diretamente sobre a imagem.

Foram construídos colimadores de chumbo, com furo de até 50 μm de diâmetro, e foram desenvolvidos filtros de resina de epoxy com estanho para se obter pico de energia da ordem de 28 keV, sob tensão de 70 kV no tubo de raios X. Como as amostras de solo típicas desse tomógrafo têm dimensão da ordem de 10 mm, é necessário utilizar baixa energia e com pico bem definido para obter bom contraste na imagem.

Tomógrafos desenvolvidos para parceiros

Dois tomógrafos de laboratório, baseados no minitomógrafo de primeira geração, foram desenvolvidos para parceiros: um para o Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) da USP-Piracicaba e outro para a Universidade Federal de Pelotas (UFPel). Ambos equipamentos estão sendo utilizados em pesquisa na área de Física do Solo. Em relação ao minitomógrafo, algumas alterações foram feitas na cadeia nuclear, na construção mecânica, no sistema eletrônico e no programa de controle, de forma a atualizar tecnologicamente e atender às especificações dos parceiros. As diferenças são descritas a seguir.

Na cadeia nuclear foi substituída a placa conectada à placa-mãe do computador por um módulo duplo contador/temporizador com interface serial RS232C, que é instalado no gabinete NIM-BIM (Figura 5a). O circuito de comando dos motores de passo foi alterado do modo unipolar para o modo bipolar, visando obter maior torque com menor consumo de corrente, além de ser acondicionado em uma caixa adaptada para o padrão NIM-BIM. O programa de controle da mesa controla o contador e o temporizador via interface serial e controla o circuito de comando dos motores de passo através da interface paralela.

O sistema de movimentação da amostra está apoiado num plano a 30 cm abaixo do tampo de granito (Figura 5b) onde estão fixadas as guias

lineares com os respectivos carros deslizantes, que, por sua vez, são base da fonte e do detector. O tomógrafo construído para o CENA tem um castelo de chumbo que abriga duas fontes de raios gama, uma em cada extremidade, dos seguintes radioisótopos: ^{241}Am com 11,1 MBq e ^{137}Cs com 3,7 GBq. Esse castelo pode ser rotacionado sobre sua base para o operador selecionar a fonte. Adicionalmente, a mesa do tomógrafo do CENA está equipada com um mecanismo manual, situado na outra extremidade da mesa, para realizar medidas de atenuação de radiação ao longo de colunas de solo estruturado com até um metro de altura. O ajuste da altura é feito através de volante acoplado ao fuso que movimenta a base da amostra. A fim de preparar o equipamento para a medida de atenuação, desliza-se o castelo das fontes para a outra extremidade da guia, próxima à coluna de solo, e retira-se o detector da base do lado da tomografia para ser instalado no alojamento.

O tomógrafo destinado à UFPel foi construído com as mesmas características daquele produzido para o CENA exceto que opera com apenas uma fonte, ^{241}Am com 11,1 MBq, portanto o castelo é bem menor e não possui o sistema de medida de atenuação.

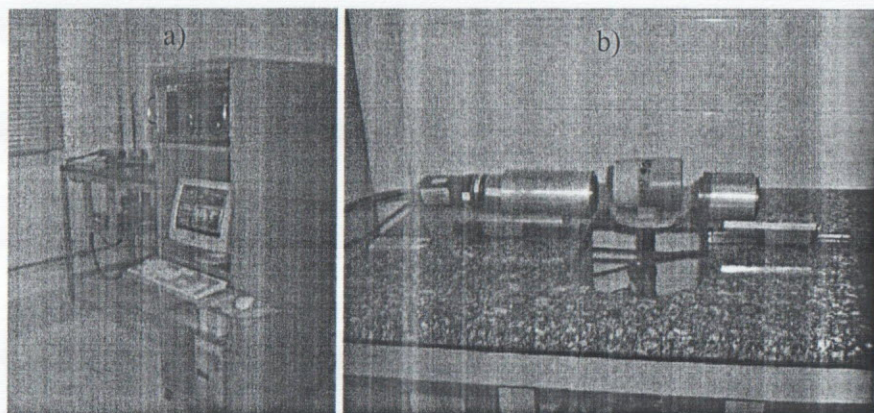


Figura 5. Foto do conjunto (a) e do sistema de posicionamento (b) do tomógrafo da Universidade Federal de Pelotas.

Aplicações da Tomografia Computadorizada na Ciência do Solo

Revisão da literatura em aplicações

Os primeiros trabalhos realizados sobre tomografia em solos mostraram

que existe uma correlação linear entre a intensidade da imagem e a densidade (PETROVIC et al., 1982; CRESTANA et al., 1985) e a umidade (HAINSWORTH e AYLMORE, 1983) da amostra. Imagens bi e tridimensionais do interior de amostras de solos foram obtidas, mostrando um potencial muito grande de estudos como determinações de características hídricas (fluxo de água e solutos), caracterização da macroporosidade, compactação de solos e absorção de água pelas raízes, dentre outras. Entretanto, já nesses trabalhos, várias limitações, como artefatos de imagem (PETROVIC et al., 1982), baixa disponibilidade para uso de equipamentos médicos (CRESTANA et al., 1986), aspectos relacionados à baixa resolução espacial, impossibilitando a visualização de poros menores que 1 mm^3 (WARNER et al. 1989), foram mencionadas.

Atualmente, a maioria dessas questões já foi resolvida e o que ainda se busca, do ponto de vista metodológico e de instrumentação, é a melhoria da resolução espacial das imagens, com a possibilidade da visualização de poros da ordem de alguns micrometros ou menos. Isso possibilitaria a aplicação da técnica em estudos de fenômenos de interface sólido-líquido-gás-raízes no solo. Muitos trabalhos podem ser encontrados, na literatura, sobre o uso da TC para estudos de solos. A seguir são apresentados alguns desses trabalhos.

Hainsworth e Aylmore (1983, 1986) estudaram o transporte da água na interface solo-raiz, possibilitando estabelecer um modelamento mais preciso do fenômeno de absorção de água pelas raízes. Crestana et al. (1988) estudaram as diversas etapas da germinação de sementes de milho, além do movimento de solutos e da frente de molhamento em três dimensões. Vaz et al. (1989) utilizaram a TC para estudos da compactação de solos submetidos à ação de implementos agrícolas, analisando o aumento da densidade na interface implemento-solo.

Fenômenos de deslocamento miscível foram extensivamente estudados em diversas condições de solos e geometrias de amostras, sendo possível monitorar o movimento da água e solutos no interior de colunas de solos (CRESTANA et al., 1985; WITHJACK e AKERVOLLE 1988; STEUDE et al., 1990a; SORBIE et al., 1989; PEYTON et al., 1994). O fenômeno da infiltração preferencial, instabilidade da frente de molhamento ou "fingering" foi monitorado por meio da obtenção de imagens tridimensionais de TC (STEUDE et al., 1990b), bem como o modelamento do fenômeno pelo uso da geometria fractal (CRESTANA e POSADAS, 1998; POSADAS e CRESTANA, 1993,

O desenvolvimento de um equipamento de TC portátil (NAIME, 1994) possibilitou a aplicação da técnica diretamente no campo, em estudos de solos, como, por exemplo, nas variações do perfil de densidades de um solo colapsível (NAIME et al., 1997).

Equipamentos com maior resolução possibilitaram a obtenção de imagens na escala micrométrica, com a qual foram obtidos resultados ainda não alcançados na TC convencional (resolução acima de 1 milímetro). Steude et al. (1990b) apresentam imagens de grãos de areia e raízes com resolução de 25 μm . Spanne et al. (1994) apresentam as possibilidades do uso de raios-X gerados por aceleradores synchrotron para gerar imagens de amostras de solos com resolução espacial de até $2 \times 2 \times \mu\text{m}^3$. As imagens de alta resolução obtidas permitiram a avaliação de heterogeneidades no interior de pequenos grãos de areia.

Heeraman et al. (1997) utilizaram a microtomografia para estudar a germinação de sementes e a visualização tridimensional do sistema radicular de feijão. Macedo et al. (1998), utilizando um microtomógrafo com resolução espacial de 100 μm , estudaram o encrostamento superficial formado num solo após um evento de irrigação, verificando o aparecimento de camadas adensadas de espessuras menores que 1 mm.

Perret et al. (1999) e Perret et al. (2000) quantificaram redes de macroporos e estudaram fluxo preferencial de solutos em colunas de solo estruturado por meio da tomografia de emissão de fótons (SPECT). Essa nova abordagem de estudo de fluxo em solo utiliza traçadores radioativos como emissor de fótons. É possível obter dados qualitativos e quantitativos da distribuição espacial desses traçadores. Esses autores introduziram o conceito de conectividade entre poros e desenvolveram método para quantificá-la. A forma com que os poros estão conectados é fundamental para a condutividade do meio poroso.

Naime (2001) utilizou um tomógrafo de terceira geração para acompanhar o avanço da frente de molhamento no solo e desenvolver uma nova metodologia para a determinação da curva de retenção da água no solo e da condutividade hidráulica em função da umidade. Bastardie et al. (2003) caracterizaram as perfurações no solo provocadas por três espécies de minhocas, utilizando reconstrução tridimensional de tomografias de raios X. Foram calculados o volume total dos vazios, o volume distribuído dos canais em função da umidade e a distribuição de tamanho de poros, por meio de técnicas de morfologia matemática.

De Gryze et al. (2006) mostraram as alterações que ocorrem na estrutura porosa do solo durante a decomposição da matéria orgânica, utilizando a tomografia como ferramenta de visualização tridimensional e de quantificação do espaço poroso. Os resultados mostram que a atividade microbiana altera a morfologia da estrutura porosa.

Os primeiros trabalhos em Ciência do Solo

Os três primeiros trabalhos utilizando a tomografia computadorizada na área da Ciência do Solo já foram citados no item 4.1 e serão brevemente descritos, podendo seus detalhes ser vistos nas respectivas referências.

Em 1982, A. M. Petrovic, J. E. Sievert e P. E. Rieke utilizaram o tomógrafo de quarta geração do Centro Clínico da Universidade Estadual de Michigan, fabricado pela American Science and Engineering, Inc., para realizar medidas da distribuição espacial da densidade do solo (PETROVIC et al., 1982). Primeiramente, Petrovic e seus parceiros, avaliaram a linearidade do tomógrafo em relação à densidade global utilizando amostras compostas de microesferas de vidro, com diâmetros de 0,2 mm e 0,1 mm, colocadas em cilindros de alumínio, em montagens com densidades de 0,14 g cm⁻³, 0,80 g cm⁻³, 1,00 g cm⁻³, 1,21 g cm⁻³, 1,32 g cm⁻³ e 1,55 g cm⁻³. Para os ensaios com solo, foram retiradas 12 amostras do horizonte Ap de um solo areno-barrento fino, e o lote era constituído de doze amostras com densidades variando de 1,29 g cm⁻³ a 1,64 g cm⁻³, preparadas em recipientes de acrílico com 32 mm de diâmetro interno. Os resultados das medidas com as microesferas de vidro e com as amostras de solo são vistos nas Figuras 6 e 7.

O estudo que J. M. Hainsworth e L. A. G. Aylmore desenvolveram em 1983 tinha como ponto de partida a dificuldade existente em se correlacionar a resposta das plantas à água do solo, devido à variabilidade temporal e espacial do conteúdo de água nesse meio (HAINSWORTH e AYLMORE, 1983). Era necessário descobrir uma técnica que pudesse mostrar essa distribuição espacial e ao longo do tempo de maneira não invasiva, de forma a permitir a repetição do experimento quantas vezes fossem necessárias.

Em seu artigo, esses autores examinaram o potencial da tomografia computadorizada de vencer esse problema. Foram utilizados nos experimentos um tomógrafo comercial da Electric and Musical Industries Inc., modelo EMI CT 1007, e um tomógrafo de raios g com fonte de ²⁴¹Am. O tomógrafo comercial possuía dois conjuntos de tubos de raios

X e detectores, o que possibilitava examinar duas fatias da amostra simultaneamente. As amostras utilizadas eram de um solo areno-barrento proveniente de Bakers Hill, WA, EUA. Foram conduzidos três experimentos.

No primeiro, montaram-se concêntricamente três anéis acrílicos com diâmetros de 7,00 cm, 5,00 cm e 1,50 cm. O solo foi colocado uniformemente nos três cilindros e cada um teve seu conteúdo de água equilibrado, ficando o externo com o maior valor e o interno com o menor. Para determinar a umidade utilizou-se a equação (HAINSWORTH e AYLMOORE, 1983).

$$\theta_v = (UH_{\text{úmido}} - UH_{\text{seco}}) / 1000 \quad [2]$$

onde θ_v é a umidade volumétrica do solo e $UH_{\text{úmido}}$ e UH_{seco} são, respectivamente, as Unidades Hounsfield para o solo úmido e seco.

No segundo experimento, simulou-se a presença de raiz artificial, montando-se um vaso de 70 mm de diâmetro por 120 de altura, preenchido com solo, no centro do qual foi inserido um tubo de *alundum* (substância feita de alumínio fundido) com 1,5 mm de diâmetro externo e 0,6 mm de diâmetro interno. Durante o experimento, uma das extremidades do tubo foi conectada a um reservatório de água e solo umedecido gradualmente. Tomografias foram obtidas na mesma fatia, antes e depois de ser injetada a água e as umidades comparadas. No terceiro experimento, plantou-se uma semente de rabanete num vaso com 70 mm de diâmetro e 120 de altura, preenchido com solo. Sete dias após a germinação, o solo foi umedecido até a capacidade de campo e foram realizadas tomografias da fatia a 40 mm do topo do vaso, com o tomógrafo comercial, nesse sétimo dia, e novamente após sete e vinte dias. As perdas por transpiração foram avaliadas pesando-se o vaso. O decréscimo da umidade foi medido usando-se a expressão:

$$\Delta\theta_v = (UH_{cc} - UH_0) / 1000 \quad [3]$$

onde UH_{cc} e UH_0 são, respectivamente, as Unidades Hounsfield para o solo na capacidade de campo e nos dias 7 e 20.

Os resultados dos estudos de Hainsworth e Aylmore (1983) mostraram a aplicabilidade da TC para medir a umidade do solo, bem como para avaliar sua variabilidade espacial e temporal.

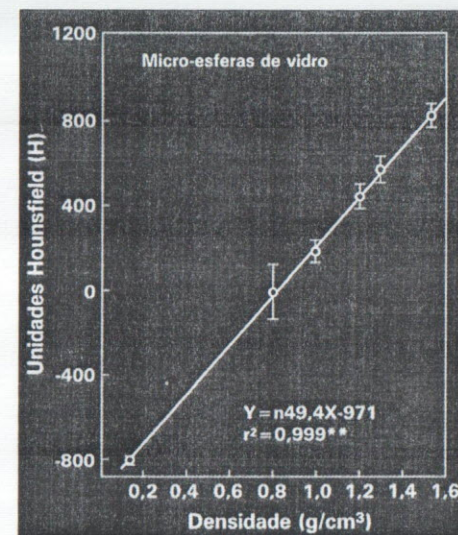


Figura 6. Variação das Unidades Hounsfield medidas em amostras de microesferas de vidro, com diferentes densidades obtidas por Petrovic et al. (1982).

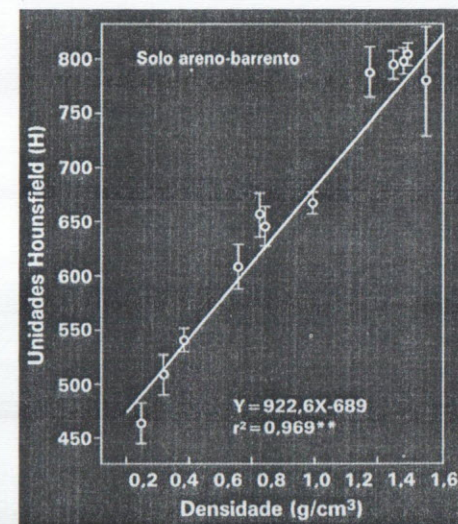


Figura 7. Variação das Unidades Hounsfield medidas em amostras de solo areno-barrento, com diferentes densidades, obtidas por Petrovic et al. (1982).

Na Tabela 1, vêem-se os dados comparativos entre a umidade medida por meio da tomografia, usando-se os dois equipamentos, e a umidade medida por gravimetria. Na Figura 8 vê-se a variação da umidade a partir da raiz do rabanete. Observou-se uma excelente correlação entre as 2 técnicas.

Tabela 1. Comparação dos valores de umidade obtidos com o tomógrafo de raios X e de raios gama com a técnica de gravimetria.

Tomógrafo	Anel	θ_v (TC)	θ_v (grav.)
raios X	externo	$0,180 \pm 0,065$	$0,175 \pm 0,041$
	central	$0,063 \pm 0,060$	$0,075 \pm 0,022$
	interno	$0,000 \pm 0,020$	$0,000 \pm 0,001$
raios gama	externo	$0,350 \pm 0,040$	$0,325 \pm 0,045$
	central	$0,142 \pm 0,040$	$0,150 \pm 0,020$
	interno	$0,000 \pm 0,060$	$0,001 \pm 0,001$

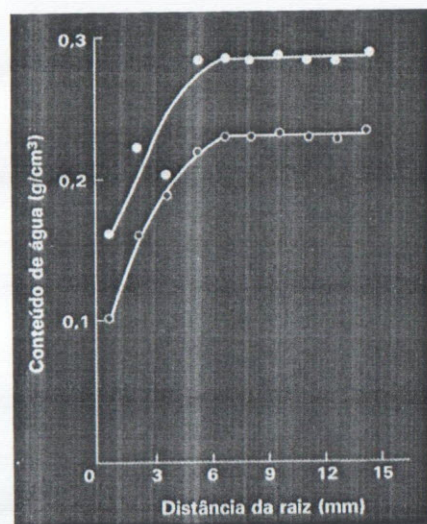


Figura 8. Conteúdo de água no solo na proximidade de uma raiz de rabanete após (a) 7 dias e (b) 20 dias de transpiração a partir da umidade de capacidade de campo ((HAINSWORTH e AYLMOORE, 1983)

Em 1985, Crestana e colaboradores utilizaram a tomografia computadorizada para medir a distribuição da umidade contida numa amostra de solo e montaram um experimento com dinâmica da água no solo (CRESTANA et al., 1985). Nessa montagem, dois movimentos de

água foram avaliados. Primeiramente o horizontal, utilizando-se um recipiente cilíndrico com 50 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. Para o fluxo vertical, empregou-se um tubo de acrílico com diâmetro de 100 mm e altura de 300 mm, dividido ao meio no sentido axial, de forma que se pudessem comparar as imagens da área seca e da área em umedecimento.

Foram analisados solos do horizonte Ap, sendo um deles um solo arenoso da cidade de Trieste, Itália, e o outro um solo areno-barrento da cidade de Barretos/SP. Empregou-se um tomógrafo de terceira geração GE CT/T 8800, General Electric, do Instituto de Radiologia, Universidade de Trieste, Itália. As calibrações das tomografias em termos de Unidades Hounsfield versus densidade global e umidade são apresentadas nas Figuras 9 e 10. A dependência linear de UH com a densidade global confirmou o resultado de Petrovic et al. (1982). Para a umidade volumétrica encontrou-se igualmente a dependência linear entre seu conteúdo e UH.

