

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**SABRINA PASSONI**

**MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X NA CARACTERIZAÇÃO  
MICROMORFOLÓGICA DE SOLO SUBMETIDO A DIFERENTES MANEJOS**

**PONTA GROSSA  
2013**

**SABRINA PASSONI**

**MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X NA CARACTERIZAÇÃO  
MICROMORFOLÓGICA DE SOLO SUBMETIDO A DIFERENTES MANEJOS**

**Dissertação apresentada para  
obtenção do título de Mestre na  
Universidade Estadual de Ponta  
Grossa, no Programa de Pós  
Graduação em Ciências/ Física.**

**Orientador Prof. Dr. Luiz Fernando  
Pires**

**PONTA GROSSA  
2013**

**Ficha Catalográfica**  
**Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG**

Passoni, Sabrina  
P288      Microtomografia de raios x na  
            caracterização micromorfológica de solo  
            submetido a diferentes manejos/ Sabrina  
            Passoni. Ponta Grossa, 2013.  
            146f.

            Dissertação (Mestrado em Ciências -  
            Área de Concentração: Física),  
            Universidade Estadual de Ponta Grossa.  
            Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando  
            Pires.

            1.Estrutura do solo. 2.Análise de  
            imagens. 3.Conectividade e tortuosidade.  
            I.Pires, Luiz Fernando. II. Universidade  
            Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em  
            Ciências. III. T.

CDD: 539

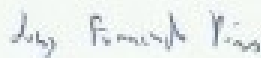
**TERMO DE APROVAÇÃO**

**SABRINA PASSONI**

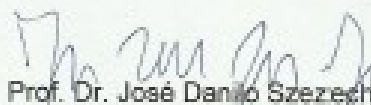
**“MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X NA CARACTERIZAÇÃO  
MICROMORFOLÓGICA DE SOLOS SUBMETIDOS A DIFERENTES MANEJOS”**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências - Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora,

Orientador:



Prof. Dr. Luiz Fernando Pires  
Departamento de Física - UEPG/PR.



Prof. Dr. José Danilo Szezech Júnior  
Departamento de Matemática e Estatística - UEPG/PR.



Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior  
Departamento de Ciência do Solo - UFLA/MG

Ponta Grossa, 31 de julho de 2013.

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, pela vida, por quem sou hoje e por abençoar meu caminho em todos os momentos;

À minha família, pelo amor, compreensão e incentivo. Em especial, à minha mãe, por ser exemplo e fortaleza na minha vida; e ao meu pai, o qual estaria orgulhoso em vivenciar mais uma etapa concluída.

Ao meu filho Henrique, pelo entendimento da ausência materna durante este período de dedicação profissional;

Ao meu amor Julio César, pelo “colo” nas horas difíceis, pela compreensão e palavras de carinho e incentivo.

Ao prof. Dr. Luiz Fernando Pires, pela amizade, orientação e dedicação na realização deste trabalho;

À todos do grupo FASCA, por seu companheirismo e conhecimento compartilhado. Em especial à minha amiga e companheira de todas as horas, Jaqueline Aparecida Ribaski Borges, por ser paciente e sempre compreensiva nas horas de “crise” durante estes anos em que trabalhamos juntas; e principalmente por ter desenvolvido parte deste trabalho em conjunto.

À CNEN, pela bolsa de mestrado;

Ao Dr. Jadir Aparecido Rosa do IAPAR, unidade Ponta Grossa, pela área disponibilizada para a coleta das amostras.

Ao Dr. Richard J. Heck, pela aquisição das imagens microtomográficas, pela disponibilidade de programas no servidor e pelo conhecimento compartilhado.

À Bárbara Junqueira, pelo auxílio e orientação no tratamento das imagens microtomográficas.

Ao Dr. Waldir Roque, pelos dados de tortuosidade e conectividade, bem como suas orientações nas análises.

“Não temas, porque eu sou contigo; não te assombres, porque eu sou teu Deus; eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento com a destra da minha justiça. Eis que envergonhados e confundidos serão todos os que se irritam contra ti; tornar-se-ão em nada; e os que contenderem contigo perecerão. Quanto aos que pelejam contigo, buscá-los-ás, mas não os acharás; e os que guerreiam contigo tornar-se-ão em nada e perecerão. Porque eu, o Senhor teu Deus, te seguro pela tua mão direita, e te digo: Não temas; eu te ajudarei.”

(Isaías 41: 10-13)

## RESUMO

A microtomografia computadorizada de raios X ( $\mu$ CT) é uma técnica não-invasiva, que pode ser usada com sucesso para analisar as propriedades físicas do solo pelos cientistas, sem destruir a estrutura do solo. A técnica apresenta vantagens sobre os métodos convencionais: a caracterização do sistema poroso do solo em três dimensões, a qual permite análises de propriedades morfológicas, tais como a conectividade e tortuosidade dos poros. No entanto, como o solo é um sistema não-homogêneo e complexo, a técnica de  $\mu$ TC necessita de metodologias específicas para o processamento de imagens digitais, principalmente durante o processo de segmentação. Os objetivos deste trabalho foram: 1) desenvolver uma metodologia de processamento digital de imagens microtomográficas; 2) caracterizar a estrutura do solo por meio de análise micromorfológica das amostras submetidas a sistemas plantio direto e plantio convencional coletadas em três camadas distintas (0-10, 10-20 e 20-30 cm) e 3), identificar possíveis alterações no sistema poroso do solo analisado, devido ao efeito de diferentes sistemas de manejo. O uso da técnica de tomografia computadorizada e os procedimentos adotados para o processamento de imagem digital microtomográfica mostrou-se eficiente para a caracterização micromorfológica do sistema poroso do solo. Os dados do solo sob sistema de plantio direto apresentou os melhores resultados do ponto de vista agrícola sobre a porosidade, o número total de poros, conectividade e tortuosidade em comparação com o plantio convencional.

Palavras-chave: estrutura do solo, análise de imagens, conectividade e tortuosidade.

## **ABSTRACT**

The X-ray computed microtomography (CT) represents a non-invasive technique that can be used with success to analyze physical properties by the soil scientists without destroying the structure of the soil. The technique has as advantage over conventional methods the characterization of the soil porous system in three dimensions, which allow morphological property analyses such as connectivity and tortuosity of the pores. However, as the soil is a non-homogeneous and complex system, the CT technique needs specific methodologies for digital image processing, mainly during the segmentation procedure. The objectives of this work were: 1) to develop a methodology for microtomographic digital image processing; 2) to characterize the soil structure by using micromorphology analysis of samples submitted to non-tillage and conventional systems collected in three distinct layers (0-10, 10-20 and 20-30 cm); and 3) to identify possible changes in the porous system of the soil analyzed due to the effect of different management systems. The use of the CT technique and the procedures adopted for microtomographic digital image processing show to be efficient for the micromorphologic characterization of soil porous system. Soil under non-tillage system presented the best results from the agricultural point of view regarding porosity, total number of pores, connectivity and tortuosity in comparison to the conventional tillage.

