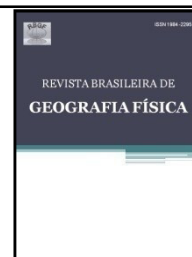




ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Espaço poroso em solos brasileiros usando microtomografia computadorizada de raios-X

Larissa Fernandes Costa¹, Antonio Celso Dantas Antonino², Richard John Heck³, Artur Paiva Coutinho⁴, Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel⁵; Thiago Campos Vasconcelos⁶, Cássia Bezerra Machado¹

¹Estudante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE. Av. Luiz Freire, 1000. Cidade Universitária, Recife-PE, Brasil. CEP: 50740-545. E-mail: cassiabmachado@gmail.com e tcampos@gmail.com; ²Prof. do Departamento de Energia Nuclear da UFPE. E-mail: acdantonino@gmail.com; ³Prof. da University of Guelph, Ontario, Canadá. E-mail: rheck@uoguelph.ca; ⁴Prof. da UFPE, Centro Acadêmico do Agreste. E-mail: arthur.coutinho@yahoo.com.br; ⁵Profa. da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE. Brasil. CEP: 52171-900. E-mail: rmpimentel@hotmail.com. ⁶Estudante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPE.

Artigo recebido em 13/06/2016 e aceito em 21/06/2016

RESUMO

A porosidade é importante na determinação da qualidade de um solo, por possuir forte influência na aeração, na transferência de água/solutos/gases/calor, na resistência à penetração e ramificação de raízes, além do desenvolvimento de microorganismos. A avaliação do espaço poroso, considerando vazios intra e inter-agregados, em diferentes tipos de solo e suas implicações (vantagens/desvantagens) é objetivo deste estudo. Foi determinada a porosidade inter e intra-agregados em solos dos tipos Latossolo Vermelho distrófico e Neossolo Regolítico eutrófico. Para os intra-agregados foram classificados: o tamanho, a forma e a inclinação. A porosidade inter-agregados foi maior para o Neossolo; este é um comportamento esperado para um solo arenoso, quando comparado a um solo argiloso. Considerando a porosidade intra-agregados, destacou-se a predominância da inclinação horizontal, poros maiores e maior quantidade de poros complexos para o Neossolo. A aplicação de microtomografia computadorizada de raios-X se mostrou eficiente na caracterização micromorfológica da porosidade do solo.

Palavras-chave: Porosidade, Imagem digital, Agregado.

Porous space in Brazilian soils using X-ray computed tomography

ABSTRACT

Porosity is important in determining the quality of the soil, as it has strong influence on the aeration, in the transfer of water/solute/gas/heat, resistance to penetration and branching roots, and the development of microorganisms. The assessment of the pore space, whereas intra and inter-empty clusters in different soil types and their implications (advantages/disadvantages) is aim of this study. It was determined to inter- and intra-aggregate porosity in soil types Red Latossol dystrophic. For intra-aggregates were classified: the size, shape and slope. The inter-aggregate porosity was higher for Regossols; this is expected behavior for a sandy soil, compared to a clay soil. Considering the intra-aggregate porosity, noted the predominance of horizontal slope, larger pores and a larger number of complex pores to Regossols. The application of computed microtomography X-ray proved effective in micromorphological characterization of soil porosity.

Keywords: Porosity, Digital Image, Aggregate.

Introdução

O solo muitas vezes é considerado como um material inerte e que serve apenas como suporte para o crescimento de plantas, fundações para as estruturas construídas pelo homem e como moradia de animais. Porém, esse meio é um corpo vivo e

dinâmico que precisa ser preservado para que haja um futuro melhor e com qualidade para a humanidade.

O crescimento acelerado da população vem intensificando a degradação do solo. Nos centros urbanos ocorre a sua impermeabilização devido à compactação ou cobertura por asfalto e concreto.

* E-mail para correspondência: larissafcosta@hotmail.com (Costa, L.F.).

No campo, o aumento populacional exigiu uma maior demanda de alimentos, resultando em mudanças na forma da produção agrícola como a mecanização da produção e o uso de agrotóxico que podem contaminar o solo e causar alterações em sua estrutura.

A estrutura do solo é determinada pelo arranjo, orientação e organização de partículas de diferentes composições químicas, tamanhos e formas que, quando agregadas, determinam a porosidade do solo (Hillel, 1998; Reichardt, 2008). Os poros são espaços no solo responsáveis pelos processos de aeração, condução e retenção de água e nutrientes fundamentais para o crescimento e desenvolvimento de plantas e microorganismos, estando fortemente relacionado a fertilidade do solo e a sua qualidade física (Tormena et al., 1998, De Freitas et al., 2012; Stefanoski et al., 2013). Em relação à distribuição, os poros podem ser classificados em inter-agregados e intra-agregados, com tamanhos de poros de 70-0,4 μm e 0,3-0,01 μm , respectivamente (Lu et al., 2014). Os poros inter-agregados são aqueles responsáveis pela aeração das raízes e drenagem da água no solo, e se caracterizam pelo rápido esvaziamento e fluxo de água. Os poros intra-agregados são aqueles responsáveis pela retenção e disponibilidade de água para as plantas e se caracterizam por se esvaziarem mais lentamente, proporcionando uma condução mais lenta da água pelo solo (Othmer et al., 1991).

O manejo do solo altera sua estrutura, causando uma reorientação das partículas e modificação na morfologia dos poros, alterando sua capacidade de transporte e armazenamento de água e nutrientes e, com isso, afetando o desenvolvimento de plantas e as atividades microbianas (Gonçalves e Moraes, 2012; Jorge et al., 2012).

A compactação é um dos parâmetros mais importantes de perda de qualidade da estrutura de um solo, causada por problemas na gestão agrícola, principalmente pelo uso de maquinários pesados (Marsili et al., 1998; Pagliai et al., 2003). A diminuição da macroporosidade e a modificação na geometria dos macroporos, como surgimento de poros planares e sem continuidade, por exemplo, são fatores analisados no estudo da compactação de um solo e que afetam a atividade biológica devido ao aumento da resistência a penetração e conseqüentemente diminuição da condutividade hidráulica (Pagliai et al., 1983; Pagliai et al., 2000; Pagliai et al., 2003; Pagliai et al., 2004).

Para o estudo desse sistema complexo, desde a década de 1980 vem se utilizando a microtomografia computadorizada de raios-X (Petrovic et al., 1982; Hainsworth e Aylmore,

1983; Crestana et al., 1985) que, com o avanço nos sistemas computacionais e nos equipamentos tomográficos, vem sendo possível caracterizar quantitativamente, qualitativamente, em três dimensões e de forma não destrutiva o espaço poroso do solo em alta resolução (escala micrométrica). Porém, ainda não há uma padronização do uso dessa tecnologia no estudo da porosidade do solo, principalmente em relação ao tratamento e segmentação de imagens.

Nesse contexto, é necessário apresentar uma metodologia eficaz para a caracterização dos espaços porosos, por meio da microtomografia computadorizada de raios-X, avaliando as mudanças no espaço poroso causadas por mudanças na estrutura e seu efeito nas propriedades do solo.

O objetivo deste estudo é caracterizar o espaço poroso inter e intra-agregados em diferentes tipos de solo brasileiros.

Material e métodos

Amostras

Foram utilizados dois tipos de solo, Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Regolítico eutrófico (NRe), cujas amostras utilizadas para a análise da metodologia empregada nesse trabalho foram coletadas por parceiros do Soil Imaging Laboratory, na School of Environmental Sciences da University of Guelph, no Canadá, e por parceiros e estudantes do Laboratório de Física do Solo, no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE), no Brasil.

As amostras de solo LVd foram coletadas pelo Grupo de Pesquisa de Geografia da Universidade Federal de Goiás, no Brasil, nas propriedades da Usina São Francisco S/A, no município de Quirinópolis, onde foram abertas trincheiras de, aproximadamente, 2,0 x 1,5 x 2,5 m para a coleta das amostras indeformadas do horizonte superficial AB, as quais foram coletadas em cilindros de acrílico com 6,4 cm de diâmetro e 15 cm de altura (Figura 1a), posteriormente secas em estufa a 40°C. As amostras foram coletadas em três sítios amostrais, atualmente sob cultivo de cana-de-açúcar, o qual substituiu áreas de pastagem ou cultura anual (soja) ou, ainda, com sucessão pastagem/cultura anual. Nesses sítios selecionados, o tipo da cana cultivada foi o mesmo, com o mesmo tipo de preparo inicial do solo (solagem, grade pesada, calagem, gessagem, fosfatagem e grade leve), o qual foi submetido a uma forte mecanização durante o processo de cultivo e colheita.