Desses experimentos pode-se concluir que as Unidades Hounsfield ou Unidades Tomográficas (UT) dependem tanto da densidade (ρ) quanto da umidade do solo (θ) e, portanto, elas são uma função bidimensional $UH(\rho, \theta)$, devendo isso ser considerado ao serem feitos estudos do solo por meio da tomografia computadorizada.

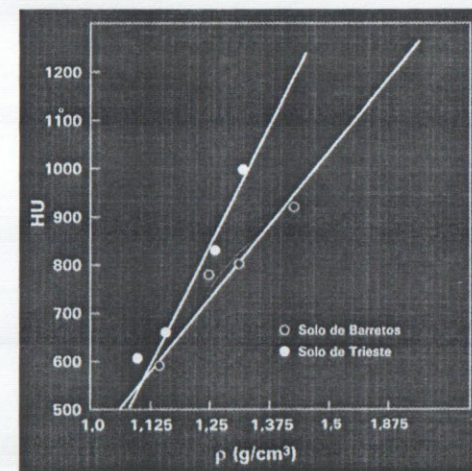


Figura 9. Curva de calibração de Unidades Hounsfield (UH) em função da umidade volumétrica de dois solos. O desvio padrão médio foi de 32,5 UH (CRESTANA et al., 1985).

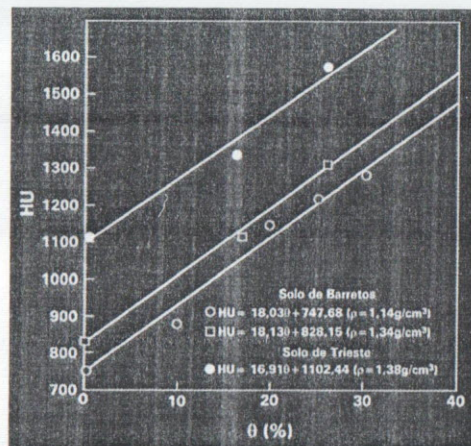


Figura 10. Curva de calibração de Unidades Hounsfield (UH) em função da umidade volumétrica de dois solos. O desvio padrão médio foi de 63,2 UH (CRESTANA et al., 1985).

Compactação do solo em cana-de-açúcar

Por trazer alterações nas propriedades físicas do solo e, conseqüentemente, diminuição na produção das culturas, a compactação tem merecido a atenção de pesquisadores de diversas áreas. Com o objetivo de levantar os perfis de densidade em áreas cultivadas com cana-de-açúcar e, portanto, o efeito desse uso do solo, Vaz e colaboradores empregaram a tomografia computadorizada para avaliar amostras indeformadas de solo dessas regiões (VAZ et al., 1996).

Amostras de um solo Latossolo Vermelho distrófico da Usina Capuava, da zona rural do município de Piracicaba/SP, e o solo com distância entre pontos de coleta inferiores a 700m, com quatro situações diferentes de uso da terra: uma com vegetação nativa (floresta latifoliada tropical) e três desmatadas e cultivadas com cana-de-açúcar durante 16, 30 e 50 anos. A área com 50 anos de cultivo foi desmatada manualmente, tendo suas arações e gradagens iniciais sido feitas com tração animal e, atualmente, com tração mecânica. Em cada área abriu-se uma trincheira para a coleta de amostras em forma de torrões, parafinados, sendo na sequência para transporte ao laboratório. A avaliação da densidade por meio das imagens seguiu calibração prévia do minitomógrafo da Embrapa Instrumentação Agropecuária (CRUVINEL, 1987; CRUVINEL et al., 1990; VAZ et al., 1996; CRESTANA et al., 1992), com a equação:

$$UT = 7 + (345 + 197u)\rho \quad [4]$$

onde $u \text{ (g g}^{-1}\text{)}$ é a umidade a base de massa e, $\rho \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$ a densidade do solo. No presente caso, as amostras foram secadas em estufa a 105°C , por 24h ($u \equiv 0$), simplificando a Eq. 4 para:

$$UT = 7 + 345D \quad [5]$$

Na Figura 11, é apresentada uma imagem tomográfica de uma amostra coletada da parcela com 50 anos de cultivo. Como a tomografia foi feita ao longo do plano vertical da amostra e a resolução é de 2 mm, pode-se ver a versatilidade dessa ferramenta, que possibilita avaliar a densidade de 2 em 2 mm no sentido vertical. Na Figura 11b, observa-se o perfil de variação da densidade da amostra.

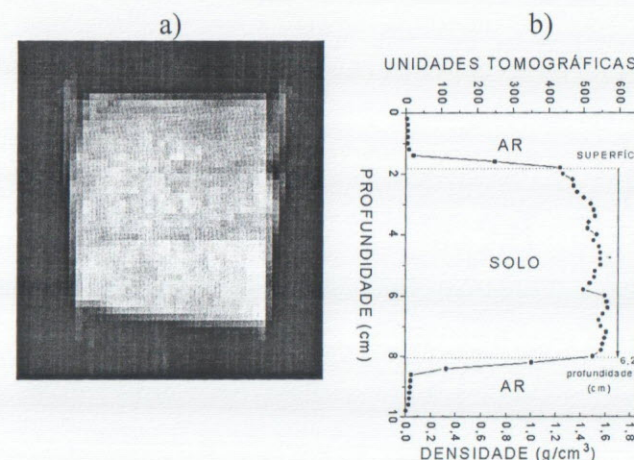


Figura 11. Imagem tomográfica (a) e variação da densidade (b) ao longo do plano vertical na amostra da parcela com 50 anos de cultivo de cana-de-açúcar (VAZ et al., 1996).

Em imagens análogas das demais parcelas, mostradas nas Figuras 12 a 15, das quais foram levantados os perfis de densidade mostrados nas Figuras 16 a 19, percebe-se que, na parcela em floresta, a densidade superficial é inferior a $1,2 \text{ g cm}^{-3}$, subindo para esse valor à medida que a profundidade aumenta. Na parcela cultivada por 50 anos, a densidade à superfície é de $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ e cai para $1,1 \text{ g cm}^{-3}$, um pouco abaixo dos 40 cm de profundidade, enquanto na parcela de 16 anos essa queda ocorre somente abaixo de 60 cm. Na parcela cultivada durante 30 anos, o valor da superfície é em torno de $1,1 \text{ g cm}^{-3}$, sobe para $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, por volta dos 30 cm de profundidade e cai para $1,1 \text{ g cm}^{-3}$, após os 60 cm. Esses resultados mostram, para os casos analisados, que o cultivo mecanizado

durante 16 anos causou o maior impacto na compactação do solo, embora não seja possível estabelecer, com esse número de amostras, uma correlação rigorosa entre a compactação e o tempo de cultivo.

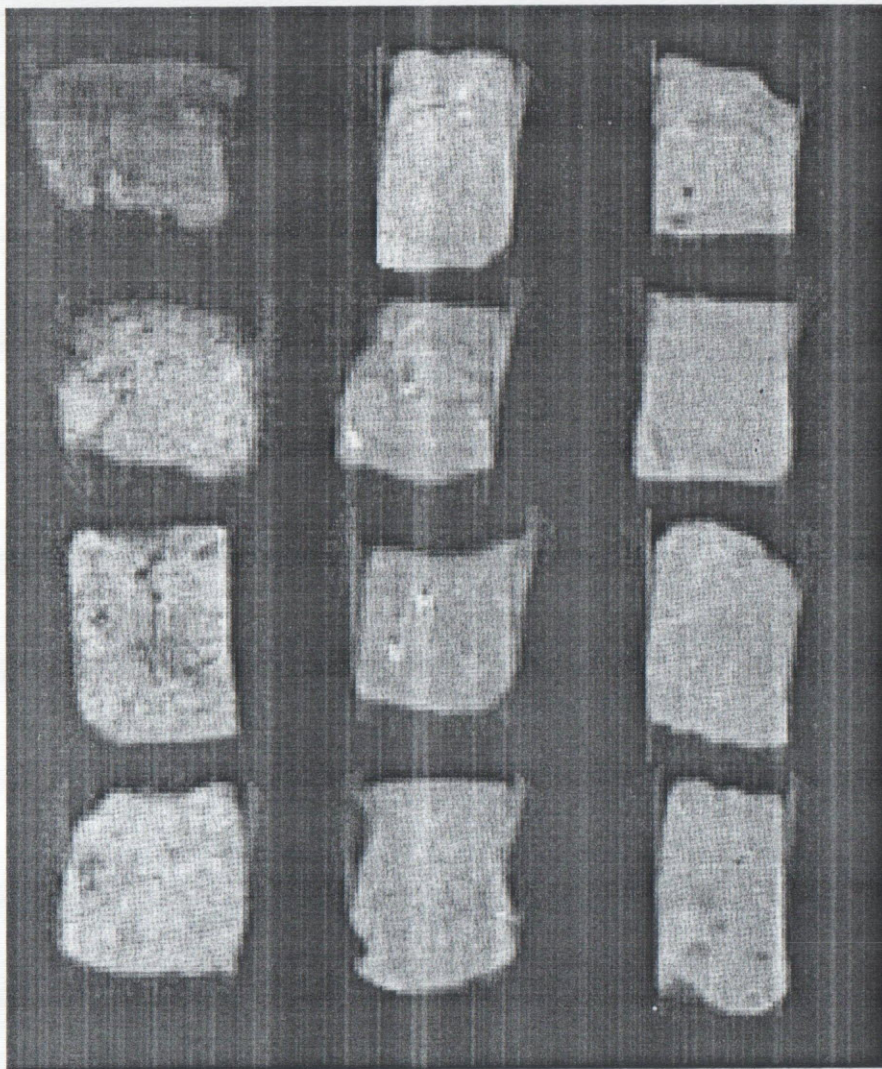


Figura 12. Imagens verticais obtidas, por tomografia computadorizada, das amostras de solo coletadas na área de floresta (VAZ et al., 1996).

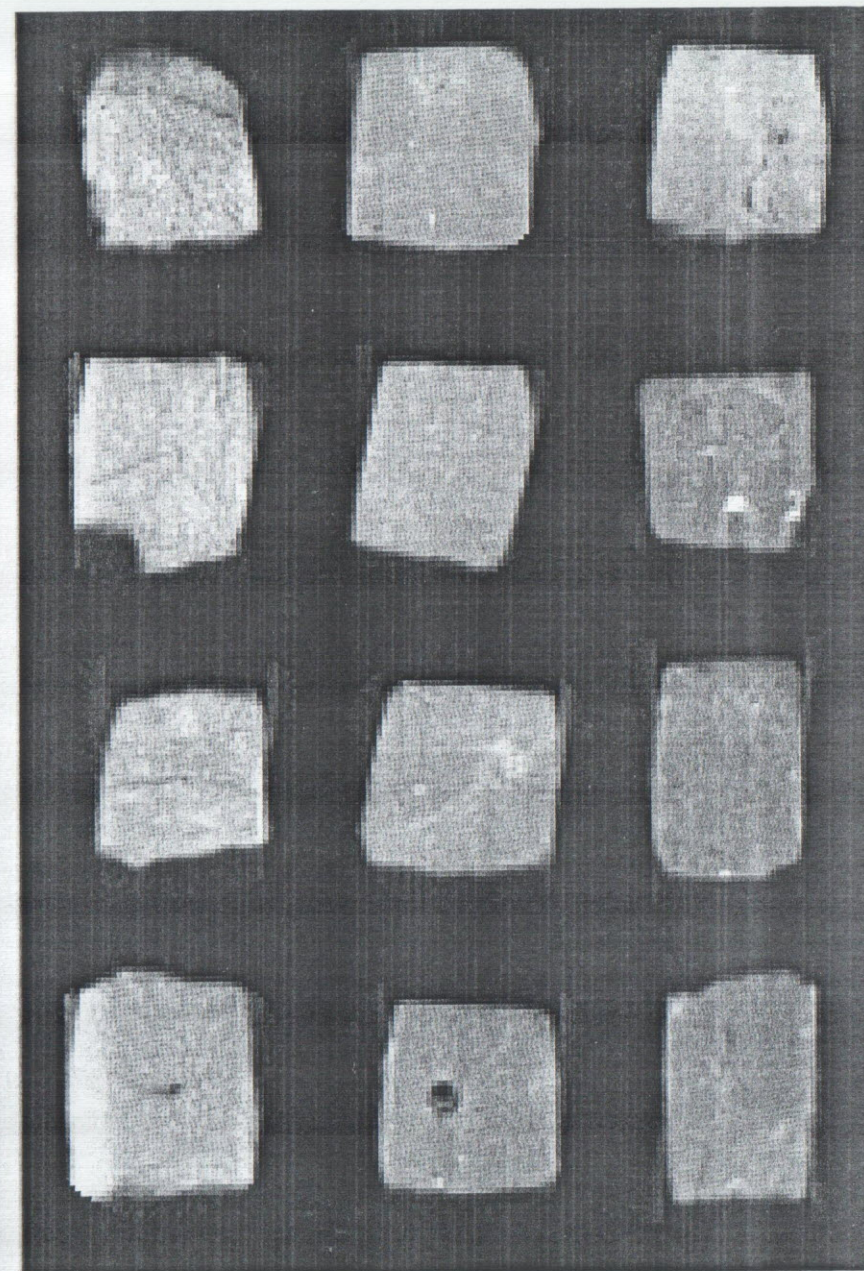


Figura 13. Imagens verticais obtidas, por tomografia computadorizada, das amostras de solo coletadas na parcela com cultivo de cana-de-açúcar durante 16 anos (VAZ et al., 1996).

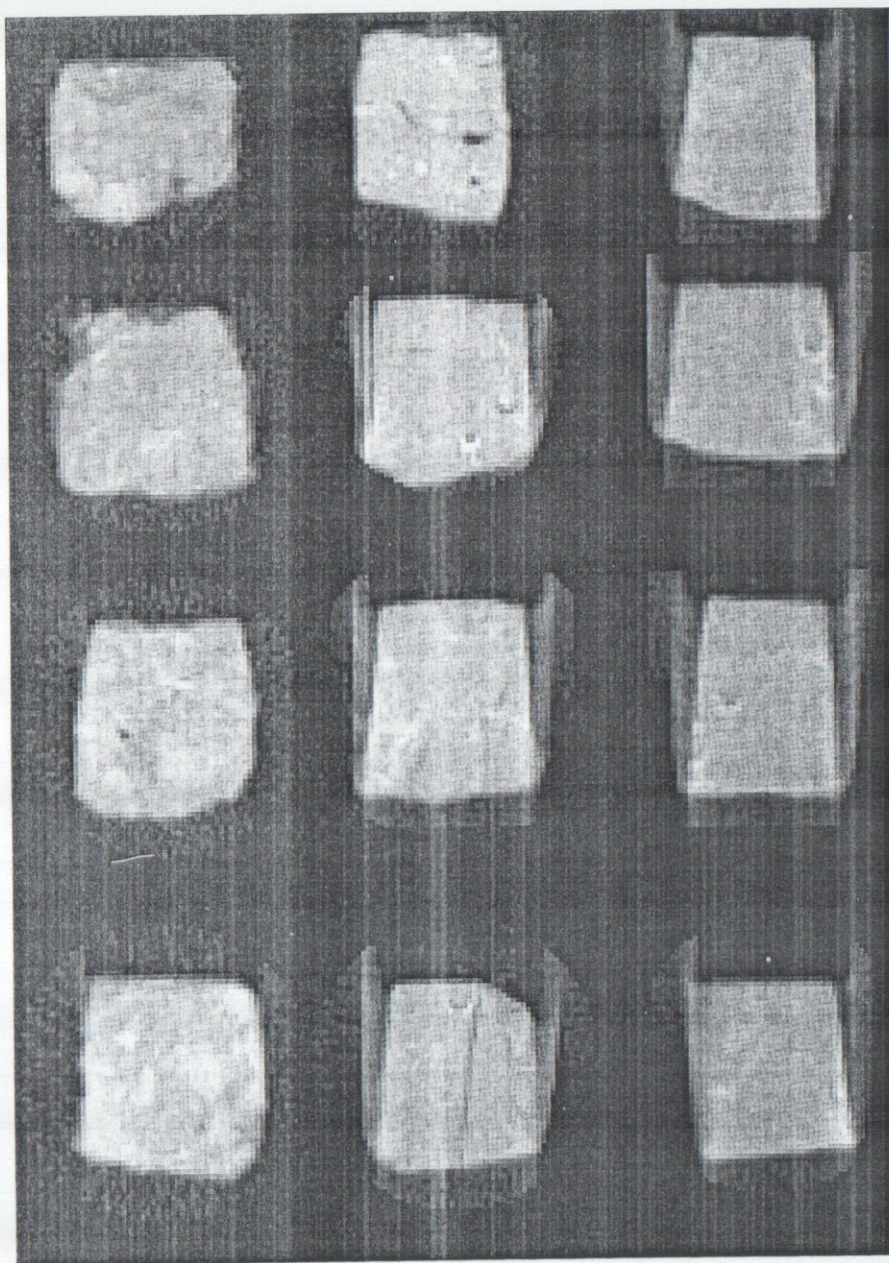


Figura 14. Imagens verticais obtidas, por tomografia computadorizada, das amostras de solo coletadas na parcela com cultivo de cana-de-açúcar durante 30 anos (VAZ et al., 1996).

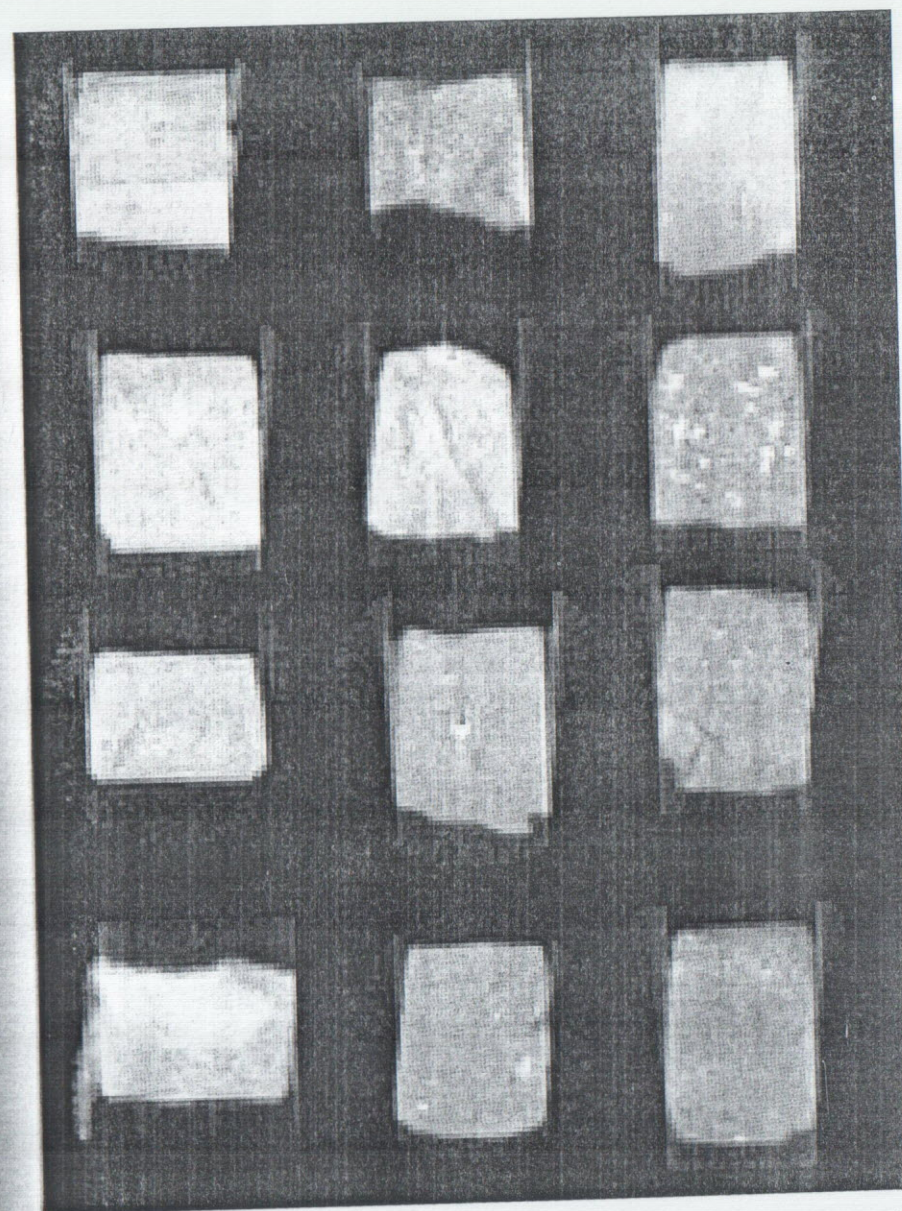


Figura 15. Imagens verticais obtidas, por tomografia computadorizada, das amostras de solo coletadas na parcela com cultivo de cana-de-açúcar durante 50 anos (VAZ et al., 1996).