Key-words: structure of soil, image analysis, connectivity and tortuosity.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Esquema de um tomógrafo de raios X por feixe cônico, no qual a amostra gira durante a varredura abrangendo todo o seu volume. (Fonte: Adaptado de Alves, 2012).....39
- Figura 2 - Procedimento de aquisição (vermelho), pré-processamento (verde) e processamento de imagens (azul) tomográficas. (Fonte: Fernandes et al., 2009).....40
- Figura 3 – Os raios x atingem o material cintilador e este emite luz. A luz converge por meio de lentes onde é detectada pela câmera de CCD localizada logo atrás do detector formando a imagem (Fonte: Alves, 2012).....45
- Figura 4 – (a) Projeção de uma função  $f(x,y)$  associada; (b) Conjunto de projeções em diferentes ângulos  $\theta$ . (Fonte: (a) Natterer, 2001; (b) [http://www.walmorgodoi.com/arquivos/Palestra\\_Reconstrucao\\_Imagens.pdf](http://www.walmorgodoi.com/arquivos/Palestra_Reconstrucao_Imagens.pdf)).....47
- Figura 5 – Reconstrução de acordo com o número de projeções sem o uso de filtro (superior) e reconstrução de acordo com o número de projeções com o uso de filtro (inferior). Em ambos os casos nota-se que quanto mais projeções forem realizadas, melhor será a resolução espacial da imagem. (Fonte: [http://www.walmorgodoi.com/arquivos/Palestra\\_Reconstrucao\\_Imagens.pdf](http://www.walmorgodoi.com/arquivos/Palestra_Reconstrucao_Imagens.pdf)).....48
- Figura 6 – Exemplo de um pré-processamento simples: (a) imagem original com a presença de ruído gaussiano, (b) imagem após aplicação de um filtro mediana para redução do ruído e (c) imagem após aplicação de um filtro passa-alta para realce dos contornos. (Fonte: Gonzalez e Woods, 1993).....49
- Figura 7 – (a) Matriz de reconstrução da imagem tomográfica: para um FOV pequeno obtém-se uma matriz grande com maior número de *pixel* e melhor resolução espacial (esquerda) e para um FOV grande obtém-se uma matriz grande com quantidade reduzida do número de *pixels* e com resolução espacial de baixa qualidade (direita) e (b) da esquerda para direita uma mesma matriz com diferentes resoluções espaciais. (Fonte: [http://www.portalciep.com.br/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&download=26:tomografia-computadorizada&id=4:modulo-iii&Itemid=71](http://www.portalciep.com.br/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=26:tomografia-computadorizada&id=4:modulo-iii&Itemid=71)).....50
- Figura 8 – Representação de um detector de 144 *pixel*. Os quadrados vermelhos indicam o modo de *binning* adotado para três situações: 1x1, 2x2 e 3x3. Abaixo um zoom de uma matriz 2x2 com os respectivos valores de UT para cada *pixel*. (Fonte: Adaptado de <http://www.noao.edu/outreach/aop/glossary/binning.html>).....52
- Figura 9 – Os diferentes tons de cinza em uma imagem tomográfica em termos de Unidade Tomográfica (UT); onde o maior valor de UT, 1,0, representa a menor atenuação sofrida pela matéria em uma amostra de solo que corresponde ao poro. (Fonte: Borges, 2011).....54
- Figura 10 – (a) Imagem de solo monocromática digital com sistema de coordenada  $(x, y)$  e com 8 bits ( $2^8$ ) = 256 níveis de cinza, (b) mesma imagem com 16 bits ( $2^{16}$ ) = 65.536 níveis de cinza e (c) com 32 bits ( $2^{32}$ )  $\approx 4,3 \times 10^9$  níveis de cinza. (Fonte: A autora).....57
- Figura 11 – Em (a) imagem com histograma bimodal e em (b) imagem com histograma multimodal. (Fonte: Gonzalez e Woods, 1993).....58
- Figura 12 – Os dois artefatos estão indicados por setas vermelhas: o efeito estrela e o efeito de endurecimento do feixe. As imagens foram obtidas com diferentes energias, onde observa-se que estes efeitos são mais pronunciados com menor energia dos raios X (esquerda). Os artefatos em forma de estrela são representados pelas projeções fora da borda do material de alta densidade. E o endurecimento do feixe é o reflexo mais escuro da imagem (aparentemente mais denso) (Fonte: Heck, 2009).....60

Figura 13 – Imagem tomográfica com artefatos em forma de anel, obtida por meio de um $\mu$ TCFC. (Fonte: A autora).....	61
Figura 14 – Ilustração da distância geodésica $L_G$ e da distância Euclidiana $L_E$ , tomada entre pontos e entre planos. (Fonte: Roque et al., 2012).....	64
Figura 15 – Esquema do funcionamento do algoritmo de RG para uma imagem 2D 4x4 <i>pixels</i> . Note que o <i>pixel</i> isolado no canto superior direito em <i>l</i> é eliminado durante o procedimento em $r_4$ . No caso de uma imagem binária volumétrica serão <i>voxels</i> , o elemento estruturante é baseado nos 6-vizinhos ( $EE_6$ ) substituindo-se agora a linha de varredura por um plano varredor, a coluna inicial por um plano inicial. (Fonte: Roque et al, 2011).....	65
Figura 16 – (a) Relação das amostras utilizadas para cada sistema de manejo e suas respectivas camadas de coleta; (b) Foto de um tubo de acrílico similar àqueles utilizados na presente pesquisa. Este apresentado aqui possui dimensões de 6,4 cm e externo de 7,0 cm, com 7,5 cm de altura. (Fonte: A autora).....	70
Figura 17 – Microtomógrafo utilizado para a obtenção das imagens tomográficas das amostras de solo (à esquerda), fonte e filtros (centro); amostra e detectores (à direita). (Fonte: Heck, 2009).....	71
Figura 18 –(a) Sub-volume ( $58,212 \text{ cm}^3$ ) selecionado para reconstrução e (b) imagem (16 bit) reconstruída com resolução de $60 \mu\text{m}$ . Nesta imagem os materiais menos densos (poros) da amostra estão representados por tons de cinza mais escuro e os menos densos (minerais) por tons de cinza mais claro. (Fonte: A autora).....	72
Figura 19 – Imagens geradas: VAR (à esquerda) e LowVAR (à direita). (Fonte: A autora).....	73
Figura 20 – (a) Fluxograma do processo executado para minimização dos artefatos em forma de anéis presentes nas imagens microtomográficas. (b) Imagem criada durante o processo de extração dos artefatos em forma de anéis. Este é o fator de correção ( <i>cf</i> ) que corresponde à parte “defeituosa”, o qual nesta etapa apresentada na figura, ainda não foi aplicado o filtro. Após a passagem dos filtros ela é “devolvida” para a imagem original (Fonte: A autora).....	74
Figura 21 – As imagens são de antes (esquerda) e depois (direita) da aplicação do <i>plugin</i> para correção dos artefatos em forma de anéis. (Fonte: A autora).....	75
Figura 22 – (a) Interface do programa <i>Origin</i> para determinação dos picos correspondentes às fases sólida e gasosa das amostras de solo; (b) Local da distribuição da escala de cinza em que ocorre a dúvida do que é sólido e do que é ar dentro da amostra. (Fonte: (a) A autora (b) cortesia Jaqueline A. R. Borges).....	76
Figura 23 – Exemplo de parâmetros utilizados para a segmentação de um conjunto de imagens com resolução de $60 \mu\text{m}$ . A janela é aberta no programa <i>Image J</i> após o comando <i>Plugin/CT Segmentation/CT Segmentation SD Variant</i> . (Fonte: A autora).....	77
Figura 24 – (a) Imagem original; (b) <i>Clamped</i> ; (c) <i>Laplacian</i> ; (d) <i>Zero-crossings</i> ; (e) <i>Unknown: 255, rest: 0</i> ; (f) <i>Unknown: Laplacian, other: NaN</i> ; (g) <i>More Air: 255, rest: 0</i> ; (h) <i>More Solid: 255, rest: 0</i> ; (i) <i>Air: 255, rest: 0</i> ; (j) <i>Solid: 255, rest: 0</i> ; (k) <i>Seed Image, Unknown:0, Air:1, Solid: 2</i> ; (l) <i>SRG</i> ; (m) <i>imagem binária, onde os poros estão representados pela cor branca</i> ; (n) Sequência de imagens renderizadas (Fonte: A autora).....	80
Figura 25 - Interface do programa <i>Image J</i> para determinação do valor de <i>threshold</i> aplicado para definição dos poros na imagem (Fonte: A autora).....	82
Figura 26 - Fluxograma do procedimento de classificação, binarização e contabilização de parâmetros físicos que definem forma, tamanho, número total de poros e porosidade.*Na primeira etapa são excluídos os poros G+M, na segunda são excluídos os G e por último restam apenas os poros M. (Fonte: A autora).....	84

Figura 27 – Formato de um objeto definido por meio de seus eixos principais: maior (ma), menor (me) e intermediário (in) sugeridos por Bullock et al., (1985) utilizados para a classificação dos poros médios (M). (Fonte: adaptado de Bullock et al., 1985).....	85
Figura 28 – Macroporosidade total percentual, $MAP_{total}(\%)$ , por volume de amostra para cada camada: 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm e para os sistemas de manejo: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC).....	90
Figura 29 – Número de macroporos, NMAP, por volume de amostra para cada camada: 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm e para os sistemas de manejo: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC).....	94
Figura 30 – Macroporosidade percentual, $MAP(\%)$ , por volume de amostra em função do volume dos macroporos: pequeno (P), médio (M) e grande (G); nas camadas: 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm para os sistemas de manejo: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC).....	96
Figura 31 – Número de macroporos, NMAP, por volume de amostra em função do volume dos macroporos: pequeno (P), médio (M) e grande (G); nas camadas: 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm para os sistemas de manejo: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC).....	98
Figura 32 – Macroporosidade percentual, $MAP(\%)_M$ , por volume de amostra em função da forma dos macroporos médios (M): esferoidal (ES), haste (HA), disco (DI), elipsoidal (EL) e não-classificados (NC); para a camada 0-10 cm: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC); para a camada 10-20 cm: (c) Plantio Direto (PD) e (d) Plantio Convencional (PC) e para a camada 20-30 cm: (e) Plantio Direto (PD) e (f) Plantio Convencional (PC).....	101
Figura 33 – Número de macroporos, NMAP, por volume de amostra em função da forma dos macroporos médios (M): esferoidal (ES), haste (HA), disco (DI), elipsoidal (EL) e não classificados (NC); para a camada 0-10 cm: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC); para a camada 10-20 cm: (c) Plantio Direto (PD) e (d) Plantio Convencional (PC) e para a camada 20-30 cm: (e) Plantio Direto (PD) e (f) Plantio Convencional (PC).....	104
Figura 34 – Macroporosidade percentual, $MAP(\%)_M$ , por volume de amostra em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos médios (M) para a camada 0-10 cm: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC); para a camada 10-20 cm: (c) Plantio Direto (PD) e (d) Plantio Convencional (PC) e para a camada 20-30 cm: (e) Plantio Direto (PD) e (f) Plantio Convencional (PC).....	106
Figura 35 – Número de macroporos, NMAP, por volume de amostra em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos médios (M) para a camada 0-10 cm: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC); para a camada 10-20 cm: (c) Plantio Direto (PD) e (d) Plantio Convencional (PC) e para a camada 20-30 cm: (e) Plantio Direto (PD) e (f) Plantio Convencional (PC).....	108
Figura 36 – Macroporosidade percentual, $MAP(\%)_M$ , por volume de amostra em função da forma e do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos médios (M) para o PD: (a) camada de 0-10 cm, (b) camada de 10-20 cm e (c) camada 20-30 cm.....	110
Figura 37 – Macroporosidade percentual, $MAP(\%)_M$ , por volume de amostra em função da forma e do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos médios (M) para o PC: (a) camada de 0-10 cm, (b) camada de 10-20 cm e (c) camada 20-30 cm.....	112
Figura 38 – Número de macroporos, NMAP, por volume de amostra em função da forma e do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos médios para o PD: (a) camada de 0-10 cm, (b) camada de 10-20 cm e (c) camada 20-30 cm.....	114