A amostra de solo NRe foi coletada no município de São João (PE) pelo Grupo de

Pesquisa do Laboratório de Física do Solo do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, em Recife juntamente com o Grupo de Pesquisa de Física do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Garanhuns, onde foram abertas trincheiras de, aproximadamente, 2,0 x 1,5 x 2,5 m para a coleta da amostra indeformada da camada superficial de 0 – 20 cm, a qual foi coletada em cilindro de PVC

com 7,5 cm de diâmetro e 7,5 cm de altura (Figura 1b) e seca em estufa a 40°C. Na área de coleta predomina a sucessão de cultivo de mandioca, feijão e milho, realizada através de agricultura familiar, onde o manejo utilizado se caracteriza por uma primeira gradagem, adubação orgânica, segunda gradagem e plantio da cultura, sem uso de maquinários pesados nos processos de cultivo e com uma colheita realizada de forma manual.

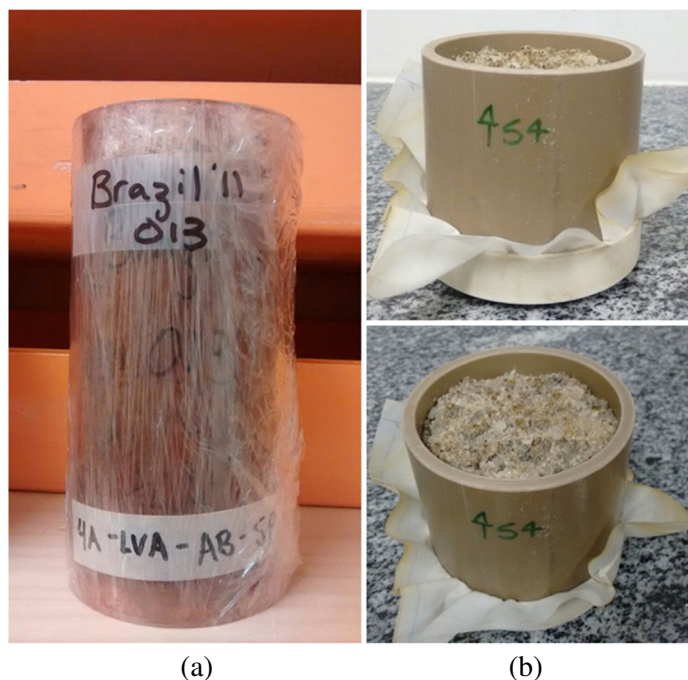


Figura 1. Cilindros de acrílico com 6,4 cm de diâmetro e 15 cm de altura utilizados para a coleta das amostras indeformadas de Latossolo Vermelho distrófico (a). Cilindro de PVC com 7,5 cm de diâmetro e 7,5 cm de altura utilizados para a coleta da amostra indeformada da camada superficial de solo do Neossolo Regolítico eutrófico (b).

O solo LVd se caracteriza por ser um solo com alto teor de argila, profundo, de estrutura uniforme em relação à cor, textura e profundidade, e varia de poroso a muito poroso e é susceptível à erosão e compactação. Os solos do tipo NRe são pouco desenvolvidos, com predomínio de areia e baixo teor de argila e matéria orgânica. Devido ao seu caráter arenoso, esse tipo de solo apresenta elevada permeabilidade e baixa capacidade de retenção de umidade.

Os atributos físicos do LVd e NRe, segundo Silva e Castro (2014) e Almeida et al. (2015), estão apresentados na Tabela 1.

Aquisição de imagens

As imagens tomográficas das amostras do solo LVd foram obtidas por meio do tomógrafo de raios-X de terceira geração, Modelo GE Medical CT MD8X-130 (Figura 2a), pertencente ao Soil Image Laboratory da Universidade de Guelph, no Canadá. Foram utilizados como parâmetros no processo de aquisição das imagens, a tensão de 120

kV, corrente de 170 μ A e tempo de exposição de 3500 ms. A resolução espacial das imagens foi de 20 μ m (20 x 20 μ m²), utilizando filtro de cobre para minimizar os fótons de baixa energia, ou seja, para minimizar os artefatos do tipo feixe de endurecimento (*beam hardening*).

As imagens tomográficas da amostra do solo NRe foram obtidas com o tomógrafo de raios-X de terceira geração, Modelo NIKON XT H 225 ST (Figura 2b), pertencente ao Grupo de Pesquisa do Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X (LTC-RX), instalado no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE), no Brasil. Foram utilizados como parâmetros no processo de aquisição da amostra uma tensão de 150 kV, uma corrente de 226 μ A e um tempo de exposição de 500 ms. A resolução espacial das imagens foi de 50 μ m (50 x 50 μ m²) e também foi utilizado um filtro de cobre com espessura 0,5 mm para minimizar os fótons de baixa energia.

Tabela 1. Atributos físicos dos solos dos tipos Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Neossolo Regolítico eutrófico (NRe)

Perfil	Tipo de solo	Uso da terra	Amostra	Prof. camada	PT	Areia	Silte	Argila	Classe textural
				(cm)					
P1		Soja/cana	LVd_soja	30-70	32	62	8	30	Franco-argilo-arenoso
P2	LVd	Pastagem/cana	LVd_pasto	20-44	37	58	9	33	Franco-argilo-arenoso
P3		Sucessão: pasto/soja/cana	LVd_suc	29-56	40	57	9	34	Franco-argilo-arenoso
P5	NRe	Milho/feijão/mandioca	NRe	0-20	43	88	10	2	Arenoso

Fonte: Os dados das amostras de solo LVd são de Silva e Castro (2014) e os dados da amostra de solo NRe são de Almeida et al. (2015), obtidos de acordo com a EMBRAPA (1997).

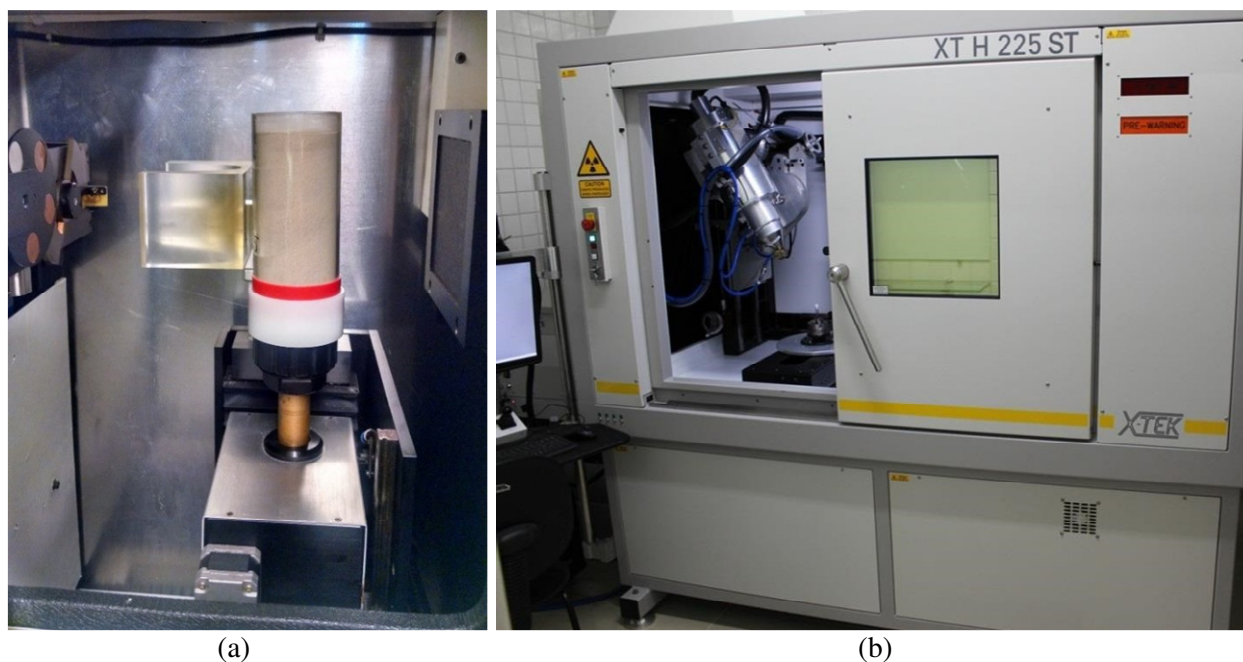


Figura 2. Amostra no tomógrafo de raios-X de terceira geração, Modelo GE Medical CT MD8X-130 instalado no Soil Image Laboratory da Universidade de Guelph, no Canadá (a). Tomógrafo de raios-X de terceira geração, Modelo NIKON XT H 225 ST instalado no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE), no Brasil (b).