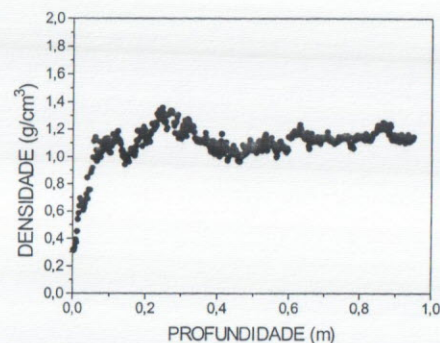


Figura 16. Perfil de densidades obtido das imagens dos torrões de solo coletados na área de floresta

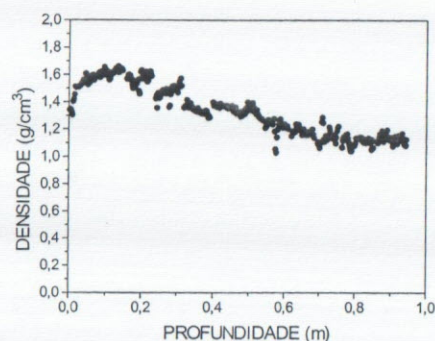


Figura 17. Perfil de densidades obtido das imagens dos torrões de solo coletados na área cultivada com cana por 16 anos

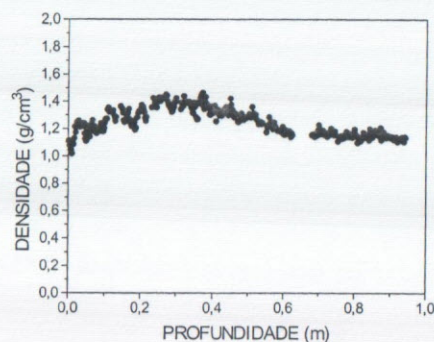


Figura 18. Perfil de densidades obtido das imagens dos torrões de solo coletados na área cultivada com cana por 30 anos

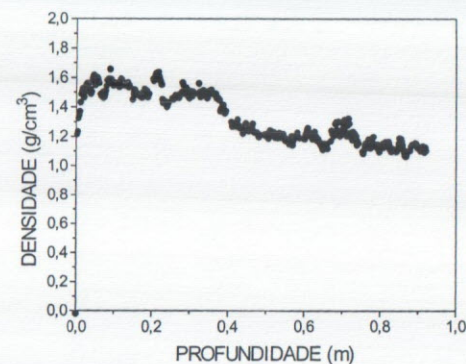


Figura 19. Perfil de densidades obtido das imagens dos torrões de solo coletados na área cultivada com cana por 50 anos

Estudo em solos colapsíveis em Mato Grosso

O problema do afundamento de edificações, causado pelo colapso do solo, demandou estudos para obter soluções técnicas, economicamente viáveis, para o projeto de fundações de edifícios localizados em regiões onde o solo está sujeito ao colapso estrutural. A engenharia civil não dispunha de conhecimento suficiente sobre o fenômeno para evitar ou minimizar seus efeitos. O cálculo das fundações era baseado em métodos inferidos empiricamente. Por isso, na maioria dos casos, os resultados obtidos são indesejáveis e excessivamente dispendiosos.

De uma forma genérica, solos colapsíveis (CONCIANI et al., 1995) podem ser definidos como sendo aquele tipo de solo de estrutura com alta porosidade ou índice de vazios acima de 60%, composto basicamente de areia e silte, não lixiviado e não saturado, com ligações entre grãos formadas por argilas e colóides, e que, quando submetido à acréscimos de tensão e/ou umidade, sofre rearranjo brusco da sua estrutura com conseqüente redução do seu volume (MENEZES e FRAGA, 1994).

A estrutura do solo colapsível consiste de grãos não lixiviados, separados por espaços vazios, com as menores distâncias entre os grãos sendo normalmente preenchidas por pontes de argila floculada. O colapso do solo ocorre quando o solo sob carga é submetido a um aumento no conteúdo de água fazendo que a infiltração da água decomponha os cimentos naturais ou pontes de argila, diminuindo a coesão entre os grãos. Desta maneira, a magnitude das tensões

cisalhantes entre os grãos excede a resistência das pontes de argila.

Há casos em que o colapso atinge um metro de profundidade. O entendimento do mecanismo de compressão destes solos, bem como da região afetada pela variação de tensões que lhes foi imposta, permitiu o domínio das técnicas construtivas da região e a possibilidade de previsão do comportamento do recalque (afundamento) das obras ali edificadas.

Em trabalho realizado em parceria com a Escola Técnica Federal do Mato Grosso, Universidade Federal do Mato Grosso e Universidade de São Paulo, o tomógrafo portátil de primeira geração foi utilizado para quantificar, *in situ*, a redução de vazios provocado pelo colapso do solo. Os experimentos foram realizados no campo experimental da cidade de Campo Novo do Parecis (MT), onde ocorrem grandes recalques quando o solo é submetido a um carregamento externo e umedecimento.

Neste estudo, foram obtidas imagens tomográficas ao longo da profundidade de 2 m, antes e após a realização da prova de carga com provocação do colapso, como ilustra a Figura 20.

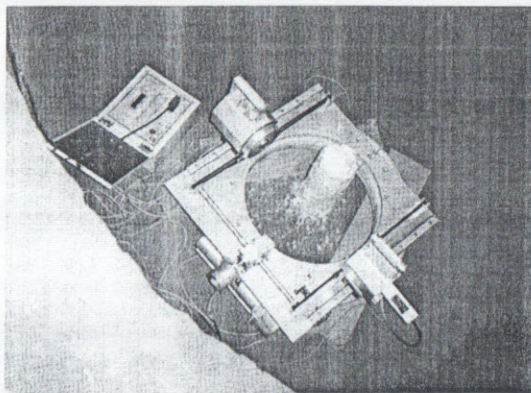


Figura 20. Tomógrafo portátil instalado a 120 cm de profundidade em estudo de solo colapsível.

A Figura 21 mostra duas imagens tomográficas coletadas a 105 e 120 cm de profundidade, antes (a) e depois (b) do carregamento, respectivamente. A partir das imagens da Figura 22, nota-se claramente o adensamento do solo. A densidade média do solo aumentou de 0,91 para 1,08 g cm⁻³ na profundidade de 105 cm e de 0,96 para 1,06 g cm⁻³ em 120 cm.

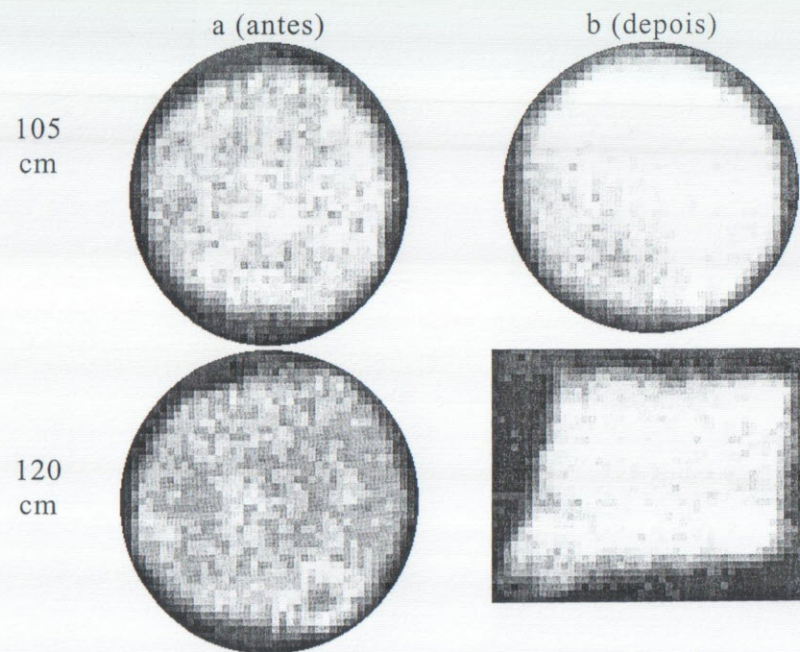


Figura 21. Imagens tomográficas antes (a) e depois (b) do carregamento em 105 e 120 cm de profundidade.

O gráfico da Figura 22 mostra a variação da densidade do solo ao longo da profundidade. O erro experimental médio dos valores apresentados é de 1,6%. Note-se que as tomografias, após carregamento, foram realizadas abaixo de 1 m, cota de assentamento da placa.

É importante notar na Figura 22 que o solo sofreu alterações mais acentuadas nos primeiros 20 cm abaixo da superfície de carregamento. Isso mostra que a região mais afetada foi de aproximadamente 25% do diâmetro da placa, o que significa, em princípio, que a fundação do edifício ou silo deve levar isto em conta.

Portanto, os projetos de geotecnia e engenharia civil, nos locais onde solos colapsíveis existem, precisam tirar vantagem desse fato buscando simplificação e ou redução de custos e estabilidade da construção.

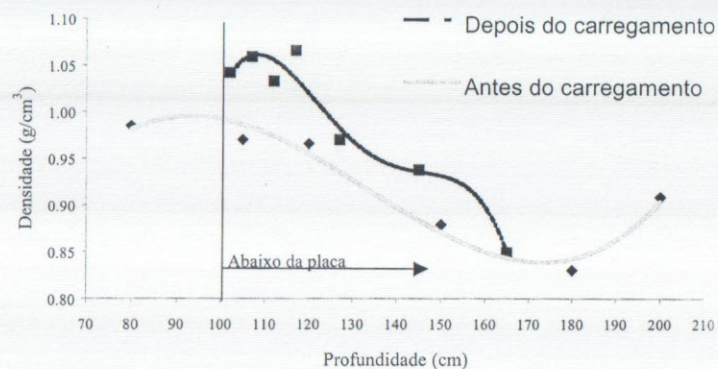


Figura 22. Densidade do solo em função da profundidade, antes e depois do experimento com prova de carga.

Estudo de perfil cultural

O fluxo e o armazenamento da água no solo, sua aeração, o transporte de nutrientes e o crescimento de raízes são fatores que podem ser alterados em função das variações na sua densidade e porosidade provocadas pelo uso de determinado manejo. Portanto, o estudo desses parâmetros é uma ferramenta auxiliar de grande importância na avaliação do impacto de manejos do solo. Uma das formas dessa avaliação é a metodologia do perfil cultural, que mapeia as ocorrências das diversas estruturas ao longo de um perfil do solo, observando-se o modo de organização, individualizando-se áreas ou campos no perfil. Esses campos são identificados em função de seus estados internos e classificados por parâmetros como características dos agregados, coesão, presença de fissuras, modo e face de ruptura do torrão, aglomeração, entre outros. Porém, apesar de sua importância, essa metodologia baseia-se em parâmetros cuja avaliação é subjetiva, dependente, portanto, da habilidade do pesquisador e dos pontos de vista que podem variar de um pesquisador para outro, como é comum na subjetividade.

Num trabalho de parceria com a Universidade Estadual de Londrina, foi realizado um estudo para avaliar o potencial da TC para diferenciar as estruturas identificadas visualmente pelo método do perfil cultural e estabelecer padrões analíticos objetivos para essas estruturas.

As amostras foram coletadas em duas áreas, sendo uma num Latossolo Vermelho distroférico, em Cascavel/PR, sob cultura de milho com

diferentes manejos, e a outra num Latossolo Vermelho Amarelo distrófico em São Carlos/SP, sob pastagem com diferentes estados de degradação física. O procedimento experimental foi feito primeiramente caracterizando o perfil por meio da identificação das estruturas em trincheiras e, posteriormente, coletando torrões aproximadamente cúbicos, acondicionando-os em pequenas caixas de papelão e mapeando suas densidades em sessões planas verticais por meio da tomografia computadorizada.

Três tomógrafos foram utilizados nesses experimentos, sendo dois de raios gama (Césio-137 e Amerício-241, como fontes radioativas), com resolução de milímetros e um tomógrafo de raios X de resolução micrométrica. Esses equipamentos são citados no item *Tomógrafo portátil, minitomógrafo e microtomógrafo*, e seus detalhes são lá descritos.

Resultados obtidos para um Latossolo Vermelho distroférico de Cascavel-PR

A amostragem foi feita em três trincheiras num solo submetido a dois manejos, sendo semeadura direta e plantio convencional com grade pesada, e num solo em área não mobilizada. Foi um total de seis amostras de solo indeformado, retiradas das estruturas descritas na análise de perfil cultural. A Tabela 2 descreve e localiza essas amostras.

Tabela 2. Estruturas das amostras coletadas nas trincheiras do Latossolo Vermelho distroférico.

n	Estrutura	Descrição	Localização	Prof. (cm)
1	NAM	estado natural	grade pesada	28 a 33
2	CΔμ	fissurado	grade pesada	23 a 28
3	CΔμ	contínuo-parcialmente compactado	grade pesada	12 a 18
4	F	contínuo-compactado	semeadura direta	10 a 15
5	CΔ	contínuo-parcialmente compactado	semeadura direta	28 a 33
6	F	fissurado	grade pesada	11 a 16

n: número da amostra

Os torrões aproximadamente cúbicos foram acondicionados em caixas de 5x5x5 cm³. As análises foram realizadas no minitomógrafo com resolução de espacial de 2x2x2 cm³. A umidade foi mantida embalando

as amostras em filme plástico de PVC. Na Figura 23, vêem-se as imagens tomográficas das amostras coletadas. Após a realização das tomografias, as amostras foram secadas em estufa para a determinação da umidade à base de massa. O coeficiente de atenuação em massa das amostras foi determinado numa amostra composta de solo deformado das três trincheiras, lembrando-se que esse coeficiente é dado por:

$$\mu_m = \mu / \rho \quad [6]$$

O valor obtido foi de $0,3993 \pm 0,0047 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Utilizando-se a equação para um meio poroso desenvolvida por CRESTANA et al. (1985), na qual:

$$\mu = \mu_{mp} \rho_g + \mu_{mw} \rho_w \theta \quad [7]$$

sendo μ_{mp} e μ_{mw} ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$) os coeficientes de atenuação em massa da fração sólida do solo e da água, respectivamente; ρ_g e ρ_w (g.cm^{-3}) a densidade global do solo e a densidade da água; e θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) a umidade volumétrica do solo. Considerando-se $\mu_{mw} = 0,203 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, tem-se a seguinte equação de calibração para determinação das densidades a partir dos coeficientes de atenuação (μ) a partir das imagens:

$$\rho_g = \mu / (0,3993 + 0,203) u \quad [8]$$

onde u (g g^{-1}) é a umidade a base de massa ($u = \theta / \rho_g$). Valores das densidades das amostras obtidos das tomografias são apresentados na Tabela 3.

A Tabela 3 evidencia que as estruturas consideradas maciças apresentaram menores desvios padrão, confirmando sua homogeneidade. Por outro lado, as amostras não maciças apresentaram desvios padrão maiores, coerentes com a variabilidade característica destas estruturas.

Também coerentemente com as análises pelo método do perfil cultural, as maiores densidades médias foram obtidas nas amostras com estado maciço compactado.

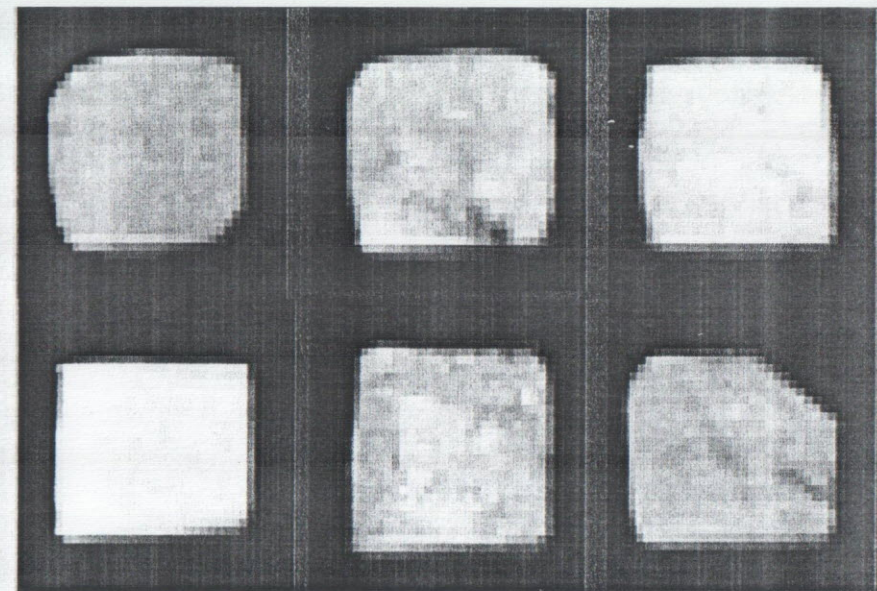


Figura 23. Imagens tomográficas das amostras de Latossolo Vermelho distroférico de Cascavel/PR, coletadas após a descrição do perfil cultural.

Tabela 3. Valores da densidade global (ρ) média e valores máximos e mínimos obtidos das imagens tomográficas da Figura 23.

Estrutura	Dados das tomografias			
	$\rho_{\text{média}}$	Desvio Padrão	$\rho_{\text{máx.}}$	$\rho_{\text{mín.}}$
	g cm^{-3}			
NAM	1,151	0,034	1,237	1,025
CΔμ	1,333	0,062	1,587	1,015
CΔμ	1,319	0,096	1,527	0,870
F	1,326	0,087	1,527	1,059
CΔ	1,539	0,033	1,636	1,256
F	1,138	0,123	1,365	0,629

Resultados obtidos para um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de São Carlos-SP

Esse solo de textura média (30% de argila) foi cultivado por 20 anos com pastagem de *Brachiaria decumbens*. Três áreas em condições distintas de degradação foram avaliadas: (I): Área degradada com invasão de

Paspalum notatum (grama batatais). Lotação à época do estudo de 0,7 UA/ha (unidade de animal por hectare); (II): Área recuperada por pousio (ausência de animais) durante dois anos. Não invadida por *Paspalum notatum*, mas a presença de outras ervas daninhas é notada; (III): Área recuperada por adubação mineral completa (NPK + micronutrientes) e calcário dolomítico por três anos. Lotação animal à época do estudo: 5 UA/ha.