- Figura 39 – Número de macroporos, NMAP, por volume de amostra em função da forma e do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos médios para o PC: (a) camada de 0-10 cm, (b) camada de 10-20 cm e (c) camada 20-30 cm.....115
- Figura 40 – Macroporosidade percentual,  $MAP(\%)_P$ , por volume de amostra em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos pequenos (P) para as camadas 0-10 cm; 10-20 cm e 20-30 cm sendo em: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC).....116
- Figura 41 - Número de macroporos, NMAP, por volume de amostra em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos pequenos (P) para as camadas 0-10 cm; 10-20 cm e 20-30 cm: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC).....117
- Figura 42 - Valores da Característica de Euler-Poincaré (CEP) em função dos *disectors* ( $z^+$ ) para o sistema de manejo Plantio Direto (PD), nas camadas de (a) 0-10 cm; (b) 10-20 cm, (c) 20-30 cm e (d) 0-30 cm.....118
- Figura 43 - Valores da Característica de Euler-Poincaré (CEP) em função dos *disectors* ( $z^+$ ) para o sistema de manejo Plantio Convencional (PC), nas camadas de (a) 0-10 cm; (b) 10-20 cm, (c) 20-30 cm e (d) 0-30 cm.....120
- Figura 44 - Imagens microtomográficas 3D onde o sistema poros está representado na cor branca. Para o PD observa-se que em todas as camadas a porosidade é maior comparada ao PC. (a) 0-10 cm (PD); (b) 10-20 cm (PD), (c) 20-30 cm (PD), (d) 0-10 cm (PC); (e) 10-20 cm (PC) e (f) 20-30 cm (PC).....121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Propriedades físicas e químicas do Latossolo Vermelho distrófico submetido ao plantio direto (PD) e ao plantio convencional (PC) em diferentes camadas.....	70
Tabela 2 -	Relação dos valores utilizados para a segmentação das imagens (com resolução de 60 $\mu\text{m}$ de cada amostra utilizada).....	78
Tabela 3 -	Classificação dos macroporos: pequeno (P), médio (M) e grande (G); seus respectivos volumes máximos e mínimos ( $\text{mm}^3$ ) para a resolução de 60 $\mu\text{m}$ .....	83
Tabela 4 -	Classificação dos macroporos do tipo médio (M) quanto à sua forma e as condições que foram utilizadas para classificação.....	85
Tabela 5 -	Sub classes de macroporos por volume ( $\text{mm}^3$ ) de macroporo.....	88
Tabela 6 -	Valores da tortuosidade $\tau$ nas seis direções (x+, x-, y+, y-, z+ e z-); para os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC), nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm.....	122
Tabela 7 -	Valores dos Desvios de Tortuosidade Direcional (DTD) nas três direções x, y e z; para os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC), nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm.....	123

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

2D – bidimensional

3D – tridimensional

CEP – Característica de Euler-Poincaré

<sup>241</sup>Am – Fonte radioativa de Amerício-241

UH – Unidade Hounsfield

UT – Unidade Tomográfica

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

CBCS – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná

DTD – Desvio de Tortuosidade Direcional

$L_G$  – Distância Geodésica

$L_E$  – Distância Euclidiana

RG – Reconstrução Geodésica

B4, B6, B8 – Conectividade dos *pixels*

Al – Alumínio

Cu – Cobre

FOV – *field of view* (campo de visão)

RE – resolução espacial

RC – resolução de contraste

*bits* – *binary digity*

*pixel* – *picture element*

*voxel* – *volumetric picture element*

CsITI – Iodeto de Césio dopado com Tálho

CCD – Dispositivo de Carga Acoplada

UV – radiação eletromagnética ultra violeta

PDI – Processamento Digital de Imagem

TC – Tomografia Computadorizada

TCFL – Tomografia Computadorizada por Feixe em Leque

TCFC – Tomografia Computadorizada por Feixe Cônico

$\mu$ TC – Microtomografia Computadorizada

$\mu$ TCFC – Microtomografia Computadorizada por Feixe Cônico

EDUSP – Editora Universidade de São Paulo

PC – Plantio Convencional

PD – Plantio Direto

NTP – número total de poros

$\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) - coeficiente de atenuação linear

$\phi$  ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) – Porosidade

$p(k)$  – função discreta

k – níveis possíveis de iluminância  
 $n_k$  – número total de *pixels*  
 $\rho(L_E, L_G)$  – distribuição de distâncias Euclidianas e distâncias Geodésicas  
 $\tau$  - tortuosidade  
 $EE_6$  - elemento estruturante  
 $\theta$  – ângulo  
 $P_r(\theta)$  – função projeção  
 $f(x,y)$  – função  
S/R – razão sinal-ruído  
 $D_v$  – partes desconectadas  
 $C_v$  – conectividade por volume da unidade  
ROI – região de interesse  
#I – número de ilhas  
#B – número de túneis  
#H - número de orifícios  
i – imagem binária  
 $N_i$  – número total de objetos desconectados  
 $d_1$  e  $d_2$  – imagens resultantes  
 $r_1$  e  $r_2$  – resultado das interseções de imagens  
 $V$  ( $\text{mm}^3$ ) – volume  
 $\sigma$  – Desvio padrão  
P – pequeno  
M- médio  
G- grande

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
---------------------------	-----------

### CAPÍTULO 2

<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
2.1. Caracterização Micromorfológica do solo.....	18
2.2. Aplicação da Técnica de Tomografia Computadorizada na Ciência do Solo.....	23
2.3. A importância da caracterização do sistema poroso do solo, os efeitos que os diferentes sistemas de manejo podem ocasionar na porosidade e as limitações das técnicas convencionais utilizadas.....	29
2.4. Tortuosidade e conectividade do sistema poroso do solo.....	34

### CAPÍTULO 3

<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>37</b>
3.1. Tomografia Computadorizada.....	37
3.1.1. Histórico.....	37
3.1.2. Tomografia Computadorizada por feixe cônico.....	38
3.1.3. Princípios básicos da Tomografia Computadorizada.....	40
3.1.3.1. Aquisição.....	41
3.1.3.1.1. Filtro (externo).....	42
3.1.3.1.2. Ponto focal.....	42
3.1.3.1.3. Detector.....	43
3.1.3.1.4. Cintilador.....	44
3.1.3.1.5. Câmera CCD.....	45
3.1.3.2. Pré-Processamento.....	46
3.1.3.2.1. Reconstrução.....	46
3.1.3.2.2. Parâmetros de reconstrução e fatores que influenciam na qualidade da imagem.....	49
3.1.3.2.3. Características de uma imagem digital microtomográfica.....	56
3.1.3.2.4. Artefatos na imagem microtomográfica.....	59



3.1.3.2.5. Segmentação.....	61
3.1.3.3. Processamento.....	63
3.1.3.3.1. Tortuosidade e conectividade da rede de poros do solo.....	63