Reconstrução de imagens

Nas amostras de solo LVd, os subvolumes de interesse foram reconstruídos em 3D utilizando o eXplore Reconstruction Utility, um programa da GE Healthcare (2006), com dimensões de 840 x 840 x 600 voxels (Figura 3a-c). A resolução espacial das imagens foi reduzida para 40 μm (40 x 40 x 40 μm^3) e a resolução radiométrica ficou em 16-bit. Para a minimização de ruídos foi aplicado o filtro de Gauss em todos os subvolumes reconstruídos. Durante a reconstrução, as imagens

foram convertidas para a escala de Hounsfield, onde o ar apresenta o valor de 0 e a água um valor igual a 1000.

As imagens do solo NRe foram reconstruídas em 3D utilizando o CTPro 3D XT 3.0.3 (Nikon Metrology NV) em um subvolume de interesse de 840 x 840 x 840 voxels (Figura 3d), com resolução espacial das imagens de 50 μm (50 x 50 x 50 μm^3). No programa VGStudio MAX 2.2 (Volume graphics, Heidelberg, Alemanha), as imagens foram convertidas para a escala de

Hounsfield, onde o ar apresenta o valor de 0 e a água apresenta um valor igual a 1000.

Ressalta-se que todos os procedimentos de aquisição e reconstrução aqui descritos foram

executados por parceiros, seguindo os padrões estabelecidos pelos laboratórios mencionados, sendo, portanto, utilizadas nesse trabalho apenas as imagens disponibilizadas por eles.

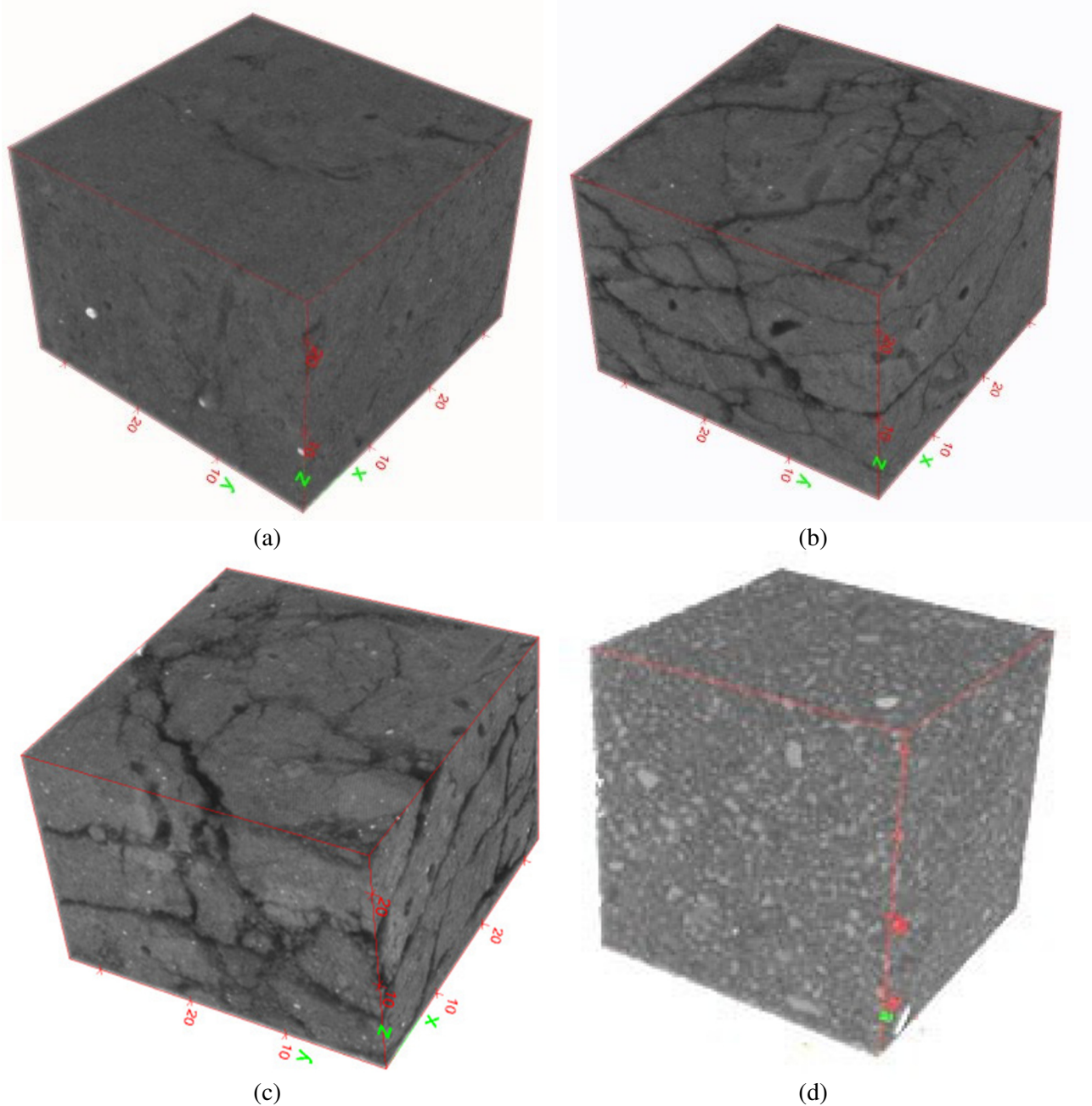


Figura 3. Subvolumes reconstruídos de imagens tomográficas gerados de amostras de solo Latossolo Vermelho Distrófico: LVd_soja (a), LVd_pasto (b), LVd_suc (c); e de solo Neossolo Regolítico Eutrófico (d).

Correção de artefatos de anéis

As imagens das amostras de solo LVd apresentaram artefatos de anéis bem acentuados (Figura 4a), sendo necessárias correções, as quais foram feitas como base na metodologia de Münch et al. (2009) e Wei et al. (2013). As imagens

reconstruídas e em coordenadas cartesianas foram transformadas para coordenadas polares e foi utilizada uma combinação dos filtros wavelet e Fourier para a supressão dos artefatos, como se pode observar na imagem pós-filtragem (Figura 4b).

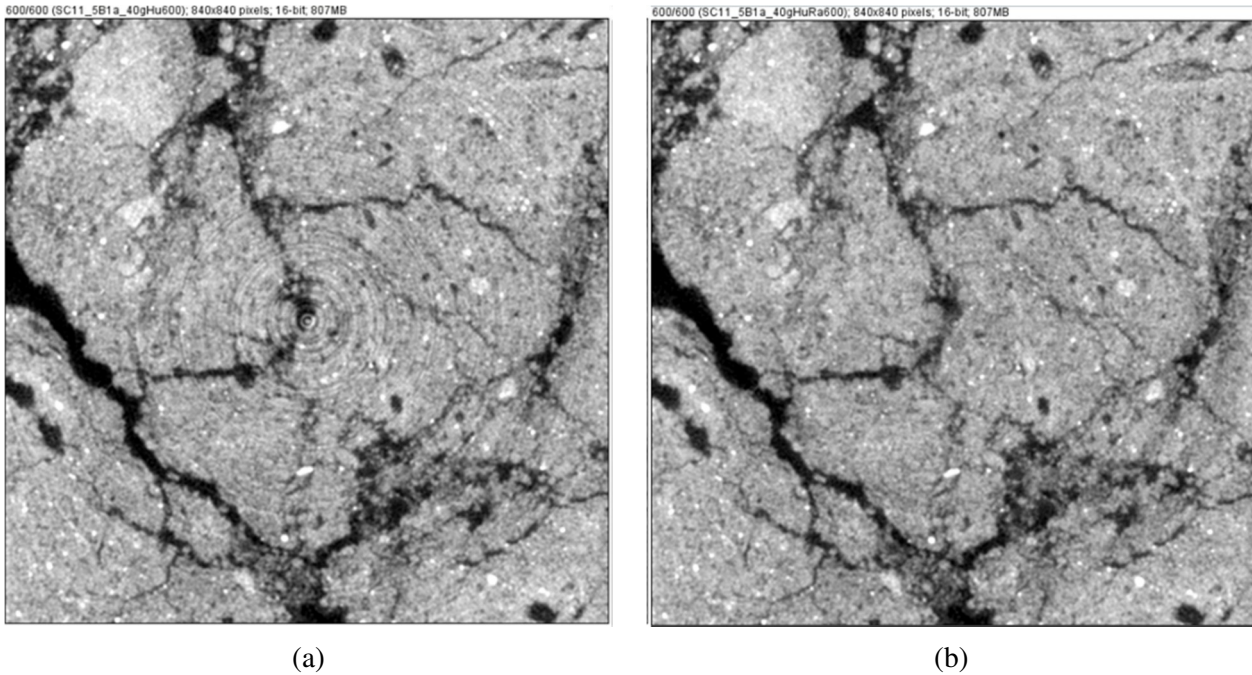


Figura 4. Imagens das amostras de solo Latossolo Vermelho distrófico antes (a) e depois (b) da correção dos artefatos de anéis.