A amostragem foi feita em três trincheiras abertas, uma em cada área acima, de forma similar ao procedimento do Latossolo Vermelho distroférico, com a particularidade de serem retiradas vertical e continuamente no perfil, para se obter um perfil vertical de densidades até a profundidade de um metro. Após as tomografias milimétricas, nas profundidades de 5 e 30 cm, subamostras com cerca de 1 cm de diâmetro foram retiradas e fixadas numa base de parafina, conforme indicado na Figura 24a e 24b, para a obtenção de imagens no microtomógrafo.

As Figuras 25 a 27 mostram as imagens com resolução milimétrica, para as áreas (I), (II) e (III), respectivamente. A Figura 28 mostra imagens mais detalhadas da estrutura do solo, por meio da tomografia micrométrica, para as três áreas, nas profundidades de 5 e 30cm.

Utilizando-se a Eq. 8, obteve-se, a partir das tomografias das Figuras 25 a 27, a distribuição das densidades ao longo da profundidade. Esse resultado é apresentado na Figura 29, onde se vê que a área degradada apresenta maior densidade nos dez centímetros superficiais, ou, pode-se dizer, as áreas recuperadas por pousio ou adubação tiveram a densidade superficial reduzida após esses manejos.

A Tomografia Computadorizada mostrou-se uma excelente ferramenta para avaliação do estado interno das estruturas do solo, o que é sempre uma dificuldade nas análises descritivas.

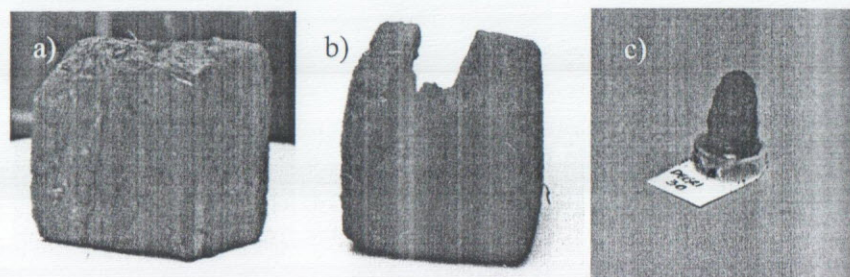


Figura 24. Torrão de solo (a) e amostra retirada para microtomografia (c), como indicado (b)

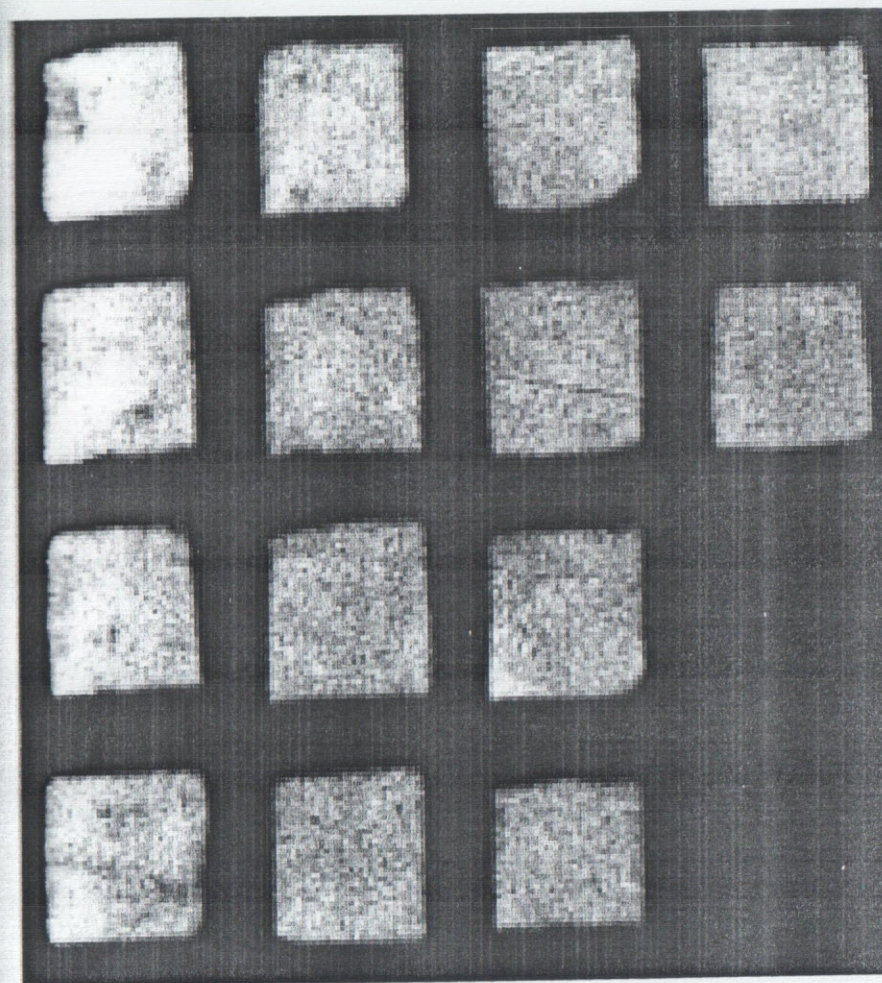


Figura 25. Imagens tomográficas dos torrões da trincheira da área degradada (I).

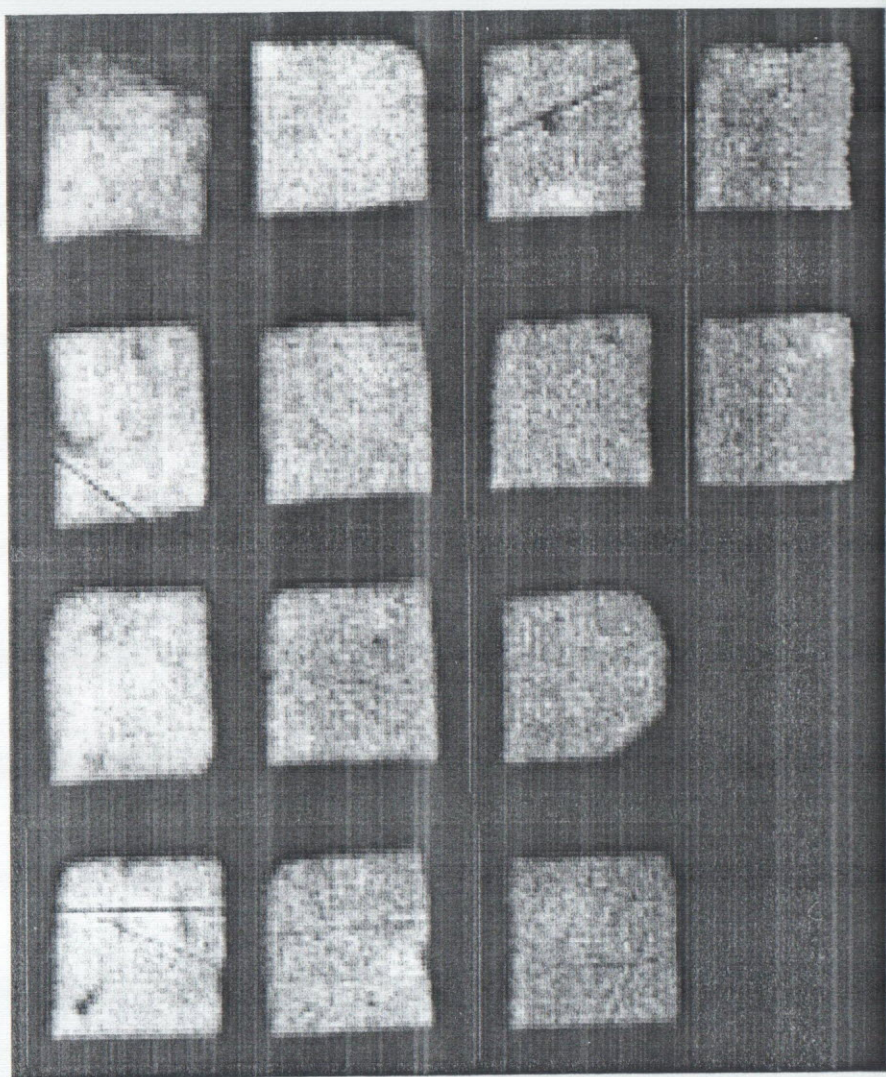


Figura 26. Imagens tomográficas dos torrões da trincheira da área recuperada com pousio (II).

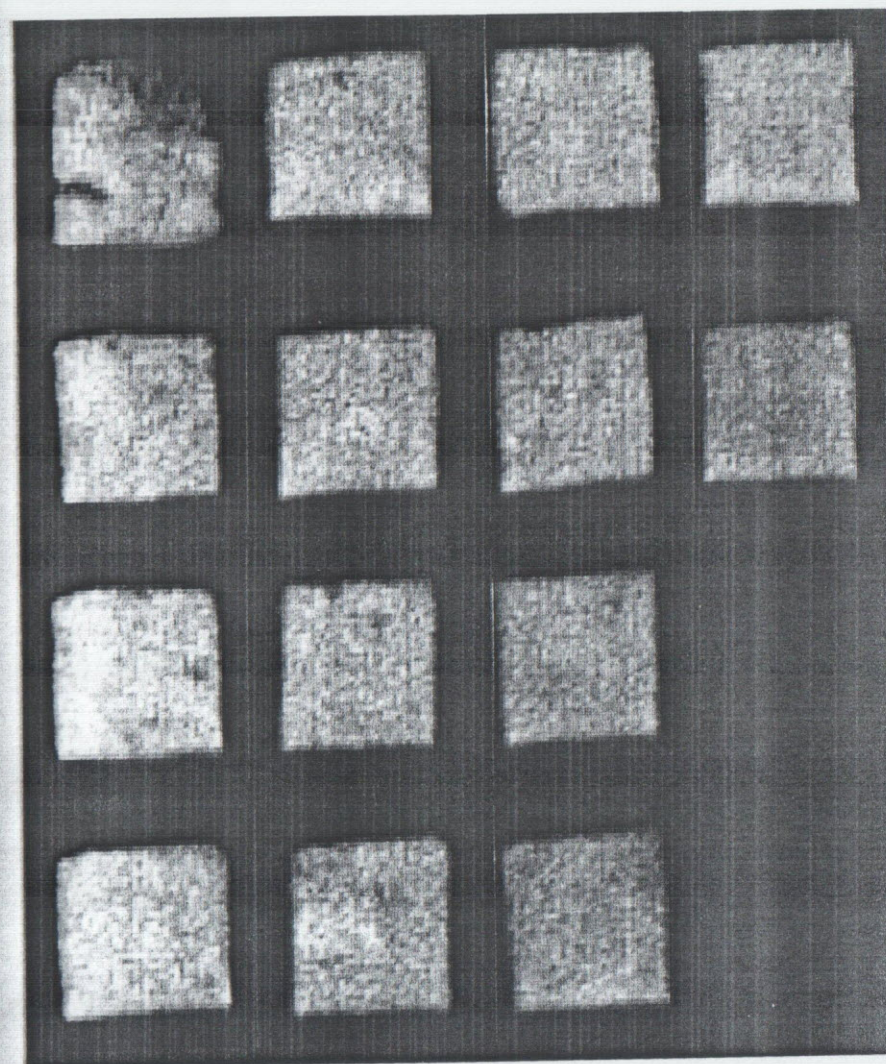


Figura 27. Imagens tomográficas dos torrões da trincheira da área recuperada com adubação (III). Números nas imagens representam a profundidade em relação à superfície.

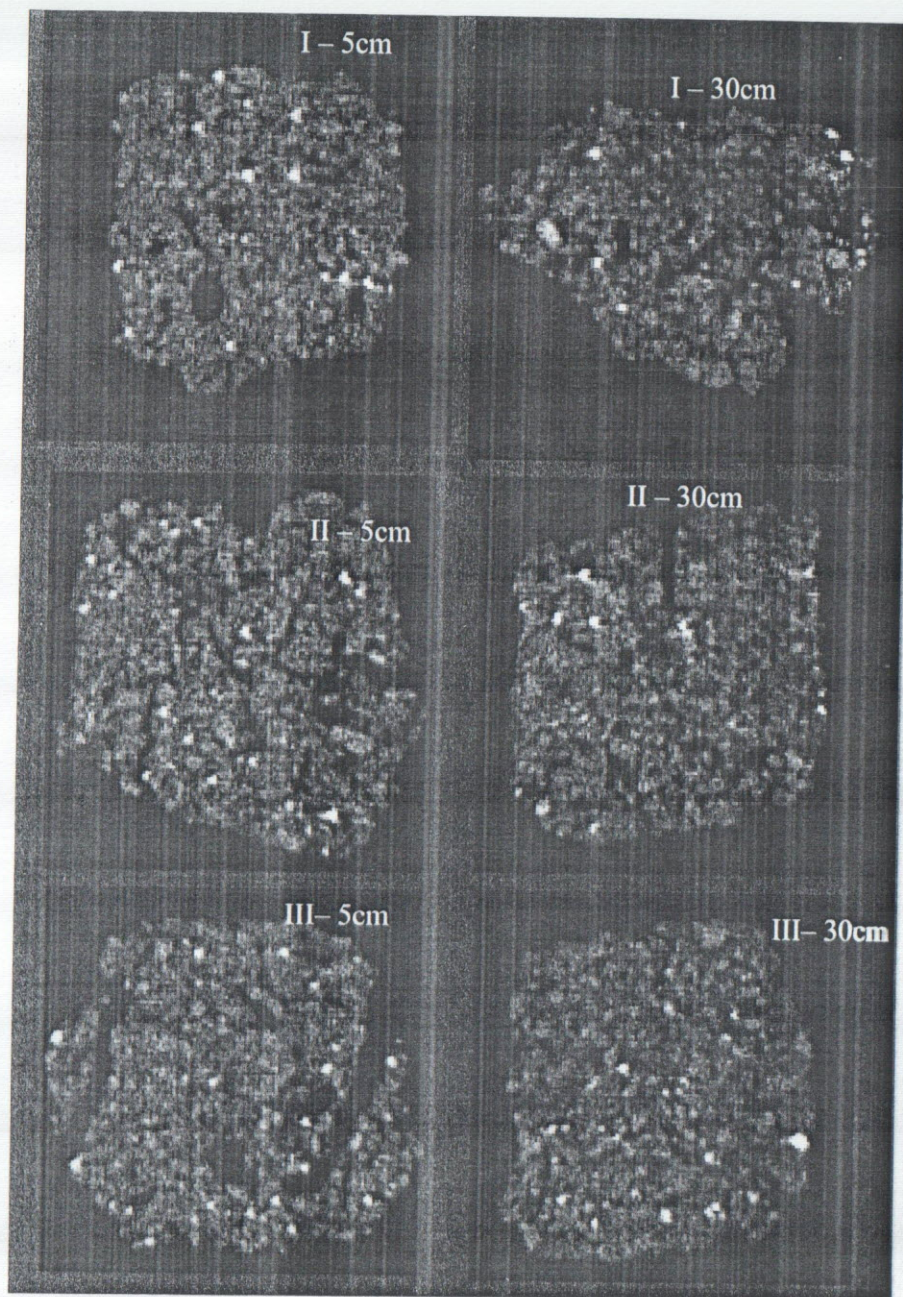


Figura 28. Imagens tomográficas com resolução micrométrica das amostras coletadas nas três áreas: degradada (I); recuperada com pousio (II) e recuperada com adubação (III) a 5 e 30 cm de profundidade.

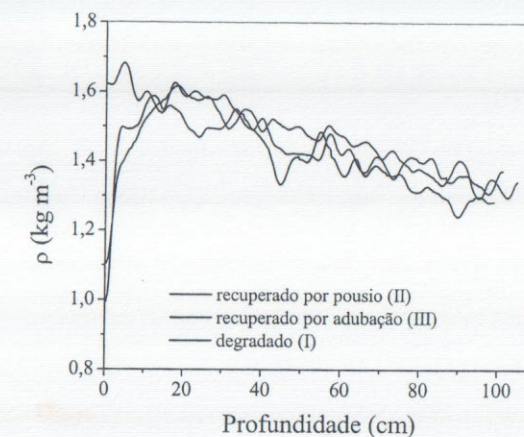


Figura 29. Perfis de densidades das três parcelas estudadas.

Obtenção da curva de retenção de água no solo

O tomógrafo portátil de 3ª geração possibilitou desenvolver uma nova metodologia para a determinação da curva de retenção da água no solo. Com este método, é possível determinar a curva completa, desde seco até a saturação, em apenas 4 horas de experimento. A metodologia tradicional, com uso da panela de Richards e mesa de tensão, pode levar mais de um mês para se obter 5 ou 6 pontos da curva, ensaiando solos de textura mais fina.

O tempo de varredura de 4 minutos permite, em solos argilosos, acompanhar com tomografias o processo de infiltração da água no solo ao longo do perfil de uma coluna de solo estruturado. A umidade em função do tempo e da profundidade é medida através de duas seqüências repetidas de tomografias ao longo da amostra: a primeira com a amostra seca em estufa e a segunda durante o processo de infiltração provocado por uma carga hidráulica constante no topo da coluna de solo. Além disso, monitora-se a taxa de infiltração durante a segunda seqüência de varreduras. Com os dados de umidade e taxa de infiltração, aplica-se a solução numérica da equação de Richards para determinar os parâmetros do modelo de ROSSI e NIMMO (1994), que determina a curva de retenção desde o solo seco até a saturação.

Na direção z do fluxo vertical da água, a solução numérica da equação de Richards parte da forma dada pela Eq. 4.3-8 com as seguintes condições de contorno: $h=h_0$, $z=0$, $t>0$.

$$q|_{z_b} = \left[k \frac{\partial h}{\partial z} + k \right]_{z_b} = k|_{z_b}, \text{ para } \frac{\partial h}{\partial z}|_{z_b} = 0 \quad [9]$$

onde h_0 é a sucção no topo da coluna, igual à altura da coluna d'água acima do solo tomada com sinal negativo; $q|_{z_b}$ é a densidade de fluxo descendente na base da coluna (z_b). A condição de contorno define drenagem livre. As condições iniciais foram representadas pelas umidades antes da aplicação da água. A equação de Richards foi resolvida pelo método de diferenças finitas com aproximação de conservação de massa no termo da umidade (CELIA et al., 1990). A aproximação dos pontos internos é feita através da seguinte relação:

$$c_i^{(s-1)} \frac{h_i^{(s)} - h_i^{(s-1)}}{\Delta t^n} + \frac{\theta_i^{(s-1)} - \theta_i^n}{\Delta t^n} = -\frac{\omega}{(\Delta z)^2} \left[k_{i+1/2}^{(s-1)} (h_{i+1}^{(s)} - h_i^{(s)} + \Delta z) - k_{i-1/2}^{(s-1)} (h_i^{(s)} - h_{i-1}^{(s)} + \Delta z) \right] - \frac{1-\omega}{(\Delta z)^2} \left[k_{i+1/2}^n (h_{i+1}^n - h_i^n + \Delta z) - k_{i-1/2}^n (h_i^n - h_{i-1}^n + \Delta z) \right] \quad [10]$$

onde o subscrito i denota os pontos internos z_i , $i=0,1,2,\dots,N$, $z_0=0$, $z_N=z_b$, $\Delta z=z_{i+1}-z_i$; nos cálculos foi adotado $N=100$, s é o número de iterações para prosseguir do nível-instante n para o nível-instante $n+1$; ω é o parâmetro de convergência, sendo utilizado o valor de $\omega=0,55$; c é a capacidade diferencial de água no solo ($c = \delta\theta/\delta h$). A condutividade hidráulica em pontos médios $k_{i+1/2}$ foi calculada como uma integral média utilizando-se aproximação discreta log-linear (SHCHERBAKOV et al., 1986). O critério de convergência utilizado para a iteração foi o seguinte:

$$\begin{cases} \max |h^{(s)} - h^{(s-1)}| < \varepsilon_1, & h^{(s)} < 10 \\ \max |1 - h^{(s)} / h^{(s-1)}| < \varepsilon_2, & h^{(s)} \geq 10 \end{cases} \quad [11]$$

onde ε_1 e ε_2 são 0,1 e 0,001, respectivamente. O passo na escala de tempo varia da seguinte maneira: se o número de iterações for maior que 7, o passo decresce 1,2 vezes; se o número de iterações for maior que 3, o passo aumenta 1,05 vezes, mas não excede 0,001 dia (1,44 minutos).