## CAPÍTULO 4

<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>69</b>
4.1. Solo e preparação das amostras.....	69
4.2. Aquisição das imagens microtomográficas.....	71
4.3. Pré-Processamento: reconstrução, tratamento e segmentação.....	72
4.3.1. Seleção dos sub-volumes para reconstrução.....	72
4.3.2. Imagens auxiliares: histograma e <i>voxels</i> de baixa variabilidade.....	73
4.3.3. Correção de artefatos.....	74
4.3.4. Segmentação.....	75
4.3.4.1. Determinação dos valores de centro máximo (CM) e variância (VAR), correspondentes ao ar e ao sólido: método estatístico para a segmentação.....	75
4.3.4.2. Determinação do melhor valor para o ar e para o sólido: método visual para a segmentação.....	81
4.4. Processamento.....	83
4.4.1. Classificação do tamanho e forma dos poros.....	83
4.5. Análise dos dados.....	85
4.5.1. Macroporosidade: por forma e volume de macroporos.....	86
4.5.2. Número de macroporos: por forma e volume de macroporos...	87
4.5.3. Tortuosidade e conectividade do espaço poroso do solo.....	88

## CAPÍTULO 5

<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>90</b>
5.1. Macroporosidade.....	90
5.2. Número de macroporos.....	93
5.3. Macroporosidade em função do tamanho dos macroporos.....	95
5.4. Número de macroporos em função do tamanho dos macroporos.....	98

5.5.	Macroporos médios (M): Macroporosidade em função da forma dos macroporos.....	100
5.6.	Macroporos médios (M): Número de macroporos em função da forma dos macroporos.....	103
5.7.	Macroporos médios (M): Macroporosidade em função do volume (mm <sup>3</sup> ) dos macroporos.....	105
5.8.	Macroporos médios (M): Número de macroporos em função do volume (mm <sup>3</sup> ) dos macroporos.....	107
5.9.	Macroporos médios (M): Macroporosidade em função da forma e do volume (mm <sup>3</sup> ) dos macroporos.....	109
5.10.	Macroporos médios (M): Número de macroporos em função da forma e do volume (mm <sup>3</sup> ) dos macroporos.....	113
5.11.	Macroporos pequenos (P): Macroporosidade em função do volume (mm <sup>3</sup> ) dos macroporos.....	116
5.12.	Macroporos pequenos (P): Número de macroporos em função do volume (mm <sup>3</sup> ) dos macroporos.....	117
5.13.	Conectividade do Sistema Poroso do Solo.....	118
5.14.	Tortuosidade do Sistema Poroso do Solo.....	122

## **CAPÍTULO 6**

<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>124</b>
---------------------------	------------

## **CAPÍTULO 7**

<b>7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>125</b>
---	------------

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>126</b>
-------------------------	------------

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos fatores ambientais, pedogênicos e antropogênicos ocasionam modificações no espaço poroso do solo, os quais inevitavelmente provocam a reorganização das partículas, afetando diretamente na estrutura solo. O estudo do sistema poroso do solo é importante porque está diretamente relacionado com a dinâmica da água e ar no solo.

Para o estudo deste sistema complexo, tradicionalmente é utilizada a técnica de micromorfologia. Esta técnica utiliza amostras indeformadas de solo, as quais são preparadas em blocos impregnados com resina ou lâminas finas de solo, que, quando associada a técnicas microscópicas, possibilita a análise direta de imagens digitais 2D, nas quais é possível caracterizar os constituintes elementares do solo, entre eles, os poros.

No entanto, os fatores limitantes dessa técnica são: o número pequeno de imagens 2D por bloco ou lâmina, espaço amostral limita-se a uma área e não um volume, a preparação dos blocos ou lâminas é bastante trabalhosa; podendo facilmente ocorrer problemas na etapa de impregnação.

Após o surgimento da Tomografia Computadorizada em 1971 para fins médicos, cientistas do solo começaram a utilizar esta técnica não invasiva no estudo das propriedades físicas do solo, as quais passaram ser analisadas em 3D.

Na década de 90 surgiu a tomografia computadorizada por feixe cônico e não demorou muito para que essa nova tecnologia fosse aplicada em diversas áreas das ciências em escala micrométrica.

Na ciência do solo a técnica de microtomografia de raio X por feixe cônico, ainda é pouco difundida, no entanto, apresenta vantagens na caracterização quantitativa e qualitativa do sistema poroso do solo quando comparadas aos métodos convencionais utilizados até então na área de ciência do solo. Dentre as vantagens, o fato de termos uma sequência de muitas imagens bidimensionais representando um volume tridimensional, nos permite caracterizar propriedades físicas como a conectividade e a tortuosidade dos poros.

Embora a constante evolução no aprimoramento da técnica de microtomografia de raios X por feixe cônico, associada ao processamento digital de imagens para caracterização das propriedades físicas do solo, parâmetros importantes na etapa de aquisição e de pré-processamento das imagens digitais ainda são fonte de muitas pesquisas principalmente com o objetivo de padronização na etapa de tratamento e segmentação dessas imagens.

Diante disso, os objetivos deste trabalho foram: 1) caracterizar micromorfologicamente o sistema poroso de amostras de um Latossolo Vermelho distrófico sob dois diferentes manejos (Plantio Convencional e Plantio Direto) via imagens microtomográficas; 2) identificar e comparar as alterações microestruturais sofridas no sistema poroso do solo sob estes sistemas de manejo; 3) avaliar as propriedades físicas de tortuosidade e conectividade da rede de poros por meio de algoritmos específicos; 4) apresentar uma descrição detalhada da metodologia adotada para o pré-processamento das imagens microtomográficas, com o intuito de padronizar o processo de segmentação no estudo de porosidade do solo, o qual será de grande utilidade para pesquisas posteriores e até mesmo para o aprimoramento científico coletivo da metodologia.

## CAPÍTULO 2

### 2. REVISÃO DE LITERATURA

#### 2.1. Caracterização Micromorfológica do Solo

A micromorfologia é uma técnica utilizada no estudo de amostras não deformadas de solos que, acompanhada de técnicas microscópicas para obtenção de imagens digitais (2D), permite identificar os componentes microestruturais (constituintes elementares como: esqueleto, plasma, nódulos e poros) do solo na sua forma natural e as diversas associações destes, bem como, suas relações mútuas no espaço e, muitas vezes, no tempo. Sendo assim, é uma técnica direta que possibilita uma melhor visualização do comportamento e alterações da estrutura como: forma, tamanho e distribuição de poros, os quais auxiliam na compreensão de muitos fenômenos na área da ciência do solo (Brewer, 1976; Leprun, 1979; Bullock et al., 1985; Stoops, 2003; Castro et al., 2003; Castro, 2008; Silos et al., 2011).

O estudo micromorfológico do solo vem sendo documentado desde 1938 (Kubiena, 1938). Os primeiros trabalhos utilizando análise de imagens (2D), para quantificar e caracterizar a porosidade de amostras de solos impregnadas, foram realizados por Jongerius et al. (1972) e Murphy et al. (1977a,b). Bouma et al. (1977), utilizaram esta técnica no estudo da continuidade dos poros. Bullock e Thomasson (1979), fizeram comparações de medidas de macroporosidade, obtidas via imagens digitais (2D), com as medidas obtidas por retenção de água (método indireto comumente utilizado na determinação da distribuição do tamanho de poros). Bouma et al. (1979) e Pagliai et al. (1983), utilizaram os dados micromorfométricos para calcular a condutividade hidráulica saturada de alguns solos argilosos e investigaram o efeito de diferentes práticas de manejo na estrutura do solo e, especialmente, na porosidade do solo. Ringrose-Voase (1990) e Ringrose-Voase e Nys (1990) apresentaram os princípios e vantagens de um sistema de análise de imagens usado na caracterização da estrutura do solo.

No Brasil, a micromorfologia teve início na década de 70, com trabalhos que tinham como objetivo: descrever características micromorfológicas, tais como cutans (Falci e Mendes, 1973); apresentar técnicas de impregnação de amostras de solo (Mendes et al., 1973); identificar a gênese de pequenos agregados arredondados

(Moura Filho e Buol, 1976); e como técnica auxiliar para interpretações pedogenéticas (Dematté et al., 1977).

Atualmente, a análise micromorfológica através de imagens digitais (2D) continua sendo muito utilizada em pesquisa aplicada à solos. Olszevisk et al. (2004) adaptaram e testaram um método digital de análise micromorfológica qualitativa de agregados de um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa, e detectaram por meio deste, modificações morfológicas causadas pelos diferentes sistemas de manejo. Oliveira et al. (2004); Cooper e Vidal-Torrado (2005); Juhász et al. (2007); e Silos et al. (2011) identificaram os materiais constituintes presentes no solo, bem como o arranjo do esqueleto e plasma com os poros (conjunto dos atributos micromorfológicos) e verificaram a evolução intempérica correlacionando-os com a porosidade e as propriedades físico-hídricas de retenção e condutividade hidráulica do solo.