Segmentação de imagens

As imagens geradas após a reconstrução com valores na escala de Hounsfield (HU) (ar=0 e água=1000) foram utilizadas para o processo de segmentação das regiões de interesse: vazios, matriz e fragmento de rocha ou sólidos (Figura 5). Esse processo consiste em distinguir as diferentes fases das imagens por meio da identificação dos

voxels relativamente puros e mistos, como, também, identificar as fases que cada um está inserido. Voxels puros são aqueles que representam, predominantemente, uma única fase e são semelhantes a uma vizinhança. Voxels mistos são aqueles que apresentam características de mais de uma fase, possuindo grande variabilidade quando comparados com seu entorno.

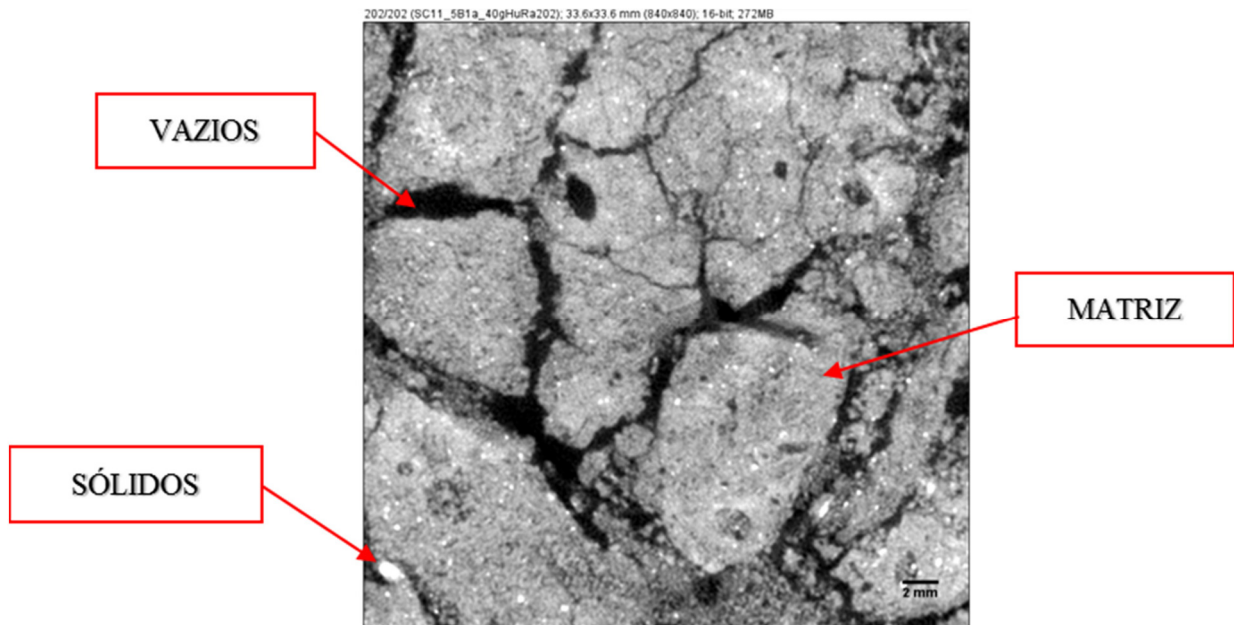


Figura 5. Imagem em escala de Hounsfield e suas regiões ou fases de interesse para segmentação de vazios, matriz e sólidos.

Todo o processo de segmentação de imagens foi executado no programa *ImageJ*. Para a identificação e a extração dos voxels puros foi

utilizado um *plug-in* chamado *Pure Voxel Extration* (PVE), o qual analisa a variabilidade do voxel com a média dos valores de uma vizinhança

de 124 voxels. Foi adotado um coeficiente de variabilidade limite do voxel em relação à média de 20%, com -1 e 1 desvio padrão. Esses valores limite são adotados visando localizar um histograma multimodal como uma quantidade de gaussianas maior que o histograma da imagem original, em escala de Hounsfield. Como os voxels puros representam fases bem definidas, cada curva gaussiana encontrada indica uma fase da imagem.

Os dados obtidos com o histograma gerado pela imagem do PVE foram utilizados em uma rotina de Matlab para a identificação dos valores das médias e suas variâncias de cada curva gaussiana. A partir das médias encontradas foi possível identificar, através da ferramenta *Threshold*, as fases que elas representavam.

A identificação e a determinação das fases dos voxels mistos, a partir das médias e da variância das fases de interesse, foi realizada pelo *plug-in CT Segmentation*, utilizando quatro métodos: *Clamping*, *Laplacian Filter*, *Edge Detection* e *Seeded Region Growing*. Essa etapa da segmentação foi realizada duas vezes, uma para a segmentação de vazios e não vazios (Figura 6a) e outra para a segmentação de sólidos e não-sólidos (Figura 6b). A imagem resultante desse processo foi uma imagem segmentada de vazios, matriz e sólidos (Figura 6c).

Análise das imagens

A análise dos vazios foi feita com a imagem final segmentada binarizada, onde vazios apresenta valor de 255 e não-vazios valor 0, utilizando o *plug-in Particle Analyzer*, também presente no *ImageJ*. Na análise de partículas, os vazios foram classificados em três faixas de tamanho: pequenos (P), médios (M) e grandes (G) (Figura 7a-c). Os vazios pequenos são aqueles formados por até 8 voxels, os médios entre 9-100000 voxels e o grandes são aqueles com uma quantidade de voxels maior que 100001. Essa divisão foi feita devido a

capacidade limitada de processamento do *plug-in Particle Analyzer* em identificar e rotular os muitos vazios existentes em uma imagem tomográfica. Esse *plug-in* associa elipsoides aos vazios fornecendo dados como volume de voxels (pixels³), área superficial (pixels²), coordenadas e tamanho dos eixos do elipsoide de referência. A porosidade foi calculada através da relação entre a soma dos volumes dos vazios P ($V_{\text{poro}(P)}$), M ($V_{\text{poro}(M)}$) e G ($V_{\text{poro}(G)}$) (Equação 2) e o subvolume reconstruído da amostra ($V_{\text{subvolume}}$) (Equação 3). Para isso, os volumes dos poros (V_{poro}) (mm³) foram calculados através da multiplicação do volume (V_{voxel}) (voxel) fornecido pelo *plug-in* pela resolução da imagem (voxel³) (tamanho do voxel) (Equação 1).

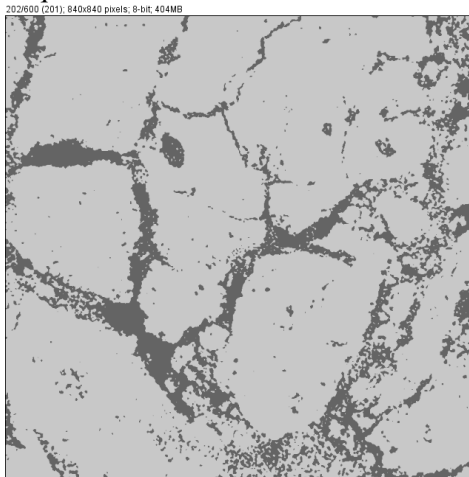
$$V_{\text{poro}} = V_{\text{voxel}} \cdot (\text{voxel}^3) \quad (1)$$

$$V_{\text{total}} = \sum V_{\text{poro}(P)} + \sum V_{\text{poro}(M)} + \sum V_{\text{poro}(G)} \quad (2)$$

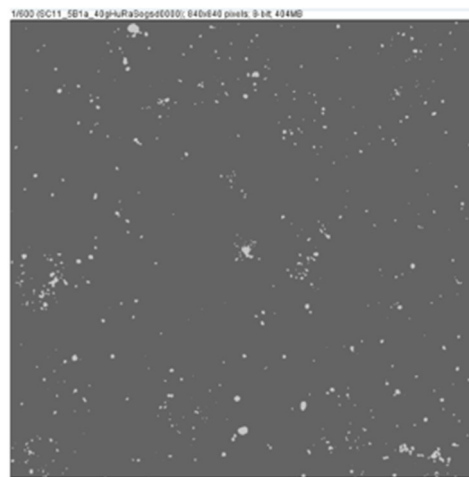
$$\eta = \frac{V_{\text{total}}}{V_{\text{subvolume}}} \times 100 \quad (3)$$

Os vazios do tipo grande (G) foram considerados como vazios inter-agregados e os vazios classificados como médio (M) e pequeno (P) formam os vazios intra-agregados. Também foi calculada a quantidade de agregados no subvolume adotado, sendo igual ao volume total da região em estudo, ou seja, o subvolume reconstruído ($V_{\text{subvolume}}$) menos o volume de vazios inter-agregados ($V_{\text{poro}(G)}$) (Equação 4).