Descrição do modelo "retenção de água-condutividade hidráulica"

Devido à amostra estar seca no início do experimento, o tradicional modelo retenção de água-condutividade hidráulica de Genuchten (1980) não pode ser utilizado. Assim, utilizou-se o modelo proposto por Rossi e

Nimmo (1994), que é uma extensão do modelo de Campbell (1974) numa faixa de umidade entre a saturação e solo seco.

O modelo de retenção da água é descrito por:

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \begin{cases} \theta_I = 1 - C \left(\frac{h}{h_0} \right)^2, & 0 \leq h \leq h_I \\ \theta_{II} = \left(\frac{h_0}{h} \right)^\lambda, & h_I \leq h \leq h_J \\ \theta_{III} = \alpha \ln \frac{h_D}{h}, & h_J \leq h \leq h_D \end{cases} \quad [12]$$

h_0 e λ são dois parâmetros do modelo, h_D é a sucção do solo seco, $h_D = 5 \times 10^7$ cm e θ_s é a umidade saturada. Os parâmetros h_I , h_J , C e α são determinados analiticamente, como funções de h_0 e λ , através das igualdades da Eq. 4.3-12, que garantem a continuidade do modelo junção de dois parâmetros, desenvolvido por Rossi e Nimmo (1994).

$$\begin{aligned} \theta_I(h_I) &= \theta_{II}(h_I) & \frac{\partial \theta_I}{\partial h}(h_I) &= \frac{\partial \theta_{II}}{\partial h}(h_I) \\ \theta_{II}(h_J) &= \theta_{III}(h_J) & \frac{\partial \theta_{II}}{\partial h}(h_J) &= \frac{\partial \theta_{III}}{\partial h}(h_J) \end{aligned} \quad [13]$$

Aplicando-se as igualdades da Eq. 4.3-12, determinam-se os parâmetros:

$$h_I = h_0 \left(\frac{2+\lambda}{2} \right)^{1/\lambda}; h_J = h_D \exp \left(-\frac{1}{\lambda} \right); C = \frac{\left[1 - \left(\frac{h_0}{h_I} \right)^\lambda \right]}{\left(\frac{h_I}{h_0} \right)^2}; \alpha = \lambda \left(\frac{h_0}{h_J} \right)^\lambda \quad [14]$$

A condutividade hidráulica neste modelo pode ser expressa como uma função dos mesmos dois parâmetros h_0 e λ , tal como a retenção da água:

$$k = K_s \sqrt{\frac{\theta}{\theta_s}} \frac{I^2(\theta)}{I^2(\theta_s)} \quad [15]$$

onde K_s é a condutividade hidráulica saturada,

$$\begin{aligned} I(\theta) &= I_{III}(\theta) \quad 0 \leq \theta \leq \theta_J \\ I(\theta) &= I_{II}(\theta) \quad \theta_J \leq \theta \leq \theta_I \\ I(\theta) &= I_I(\theta) \quad \theta_I \leq \theta \leq \theta_s \end{aligned} \quad [16]$$

e

$$\begin{aligned} I_{III} &= \frac{\alpha}{h_D} \left[\exp\left(\frac{\theta}{\alpha\theta_s}\right) \right] \\ I_{II} &= I_{III}(\theta_J) + \frac{1}{h_0} \frac{\lambda}{\lambda+1} \left[\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{\frac{\lambda+1}{\lambda}} - \left(\frac{\theta_J}{\theta_s}\right)^{\frac{\lambda+1}{\lambda}} \right] \\ I_I &= I_{II}(\theta_I) + \frac{2\sqrt{C}}{h_0} \left[\left(1 - \frac{\theta_I}{\theta_s}\right)^{1/2} - \left(1 - \frac{\theta}{\theta_s}\right)^{1/2} \right] \\ \theta_I &= \theta(h_I), \quad \theta_J = \theta(h_J) \end{aligned} \quad [17]$$

Devido à condutividade hidráulica de saturação não ser conhecida nos experimentos, ela tem que ser calculada a partir dos dados experimentais com h_0 e λ . Assume-se o valor de umidade de saturação calculando-se a média no topo do perfil.

Para estimar os parâmetros K_s , h_0 e λ , aplica-se uma versão modificada do algoritmo Marquardt publicada por Genuchten (1980). O erro quadrático médio $RMSE^2$, entre os N parâmetros observados (θ_{obs} e I_{obs}) e estimados (θ_{est} e I_{est}), é minimizado tanto para a umidade como para a infiltração. Para permitir observações da infiltração acumulada, aproximadamente com o mesmo peso das medidas de umidade, os dados de umidade foram multiplicados por $10(N_{obs} - N_C)/N_C$, onde N_{obs} é o número total de observações englobando as medidas de infiltração e umidade, e N_C é o número de camadas onde foram medidas as umidades. A umidade média nas camadas é calculada antes de se determinar o RMSE. Para executar este modelo, é necessário fornecer estimativas iniciais de h_0 , λ , K_s , θ_s e h_D .

$$^2_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\theta_{obs} - \theta_{est})^2}{N}}$$

Resultados da validação do modelo

As determinações dos perfis de umidade, durante o processo de infiltração, foram feitas com um tomógrafo de feixe em leque (NAIME, 2001). O tomógrafo (Figura 30) permite analisar amostras com até 40 mm na seção transversal e até 20 cm de altura. As amostras de solo estruturado foram esculpidas a partir de blocos (Figura 31).

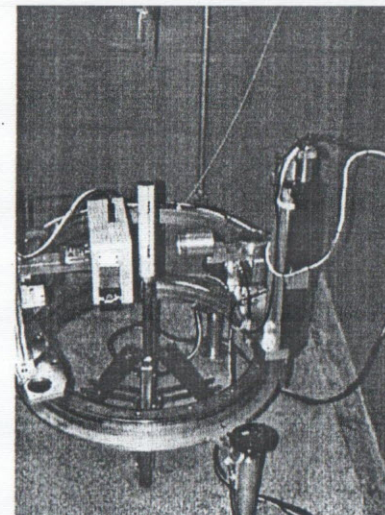


Figura 30. Tomógrafo de terceira geração analisando amostra de solo dentro de um tubo de PVC.

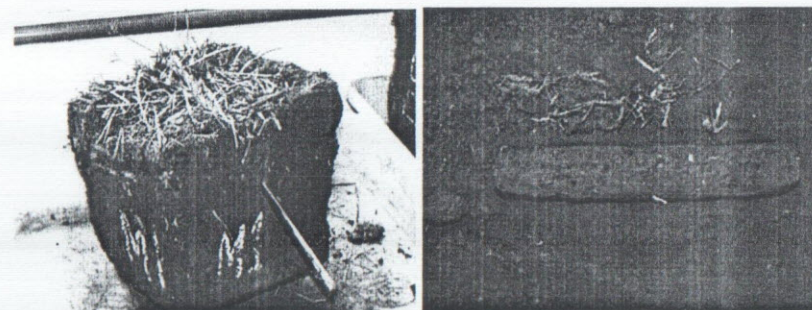


Figura 31. Preparação de amostras cilíndricas para análise com tomografia.

O solo utilizado neste trabalho é um Latossolo Vermelho distroférrico, sob pastagem, da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP. A classificação e a curva de retenção da água no solo, pelo método da

panela de Richards, foram obtidas por Primavesi et al. (1999). A granulometria do solo é 45% de argila, 15% de silte e 42% de areia.

A fração argila desse solo é basicamente constituída de caulinita e possui, portanto, capacidade de retenção de água relativamente baixa (REICHARDT, 1996). As amostras foram secadas em estufa, parafinadas e introduzidas em tubos de PVC com 40 mm de diâmetro e 20 cm de altura. Na extremidade superior do tubo é reservado pelo menos 10 mm de altura para o preenchimento com água.

Nesta análise foram feitas 31 tomografias espaçadas em 5 mm no sentido vertical, totalizando 150 mm de altura. Após a determinação dos valores médios de umidade de cada tomografia e dos valores de infiltração, foi executado o programa de ajuste dos parâmetros h_0 , λ e K_s através do algoritmo Marquardt.

A Tabela 4 mostra os valores de entrada e saída do programa. Observam-se também na Tabela os parâmetros do modelo Rossi e Nimmo (1994) calculados a partir dos resultados do programa. Os parâmetros de Rossi e Nimmo são utilizados para determinar a curva de retenção da água no solo e também $k(\theta)$ e $D(\theta)$.

Tabela 4. Parâmetros de entrada e saída do algoritmo Marquardt e parâmetros do modelo Rossi e Nimmo (1994). θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e h (cm).

Marquardt					Rossi e Nimmo					
Entrada		Saída								
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_l	h_j	C	α	$\theta(h_l)$	$\theta(h_j)$
0,45	$5 \cdot 10^{-7}$	42,42	0,102	0,157	69,09	2631,5	0,018	0,067	0,428	0,296

Os valores de infiltração estimados pelo modelo e os valores medidos são mostrados na Figura 32. A Tabela 5 mostra a correlação entre eles, as equações de ajuste da infiltração e densidade de fluxo, o r^2 e o RMSE da curva de infiltração.

Tabela 5. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos r^2 e RMSE.

Infiltração	r^2	I (cm)	r^2	RMSE	q (cm h^{-1})
medida		$2,19 t^{0,5}$		0,0013	$1,095 t^{-0,5}$
calculada	0,999	$2,04 t^{0,5}$	1	0,0248	$1,020 t^{-0,5}$

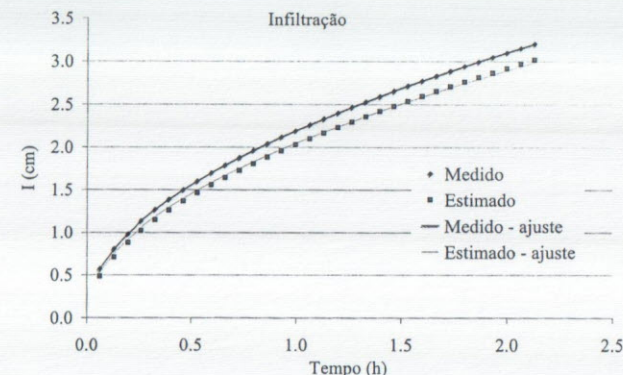


Figura 32. Resultados da infiltração medida e estimada e as funções ajustadas.

Na Figura 33a, apresenta-se a comparação entre os valores medidos e calculados do perfil de umidade da amostra, obtidos durante a primeira sequência de tomografias. Geralmente, a curva dos valores simulados apresenta queda mais acentuada que a medida devido a dois possíveis motivos: os modelos que utilizam a equação de Richards não consideram os fluxos preferenciais, causados pelo processo de preparação da amostra, que podem ocorrer na coluna; o segundo motivo pode ser de variações na massa específica global ao longo da coluna. A diminuição da densidade no sentido descendente provoca um ligeiro aumento da condutividade hidráulica e retenção de água nas seções próximas à base da coluna. Inclusive, esta pode ser a razão de a infiltração acumulada medida ser maior que a estimada.

A correspondência entre os dados medidos da retenção da água e da curva de retenção calculada com os parâmetros do modelo de Rossi-Nimmo é mostrada na Figura 33b. Os dados experimentais da curva de retenção para este solo foram obtidos por Primavesi et al. (1999), através do método da panela de Richards. A boa correspondência indica que o número de seções medidas e os tempos envolvidos no experimento produziram informações suficientes sobre a forma de frente de molhamento, que, por sua vez, indica a forma da curva de retenção.

Adicionalmente, utilizando-se as Eqs. 14, 15, 16, o modelo permite determinar a função condutividade hidráulica (Figura 34a). Determinada esta função, calcula-se a difusividade hidráulica em função da umidade (Figura 34b), por meio da Eq. 17. Da curva de retenção obtém-se $\delta h / \delta \theta$.

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta} \dots\dots\dots [18]$$

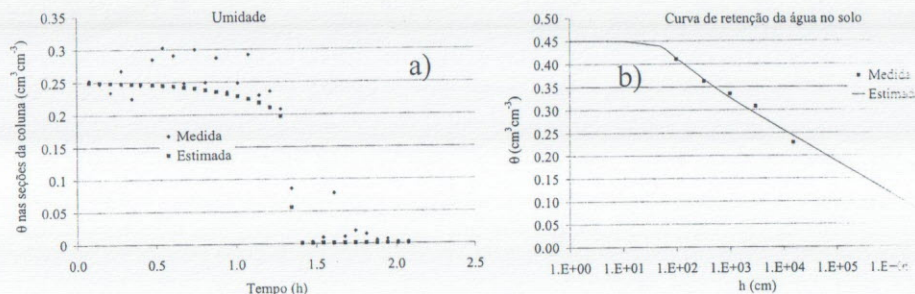


Figura 33. Amostra PC2. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

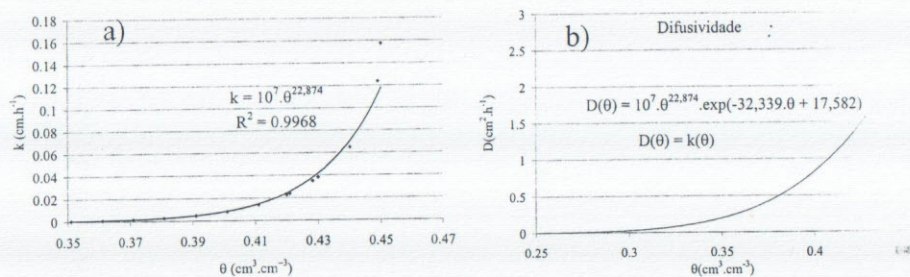


Figura 34. Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo.

A utilização do tomógrafo para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do solo, na configuração atual, está limitada a solos de textura fina. Em solos de textura grossa, a infiltração é muito mais rápida, o perfil satura antes do término da varredura tomográfica. Para vencer essa limitação, propomos a utilização de um sistema de medida de atenuação direta de raios gama, em que o tempo de medida em cada seção transversal será de, no máximo, 1 minuto.

Avaliação da ação de implementos agrícolas no solo, em Plantio Direto

Este trabalho foi realizado em parceria com o Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, liderado pelo Prof. Dr. Haroldo Carlos Fernandes e pelo Dr. Elton Fialho dos Reis, onde foi aplicada a

tomografia para avaliar o desempenho de implementos de semeadura em plantio direto sobre a palha. É consensual que o sucesso no estabelecimento de uma cultura depende do ambiente do solo ser adequado à germinação da semente, à emergência e desenvolvimento da planta. Assim posto, a operação de semeadura reveste-se de grande importância, pois possíveis erros durante o plantio só poderão ser percebidos após a emergência da planta.

O plantio direto pode ser definido como o processo de semeadura em solo não-revolvido, no qual a semente é colocada em sulcos ou covas, com largura e profundidade suficientes para a adequada abertura e o contato da semente com o solo. Trata-se de um processo de semeadura com revolvimento do solo somente ao longo da linha de plantio ou na cova. A palhada da colheita anterior é preservada para manter o solo coberto, reincorporar matéria orgânica e para protegê-lo contra o secamento e do impacto de gotas d'água; o que traria benefícios ao controle da erosão, de plantas invasoras, com menos variação térmica e hídrica do solo (MUZILLI, 1991; RIBEIRO, 1998).

O sistema de plantio direto requer semeadoras-adubadoras que cortem a palhada e distribuam uniformemente as sementes, tendo como meta principal perturbar o mínimo possível a estrutura e a biota do solo. Esse particular requer da semeadora algumas características próprias quanto à eficiência dos mecanismos rompedores do solo, visando ao corte e fluxo da palhada, à abertura do sulco e à adequada colocação da semente, fatores que garantiriam o sucesso da exploração. Por isso, semeadoras-adubadoras de plantio direto são mais pesadas que as convencionais (LANDERS, 1995; GASSEN e GASSEN, 1996; REIS, 2000; VIEIRA e REIS, 2001).

Segundo Casão Júnior (1998), as semeadoras-adubadoras para plantio direto têm apresentado problemas de desempenho em solos com altos teores de argila. A resistência à penetração dos componentes rompedores, associada à retenção de água, tem exigido constante adaptação das máquinas às realidades regionais. Como consequência, tem sido frequente os problemas com o corte irregular da vegetação, embuchamentos, abertura inapropriada do sulco, aderência do solo aos componentes, profundidade de semeadura não uniforme, cobertura irregular e contato inadequado do solo sobre as sementes, afetando a uniformidade de emergência das plantas.

De acordo com Nars e Selles (1995), a emergência de plântulas e a velocidade de emergência foram influenciadas pela densidade do solo e

tamanho de agregados do leito de semeadura. Aumentos na densidade do solo e no tamanho de agregados diminuíram e atrasaram a emergência. Em geral, a mais completa e adiantada germinação foi encontrada em leitos com densidade do solo de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ ou menor, com agregados de DMG inferiores ou iguais a 4 mm, ou com resistência à penetração menor que 1,4 MPa. A densidade afetou a emergência devido às mudanças no volume e à continuidade de poros no leito, enquanto o efeito do tamanho de agregados causado pelas mudanças no comprimento do caminho da semente para a superfície do solo.

O estudo da relação solo-semente requer metodologias apropriadas, que possam melhor caracterizar a camada de solo próximo à semente. Os métodos tradicionais para determinação da relação solo-semente e da densidade próxima à semente são empíricos e não possuem sensibilidade suficiente como o método da tomografia computadorizada.

Neste trabalho, objetivou-se estudar a utilização da tomografia computadorizada para determinação das densidades mínima, média e máxima do solo na região da semente, logo após o plantio da cultura do milho, com diferentes mecanismos rompedores do solo e tipos de rodas compactadoras, em três teores de água do solo.

O trabalho foi desenvolvido durante a estação de inverno do ano de 2002, numa área experimental da Universidade Federal de Viçosa, no município de Coimbra, MG, em altitude de 716 m, longitude de $42^\circ 48' \text{ S}$ e latitude de $20^\circ 51' \text{ W(Gr)}$. Os ensaios foram realizados em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVA), classe de solo muito utilizada no Brasil para a cultura do milho.