Souza et al. (2006) avaliaram a relação entre atributos micromorfológicos e físicos de um Latossolo Vermelho eutroférico. Esses autores verificaram que os altos valores da densidade do solo, microporosidade e resistência do solo à penetração e os baixos valores da macroporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica do solo saturado, indicou compactação do solo, confirmada por meio da análise micromorfológica.

No estudo comparativo de características micromorfológicas do solo sob diferentes sistemas de manejo (Plantio Direto e Plantio Convencional), Cremon et al. (2009) realizaram análise micromorfométrica de agregados de um Latossolo Vermelho distrófico, obtendo resultados de maiores agregados para o sistema de manejo Plantio Direto.

Glab (2007) utilizou a técnica de análise de imagens para caracterizar macroporos de amostras de solo de textura argilosa e arenosa, no qual propôs um método de separação destes poros de acordo com o seu diâmetro (os quais foram calculados a partir da área dos poros) e observou que as amostras de solo, diferem na sua porosidade, forma e tamanho de poro; e que essa separação demonstra o estado real da macroporosidade do solo, especialmente em solos porosos com contínua ramificação do sistema de macroporos.

Efeitos dos ciclos de umedecimento e secamento, os quais podem modificar a estrutura (forma e padrão) de agregados (integrais e destruídos) de Latossolos com diferentes mineralogias foram obtidos por Viana et al. (2004). Os autores

observaram que após dez ciclos, ocorreu uma mudança significativa na quantidade e na distribuição dos poros, devido à acomodação e rearranjo das partículas dos agregados que foram inicialmente destruídos. Também com o intuito de verificar mudanças na estrutura desse meio poroso oriundas da aplicação de ciclos de umedecimento e secamento, Pires et al. (2008) quantificaram a porosidade total pela imagem (2D) de solos de três diferentes texturas (entre eles dois Latassolos) submetidos a nenhum, três e nove ciclos de umedecimento e secamento. Esses autores observaram que os ciclos afetam a distribuição do tamanho, formato e número de poros.

Tradicionalmente, a análise micromofológica por meio de imagens digitais (2D), exige uma coleta e preparação cuidadosa de blocos de amostras não perturbadas do solo, além de um tempo de preparo de no mínimo 50 dias, dependendo do número de amostras e da não ocorrência de contra tempos, causados acidentalmente no decorrer do preparo das mesmas (Castro, 2008).

Para o estudo do sistema poroso, as amostras costumam ser impregnadas com resina, na qual é adicionado corante com pigmentação fluorescente. Após secagem das amostras são produzidos blocos polidos que são submetidos à iluminação por luz ultravioleta (UV). A adição do pigmento fluorescente permite que os poros seja claramente diferenciados dos agregados de solo na imagem obtida por microscopia óptica (Murphy, 1986; Protz et al., 1992; Pires et al., 2009). Quando o estudo é dos constituintes da fração sólida do solo (fase mineral e não mineral), a preparação consiste de seções finas de solo (lâminas do tipo usadas para estudos petrográficos aplicados em geologia) sem a adição de corantes, onde os materiais constituintes, devido suas propriedades ópticas anisotrópicas, são analisados sob diferentes tipos de iluminação: luz transmitida, refletida, e polarizada (Terrible e Fitzpatrick, 1992; Protz e Van Den Bygaart, 1998; Viana et al., 2004; Cooper e Vidal-Torrado, 2005).

Independente da fonte de iluminação adotada, as imagens digitais (2D), são obtidas via microscopia óptica digital tradicional (Viana et al., 2004; Cooper e Vidal-Torrado, 2005; Pires et al., 2009), portátil (Passoni et al., 2010; Pires et al., 2013) ou petrográfica (Oliveira et al., 2004). No primeiro e no último casos uma câmara CCD encontra-se acoplada ao microscópio. Outra ferramenta que pode ser usada para obtenção das imagens é o *scanner* (Olszewski, et al., 2004; Melo et al., 2008; Cremon et al., 2009).

Recentemente, Heck (2009) discutiu sobre a capacidade do sistema microscópico em discriminar características do solo, como sendo uma função da resolução espacial do sistema. No entanto, quando se utiliza iluminação transmitida, a propriedade de interesse deve estender-se de um dos lados da secção para o outro, e isto é particularmente óbvio para vazios; mas é pouco provável que sejam observados todos os constituintes do solo presentes, pois a maioria são observados obliquamente. A combinação da luz refletida com a luz transmitida, para aquisição de imagens, aumenta a capacidade de discriminação de várias fases; pois deve-se considerar o efeito *Holmes*, onde o objeto opaco vai aparecer menor e os vazios maiores utilizando luz refletida, do que utilizando luz transmitida.

Observa-se que a busca por novas tecnologias na ciência do solo, ao longo dos anos, principalmente para o estudo micromorfológico do solo, surgiu especialmente das necessidades de quantificação da composição mineralógica, do tamanho e distribuição espacial dos poros e dos constituintes do solo. Os cientistas do solo baseavam-se em pequenas diferenças na forma e na cor para identificar e delimitar as fronteiras de características pedológicas e micromorfológicas. Na maioria das vezes, essas características eram analisadas por meio de superfícies bidimensionais (2D), tais como blocos de solo polido, ou seções finas e até mesmo a olho nu ou com o auxílio de microscópio e lupas (Bui e Mermute, 1989; Drees et al, 1994; Protz et al., 1992; Stoops, 2003).

Muito se tem evoluído no que diz respeito ao desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias ao longo das últimas décadas. Essa evolução tem possibilitado a aquisição e processamento de uma grande quantidade de dados para o estudo e entendimento do funcionamento do solo. O surgimento do Processamento Digital de Imagem (PDI), de novos sistemas microscópicos digitais com melhor resolução e novos programas para a análise quantitativa de lâminas delgadas de solo ou de blocos polidos (as quais eram realizadas por meio da contagem de pontos) tem permitido grandes avanços no estudo da estrutura do solo.

No entanto, este método de análise micromorfológica via imagens digitais, é limitado à obtenção, quantificação e qualificação bidimensional em escala micrométrica das características morfológicas do solo. Análises tridimensionais (3D) são possíveis mais extremamente trabalhosas. Algumas propriedades físicas do solo, principalmente as relacionadas diretamente com a estrutura do solo, como a



rede do sistema poroso, a qual possui características inerentes como a conectividade, tortuosidade e a continuidade dos poros, necessitam de uma quantificação e qualificação mais precisa.

Um melhor entendimento do funcionamento do solo, principalmente ao que se refere às propriedades físico-hídricas deste meio complexo, necessita que as análises sejam realizadas em imagens tridimensionais.

Diante disso, vários são os aspectos práticos que limitam o uso de seções finas à sua aplicação para caracterização do solo. A seção fina é apenas uma única fatia através de um volume de solo e volumes semelhantes podem produzir seções diferentes, assim como diferentes volumes podem produzir seções semelhantes, portanto é praticamente impossível extrapolar da seção 2D para um modelo 3D (Heck, 2009).

Terribile et al. (1997), já estavam conscientes de que os métodos micromorfológicos para a quantificação de diferentes características do solo deveriam ser realizados tridimensionalmente, especialmente para uma avaliação adequada da distribuição dos poros e agregados.

Além disso, a metodologia adotada para a preparação dos blocos ou lâminas para posterior coleta das imagens digitais é um processo demorado e delicado. Oliveira et al. (2004) discutem o problema enfrentado na impregnação das amostras com resina de poliéster e adição de monômero de estireno, em um solo com alta atividade de argila. Solos com esta característica são mais úmidos e o material resinoso possui propriedade hidrofóbica; sendo assim, se o solo não estiver totalmente seco é necessário a adição de catalisador a base de acetona, o qual acelera a polimerização. O processo de preparo, pode levar mais de 50 dias (tempo para impregnação e secagem em estufa), para então, seguir com o polimento (procedimento anterior a análise dos blocos de amostra), o qual também levará mais alguns dias.

A maioria das técnicas atuais de impregnação do solo também requer desidratação, o que pode potencialmente alterar a configuração dos constituintes do solo. E ainda, através da impregnação da amostra de solo, as análises subseqüentes, tais como a retenção de água para diferentes potenciais ou condutividade hidráulica torna-se inviável em uma mesma amostra, já que o processo de impregnação é irreversível.

Portanto, o avanço na caracterização morfológica do solo tem sido dificultado por limitações dos tratamentos utilizados e da extração dos dados necessários para quantificar os constituintes do solo (Heck, 2009).

Logo após o desenvolvimento de sistemas de tomografia computadorizada de raios X na área médica no início da década de setenta, pesquisadores na área de ciência do solo começaram a aplicar essa técnica para o estudo desse meio poroso. As análises micromorfológicas do solo que antes limitavam-se a seções finas ou blocos foram então finalmente extrapoladas para três dimensões e de forma não invasiva.