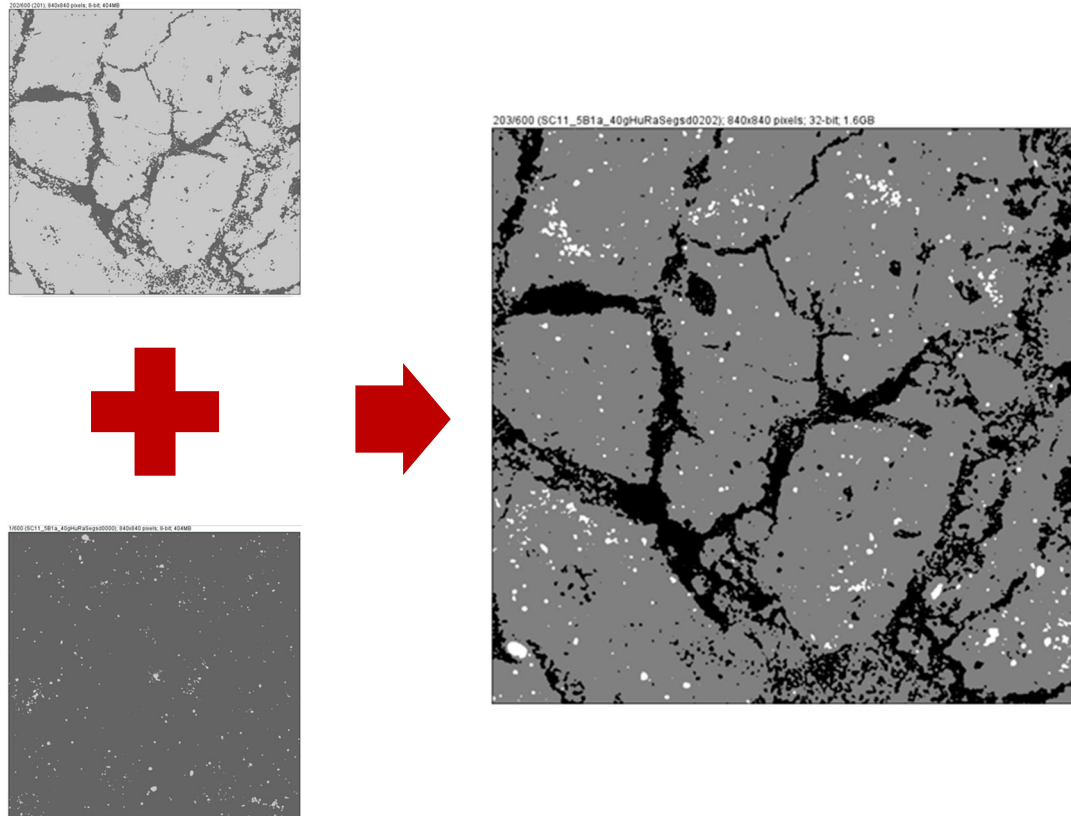
$$V_{\text{agregado}} = V_{\text{subvolume}} - V_{\text{poro}(G)} \quad (4)$$



(a)



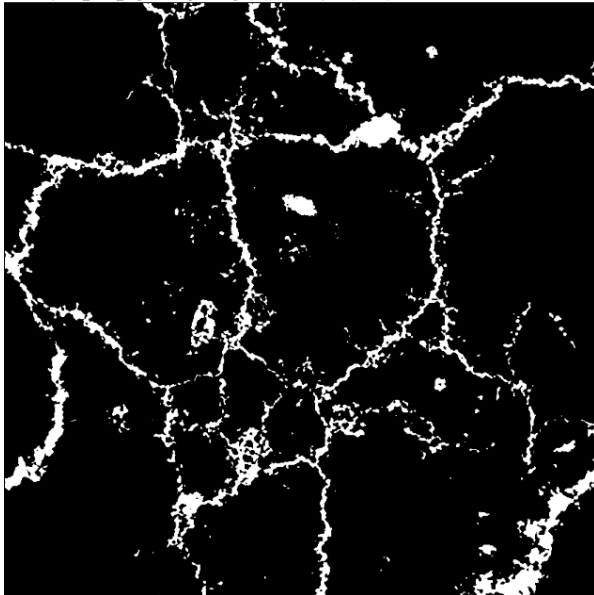
(b)



(c)

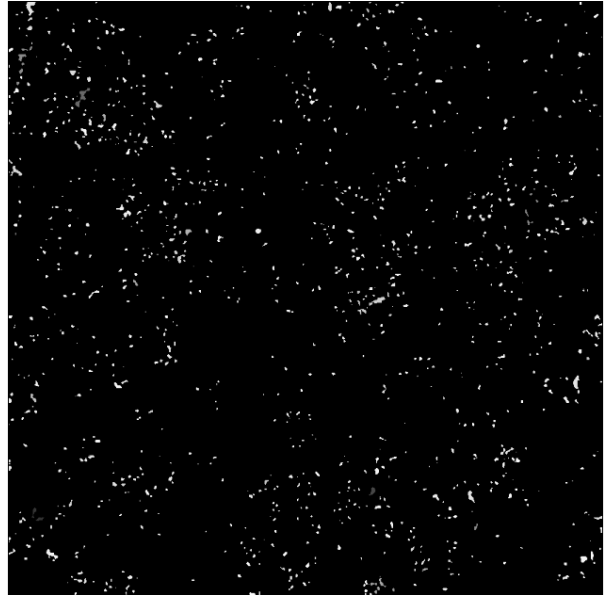
Figura 6. Imagem segmentada em vazios e não-vazios (a), sólidos e não-sólidos (b), vazios, matriz e sólidos (c) da amostra de Latossolo Vermelho distrófico submetido ao cultivo de soja antes do cultivo da cana-de-açúcar.

166/300 (SC11_4B1a_40gHuRaSegvdBIPalg0165); 840x840 pixels; 32-bit; 807MB



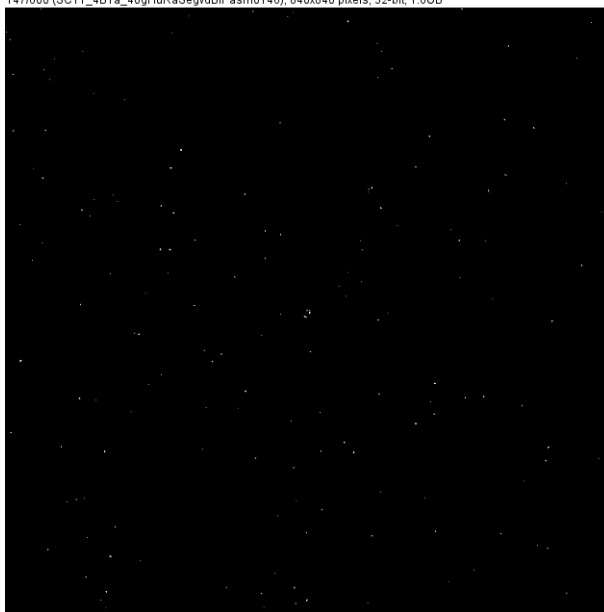
(a)

166/200 (SC11_4B1a_40gHuRaSegvdBIPamd0165); 840x840 pixels; 32-bit; 538MB



(b)

14//0UU (SC11_4B1a_4UGHUKASegv0BIPASMU14b); 84UX84U PIXEIS; 3.2-DIE; 1.0GB



(c)

Figura 7. Imagem das três faixas de tamanho de vazios: grandes (G) (a), médios (M) (b) e pequenos (P) (c) da amostra de Latossolo Vermelho distrófico.