Utilizou-se o experimento no esquema de parcelas subsubdivididas, em que elas constituíram os teores de água do solo (0,22; 0,28; e $0,34 \text{ g g}^{-1}$). As subparcelas os tipos de hastes sulcadoras (facão e discos duplos) e as subsubparcelas o tipo de elementos compactadores (borracha e lisa) (Figura 35), no delineamento em blocos casualizados, com três repetições, tendo-se no total 36 parcelas. As amostras foram retiradas no dia do plantio e quatro dias após a emergência da primeira plântula. Cada unidade experimental ocupou uma área de 60 m^2 , sendo 30 m de comprimento e 2 m de largura.

Os ensaios foram realizados em uma única velocidade de deslocamento ($V = 4,7 \text{ km h}^{-1}$). A profundidade média de semeadura foi de 3,9 cm.

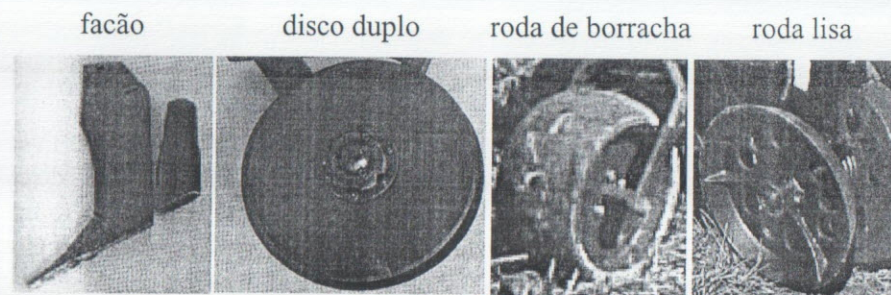


Figura 35. Mecanismos de abertura do sulco e elementos compactadores (FERNANDES et al., 2005).

As densidades do solo na região da semente foram determinadas utilizando-se um tomógrafo de terceira geração (NAIME, 2001). As amostras de solo foram secadas em estufa a 60°C , por 24 horas, antes da obtenção das imagens tomográficas. Trabalhou-se com 16 planos horizontais, em que o feixe em leque atravessou a amostra de 5 em 5 mm até a profundidade de 80 mm.

O valor do coeficiente de atenuação em massa (μ_m), obtido experimentalmente para o solo estudado, foi de $0,308 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. As Figuras 36, 37 e 38 apresentam algumas tomografias das amostras de solo na região da semente submetido a diferentes mecanismos rompedores do solo e tipos de rodas compactadoras, em três teores de água do solo.

Além da reconstrução da imagem, o programa do tomógrafo permite determinar parâmetros estatísticos como média, desvio-padrão e coeficiente de variação das unidades tomográficas em áreas selecionadas na imagem. As tomografias foram realizadas em 240 amostras cilíndricas de solo, que deveriam conter as sementes; cada cilindro tinha 40 mm de diâmetro e 80 mm de altura. Em cada amostra foram realizadas 15 tomografias espaçadas em 5 mm ao longo da seção transversal. Na localização das áreas avaliadas, utilizou-se o pixel com dimensões definidas ($3,45 \text{ mm}^2$).

Cada unidade experimental foi dividida em seis subunidades, devido às limitações do tomógrafo ao diâmetro da amostra. Dentro das tomografias, foi demarcado um quadrado de 25×25 pixels, inscrito na subunidade, correspondendo a uma área de 625 pixels. Como cada pixel corresponde a uma área de $0,318 \text{ mm}^2$ ($0,564 \text{ mm} \times 0,564 \text{ mm}$), a área total correspondente a cada tomografia foi de $198,75 \text{ mm}^2$, dentro da qual

foram determinados os valores mínimo, médio e máximo de densidade.

Os resultados foram submetidos às análises de variância e regressão, conforme os teores de água do solo, elementos rompedores e elementos compactadores, utilizando-se o programa SAEG versão 9.0.

Conforme pode ser observado na Tabela 6, o maior teor de água apresentou o maior valor de densidade mínima e o mecanismo tipo disco apresentou o maior valor de densidade mínima. Essas diferenças foram atribuídas à forma de revolvimento do solo pelo disco duplo, condicionando um menor diâmetro médio de partículas.

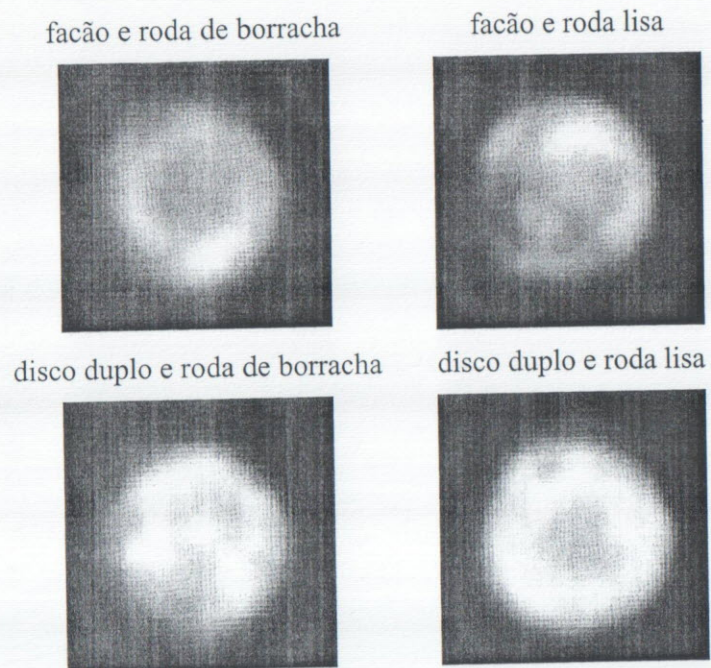


Figura 36. Tomografias ilustrativas na região da semente com teor de água de $0,22 \text{ g g}^{-1}$.

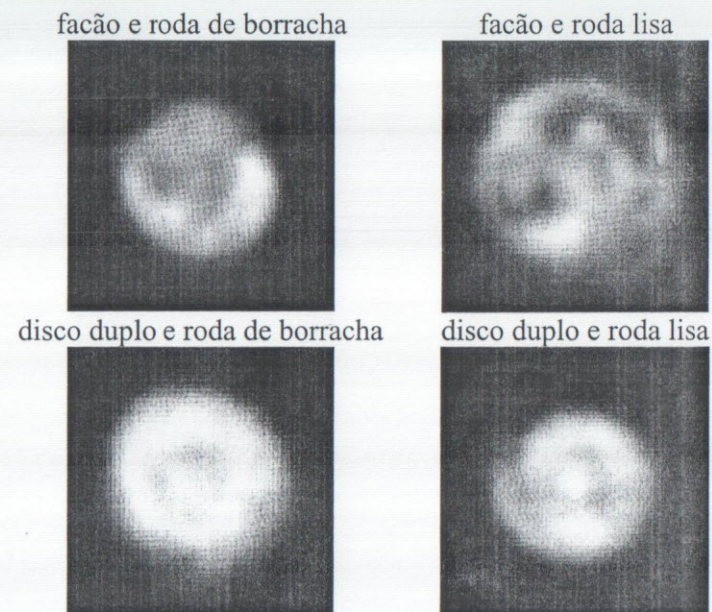


Figura 37. Tomografias ilustrativas na região da semente com teor de água de $0,28 \text{ g g}^{-1}$.

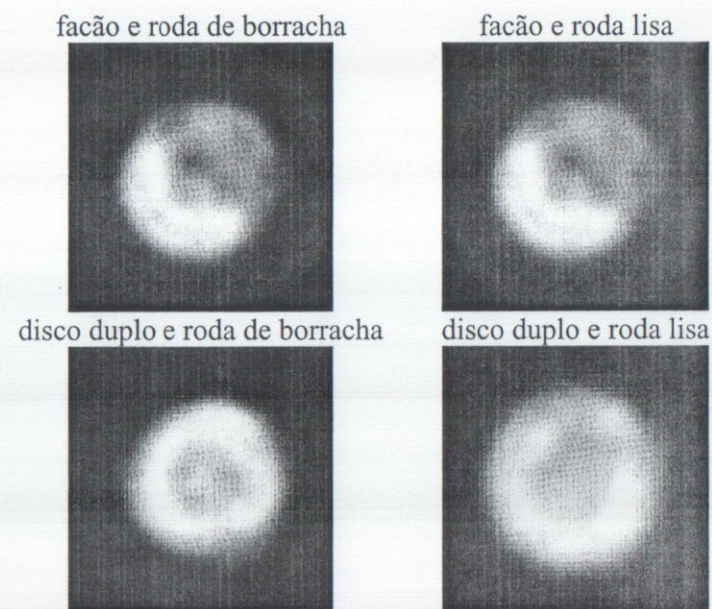


Figura 38. Tomografias ilustrativas na região da semente com teor de água de $0,34 \text{ g g}^{-1}$.

Tabela 6. Valores médios de densidade mínima (g cm^{-3}) medida pelo tomógrafo nos tratamentos estudados na região da semente.

Umidade do solo (kg kg^{-1})	Roda de borracha			Roda lisa			Média
	facão	disco	média	facão	disco	média	
0,22	0,61	0,69	0,66	0,50	0,71	0,60	0,63
0,28	0,49	0,58	0,56	0,39	0,64	0,51	0,52
0,34	0,79	0,50	0,70	0,65	0,62	0,63	0,64
média	0,63	0,59		0,51	0,66		0,60

Na Tabela 7, são apresentados os valores de densidade média medida pelo tomógrafo nos diferentes tratamentos. O menor teor de água do solo apresentou maior valor de densidade, o que possivelmente ocorreu devido ao maior diâmetro médio ponderado apresentado neste teor de água do solo. A roda de borracha apresentou o menor valor de densidade, o que possivelmente ocorreu devido à aplicação de menor pressão sobre a linha de semeadura. Stefannutti et al. (1980), trabalhando com diferentes níveis de cargas em rodas compactadoras, encontraram alteração significativa na densidade do solo.

Tabela 7. Valores médios de densidade média (g cm^{-3}) medida pelo tomógrafo nos tratamentos estudados na região da semente.

Umidade do solo (kg kg^{-1})	Roda de borracha			Roda lisa			Média
	facão	disco	média	facão	disco	média	
0,22	0,98	1,15	1,07	1,06	1,08	1,07	1,07
0,28	0,88	1,17	1,03	0,96	1,14	1,05	1,04
0,34	1,06	1,06	1,05	1,06	1,04	1,05	1,05
média	0,97	1,13		1,03	1,09		1,05

Independentemente do teor de água do solo e do elemento de compactação, o mecanismo de abertura do sulco tipo disco liso apresentou maior valor de densidade média ($1,11 \text{ g cm}^{-3}$) que o facão ($1,00 \text{ g cm}^{-3}$), como mostrado na Tabela 6. Isso ocorreu em razão, provavelmente, do espelhamento lateral causado pelo disco ao ser introduzido no solo, o que não acontece com o facão, que rompe o solo.

Mesmo apresentando maiores valores de densidade nos mecanismos tipo disco duplo, o que possivelmente dificultou a passagem de água até a semente, não houve interferência no índice de velocidade de emergência.

Já na percentagem de emergência houve interferência significativa dos sulcadores, apresentando menor emergência no mecanismo tipo disco duplo, que teve maior valor de densidade do solo; resultados semelhantes foram encontrados por Nars e Selles (1995). Já Wilkins et al. (1993), testando vários tipos de sulcadores, obtiveram valores de densidade superiores no sulcador tipo disco duplo. O mecanismo tipo facão é utilizado para romper camadas compactadas na superfície do solo (PORTELLA, 1997; REIS et al., 2003). Os resultados indicaram que o facão reduziu os valores de densidade do solo de $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ para $1,00 \text{ g cm}^{-3}$.

Verifica-se também na Tabela 8, que não houve interferência significativa do teor de água no solo e dos elementos compactadores sobre os valores de densidade máxima medida pelo tomógrafo. O menor teor de água do solo apresentou maior valor de densidade, como mostrado na Tabela 6, o que possivelmente ocorreu devido ao fato de o solo estar mais seco e, com isso, apresentar maior força de coesão entre as partículas, dificultando, assim, a formação de macroporos. O elemento compactador tipo roda lisa apresentou maior valor de densidade por causa do seu formato, que aplica a carga na lateral do sulco. Hummel et al. (1981), trabalhando com diferentes tipos de mecanismos compactadores, afirmaram que o formato do elemento compactador tem influência sobre o meio ambiente do solo próximo à semente.

Tabela 8. Valores médios de densidade máxima (g cm^{-3}) medida pelo tomógrafo nos tratamentos estudados na região da semente.

Umidade do solo (g g^{-1})	Roda de			Roda lisa			Média
	facão	disco	média	facão	disco	média	
0,22	1,33	1,34	1,34	1,43	1,41	1,42	1,38
0,28	1,17	1,43	1,30	1,27	1,47	1,37	1,34
0,34	1,28	1,38	1,33	1,32	1,40	1,36	1,34
média	1,26	1,38		1,34	1,43		1,35

O mecanismo de abertura do sulco tipo disco duplo apresentou valores de densidade ($1,41 \text{ g cm}^{-3}$) significativamente superiores ao mecanismo tipo facão ($1,30 \text{ g cm}^{-3}$). É provável que o primeiro mecanismo tenha causado espelhamento na lateral do sulco, o que influenciou os valores de densidade do solo. O maior valor de densidade do solo encontrado no disco duplo dificultou a passagem de água até a semente, interferindo na percentagem de germinação. Resultados semelhantes foram encontrados

por Righes et al. (1984), indicando que os sulcadores tipo discos duplos aumentam a compactação no fundo do sulco quando comparados com o do tipo haste, embora mobilizem menor quantidade de solo. Já Iqbal et al. (1998) observaram que, à medida que aumenta o teor de água do solo, aumenta também a compactação lateral dos sulcos.

O valor de densidade do solo medido pelo método do anel volumétrico antes do plantio foi de $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ e pelo método da tomografia com o mecanismo tipo disco duplo, de $1,41 \text{ g cm}^{-3}$. Esse aumento de densidade deve ter sido ocasionado pela ação da ferramenta no solo.

Encrostamento superficial

A crosta é uma camada adensada formada na superfície do solo e, quando seca, torna-se mais dura que as camadas abaixo dela (CURI et al., 1993), afetando, entre outros, processos importantes como a emergência de plântulas, a infiltração da água, o escoamento superficial, a erosão e a troca de gases entre atmosfera e solo (MOORE e SINGER, 1990; RAWLS et al. 1990; SLATTERY e BRIAN, 1994; FATTAH e UPADHYAYA, 1996; MORINA e VAN WINKEL, 1996; CHENG et al. 1980).

A formação dessa crosta, ou encrostamento do solo, embora não haja um consenso geral, tem sido atribuído a fatores externos responsáveis pelo suprimento da energia necessária ao processo, e a fatores internos, ligados às características inerentes do solo, como textura e estrutura.

As duas principais fontes de energia são: o impacto das gotas de chuva e a radiação do sol. A primeira fonte produz a modificação da estrutura do solo, desagregando-o e transportando as partículas finas para as camadas inferiores e acomodando-as nos macroporos. A energia solar provoca a secagem da superfície, ocasionando a sua compactação e endurecimento. Essa camada superficial é mais dura e impermeável que as demais.

Dada a importância dessa camada superficial, Santos (2000) desenvolveu o estudo do encrostamento, em função dos ciclos de molhamento e secagem. Vários métodos foram utilizados para esse estudo, mas será focada aqui a Tomografia Computadorizada, dado o objeto desse capítulo.

Os resultados apresentados nessa seção foram extraídos parcialmente desse estudo (SANTOS, 2000). Nesse experimento foi selecionada uma área situada na Estação Experimental pertencente à Universidade Federal

de Viçosa, localizada em Coimbra/MG. O solo é um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico. Vinte amostras de 15 kg cada foram coletadas, na profundidade de 0 a 150 mm.

O solo foi secado ao ar, passado em peneira de 2 mm de malha, homogeneizado e classificado. A textura medida foi de 6% de areia grossa, 3% de areia fina, 15% de silte e 76% de argila. A condutividade hidráulica foi de $1,44 \text{ cm h}^{-1}$.

O experimento teve duração de 72 dias e foi instalado em casa de vegetação. Os tratamentos constituíram-se de cinco de intervalos para reposição de água evaporada, sendo 2, 3, 4, 6 e 8 dias e, respectivamente, 36, 24, 18, 12 e 9 ciclos de umedecimento/secagem.

Foram feitas quatro repetições. As amostras constavam de cilindros de PVC, com 75 mm de diâmetro e 90 de altura, preenchidos com o solo já descrito até 70 mm de altura. Os 20 mm superficiais foram deixados vazios para aplicação da água. Para conter o solo, os cilindros eram fechados na parte inferior com uma tela plástica e um disco de tecido de algodão.

A aplicação da água foi feita por gotejamento, em volume suficiente para atingir a capacidade de campo. Antes de se iniciar o ensaio, os cilindros eram deixados em repouso por 24 h, cobertos com filme plástico, para uniformização da distribuição da água.

Após isso, os cilindros eram descobertos para permitir a evaporação e, todos os dias às 17h, a água era repostada até a capacidade de campo. Essa reposição era efetuada através de uma peneira colocada próximo à superfície do solo, para evitar que esse procedimento fosse um fator de formação da crosta. Isso porque o objetivo desse estudo era avaliar somente os ciclos de molhamento/secagem como fatores de encrostamento.

Depois de completado o período, as amostras eram deixadas para secar ao ar livre e à sombra, até atingirem a umidade residual. A umidade era acompanhada por gravimetria.

As imagens tomográficas, efetuadas em planos horizontais nas alturas ilustradas na Figura 39, foram obtidas em laboratório e utilizaram-se o tomógrafo portátil e o microtomógrafo, já descritos. As medidas na resolução milimétrica foram feitas explorando-se áreas de interesse (AI) das imagens, conforme ilustrado na Figura 39, sendo a primeira um quadrado de 3100 mm^2 , aproximadamente circunscrito internamente ao cilindro de PVC.

A segunda AI é um quadrado de 340 mm^2 , centrado no primeiro quadrado, e a terceira um quadrado também de 340 mm^2 colocado em posições das imagens que não apresentassem fissuras visíveis a olho nu.

O programa de reconstrução e apresentação das imagens permitiu, ainda, avaliações da densidade ao longo de seus cortes ou transeptos. Para a análise com o microtomógrafo, subamostras foram retiradas, após secagem em estufa a 70°C durante 24 h, com 15 mm de largura e 25 mm de altura.

A análise da densidade dessas amostras foi feita numa área total desde a superfície até 15 mm de profundidade, a partir da superfície, e em seis áreas menores idênticas, consecutivas e com 1 mm de altura cada, também partindo da superfície.

Amostras de campo indeformadas, que apresentavam selamento superficial, foram coletadas do mesmo local de amostragem do solo do experimento e submetidas à tomografia micrométrica.

Observando-se as imagens com resolução milimétrica, nota-se que nos tratamentos com reposição de água a cada dois, três, quatro e seis dias, desenvolveram-se fendas na profundidade de 10 mm.

Para ilustrar, o conjunto de imagens para a reposição a cada quatro dias é apresentado na Figura 40. Os demais conjuntos podem ser vistos na referência citada (SANTOS, 2000). As fendas mostraram-se menos evidentes na profundidade de 22,7 mm e não surgiram na profundidade de 35,4 mm.