## **2.2. Aplicação da Técnica de Tomografia Computadorizada na Ciência do Solo**

Na Ciência do Solo, os primeiros trabalhos (década de 80 do século passado) utilizando a técnica de Tomografia Computadorizada (TC), foram realizados com equipamentos para fins médicos (Petrovic et al., 1982). Uma revisão do progresso da técnica na área da ciência do solo, bem como a metodologia desenvolvida e empregada para o estudo do solo utilizando a técnica de TC, foi contemplada por Taina et al. (2008). Os autores destacaram trabalhos onde são investigados os níveis de energia utilizados, resolução espacial, segmentação de imagens tridimensionais e bidimensionais, constituintes orgânicos e minerais do solo, propriedades físico-hídricas e a fauna do solo.

No Brasil, a aplicação da TC no estudo do solo ocorreu poucos anos após a primeira aplicação da técnica na área de ciência do solo (Crestana et al., 1985). Desde então, tomógrafos de 1ª e 3ª gerações têm sido desenvolvidos especificamente para o estudo de solos, com resoluções que variam de milímetros até micrometros. Esses equipamentos utilizam fontes de raios gama ou X para o estudo de diferentes propriedades físicas do solo (Cruvinel, 1987; Cruvinel et al., 1990; Naime, 1994, 2001; Silva et al., 1997; Macedo et al., 1999). Em 2010, a tomografia computadorizada aplicada na área de física do solo no Brasil completou 25 anos e Pires et al. (2010) apresentaram um trabalho de revisão destacando a contribuição do país na área.

Com o constante avanço nos aparelhos tomográficos, em 1998, uma nova tecnologia mais compacta surgiu na área odontológica, o aparelho de tomografia

volumétrica, denominado *NewTom-9000*. Esse equipamento tem como principal diferença o formato do feixe de raios X, este agora em formato cônico, com menor probabilidade da ocorrência de efeitos indesejáveis como os artefatos produzidos devido à presença de metais na amostra, melhor resolução espacial e menor tempo de exposição sob radiação na aquisição de dados (Mozzo et al., 1998).

Pouco ainda se sabe sobre a utilização de Tomografia Computadorizada por Feixe Cônico (TCFC) em pesquisas do solo, pois no Brasil, os trabalhos com este tipo de tomógrafo restringem-se à área odontológica (Rodrigues et al., 2010) ou no estudo de rochas, em escala micrométrica. Para este último, o sistema microtomográfico por feixe cônico,  $\mu$ TCFC, de alta resolução foi utilizado no estudo da porosidade de sedimentos geológicos (Reis Neto et al., 2011; Alves, 2012) e no estudo de parâmetros microestruturais como porosidade, permeabilidade e distribuição do tamanho de poros de rochas-reservatórios (Fernandes et al., 2009; Machado, 2012).

A  $\mu$ TC foi desenvolvida a fim de satisfazer a necessidade de aparelhos mais compactos, mais acessíveis em termos de custos, com melhor resolução para o estudo de diversos tipos de materiais para as diversas áreas de conhecimento; construção civil, biologia, geologia, petróleo, etc.

Em termos práticos, o foco reduzido no tubo de raios X e o tamanho do elemento do detector são os diferenciais que permitem uma melhor resolução e conseqüentemente a alta qualidade na imagem microtomográfica, além do tempo de aquisição bastante reduzido.

O relato literário que se tem da aplicação da tecnologia  $\mu$ TCFC no estudo das propriedades físicas do solo, atribui-se a alguns grupos de pesquisa no mundo sendo um deles o grupo de pesquisas da Universidade de Guelph (Elliot e Heck, 2007a-b; Taina et al., 2008; 2010; Tarquis et al., 2009; 2012; Elliot et al., 2010).

Atualmente a técnica de  $\mu$ TCFC, devido sua primazia às demais técnicas tradicionais para obtenção de propriedade físicas do solo está fortemente consolidada no que diz respeito à sua eficácia em pesquisa de solos, mas isso não significa sua estagnação. Os trabalhos com  $\mu$ TCFC no estudo de solos têm conduzido os pesquisadores do mundo inteiro, a investigar não somente as propriedades físicas desse meio heterogêneo, mas também desenvolver e avaliar a metodologia aplicada para este fim, buscando otimizar o uso da técnica.

Algumas das propriedades físicas do solo estudadas, juntamente com estudos visando à otimização desta técnica são: densidade do solo (Baveye et al., 2002; Fante Júnior et al., 2002; Fernandes et al., 2005; Bamberg et al., 2009; Borges e Pires, 2012; Costa et al., 2012); porosidade do solo (Moreira et al., 2009; Borges et al., 2012); umidade e condutividade hidráulica (Elliot et al., 2010); selamento superficial (Lee et al., 2008; Pires, 2002; 2003); caracterização morfológica e distribuição de poros (Crestana e Vaz, 1998; Moreira et al., 2009); mudanças na estrutura do solo sob ciclos de umedecimento e secamento (Pires e Bacchi, 2010); determinação de área elementar representativa de meios porosos (Baveye et al., 2002; Borges e Pires, 2012); efeitos de diferentes sistemas de manejo e métodos de amostragem na estrutura do solo (Vaz et al., 1989; Pires et al., 2004; 2007; Taina et al., 2010); dispersão da radiação por espalhamento a qual limita a qualidade da imagem (Braz et al., 2001); efeito do tamanho do colimador e espessura da amostra por meio da atenuação de raios gama (Costa et al., 2012; 2013); obtenção simultânea de umidade e densidade utilizando diferentes energias (Cruvinel e Balogun, 2000; 2006). Mooney et al. (2006) e Sander et al. (2008) analisaram amostras de solo não perturbadas para destacar a importância do crescimento radicular na estrutura e seu efeito sobre a macroporosidade. Deurer et al. (2009) e Papadopoulos et al. (2009) estudaram os efeitos dos fertilizantes orgânicos na macroestrutura e mostraram que a matéria orgânica influencia a conectividade dos poros e a estabilidade do solo.

No geral, observa-se que as mesmas propriedades físicas do solo estudadas através de imagens 2D, obtidas por meio de técnicas microscópicas digitais, são analisadas através de imagens 3D, obtidas por meio  $\mu$ TCFC, a qual apresenta as seguintes vantagens:

- 1) é uma técnica direta e não-invasiva, ou seja, não desestrutura a amostra deixando-as intactas para estudos posteriores de qualquer propriedade física de interesse a ser estudada;

- 2) permite caracterizar e entender melhor a configuração espacial em 3D dos componentes estruturais do solo, sejam eles, pertencentes a fase sólida (minerais e não minerais) e/ou gasosa (poros);

- 3) Os aparelhos tomográficos atuais disponíveis hoje para o estudo do solo, permitem a obtenção rápida de um volume amostral relativamente grande comparados a técnica de análise micromorfológica convencional;

4) Nestes aparelhos de terceira geração, o fator magnificação da imagem, que está diretamente relacionado com o tamanho do ponto focal do aparelho, é nulo; ou seja, a imagem obtida por  $\mu$ TCFC é do tamanho real do objeto escaneado, o que elimina os efeitos de penumbra gerados pela radiação espalhada (Cavalcanti, 2001);

5) Um único volume amostral, submetido à uma varredura completa no aparelho de  $\mu$ TCFC, permite a obtenção de diversos sub-volumes; e estes podem ser reconstruídos em mais de uma resolução (desde que a resolução de aquisição seja a melhor possível, as demais poderão ser inferiores), a qual só depende da capacidade do sistema computacional;

6) Em um único sub-volume amostral é possível obter um grande número de imagens 2D, em torno de 400 à 800 imagens (esse número pode variar dependendo do ponto focal do aparelho, do tamanho do volume da amostra, do sub-volume selecionado para reconstrução e também da resolução desejada para reconstrução);

7) Não necessita de nenhuma metodologia de preparo após a coleta para a obtenção das imagens;

8) A informação contida na imagem é baseada no coeficiente de atenuação que está intimamente correlacionado com as diferentes densidades dos materiais constituintes no solo (meio heterogêneo), o que implica uma menor fonte de erro na delimitação das interfaces poro-solo, *i.e.*, maior contraste. Os aparelhos atuais reconhecem diferenças entre densidades menores que 0,5% e isso deve-se a excelente resolução (capacidade do sistema em identificar estruturas pequenas) (Parks, 2000);

9) As propriedades físicas de interesse, principalmente os poros, podem ser analisadas tridimensionalmente por meio da renderização das imagens, o que torna possível inferir sobre o comportamento e o funcionamento do solo, principalmente propriedades correlacionadas com a morfologia da rede 3D de poros;

10) Como o aparelho adquire as imagens em cortes axiais, se o interesse for outras perspectivas (plano sagital, coronal ou oblíquas), não há necessidade de nova aquisição, pois estes podem ser obtidos, por meio dos programas de reconstrução multiplanar, diretamente dos cortes originais (plano axial). Mas do ponto de vista do estudo de poros, o mais indicado é o corte axial;

11) Com o apoio da tecnologia para o Processamento Digital de Imagens (PDI) disponível hoje é possível manipular e ajustar a imagem após a varredura completa como: brilho, realces de bordas, aumento de áreas específicas (*zoom*),

contraste ou escala de cinza (ajuste de janela) para melhor visualização da estrutura de interesse.