Resultados e discussão

Através das imagens dos subvolumes reconstruídos das amostras de solo LVd e de solo NRe (Figura 3a-d) se obteve uma porosidade de 13% para o LVd com cultivo de soja, antes da expansão da cana-de-açúcar (LVd_soja), 18% para o solo LVd antes com pastagem (LVd_pasto) e 22% para uso anterior do solo com sucessão de pasto/soja (LVd_suc) (Tabela 2). Esses valores, quando comparados com as porosidades totais obtidas por Silva e Castro (2014) e Almeida et al. (2015) (Tabela 1), apresentaram uma menor porosidade em todos os solos analisados. Isso ocorre devido a uma limitação da técnica em analisar poros menores que o volume do voxel da imagem, ou seja, vazios com volumes menores que $0,04 \times 0,04 \times 0,04 \text{ mm}^3$ (resolução de $40 \mu\text{m}$) para o solo LVd; volumes menores que $0,05 \times 0,05 \times 0,05 \text{ mm}^3$ (resolução de $50 \mu\text{m}$) para o NRe não podem ser analisados.

Para os solos LVd, a porosidade encontrada representou 41% da porosidade total obtida por Silva e Castro (2014) para o LVd_soja, 49% para o LVd_pasto e 55% para solo LVd_suc. A porosidade obtida para o solo NRe foi de 65% da porosidade apresentada por Almeida et al. (2015). Portanto, houve uma redução mais acentuada na porosidade dos solos LVd que no solo NRe, isso podendo ser justificado pela diferença em suas classes texturais, visto que solos arenosos, como o NRe, tem como característica possuir poros de tamanhos maiores que os solos com maior teor de argila, como o LVd. Esse último é o mais

prejudicado pela limitação da técnica em analisar os poros menores.

Analisando as duas classes texturais diferentes, o solo NRe apresentou uma porosidade maior que as encontradas para o solo LVd, corroborando os dados obtidos por Silva e Castro (2014) e Almeida et al. (2015), apresentados na Tabela 1. Solos com maior teor de argila geralmente são mais porosos que solos arenosos, devido sua capacidade de organizar suas partículas em unidades estruturais porosas, resultando em uma densidade menor. Com isso, os valores menores de porosidade para o LVd pode indicar uma maior compactação desse solo em relação ao NR e que, segundo Silva (2012), pode ser resultado da susceptibilidade desse solo de textura média a uma compactação, esta, podendo, ainda, ter sido intensificada pelo uso de maquinários durante o preparo do solo e colheita.

Em relação à distribuição dos poros, a porosidade inter-agregados encontrada foi de 10% para o LVd_soja, 16% para o para o LVd_pasto e de 21% para o LVd_suc. No solo NRe, a quantidade de poros inter-agregados no subvolume analisado foi de 27%.

O solo NRe, portanto, apresentou uma porosidade inter-agregados maior que o solo LVd, se constituindo em um comportamento esperado, uma vez que solos de textura arenosa tendem a possuir uma macroporosidade maior que solos com maiores teores de argila. As imagens tomográficas em 3D (Figura 8a-c) ilustram bem o comportamento do espaço poroso desses dois tipos

de solo, mostrando uma rede de macroporos maior e mais contínua no solo NRe.

Tabela 2. Atributos físicos do Latossolo Vermelho e do Neossolo Regolítico obtidos com a aplicação de Microtomografia Computadorizada de Raios-X.

AMOSTRA	PROF	P	AG	V. INTER	V. INTRA
	cm	(%)			
Latossolo Vermelho distrófico – LVd					
LVd_soja	30-70	13	90	10	3
LVd_pasto	20-44	18	84	16	2
LVd_suc.	29-56	22	79	21	1
Neossolo Regolítico eutrófico – NRe					
NRe	0-20	28	73	27	1

Profundidade (PROF), porosidade (P), agregados (AG), vazios inter-agregados (V. INTER) e vazios intra-agregados (V. INTRA) dos solos.

Comparando as amostras de um único tipo de solo (LVd), observou-se uma maior frequência de poros inter-agregados no LVd_suc, seguida por LVd_pasto e, por último, o LVd_soja. A compressão do solo que é ocasionada pelas diferentes práticas de manejo, com uso intensivo do solo e a presença de maquinários durante os processos de cultivo e colheita, promovem mudanças na estrutura do solo (Wendling et al., 2005). Isto diminui os tamanhos dos vazios maiores, devido ao aumento da separação desses poros e uma perda de continuidade e conectividade, reduzindo, assim, sua capacidade de conduzir água e, conseqüentemente, alterando o desenvolvimento do sistema radicular das plantas estabelecidas sobre ele (Shäffer et al., 2008 a e). Diante disso, e considerando que as condições atuais de cultivo da cana-de-açúcar são iguais em todos os solos analisados, a redução dos vazios inter-agregados detectada nas amostras de solo LVd pode representar uma diferença no grau de compactação causada pelos tipos de manejo utilizados antes do cultivo da cana-de-açúcar, com o solo LVd_soja sendo aquele que apresentou uma maior compactação. Porém, ao se analisar as imagens tomográficas em 3D (Figura 3b-c), percebeu-se a presença de fissuras nas amostras do solo LVd_pasto e do solo LVd_suc. Essas fissuras podem ter sido geradas em consequência de uma coleta inadequada, ou a um manejo também inadequado das amostras, resultando em um aumento na frequência de poros inter-agregados nesses dois tipos de solo. Considerando os poros intra-agregados, os valores de porosidade obtidos

foram de 3%, 2% e 1% para os solos LVd_soja, LVd_pasto e LVd_suc, respectivamente. O NRe também apresentou uma porosidade intra-agregados de 1%. Como esperado, o NRe apresentou uma menor porosidade intra-agregado, como ocorre com a maioria dos solos LVd analisados, devido a uma baixa capacidade de agregação das partículas característica dos solos arenosos.

A agregação das partículas do solo está fortemente relacionada à concentração e tipo de argila, ao teor de matéria orgânica e à presença de microrganismos e raízes de plantas. Solos arenosos possuem partículas menos predispostas à formação de agregados, quando comparados aos solos com maiores teores de argila, justificando, também, a menor quantidade de agregados encontrada no solo NRe, com 73%, em função de sua maior concentração de areia.

Analisando as amostras de solo LVd, a amostra LVd_suc, com 79%, possui menor agregação que as outras duas, mesmo tendo maior concentração de argila (Tabela 2). Uma possível justificativa para esse comportamento pode estar relacionada às fissuras verificadas a partir das análises nas imagens tomográficas em 3D desses solos (Figura 3b-c), onde o aumento de poros maiores resultou na redução da quantidade de agregados desses solos. Porém, deve ser feito um estudo mais detalhado do teor de matéria orgânica e densidade do solo para entender melhor esse comportamento e verificar se existe alguma relação com a compactação desse meio.