Em solos cauliníticos, como os utilizados no trabalho de Santos (2000), o desenvolvimento de fendas foi atribuído à reorganização dos agregados, como resultante do umedecimento e secagem, gerando umedecimento diferencial do solo e aprisionamento de ar, tornando-se maior nos ciclos de quatro dias.

A resposta da densidade em função do intervalo de reposição é apresentada nas Figuras 41 a 43.

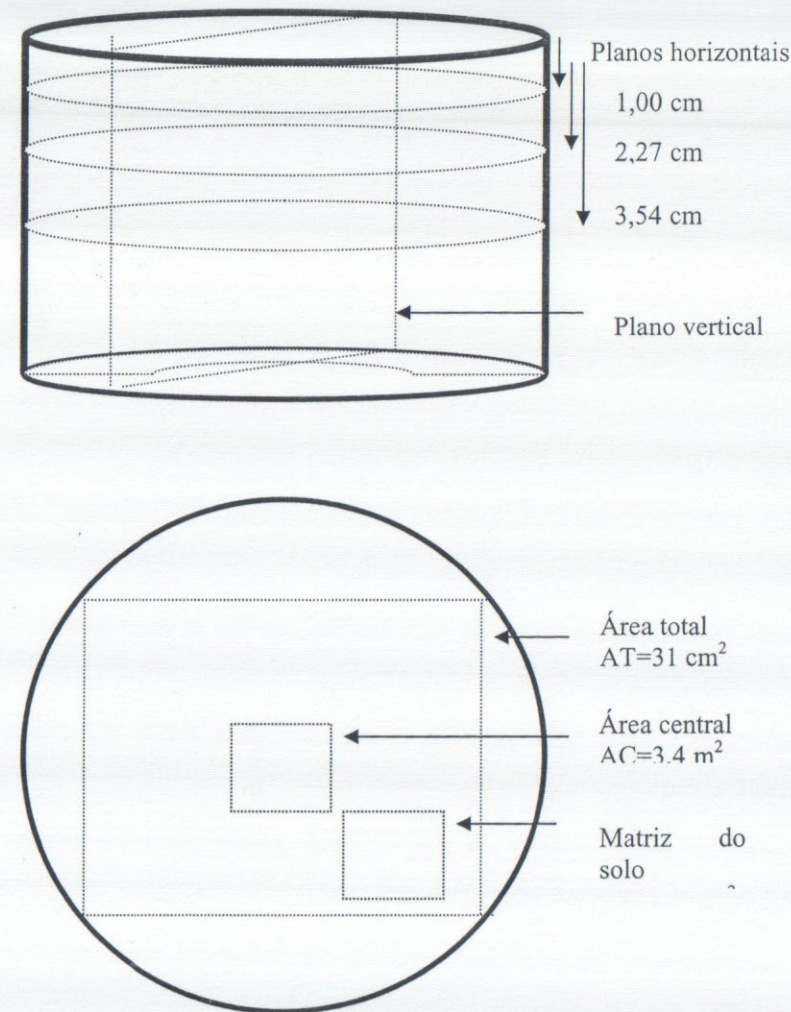
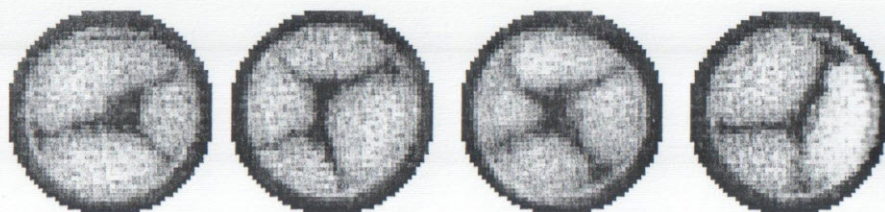
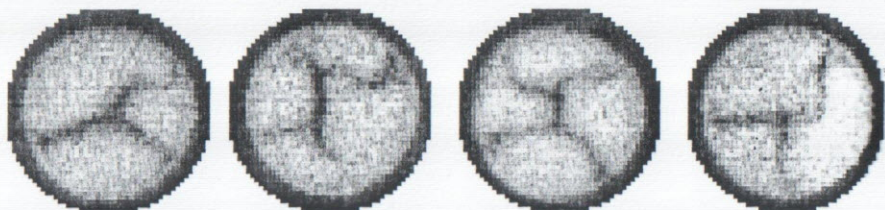


Figura 39. Localização das áreas exploradas nas imagens tomográficas, para medida das densidades dos solos submetidos a ciclos de umedecimento/secagem. (SANTOS, 2000).

Profundidade 1,00 cm



Profundidade 2,27 cm



Profundidade 3,54 cm

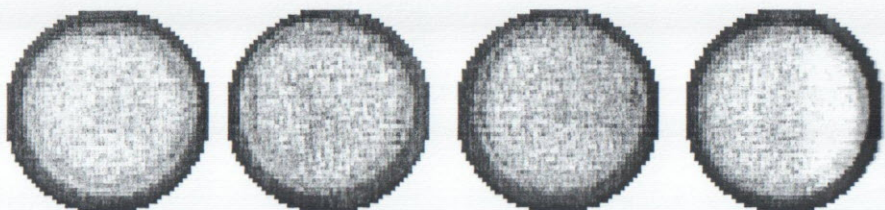
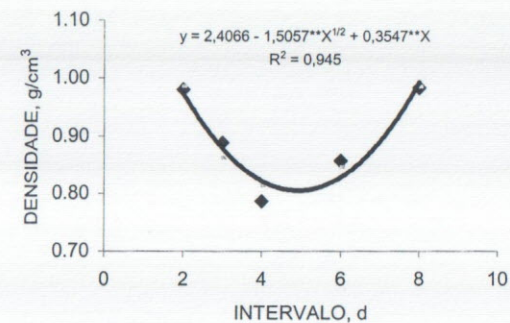
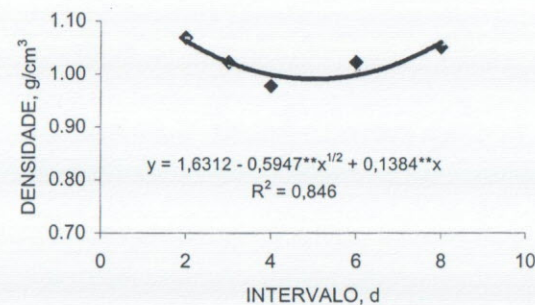


Figura 40. Imagens tomográficas de resolução milimétrica das amostras referentes aos intervalos de reposição de água de quatro dias, adquiridas nas profundidades de 1,00 mm, 2,27 mm e 3,54 mm. (SANTOS, 2000).

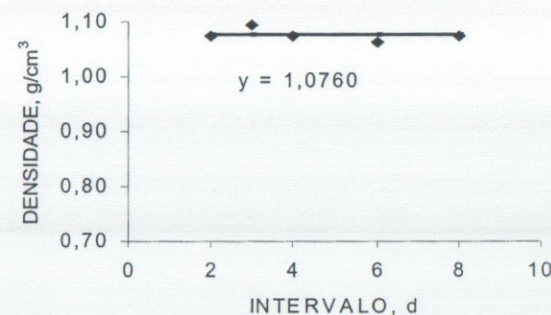
Profundidade média = 1,00 cm



Profundidade média = 2,27 cm

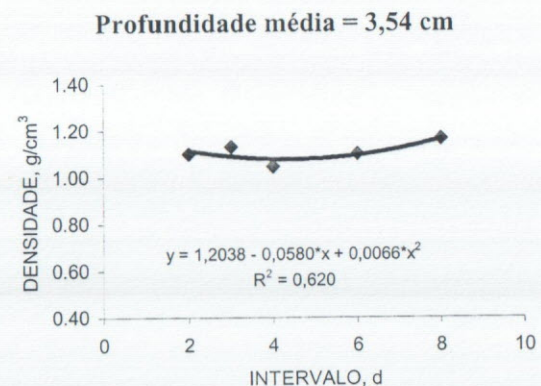
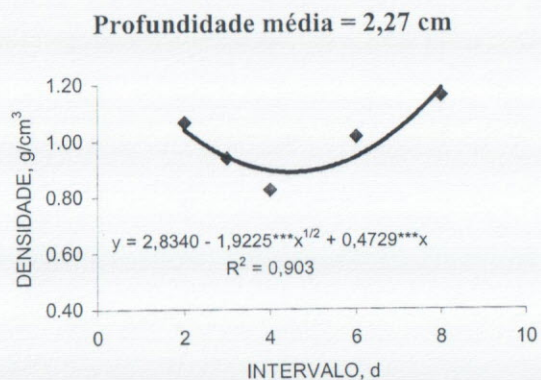
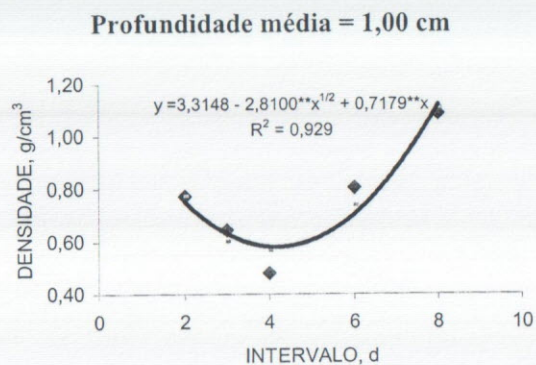


Profundidade média = 3,54 cm



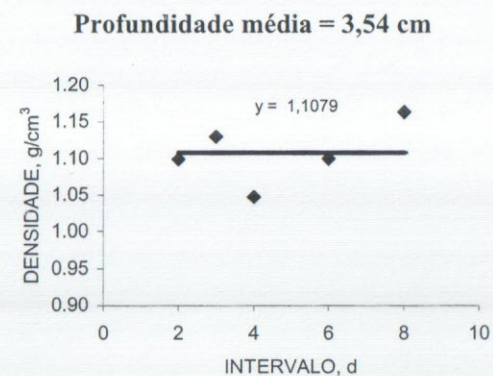
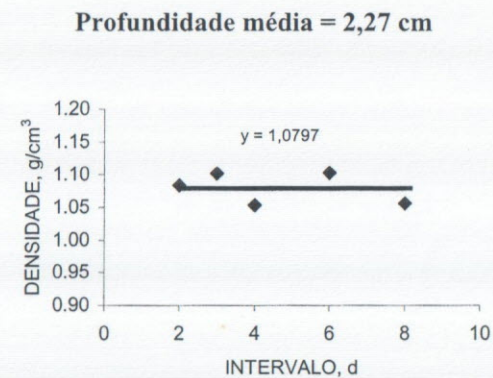
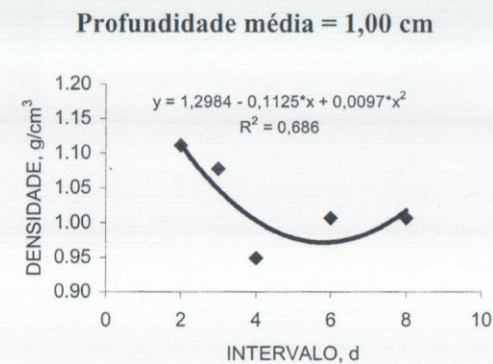
******: Significativo a 1% pelo teste *t*.

Figura 41. Resposta da densidade aos intervalos de reposição de água, medida na área de interesse total, por meio da tomografia de resolução milimétrica. (SANTOS, 2000).



*, ** e ***: Significativos a 5, 1 e 0,1%, respectivamente, pelo teste t.

Figura 42. Resposta da densidade aos intervalos de reposição de água, medida na área de interesse central, por meio da tomografia de resolução milimétrica. (SANTOS, 2000).



*: Significativo a 5% pelo teste t.

Figura 43. Resposta da densidade aos intervalos de reposição de água, medida na matriz do solo, por meio da tomografia de resolução milimétrica. (SANTOS, 2000).

Na avaliação das amostras por meio da tomografia de resolução micrométrica, cujas imagens são apresentadas nas Figuras 44 e 45, pode-se notar que, em geral, a porosidade é sensivelmente inferior, ou pouco visível, na camada superior da amostra. Nas amostras do experimento, a avaliação sugere que a formação da crosta foi estrutural, enquanto que nas amostras coletadas no campo esse encrostamento foi do tipo deposicional ou erosional.

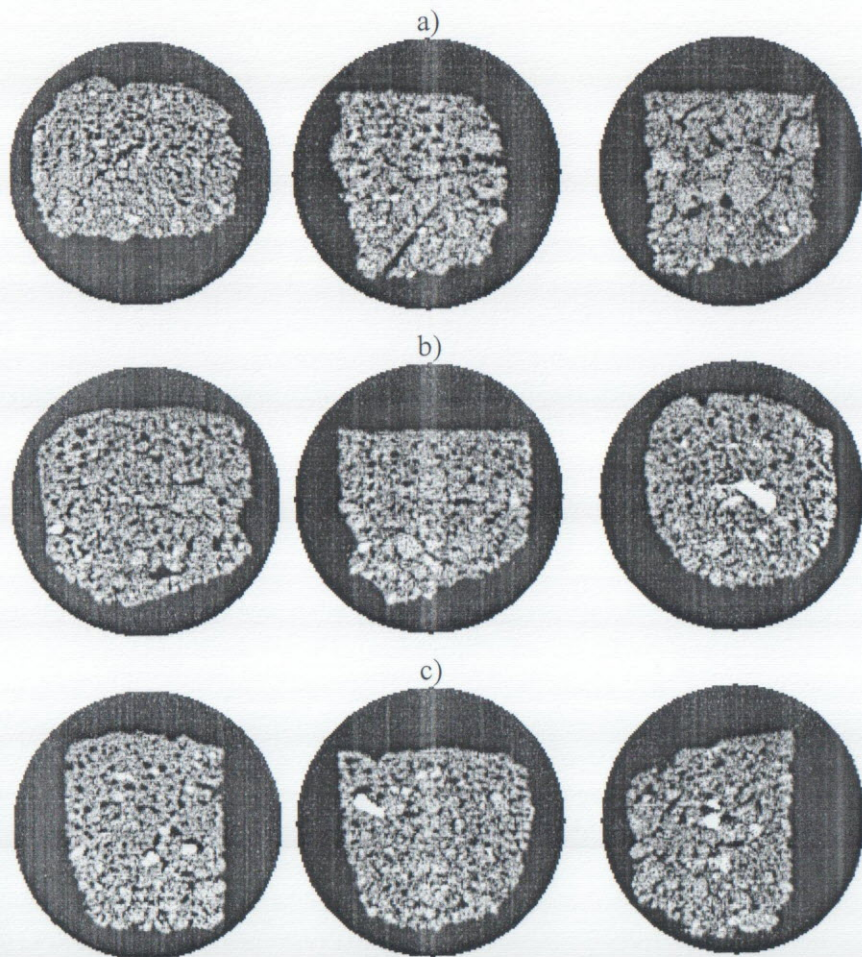


Figura 44. Imagens tomográficas de resolução micrométrica de sub-amostras de três unidades experimentais referentes aos intervalos de reposição de água de dois (a), três (b) e quatro dias (c). (SANTOS, 2000).

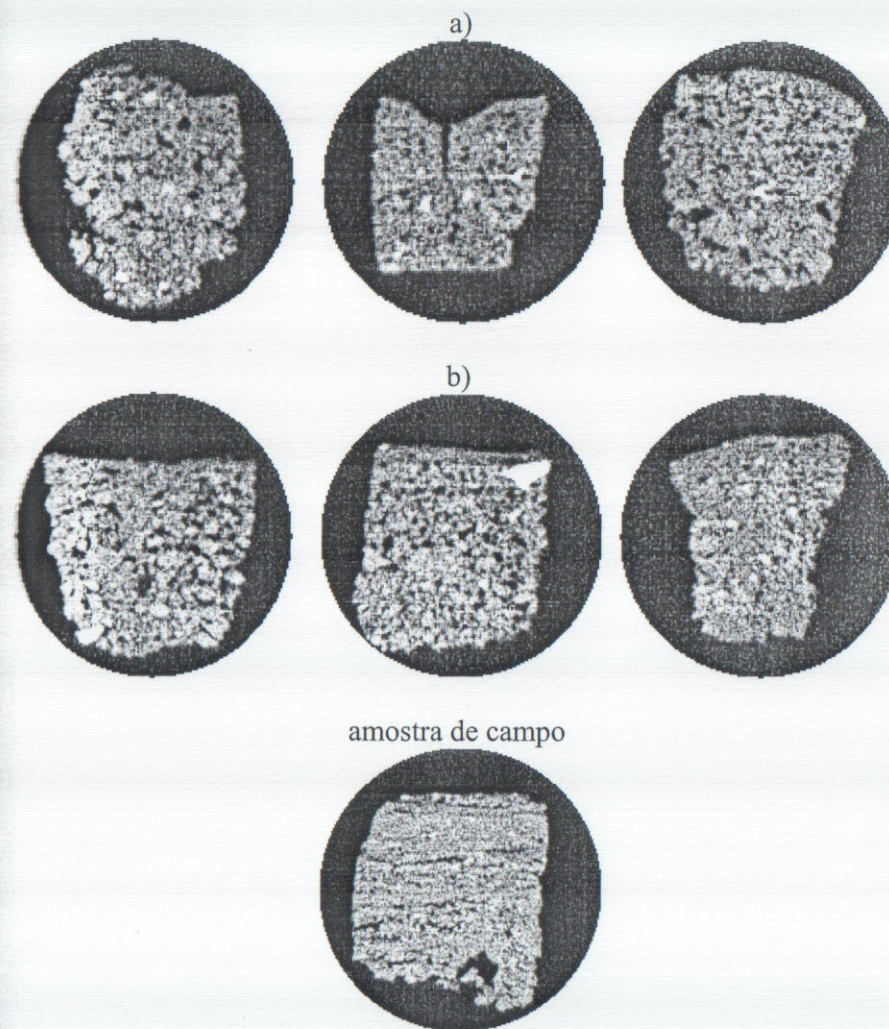


Figura 45. Imagens tomográficas de resolução micrométrica de sub-amostras de três unidades experimentais referentes aos intervalos de reposição de água de seis (a) e oito dias (b) e de amostra de campo(c), retirada no local de amostragem do solo do experimento. (SANTOS, 2000).

A Figura 46 mostra fotos das amostras desse experimento para períodos de umedecimento de dois, quatro e seis dias, tiradas antes e depois da reposição de água.