Contudo, no processo de aquisição, alguns efeitos indesejáveis tais como: endurecimento do feixe, a qual tem pequena probabilidade de ocorrência em  $\mu$ TCFC (Holberg, 2005); artefatos em forma de anéis (Heck, 2009); o efeito de volume parcial (Ketcham e Carlson, 2001; Elliot e Heck, 2007a, b); entre outros (Carlos, 2002) podem ocorrer, resultando em imagens de qualidade inferior à desejada, o que dificulta e até mesmo impossibilita a caracterização de propriedades físicas (Parks, 2000).

No entanto, a busca por melhorias continua sendo árdua para os pesquisadores de solo que utilizam a técnica de  $\mu$ TCFC, e esses efeitos podem ser evitados ou minimizados, melhorando as condições e parâmetros de aquisição relacionados ao posicionamento (fonte-amostra-detector) ou substituir por uma fonte de raios X de melhor qualidade (Heck, 2009). Outra opção para melhoria da qualidade de imagem obtida é extrair os efeitos das imagens por meio de realização de operações matemáticas, os quais são baseados em algoritmos específicos elaborados para esta finalidade (Kyriakou et al., 2009), aplicação de filtros após a reconstrução ou durante o procedimento de reconstrução (Laia e Cruvinel, 2008).

Além disso, o procedimento de pré-processamento é trabalhoso, e o primordial para a técnica de análise de imagens microtomográficas é o procedimento de segmentação (Saldanha e Freitas, 2005); o qual exige grande conhecimento em PDI (Marques e Vieira, 1999; Albuquerque e Albuquerque, 2000; Carvalho Júnior et al., 2002), bem como, da técnica e do material a ser estudado para delimitação das interfaces das partículas constituintes, incluindo o espaço poroso. Por ser o procedimento delicado e indispensável para a análise de imagens digitais, tornou-se objetivo de pesquisas na área da ciência do solo a busca de uma padronização da metodologia adotada na segmentação.

Quanto a segmentação de imagens microtomográficas, Wellington e Vinegar (1987) propuseram uma média linear dos componentes do *voxel*, que tem sido utilizada (Warner et al., 1989; Van Geet et al., 2000;2003) para classificar com precisão *voxels* mistos na determinação da porosidade. Enquanto Oh e Lindquist (1999) apresentaram um método de dois estágios para aplicação de limiar para segmentação de imagens de TC. Glenn et al. (1988) utilizaram, para otimização da imagem, recursos de isolamento através de redução de ruído, realce de borda,

controle de partículas e expansão da fronteira da partícula. Esse último procedimento aperfeiçoou parcialmente as imagens abordando a questão de *voxe/s* mistos. Tarquis et al. 2012, aplicaram quatro limiares diferentes com base nos histogramas de imagens de  $\mu$ TC e observaram que aumentando o valor do limiar, a porosidade obtida foi maior e conseqüentemente ocorreu uma redução na complexidade do espaço poroso para todos os horizontes do solo estudado. Os resultados desse estudo mostram que as seleções de limiar devem basear-se não apenas na análise formal dos histogramas de escala de cinzentos, mas também em análise mais detalhada dos padrões encontrados nestas imagens.

De forma geral, os procedimentos adotados para o PDI, os quais têm como objetivo o reconhecimento e interpretação de imagens, estão associados a extração automática – ou mesmo parcialmente automática – de informação a partir de uma imagem (Gonzalez e Woods, 1993). Assim, independente do sistema de aquisição, seja ele óptico ou tomográfico, existe a preocupação da validação quanto à variedade ferramental oferecida pelos programas utilizados na segmentação das imagens digitais, os quais podem interferir na quantidade e qualidade da propriedade física que está sendo analisada.

Marcelino et al. (2007), para aferir os valores de porosidade do solo, utilizaram dois sistemas de aquisição de imagens e realizaram o procedimento de análise de imagem manual, na qual a segmentação das imagens foi baseada na melhor impressão visual obtida individualmente para cada imagem. Para o método semi-automático, as imagens foram segmentadas por dupla histerese (um pico referente ao ar e outro referente ao solo), após a seleção interativa dos valores de limiar. A aplicação do *threshold* automático baseou-se na análise do histograma da distribuição de intensidades da imagem e os resultados de porosidade para a segmentação automática foram maiores que os resultados para segmentação manual e semi-automática.

Borges et al. (2010) e Passoni et al. (2010) investigaram a veracidade de quatro programas para o PDI e também concluíram que a segmentação automática superestima a porosidade média pela imagem. A falta de acordo entre o método semi-automático, automático e manual de análise de imagem, ressalta a necessidade de padronização dos protocolos de análise de imagens; mesmo que estas imagens forneçam histogramas bimodais (picos bem definidos ar-sólido) fornecidos pela distribuição dos diferentes tons de cinza. Além disso, medições de

porosidade significativas só podem ser comparadas, se as imagens forem submetidas ao mesmo tratamento (filtros, contraste, nitidez, etc) e por um mesmo observador para o caso de segmentação manual (Cnudde, 2005).

No que diz respeito ao tamanho e tipo da amostra, resolução e capacidade do sistema tomográfico para obtenção de imagens microtomográficas para o sistema poroso do solo são discutidos por diversos autores. Sendo os principais aspectos no estudo do espaço poroso: a qualidade dos conjuntos de dados brutos que dão origem a matriz depende da energia do fóton, do fluxo de fóton, do tamanho da amostra e do tipo da amostra (Al-Raoush e Willson, 2005). Uma matriz com alto contraste nos diferentes tons de cinza atribuídos a matriz permite a quantificação da distribuição do tamanho de poro e porosidade total, podendo revelar tanto poros individuais, quanto a forma dos poros (Mooney et al, 2006; Tippkoetter et al., 2009). No entanto, atualmente imagens com alta resolução espacial (5  $\mu\text{m}$ ) só podem ser obtidas para pequenas amostras < 2 mm de diâmetro (Mees et al., 2003).

### **2.3. A importância da caracterização do sistema poroso do solo, os efeitos que os diferentes sistemas de manejo podem ocasionar na porosidade e as limitações das técnicas convencionais utilizadas**

O solo é o compartimento do sistema agrícola cuja função é de retenção da água, de adsorção dos nutrientes essenciais e benéficos, fornecimento de calor, oxigênio e de sustentação das plantas.

A estrutura do solo é um grande indicador de qualidade do solo, a qual define uma geometria de poros, que influencia decisivamente movimentação da água e do ar no seu perfil e ação direta no desenvolvimento vegetal, pois é por meio do espaço poroso que ocorre o deslocamento de água e ar para a rizosfera das plantas, além de ser o espaço de crescimento radicular preferencial (Brito, 2010).

A porosidade do solo é composta pela macroporosidade (diâmetro dos poros  $\geq 0,05$  mm) e microporosidade (diâmetro dos poros < 0,05 mm) (Embrapa, 1997).

Contudo, esta classificação de acordo com o diâmetro do poro, pode variar de autor para autor, tanto em intervalo de tamanho como na forma dos poros. A classificação por intervalo de tamanho é definida por meio do diâmetro equivalente (microporos e macroporos) podendo haver subclasses intermediárias, que levam nomes específicos (por exemplo: mesoporos, poróides, etc) de acordo com cada



autor, os quais relacionam o tamanho dos poros com suas respectivas funções dinâmicas da água e ar no solo. Além disso, alguns autores classificam também suas características pedológicas, onde envolve a análise minuciosa de poros e agregados, bem como de outros constituintes do solo e fatores de intemperismo (Brewer, 1976; Bouma et al., 1977; Greenland, 1977; Pagliai et al., 1983; Bullock et al., 1985; Lal, 2004; Cooper e Vidal-Torrado, 2005; Souza et al., 2006).

O estudo da distribuição de poros do solo por intervalos de tamanho distintos se faz necessário para um melhor entendimento da dinâmica da água no solo, e não se deve limitar apenas aos resultados de porosidade total (Anderson e Bouma, 1973; Klein, 1998). Além disso, a qualidade estrutural do solo tem sido o principal objetivo das intervenções agrícolas, uma vez que se relaciona diretamente com o desenvolvimento vegetal e com aspectos ambientais, sendo a distribuição do tamanho de poros a peça chave de uma atividade sustentável (Silva et al., 2012).

