



MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS-X APLICADA AO ESTUDO DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

C.L. Tseng¹, M.C. Alves², S.N. Souto-Filho², E.J. Souza², S. Crestana³

- (1) Universidade de São Paulo, USP, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, 13566-590, São Carlos, SP, chientlt86@gmail.com
- (2) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, UNESP, Avenida Brasil Centro, 56, 15385-000, Ilha Solteira, SP, mcalves@agr.feis.unesp.br, sebastiaosouto87@gmail.com, epitacio_jose@hotmail.com
- (3) Embrapa Instrumentação, Rua Quinze de Novembro, 1452, Centro, 13560-970, São Carlos, SP, silvio.crestana@embrapa.br

Resumo: O uso de micro-CT de raios-X no estudo de propriedades físicas do solo vem se destacando como um meio promissor de análise, pois o micro-CT é capaz de fornecer informações em duas e três dimensões sem perturbar a estrutura interna do solo. O presente trabalho teve como objetivo demonstrar o potencial e a aplicação de microtomografia no estudo da qualidade física do solo. Assim, com os resultados deste trabalho foi possível mostrar: A potencialidade de micro-CT nas determinações qualitativas do solo, no caso a interpretação das imagens tomográficas em três distintos planos de corte. Além disso, possível descrever as vantagens e as limitações dos dois microtomógrafos, modelo 1172 e 1176 - Bruker, na pesquisa de solo. Portanto, pode-se concluir que o microtomógrafo é uma ferramenta útil para avaliação e análise das propriedades físicas do solo e consequentemente valiosa para auxiliar pesquisadores e tomadores de decisão.

Palavras-chave: microtomógrafo modelo 1172 e modelo 1176 - Bruker, densidade do solo, degradação do solo, imagens tomográficas.

APPLICATION OF X-RAY MICROTOMOGRAPHY IN THE STUDY OF SOIL PHYSICAL PROPERTIES

Abstract: The use of X-ray micro-CT in soil physical properties studies has emerged as a promising means of analysis, because the micro-CT is able to provide information on two and three dimensions without disturbing the soil's internal structure. This paper aims to show the potential of microtomography in the study of soil physical quality. Thus, the results show that: The potential of micro-CT in soil qualitative measures is the interpretation of CT images in three different cutting planes. It was also possible to describe the advantages and limitations of both microtomography, model 1172 and 1176 - Bruker, in soil research. Therefore, it is possible conclude that the microtomography is a useful tool for assessment and analysis of the physical properties of the soil for soil scientists and decision-makers.

Keywords: microtomography Model 1172 and Model 1176 - Bruker, soil density, soil degradation, tomographic images.

1. Introdução

Inicialmente a tomografia era apenas usada na área de medicina. Mais tarde foi introduzida também em outros campos da ciência, tais como engenharia, agronomia, biologia, física, química, etc. (PIRES et al., 2010). As excelentes informações quantitativas e qualitativas obtidas nas análises morfológicas bi e tridimensionais, de forma não invasiva e não destrutiva, tornaram o uso da técnica de tomografia computadorizada cada vez mais popular.

As primeiras aplicações de tomografia computadorizada (TC) na ciência de solo foram obtidos com os trabalhos de Petrovic (1982), Hainsworth & Aylmore (1983), Crestana et al. (1985) e Vaz et al. (1992). Atualmente existem cinco linhas principais de pesquisa do solo utilizando a TC de raios-x que são: 1- A classificação e separação das fases do solo; 2- Mineralogia do solo; 3- Constituintes orgânicos; 4- Quantificação das propriedades físicas do solo; e 5- Diferenciação das características bióticas, segundo Helliwell et al. (2013).

Os equipamentos hoje encontrados utilizam diversas fontes de emissão, tais como raios-x, gama, nêutron e pósitron (PIRES et al., 2010). Geralmente a resolução espacial dos tomógrafos comerciais (TC) e microtomógrafos (micro-CT), apresenta resolução variando de 1µm a 250 µm (CNUDD; BOONE, 2013).