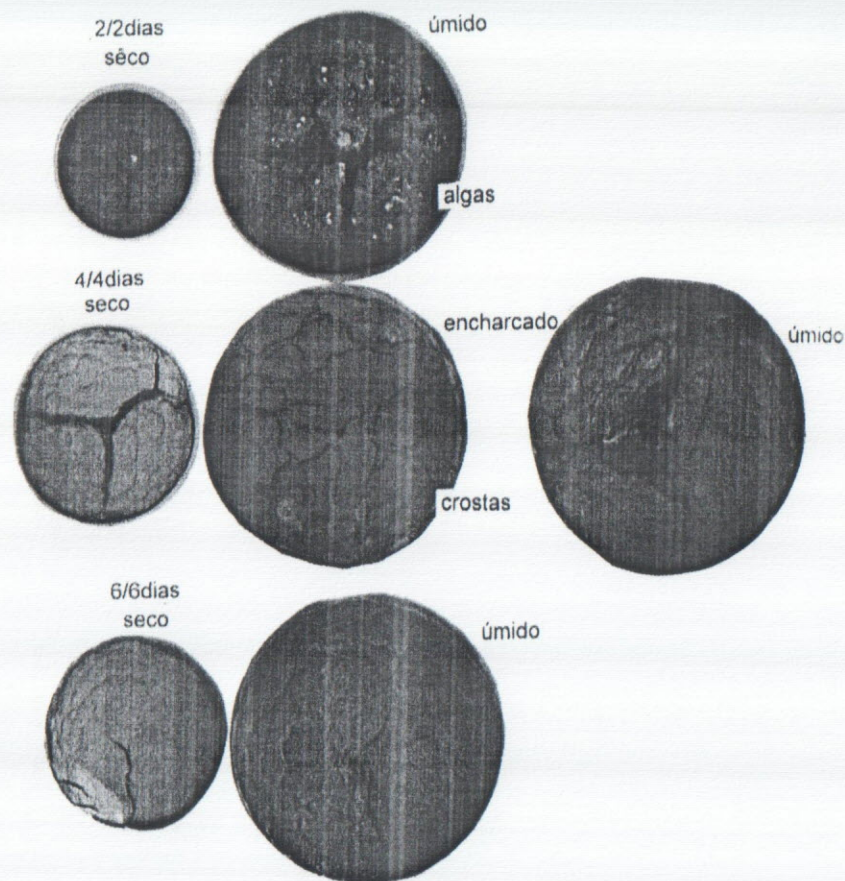


Figura 46. Fotos das amostras referentes à reposição de água em períodos de dois, quatro e seis dias, tiradas antes e depois da reposição. (SANTOS, 2000).

A resposta aos períodos de reposição de água, no experimento citado nesse item do capítulo, foi diferenciada, mostrando maior alteração para os ciclos de quatro dias. O fendilhamento superficial e a tendência ao aumento da densidade com a profundidade sugerem o encrostamento estrutural desde o topo até a camada subsuperficial, ao passo que as crostas deposicionais formam-se somente na superfície do solo, conforme notado nas amostras coletadas em condições de campo.

Referências

- AHLUWALIA, B. D. **Tomographic methods in nuclear medicine: physical principles, instruments, and clinical applications**. Boca Raton: CRC Press, 1989. 239 p.
- APPOLONI, C. R.; CESAREO, R. **Microscanning and microtomography with x-ray tubes**. Roma: Università Degli Studi di Roma "La Sapienza", 1994. 83 p. (Università Degli Studi di Roma "La Sapienza"-CISB. Rap. 0494).
- ASSIS, J. T. **Microtomografia utilizando tubo de raios X**. 1992. Tese (Doutorado) – COPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ASSIS, J. T.; LOPES, R. T.; RODRIGUES, J. L. Microfocus radiography producing microtomography. **Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A – Accelerators Spectrometers. Detectors and Associated Equipment**, Amsterdam, v. 353, n. 1-3, p. 338-339, 1994.
- AYLMORE, L. A. G. Use of computer-assisted tomography in studying water movement around plant roots. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 49, p. 1-53, 1993.
- BALOGUN, F. A.; CRUVINEL, P. E. Compton scattering tomography in soil compaction study. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A - Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Amsterdam, v. 505, p. 502-507, 2003.
- BASTARDIE, F.; CAPOWIEZ, Y.; DREUZY, J.-R. DE; CLUZEAU, D. X-ray tomographic and hydraulic characterization of burrowing by three earthworm species in repacked soil cores. **Applied Soil Technology**, [S. l.], v. 24, p. 3-16, 2003.
- BROOKS, R. A.; DI CHIRO, G. Principles of Computer Assisted Tomography (CAT) in radiographic and radioisotopic imaging. **Physics in Medicine and Biology**, Bristol, v. 21, n. 5, p. 689-732, 1976.
- CAMPBELL, G. S. A simple model for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil Science**, Baltimore, v. 117, p. 311-314, 1974.
- CASÃO JUNIOR, R. **Avaliação do desempenho da semeadora-adubadora Magnum 2850 PD no basalto paranaense**. Londrina, PR: IAPAR, 1998. 47 p. (IAPAR circular, 105).

CÁSSARO, F. A. M.; CRESTANA, S. Caracterização física de um solo argiloso expansivo através da simultânea de raios-X de dupla energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 23., 1995, Maringá, PR. **Anais...** Maringá, PR: Universidade Estadual de Maringá, 1995. v. 2. p. 531-535.

CELIA, M. A.; BOULOTAS, E. T.; ZARBA, R. L. A general mass-conservative numerical solution for unsaturated flow equation. **Water Resources Research**, Washington, v. 26, p. 1483-1496, 1990.

CESAREO, R.; APPOLONI, C. R.; BRUNETTI, A.; CASTELLANO, A.; CRUVINEL, P. E.; MASCARENHAS, S.; ASSIS, J. T.; GIGANTE, G. E. Industrial applications of tomography and microtomography. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTERIZED TOMOGRAPHY FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS, 1994, Berlin. **Proceedings...** [S.l. : s.n.], 1994. p. 295-302.

CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. Nuclear techniques in soil science. **Soil Science**, Amsterdam, v. 1, p. 27-46, 1993.

CHENG, Y.; TARCHITZKZ, J.; BROUWER, J.; MORIN, J.; BANIN, A. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. **Soil Science**, Baltimore, v. 130, p. 105-108, 1980.

CONCIANI, W.; SOARES, M. M.; CRESTANA, S. Geotechnical use of a mini tomography. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS/UNSAT'95, 1., 1995, Paris, France. **Proceedings...** Paris: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995. p. 447-452.

CORMACK, A. M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 34, n. 9, p. 2722-2727, 1963.

CORMACK, A. M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. II. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 35, n. 10, p. 2908-2913, 1964.

CRESTANA, S. et al. Tomografia reconstitutiva. In: CRESTANA, S. et al. (Ed.). **Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1996. cap. 4. p. 152-200.

CRESTANA, S.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. Using a computed miniscanner in soil science. **Soil Science**, Baltimore, v. 142, p. 56-61, 1986.

CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, R.; REICHARDT, K. Calibração e uso de um tomógrafo computadorizado em ciência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, n. 2, p. 161-167, 1992.

CRESTANA, S.; KAUTEN, R.; NIELSEN, D. R. Investigações não-destrutivas de sistemas porosos multifásicos através de microtomografia de raios-X, gama e ressonância magnética nuclear (RMN). In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS-ENEMP, 18., 1990, Nova Friburgo. **Anais...** Nova Friburgo: Colégio Anchieta, 1990. v. 2. p. 689-698.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CESAREO, R.; CRUVINEL, P. E. Soil research opportunities using X-ray and gamma-ray computed tomography techniques. In: RUIDOSO INTERNATIONAL CONFERENCE, 1988, Ruidoso, Novo México. **Proceedings...** Ruidoso: [s. n.], 1988. p. 121-128.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R. S. Statical and dynamical three dimensional studies of water in soil using computed tomography scanning. **Soil Science**, Baltimore, v. 140, p. 326-332, 1985.

CRESTANA, S.; POSADAS, A. N. 2-D and 3-D fingering in unsaturated soils investigated by fractal analysis, invasion percolation modeling and non-destructive image processing. In: BAVEYEYE, P.; PARLANGE, J. Y.; STEWART, B. A. (Ed.). **Fractals in soil science**. Boca Raton: CRC, 1998. p. 293-332. (Advances in Soil Science).

CRUVINEL, P. E. **Minitomógrafo de raios X e raios-gama computadorizado para aplicações multidisciplinares**. 1987. 329 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CRUVINEL, P. E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. X- and gamma- rays computerized minitomograph scanner for soil science. **IEEE - Transactions on Instrumentation and Measurements**, New York, v. 39, n. 5, p. 745-750, 1990.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KAMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, L. E. F. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90 p.

DE GRYZE, S.; JASSOGNE, L.; SIX, J.; BOSSUYT, H.; WEVERS, M.; MERCKX, R. Structure changes during decomposition of fresh residue: X-ray tomography analyses. **Geoderma**, Amsterdam, v. 134, n. 1-2, p.

FATTAH, H. A.; UPADHYAYA, S. K. Effect of soil crust and soil compaction on infiltration in a Yolo loam soil. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 39, p. 79-84, 1996.

FERNANDES, H. C.; REIS, E. F.; NAIME, J. M.; MODOLO, A. J. **Avaliação da influência de implementos de plantio direto do milho com tomografia de raios gama**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2005. 22 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de Pesquisa, n. 10).

FLANNERY, B. P.; DECKMAN, H. W.; ROBERGE, W. G.; D'AMICO, K. L. Three-dimensional x-ray microtomography. **Science**, Washington, v. 237, p. 1439-1444, 1987.

GASSEN, D.; GASSEN, F. **Plantio direto o caminho do futuro**. Passo Fundo, RS: Aldeia Sul, 1996. 207 p.

GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-989, 1980.

GENUCHTEN, M. T. **Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments**. Riverside, CA: U.S. Salinity Laboratory, 1981. (Research Report No. 119).

GRANT, J. A.; MORGAN, M. J.; DAVIS, J. R.; DAVIES, D. R.; WELLS, P. X-ray diffraction microtomography. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 4, p. 83-84, 1993.

HAINSWORTH, J. M.; AYLMOORE, L. A. G. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 21, p. 435-440, 1983.

HAINSWORTH, J. M.; AYLMOORE, L. A. G. Water extraction by single plant roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 841-848, 1986.

HEERAMAN, D. A.; HOPMANS, J. W.; CLAUSNITZER, V. Three dimensional imaging of plant roots in situ with X-ray Computed Tomography. **Plant and Soil**, The Hague, v. 189, n. 2, p. 167-179, 1997.

HENDEE, W. R. **Medical radiation physics**. 2nd ed. Chicago: Year Book Medical Publishers, 1984. 517 p.

HENDEE, W. R. **The physical principles of computed tomography**. Boston: Little and Brown, 1983. 192 p.

HOUNSFIELD, G. N. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. **British Journal of Radiology**, London, v. 46, p. 1016-1022, 1973.

HUMMEL, J. W.; GRAY, L. E.; NAVE, W. R. Soybean emergence from field seedbed environments. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 24, n. 4, p. 872-878, 1981.

IQBAL, M.; MARLEY, S. J.; ERBACH, D. C.; KASPAR, T. C. An evaluation of seed furrow smearing. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 41, n. 5, p. 1243-1248, 1998.

KAK, A. C.; SLANEY, M. **Principles of computerized tomographic imaging**. New York: IEEE Press, 1987. 329 p.

LANDERS, J. N. **Fascículo de experiências de plantio direto no cerrado**. Goiânia, GO: Associação de Plantio Direto no Cerrado, 1995. 261 p.

MACEDO, A. S. **Construção e uso de um tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em ciência do solo e meio ambiente**. 1997. 129 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Paulo (CRHEA), Universidade de São Paulo, São Carlos.

MACEDO, A.; CRESTANA, S.; VAZ, C. M. P. X-ray microtomography to investigate thin layers of soil clod. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, p. 249-253, 1998.

MENEZES, R. S.; FRAGA, M. B. T. Solos colapsáveis. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 2., 1994, Recife-Pe. **Anais...** Recife: [s. n.], 1994. p. 111-116.

MOORE, D. C.; SINGER, M. J. Crust formation effects on soil erosion processes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 1117-1123, 1990.

MORINA, J.; VAN WINKEL, J. Effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 1223-1127, 1996.

MUZILLI, O. **O plantio direto como alternativa no manejo e conservação do solo: curso Básico Para Instrutores em Manejo e Conservação do Solo**. Londrina, PR: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1991. 20 p.

NAIME, J. M. **Projeto e construção de um tomógrafo portátil para estudos de Ciência do Solo e plantas, em campo**. 1994. 87 f.

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

NAIME, J. M. **Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não-saturada do solo**. 2001. 146 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos.

NAIME, J. M.; CRUVINEL, P. E.; CRESTANA, S.; CONCIANI, W.; SOARES, M. M. Portable CAT scanner applied to collapsible soil studies. In: GAZZINELLI, R.; MOREIRA, R. L.; RODRIGUES, W. N. (Ed.). **INTERNATIONAL CONFERENCE**, 2., 1997, Belo Horizonte-MG. Physics and industrial development: bridging the gap. **Proceedings...** Singapore: World Scientific, 1997. p. 327-331.

NARS, H. M.; SELLES, F. Seedlings emergence as influenced by aggregate size, bulk density, and penetration resistance of the seedbed. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 34, n. 1, p. 61-76, 1995.

PERRET, J.; PRASHER, S. O.; KANTZAS, A.; HAMILTON, K.; LANGFORD, C. Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. **Soil Science Society of America Journal**, Madison-WI, v. 63, p. 1530-1543, 1999.

PERRET, J.; PRASHER, S. O.; KANTZAS, A.; HAMILTON, K.; LANGFORD, C. Preferential solute flow in intact soil columns measured by SPECT scanning. **Soil Science Society of America Journal**, Madison-WI, v. 64, p. 469-477, 2000.

PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J. E.; RIEKE, P. E. Soil bulk density in three dimensions by computed tomography scanning. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 445-450, 1982.

PEYTON, R. L.; GANTZER, C. J.; ANDERSON, S. H.; HAEFFNER, B. A.; PFEIFER, P. Fractal dimension to describe soil macropore structure using X ray computed tomography. **Water Resources Research**, Washington, v. 30, n. 3, p. 691-700, 1994.

PORTELLA, J. A.; SATTLER, A.; FAGANELLO, A. Desempenho de elementos rompedores de solo sobre o índice de emergência de soja e de milho em plantio direto do sul do Brasil. **Engenharia na Agricultura**. Viçosa, v. 5, n. 3, p. 209-217, 1997.

POSADAS, A. N.; CRESTANA, S. Aplicação da teoria fractal na caracterização do fenômeno "fingering" em solos não saturados. **Revista**

Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 17, n. 1, p. 1-8, jan./abr., 1993.

POSADAS, D. A.; TANNÚS, A.; PANEPUCCI, H.; CRESTANA, S. Magnetic resonance imaging as a non-invasive technique for investigating 3-D preferential flow occurring within stratified soil samples. **Computer and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 14, n. 4, p. 255-267, 1996.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. P. A.; PEDROSO, A. F.; CAMARGO, A. C.; RASSINI, J. B.; ROCHA FILHO, J.; OLIVEIRA, G. P.; CORREA, L. A.; ARMELIN, M. J. A.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S.C.F. **Microbacia hidrográfica do Ribeirão Cachim**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 1999. (Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de Pesquisa, 05).

RADON, J. H. In the determination of functions from their integrals along certain mainfolds. **Berichte über die Verhandlungen**, Berlin, v. 69, p. 262-277, 1917.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SIMANTON, J. R.; KOHL, K. D. Development of a crust factor for a Green-Ampt model. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 33, p. 1224-1228, 1990.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: USP/ESALQ, Depto. de Física e Meteorologia, 1996. 513 p.

REIS, E. F. **Inter-relação solo-semente com duas semeadoras-adubadoras de plantio direto, em diferentes umidades de um solo argiloso**. 2000. 51 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

REIS, E. F.; CUNHA, J. P. A. N.; FERNANDES, H. C. Influência de mecanismos rompedores de solo no desempenho de uma semeadora-adubadora de plantio direto. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, Havana, v. b12, n. 4, 2003.

RIBEIRO, M. F. S. Mecanização agrícola. In: DAROLT, M. R. **Plantio direto: pequena propriedade sustentável**. Londrina, PR: IAPAR, 1998. p. 95-111. (Circular nº 101).

RIGHES, A. A.; DALLMEYER, A. U.; SILVEIRA, D. R.; FARRET, I. S.; POZZERA, J.; FERREIRA, O. O.; SILVEIRA, T. C. **Inovação tecnológica de mecanismos para semeadura direta**. Santa Maria, RS: FATEC, 1984. 100 p.

ROSENFELD, A.; KAK, A. C. Reconstruction. In: ROSENFELD, A.; KAK, A. C. **Digital picture processing**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1982. cap. 8. v. 1. p. 353-430. (Computer Science and Applied Mathematics).

ROSSI, C.; NIMMO, J. R. Modeling soil water retention from saturation to oven dryness. **Water Resources Research**, Washington, v. 30, p. 701-708, 1994.

SANTOS, C. S. V. **Formação de camadas superficiais adensadas em solo argiloso em resposta a flutuações de umidade**. 2000. 71 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SHCHERBAKOV, R. A.; PACHEPSKY, Y. A.; KUZNETSOV, M. Y. Comparison of methods of calculating one dimensional moisture transport in soils. **Water Resources Research**, Washington, v. 13, p. 1-20, 1986.

SLATTERY, M. C.; BRYAN, R. B. Surface seal development under simulated rainfall on an actively eroding surface. **Catena**, Amsterdam, v. 22, p. 17-34, 1994. Catena Supplement 22.

SORBIE, K. S.; HERIOT-WATT, U.; WAT, R. M.; NIELSEN, S.; LEKNES, J. **Miscible displacement in heterogeneous core systems**: Tomographic confirmations of flow mechanisms. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1989. Paper no. 18096.

SPANNE, P.; JONES, K. W.; PRUNTY, L.; ANDERSON, S. H. Potential application of synchrotron computed microtomography to soil science. In: ANDERSON, S. H.; HOPMANS, J. W. (Ed.). **Tomography of soil-water-root processes**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 43-57. (SSSA Special Publication n. 9).

STEFANUTTI, R.; ORTOLANI, A. F.; COAN, O. Desenvolvimento de uma pista de ensaio e carrinho com rodas compactadoras para estudos relacionados com emergência de plântulas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 10., 1980, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1980. p. 190-203.

STEUDE, J.; CRESTANA, S.; NIELSEN, D. R. 3D wetting front instabilities in layered soils by computed tomography. In: ANDERSON, S. (Ed.). **New analytical Methods for Quantifying Root and Soil Dynamics**: a multidisciplinary conference. St. Louis: Soil Science Society of America, 1990a. não paginado.

STEUDE, J.; CRESTANA, S.; NIELSEN, D. R.; CAO, C. Microtomography of a soil-root system. In: ANDERSON, S. (Ed.). **New analytical Methods for Quantifying Root and Soil Dynamics**: a multidisciplinary conference. St. Louis: Soil Science Society of America, 1990b. não paginado.

VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P. E.; REICHARDT, K.; STOLF, R. Using a computed tomography miniscanner for studying tillage induced soil compaction. **Soil Technology**, Cremlingen, v. 2, p. 313-321, 1989.

VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S.; OLIVEIRA, J. C. M.; REICHARDT, K. **Avaliação do adensamento de um solo cultivado com cana-de-açúcar, usando a tomografia computadorizada**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 1996. 15 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de Pesquisa, 03).

VIEIRA, L. B.; REIS, E. F. Máquinas para o plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 42-48, 2001.

WARNER, G. S.; NIEBER, J. L.; MOORE, I. D.; GEISE, R. A. Characterizing macropores in soil by computed tomography. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 653-660, 1989.

WILKINS, D. E.; MUILENBURG, G. A.; ALLMARAS, R. R. Grain-drill opener effects on wheat emergence. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 26, n. 3, p. 651-656, 1993.

WITHJACK, E. M.; AKERVOLE, I. **Computed tomography studies of 3-D miscible displacement behavior in a laboratory five-spot model**. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1988. Paper no. 18096.