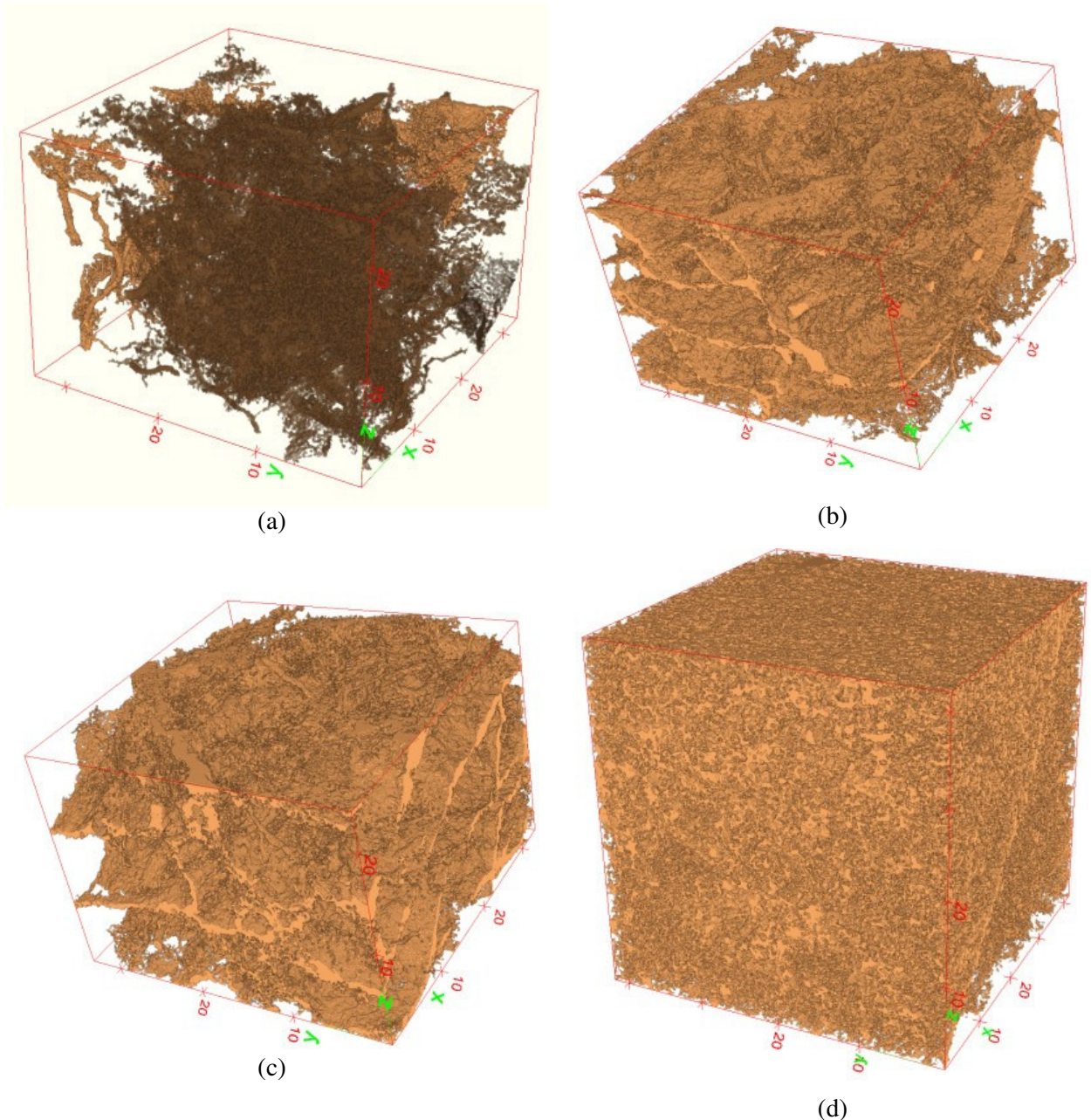


Figura 8. Espaço poroso inter-agregados do Latossolo Vermelho distrófico: LVd_soja (a), LVd_pasto (b), LVd_suc (c) e do Neossolo Regolítico eutrófico (d).

A perda de continuidade dos poros maiores causada pela compactação do solo resulta em um aumento na quantidade de meso e microporos. Com isso, analisando o comportamento dos vazios intra-agregados (Tabela 2), verificou-se uma maior quantidade desse tipo de poro no LVd_soja, seguido por LVd_pasto e LVd_suc. Pode-se verificar esse comportamento na distribuição no espaço poroso intra-agregados dos solos LVd_soja, LVd_pasto, LVd_suc (Figura 9), onde há uma

menor densidade desse tipo de poro no LVd_suc, (Figura 9c).

Porém, como há uma limitação da técnica devido à resolução das imagens; a quantidade desse tipo de poros pode não estar sendo bem representada. O solo LVd_suc pode apresentar uma quantidade bem maior de microporos que o solo LVd_soja, os quais não estão sendo computados em consequência dessa limitação.

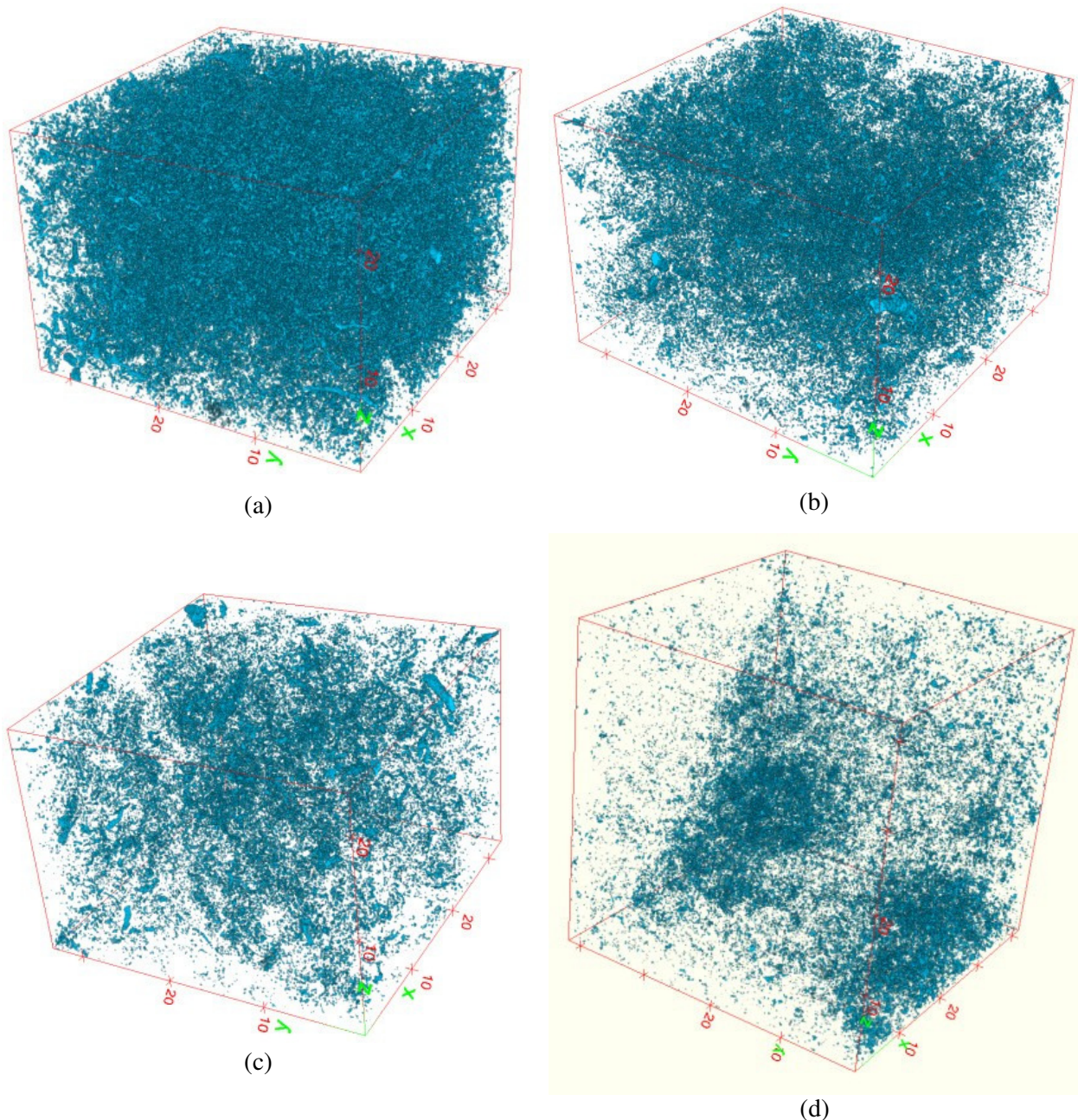


Figura 9. Espaço poroso intra-agregados do Latossolo Vermelho distrófico: LVd_soja (a), LVd_pasto (b), LVd_suc (c) e do Neossolo Regolítico eutrófico (d).

Com isso, não se pode determinar o grau de compactação dessas amostras analisando os dados obtidos. É necessária uma análise mais detalhada do poros intra-agregados, através de um estudo morfométrico, para que se possa entender melhor as mudanças na estrutura de um solo e, conseqüentemente, a dinâmica dos fluidos e o desenvolvimento das plantas estabelecidas sobre ele, visto que, o estudo unicamente da porosidade total de um solo não é suficiente para a análise das suas propriedades físico-hídricas.

As oscilações na hidratação do solo implicam na alteração da sua estrutura, especialmente no que se refere ao melhor desenvolvimento das raízes e conseqüente

utilização da água existente nos espaços porosos, fundamental para um adequado desenvolvimento de espécies cultivadas. Massat et al. (2016) destaca a relevância no aumento de espaços porosos no solo em conseqüência de um aumento na hidratação do mesmo, levando a uma redução da porosidade inter-agregado.

A comprovação da relevância no uso da tomografia computadorizada de raios-X no avanço da compreensão das particularidades e especificidades da estrutura dos solos e suas implicações para a condução/acumulação de água, facilidades/dificuldades para o desenvolvimento de raízes de plantas, especialmente se tratando daquelas cultivadas, é extensamente encontrada na

literatura abordando variados objetivos de aplicação (Pires et al., 2011; Beckers et al., 2014; Lu et al., 2014; Pires et al., 2014; Carducci et al., 2016; Massat et al., 2016; Prado et al., 2016; Robin et al., 2016).