Dentre os softwares de processamento digital das imagens, qualitativa e quantitativamente, utilizados pelos cientistas do solo, no momento vale a pena citar: Mathematic, ImageJ, CT-Analyser, Matlab, Avizo, VGSstudio Max, MAVI, Blob3D, Pore3D, 3DMA-Rock Morpho + e Fiji. Há também outros softwares com menor frequência de uso, como: Macroview, 3D-Doctor, Amide. (CNUDD; BOONE, 2013) e (TAINA et al., 2007).

A metodologia desta pesquisa consistiu em utilizar os microtomógrafos comerciais, disponibilizados pela Embrapa-Instrumentação e a Faculdade de Odontologia da UNESP, para adquirir as projeções tomográficas de amostras de solo e reconstruir essas projeções em imagens bidimensionais por meio de software NRecon. Posteriormente, essas imagens foram processadas por software de análise CT-Analyser e Data-Viewer para obter as informações qualitativas e quantitativas do solo estudado (TSENG, 2013).

O objetivo principal deste trabalho foi mostrar o potencial de microtomógrafos de raios-x nos estudos qualitativo e quantitativo da qualidade física do solo. E por fim, como resultado adicional, realizar a comparação entre dois equipamentos com resoluções diferentes.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo e coleta de amostras

As amostras de solo foram coletadas na Fazenda de Ensino e Pesquisa Produção Animal da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira, situada no município de Selvíria - MS, à margem direita do rio Paraná. O local é caracterizado pelos vestígios da implantação da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, onde foram retirados 8,6m de solo. O estudo foi realizado no subsolo com presença de horizonte B remanescente. Desde 1969, a área ficou exposta e apresenta forte compactação superficial e baixa presença de vegetação. A partir de 1992 foram implantados procedimentos de recuperação nessa área.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho distrófico e sua classe textural é franco-argila-arenosa. A pluviosidade anual em média da região é de 1.370 mm. As temperaturas médias são aproximadamente 23,5°C, com a umidade relativa do ar entre 70- e 80% (DEMATTÊ, 1980). Esse solo é caracterizado pelo avançado estágio de intemperização, pH ácido e é típico das regiões equatoriais e tropicais (EMBRAPA, 2013).

As amostras foram coletadas em seis áreas submetidas a diferentes sistemas de recuperação: I - Controle (vegetação nativa do Cerrado); II - Solo cultivado com pastagem degradada; III - Solo com pastagem recuperada; IV - Solo manejado com *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-alves) + *Brachiaria decumbens* + Lodo de esgoto (AF+B+LE); V - Solo degradado (remanescente da construção de usina hidrelétrica); VI - Solo recuperado (aplicação de adubação verde durante sete anos, de 1992 a 1999, e depois cultivado com *Brachiaria decumbens*). Para cada local de coleta, foram selecionadas três profundidades do horizonte B para realização desse trabalho: a) 0 - 10 cm e b) 10 - 20 cm e c) 20 - 30 cm, constituindo no total de 162 amostras.

2.2. Aquisição e a reconstrução de imagens tomográficas

A aquisição das projeções e a reconstrução de imagens bidimensionais foram adquiridas a partir da utilização do microtomógrafo de raios-x de alta resolução (modelo 1176 Skyscan, Bélgica) da Faculdade de Odontologia da UNESP - Araraquara e, parcialmente, da Embrapa Instrumentação Agropecuária - São Carlos.

Primeiramente as amostras foram posicionadas dentro do microtomógrafo, em seguida foram obtidas as projeções tomográficas com os parâmetros pré-selecionados (VAZ et al., 2011). Em seguida, as projeções tomográficas foram reconstruídas bidimensionalmente por software NRecon. Com base nessas imagens reconstruídas, as propriedades físicas foram adquiridas pelo software CT-Analyser. Por fim, utilizou-se o software *DataViewer* para se obter a visualização das imagens tomográficas em três distintos planos.

3. Resultados e Discussão

3.1. Curva de coeficiente de atenuação

De acordo com os resultados obtidos no experimento, foi traçado um gráfico relacionando o coeficiente de atenuação com a Unidade Hounsfield. A equação linear obtida permitiu o cálculo de densidade por meio de Unidade de Hounsfield proveniente das imagens tomográficas, demonstrando que, o método utilizado é de investigação não destrutiva e não invasiva (CRESTANA, 1985 e PEDROTTI et al., 2003).

3.2. Visualização morfológica dos solos: Transversal, sagital e coronal

As imagens tomográficas permitiram uma visualização clara das estruturas morfológicas dos solos. Com o auxílio do software *DataViewer*, foi possível fazer cortes em três planos distintos: transversal, sagital e coronal, permitindo a escolha da seção de cortes de interesse (Figura 1, 2 e 3). Notou-se que, pela visualização não importa qual tipo de plano utilizado, as características físicas e ambientais da amostra permanecem as mesmas.

Observou-se que o solo do tratamento controle (cerrado) apresenta grande heterogeneidade na sua distribuição de tamanho de agregados e poros em comparação aos demais tratamentos. O solo recuperado (tratamento VI) é o mais próximo do solo natural de cerrado. Em seguida, aparece o solo tratado com AF+B+LE e, por último, a pastagem recuperada. O solo retirado da pastagem degradada apresenta uma aparência semelhante à do solo degradado.

Nos planos sagitais e coronais foram identificadas diversas rachaduras no solo degradado e tratado com AF+B+LE. No caso do solo tratado deve associar-se a ação desintegradora da planta nativa *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-alves), adição de matéria orgânica proveniente do lodo de esgoto e rendimento de matéria verde da *Brachiaria decumbens* (ALVES & CAMPOS, 2008).

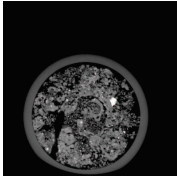


Figura 1. Corte transversal do solo de cerrado

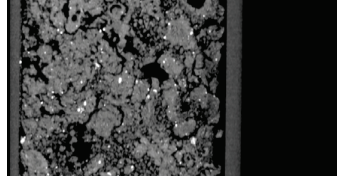


Figura 2. Corte sagital do solo de cerrado

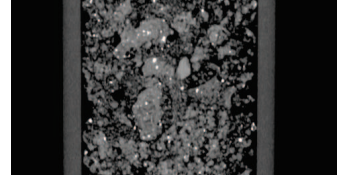


Figura 3. Corte coronal do solo de Cerrado (c)

3.3. As vantagens e desvantagens entre os microtomógrafos Skyscan modelos 1172 e 1176

O microtomógrafo de alta resolução modelo 1172 é mais indicado para materiais densos devido ao seu intervalo e flexibilidade na escala dos pixels, com precisão variando na casa de micrômetros, um fator bastante atrativo para investigar as propriedades e comportamentos de solos. Embora o modelo 1176 possua alto desempenho e alta resolução espacial in-vivo, ele é mais indicado para pesquisas clínicas. Além do mais, existem apenas três resoluções pré-fixadas pelo fabricante: 9, 18 e 35 μ m.

O sistema de detecção dos dois modelos é outra grande diferença entre eles. No modelo 1172 as amostras são colocadas no centro de um suporte giratório enquanto recebe energia proveniente da fonte de raios-x, projetada sobre os detectores fixos que estão posicionados atrás da amostra. No modelo 1176 as amostras são posicionadas sobre um suporte fixo, enquanto recebem a energia da fonte de raios-x e os detectores giram ao seu redor. Uma vantagem desse sistema é que as pequenas partículas sofrem menos perturbação durante a aquisição das projeções comparado com o modelo 1172.