Conclusões

A tomografia computadorizada de raios-X possui limitações para a determinação da porosidade de um solo, especialmente para aqueles solos com maiores teores de argila, onde a porosidade encontrada não pode representar a porosidade total do solo devido a uma restrição de visualização daqueles poros menores que o valor da resolução das imagens.

A utilização da tomografia computadorizada de raios-X se mostra bastante eficiente na caracterização dos espaços vazios (inter-agregados) e permite uma avaliação segura dos solos quanto à sua capacidade de condução/retenção de água e facilitação no desenvolvimento das raízes de plantas vasculares. Esta informação adquire um valor especial quando aplicada à uma avaliação/monitoramento das condições da estrutura do solo no tocante às condições mais adequadas ao melhor desenvolvimento das raízes de espécies cultivadas.

A utilização das análises da porosidade inter-agregados em amostras de solo não-perturbados, através da tomografia computadorizada de raios-X, se mostrou eficaz para a caracterização destes poros. Isto foi seguramente constatado pela comparação entre tipos de solos com teores bem distintos de argila, como comprovado para amostras de solos dos tipos Latossolo Vermelho distrófico e Neossolo Regolítico eutrófico.

Ressalta-se que é de suma importância que as amostras tenham sido rigorosamente submetidas a um processo adequado de coleta e transporte até o laboratório onde serão obtidas as imagens no tomógrafo, visto que a possibilidade da produção de fissuras ou fraturas durante estes procedimentos pode superestimar a frequência desse tipo de poro.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio à pesquisa, através da concessão da bolsa de estudo de mestrado da primeira autora (Processo nº. 130874/2015-9) e das Bolsas de Produtividade dos professores Antonio Celso Dantas Antonino e Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel (Bolsa Sênior da CAPES, BEX no 1752/14-6). Ao grupo de pesquisa de Geografia da Universidade Federal de Goiás, Brasil, pela coleta das amostras, fornecimento de dados utilizados nesse trabalho.

Ao grupo de pesquisa de Física do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, Brasil, pelo fornecimento de dados utilizados nesse trabalho. Ao Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE) e ao Soil Imaging Laboratory, School of Environmental Sciences, University of Guelph, Canadá, pela disponibilização de imagens utilizadas nesse estudo; agradecimento especial ao primeiro laboratório citado por disponibilizar espaço em seu servidor e acesso aos programas utilizados para a realização das análises.

Referências

- Almeida, A. V. D. L., Corrêa, M. M., Lima, J. R. de S., Souza, E. S., Santoro, K. R., Antonino, A. C. D., 2015. Atributos Físicos, Macro e Micromorfológicos de Neossolos Regolíticos no Agreste Meridional de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 39, 1235-1246.
- Beckers, E., Plougonven, E., Roisin, C., Hapca, S., Léonard, A., Degré, A., 2014. X-ray microtomography: A porosity-based thresholding method to improve soil pore network characterization? *Geoderma* 219-220, 145-154.
- Carducci, C. E., Zinn, Y. L., Rossoni, D. F., Heck, R. J., Oliveira, G. C., 2016. Visual analysis and X-ray computed tomography for assessing the spatial variability of soil structure in a cultivated Oxisol. *Soil and Tillage Research*. No prelo.
- Crestana, S., Mascarenhas, S., Pozzi-Mucelli, R. S., 1985. Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning. *Soil Science* 140, 326-332.
- De Freitas, D. A. F., Silva, M. L. N., Cardoso, E. L., Curi, N., 2012. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. *Revista Ciência Agronômica* 43, 417-428.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária., 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro.
- Gonçalves, F. C., Moraes, M. H., 2012. Porosidade e infiltração de água do solo sob diferentes sistemas de manejo. *Irriga* 17, 337.
- Hainsworth, J. M., Aylmore, L. A. G., 1983. The use of computer assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Australian Journal of Soil Research* 21, 435-443.
- Hillel, D., 1998. *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental*

- considerations. Academic Press. San Diego, CA.
- Hsieh, H. T., Brown, G. O., Stone, M. L., Lucero, D. A., 1998. Measurement of porous media component content and heterogeneity using gamma ray tomography. *Water Resources Research* 34, 365-372.
- Jorge, R. F., de Almeida, C. X., Borges, E. N., Passos, R. R., 2012. Distribuição de poros e densidade de latossolos submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo. *Bioscience Journal* 28, 159-169.
- Lu, S. G., Malik, Z., Chen, D. P., Wu, C. F., 2014. Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides. *Catena* 123, 79-87.
- Marsili, A., Servadio, P., Pagliai, M., Vignozzi, N., 1998. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber-and metal-tracked tractors. *Soil and Tillage Research* 49, 185-199.
- Massat, L., Cuisinier, O., Bihannic, I., Claret, F., Pelletier, M., Masrouri, F., Gaboreau, S., 2016. Swelling pressure development and inter-aggregate porosity evolution upon hydration of a compacted swelling clay. *Applied Clay Science* 124-125, 197-210.
- Münch, B., Trtik, P., Marone, F., Stampanoni, M., 2009. Stripe and ring artifact removal with combined wavelet-Fourier filtering. *Optics Express* 17, 8567-8591.
- Othmer, H., Diekkrüger, B., Kutilek, M., 1991. Bimodal Porosity and Unsaturated Hydraulic Conductivity. *Soil Science* 152, 139-150.
- Pagliai, M., Lamarca, M., Lucamante, G., 1983. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in viticulture under zero and conventional tillage. *Journal of Soil Science* 34, 391-403.
- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N., Pellegrini, S., 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil and Tillage Research* 73, 119-129.
- Pagliai, M., Pellegrini, S., Vignozzi, N., Rousseva, S., Grasselli, O., 2000. The quantification of the effect of subsoil compaction on soil porosity and related physical properties under conventional to reduced management practices. *Advances in GeoEcology* 32, 305-313.
- Pagliai, M., Vignozzi, N., Pellegrini, S., 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research* 79, 131-143.
- Petrovic, A. M., Siebert, J. E., Rieke, P. E., 1982. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. *Soil Science Society of America Journal* 46, 445-450.
- Pires, L. F., Brinatti, A. M., Saab, S. C., Cássaro, F. A. M., 2014. Porosity distribution by computed tomography and its importance to characterize soil clod samples. *Applied Radiation and Isotopes* 92, 37-45.
- Pires, L. F., Cássaro, F. A. M., Bacchi, O. O. S., Reichardt, K., 2011. Non-destructive image analysis of soil surface porosity and bulk density dynamics. *Radiation Physics and Chemistry* 80, 561-566.
- Robin, V., Paul, S., Arnaud, M., Olivier, R., Michael, D., 2016. Effective porosity measurements of poorly consolidated materials using non-destructive methods. *Engineering Geology* 205, 24-29.
- Schäffer, B., Mueller, T. L., Stauber, M., Müller, R., Keller, M., Schulin, R., 2008a. Soil and macro-pores under uniaxial compression. II. Morphometric analysis of macro-pore stability in undisturbed and repacked soil. *Geoderma* 146, 175-182.
- Schäffer, B., Stauber, M., Mueller, T. L., Müller, R.; Schulin, R., 2008b. Soil and macro-pores under uniaxial compression. I. Mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. *Geoderma* 146, 183-191.
- Silva, A. A., 2012. Transformações no uso da terra e na estrutura de solos no cerrado em áreas de expansão da cana-de-açúcar—o caso da microrregião de Quirinópolis, Goiás. Tese de Doutorado em Geografia - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Sócio-Ambientais.
- Silva, A. A., Castro, S. S., 2014. Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física de um latossolo vermelho textura média cultivado com cana-de-açúcar na microrregião de Quirinópolis, Goiás. *Boletim Goiano de Geografia* 34, 233-251.
- Stefanoski, D. C., Santos, G. G., Marchão, R. L., Petter, F. A., Pacheco, L. P., 2013. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17, 1301-1309.
- Tormena, C. A., Silva, A. D., Libardi, P. L., 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Bras.Ci. Solo* 22, 573-581.
- Wei, Z., Wiebe, S., Chapman, D., 2013. Ring artifacts removal from synchrotron CT image slices. *Journal of Instrumentation* 8, C06006.

Wendling, B., Jucksch, I., Mendonça, E. D. S.,
Neves, J. C. L., 2005. Carbono orgânico e
estabilidade de agregados de um Latossolo

Vermelho sob diferentes manejos. Pesquisa
Agropecuária Brasileira 40, 487-494.