A respeito da otimização de tempo, o modelo 1176 possui uma vantagem em relação ao modelo 1172, que é a possibilidade de fazer aquisição de várias amostras de uma única vez. Isso acontece porque o modelo 1172 só faz aquisição de uma amostra de cada vez e o usuário necessita recolocar os parâmetros toda vez que for utilizá-lo. O modelo 1176 otimiza o tempo para o usuário que não exige análise com resolução específica, porque pode-se colocar o conjunto de amostras sem necessidade de recolocar os parâmetros.

4. Conclusões

As imagens tomográficas associados ao software *DataViewer* são meios promissores para a investigação de morfologia e propriedades físicas do solo em planos distintos. Conforme o esperado a distribuição de poros e agregados na imagens do solo recuperado (tratamento VI) é o mais próximo do solo de controle (tratamento I), em seguida o solo tratado com AF+B+LE (tratamento IV) e por fim, o solo de pastagem recuperada (tratamento III). Enquanto o solo de pastagem degradada (tratamento II) é o mais próximo de solo degradado (tratamento V).

Recomenda-se o uso do microtomógrafo Skyscan modelo 1172 para investigação de solos quando exige imagem de alta resolução. O modelo 1176 é sugerido para estudos que exigem maior otimização do tempo.

Agradecimentos

À Embrapa Instrumentação - São Carlos e a Faculdade de Odontologia da UNESP, Campus Araraquara pela disponibilidade de laboratórios e equipamentos. À Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus Ilha Solteira pela cooperação técnica. Aos técnicos do Laboratório de Técnicas Nucleares Paulo Renato Orlandi Lasso e Luis Francisco Mattêo Ferraz pelo apoio técnico, aos revisores do artigo pela correção e sugestões e a CAPES, pelo apoio financeiro.

Referências

- ALVES, M. C.; CAMPOS, F. S. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. R. Bras. CI. Solo, v. 32, p. 1389-1397, 2008.
- CNUDDE, V.; BOONE, M. N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. Earth-Science Review, v. 123, p. 1-17, 2013.
- 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.
- DEMATTÊ, J. L. I. Levantamento detalhado dos solos dos campus experimental de Ilha Solteira. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", p. 131, 1980.
- EMBRAPA, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa, 2013.
- HAINSWORTH, J. M.; AYLMOORE, L. A. G. Water extraction by single plant roots. Australian Journal of Soil Research, v.21, p.435-440, 1983.

- HELLIWELL, J. R.; STURROCK, C. J.; GRAYLING, K. M.; TRACY, S. R.; FLAVEL, R. J.; YOUNG, I. M.; WHALLEY, W. R.; MOONEY, S. J. Application of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: a review. *European Journal of Soil Science* v.64, p. 279-297, 2013.
- PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E. ; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; SILVA, A. M. Tomografia computadorizada aplicada a estudos de um Planossolo. *Pesq. agropec. bra.* Brasília, v. 38, n. 7, p. 819-826, 2003.
- PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J. E.; RIEKE, P. E. Soil bulk density in three dimension by computed tomography scanning. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.46, p. 445-450, 1982.
- PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: a literature review of Brazilian contribution. *Soil & Tillage Research*, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010.
- TAINA, I. A.; HECK, R. J.; ELLIOT, T.R. Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review. *Can. J. Soil Sci*, 2007. 20 p. Disponível em:
< <http://pubs.aic.ca/doi/pdf/10.4141/CJSS06027>>. Acesso em: 25 aug. 2014.
- TSENG, C. L. Tomografia Computadorizada de Raios-X Aplicada à Análise da Qualidade Ambiental de Solo no Entorno da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira – SP. 2013, 92p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2013.
- VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S. ; REICHARDT, K. . Tomografia computadorizada na avaliação da compactação de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 16, p. 153-159, 1992.
- VAZ, C. M. P.; DE MARIA, I. C.; LASSO, P. O.; TULLER, M. Evaluation of an advanced benchtop micro-computed tomography system for quantifying porosities and pore-size distributions of two Brazilian oxisols. v. 75, n. 3, p. 832-841, 2011.