Na prática, classificar e quantificar a distribuição de tamanho dos poros presentes em um solo nos fornece dados que em conjunto com um planejamento adequado das práticas agrícolas, auxiliam na recuperação de um solo degradado, como um exemplo, quando ocorre compactação (Camargo e Alleoni, 2006).

No quesito forma dos poros, as variáveis comumente utilizadas como parâmetros para definição de forma são: área, perímetro, comprimento do eixo maior, intermediário e do eixo menor, grau de arredondamento (circularidade, esfericidade), alongamento, diâmetro de Feret e compacidade. Essas variáveis fornecem informações sobre o tamanho, forma e rugosidade dos agregados ou poros e servem para comparar diferentes sistemas de manejo do solo no que diz respeito à maior ou menor agressividade à estrutura do solo.

A quantidade de macroporos no solo é um parâmetro importante para inferir o grau de infiltração da água no solo (Allaire-Leung et al., 2000). Macroporos (com diâmetro  $> 1000 \mu\text{m}$ ) são os poros nos quais a água infiltra e, sob condições de saturação da camada superficial do solo, o fluxo de água será determinado pelo sistema de macroporos.

O transporte de água através destes poros segue o caminho de menor resistência, enquanto, em contraste, o movimento da água no solo, sem macroporos ocorre através de pequenos poros ou espaços vazios entre os grãos e/ou agregados (Warner et al., 1989). Portanto, a quantidade de macroporos, bem como o tamanho,

forma, orientação e distribuição destes no solo podem influenciar a taxa de infiltração (Rasiah e Aylmore, 1998).

Do ponto de vista do manejo do solo, a quantificação de macroporos em diferentes sistemas de preparo do solo, proporcionam uma melhor compreensão dos efeitos que estes podem ocasionar no arranjo de poros e como consequência nas propriedades físico-hídricas do solo (Soracco et al., 2012). Além disso, a macroporosidade é a primeira fração de poro afetada pelas atividades antrópicas, torna-se necessária uma atenção especial quanto ao manejo a ser adotado (Silva et al., 2012).

Segundo Bertol et al. (2001) o manejo do solo influencia diretamente seus atributos físicos, químicos e biológicos, alterando a dinâmica do ar, água e solutos no solo. A degradação das propriedades físicas do solo é a principal responsável pela perda de qualidade estrutural e um dos grandes fatores associados ao surgimento da erosão hídrica, afetando diretamente o desenvolvimento do sistema radicular das culturas, o que conseqüentemente vai interferir na produtividade final.

O sistema de manejo do solo modifica substancialmente a distribuição do tamanho dos poros, fazendo com que haja impedimento ao movimento de água e ar no perfil do solo, quando é feito de forma inadequada (Cavaliere et al., 2009). Este efeito é agravado quando a estrutura do solo é fraca, podendo acarretar aumento de 40% na densidade do solo e redução da condutividade hidráulica saturada em 10 vezes, devido ao manejo convencional, ou seja, ocasionando uma situação mais prejudicial do que o não revolvimento do solo (Alleto e Coquet, 2009).

Além disso, a manutenção da cobertura vegetal para conservação do solo, aumenta a macroporosidade da camada superficial e protege os agregados do solo do impacto direto das gotas de chuva, mantendo dessa forma altas taxas de infiltração (Bertol et al., 1989; Faria et al., 1998).

Com relação ao tipo de estrutura e textura do solo, pode-se afirmar que solos argilosos bem estruturados (estáveis) podem apresentar taxas de infiltração e valores de condutividade hidráulica maiores em relação aos solos arenosos, e apresentam, seguramente, taxas de infiltração maiores do que os solos argilosos com estrutura instável (Brandão, 2007). Ou seja, um solo bem estruturado argiloso possui uma grande quantidade de macroporos em todo o seu perfil. Neste aspecto, o movimento de água no solo é mais dependente da estrutura do que da textura do solo, porque é afetado pelo sistema de poros existentes (Ahuja et al., 1984).

O estudo da porosidade do solo vem sendo realizado há muitos anos por meio de técnicas indiretas e diretas. As técnicas diretas são: a análise imagens de blocos ou seções finas via microscopia óptica e via microtomografia.

E as técnicas indiretas tradicionalmente utilizadas para o estudo de poros são: As curvas de retenção de água (Vaz et al; 2003; Cássaro et al., 2008; Pires et al., 2008) e as curvas de intrusão de mercúrio (Lugato et al., 2009; Lipiec, 2012) que podem estimar a distribuição do tamanho dos poros nos solos, sendo que a última pode revelar poros até a escala nanométrica.

O método clássico de análise por intrusão de mercúrio para obtenção das curvas (pressão-volume) é baseada no modelo de poros cilíndricos paralelos com diferentes raios (Gregg e Sing, 1982). Em termos de perturbação e desconfiguração do espaço poroso por meio deste método, Lawrence (1978) mostraram que o dano na amostra é improvável de ocorrer. Apesar da alta pressão utilizada nessa técnica é possível obter curvas de distribuição de poros representativas.

No entanto, essas técnicas apresentam alguns inconvenientes importantes: elas não podem fornecer uma estimativa da forma dos poros e a porosidade total, é calculada como a soma dos poros acessíveis a partir da intrusão do líquido (mercúrio), de modo que os poros não ligados não são detectados. Os poros sempre são detectados abaixo de 90 cm, mas isso não reflete a distribuição do tamanho de poro real, uma vez que o líquido revela o diâmetro da entrada da garganta (o menor diâmetro em um poro conexo, o qual é denominado de diâmetro equivalente), em vez de o diâmetro do poro verdadeiro (Cnudde et al., 2009) o que superestima a microporosidade e também não inclui qualquer informação detalhada sobre a natureza dos poros ou a sua distribuição espacial (Gantzer e Anderson, 2002).

Outro método indireto, para obtenção da porosidade total de uma amostra de solo é através da determinação da sua densidade global e densidade de partículas (sólidos). O método usual para determinação da densidade envolve a obtenção de uma amostra de volume conhecido, coletada por meio de anéis volumétricos inseridos no solo com o uso de equipamento apropriado. Esse método é o mais usado em trabalhos de avaliação da densidade de solo (Embrapa, 1997; imm et al, 2005; Pires et al., 2011). Apesar de ser um método simples e relativamente rápido, seu fator limitante é que ele exige cuidado durante a obtenção da amostra para se evitar sua deformação ou sua ruptura (Pires, et al., 2004; Viana, 2008).

Alternativamente, pode-se aplicar o método do torrão parafinado. Este método consiste na coleta de um torrão de solo e sua impermeabilização superficial por meio de parafina derretida e na obtenção do volume do torrão por deslocamento de líquido. Esse método apresenta, como limitação, a necessidade de se obter um torrão estável, que resista ao transporte, à manipulação e ao processo de impermeabilização, além de ser bastante trabalhoso (Embrapa,1997).

Alguns autores defendem que, para a obtenção da porosidade total, bem como, a caracterização micromorfológica do sistema poroso do solo, é necessário a utilização concomitantemente de duas técnicas. Por exemplo, Dal Ferro et al. (2012) avaliaram a técnica de  $\mu$ TC juntamente com a técnica por intrusão de mercúrio no estudo de poros e concluíram que ambas as técnicas devem ser empregadas, pois a  $\mu$ TC não detecta a microporosidade, a qual corresponde a 70% da porosidade total do solo estudado.

Elliot e Heck (2007) avaliaram se a técnica de  $\mu$ TC possibilita a obtenção da porosidade assim como a técnica proposta por Stoops (2003) para seções finas. Por meio de imagens microtomográficas de seções finas analisadas previamente por microscopia óptica, os autores comparam resultados obtidos via microscopia óptica digital e microtomografia. Os autores concluíram que a microtomografia classifica melhor os poros com maior circularidade, enquanto que o método óptico tradicional é melhor para características lineares. Contudo, estes resultados estão fortemente baseados no método de pré-processamento, principalmente a etapa de segmentação das imagens digitais, a qual ainda é fonte de grande estudo por estes pesquisadores.

No entanto o fator limitante, além do alto custo do aparelho microtomográfico, é o tamanho da amostra quando se deseja melhores resoluções, pois esta, permite apenas o estudo de constituintes do solo da mesma ordem da resolução. No caso de pequenos poros no solo, este fator subestima o valor da porosidade total do solo, pois a contribuição dos microporos pode ser parcialmente excluída (Taina et al., 2010). No entanto, para estudos estruturais e morfológicos dos poros de transmissão, isso não interfere; pois os microporos são poros que tem como principal função o armazenamento de água. Por outro lado, maiores tamanhos amostrais permitem avaliação destas propriedades do solo com maior representatividade (Van Den Bygaart e Protz, 1999; Baveye et al., 2002; Borges et al., 2012).

## 2.4. Tortuosidade e conectividade do sistema poroso do solo

O constante avanço do sistema computacional em conjunto aos aparelhos de microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC), bem como, o desenvolvimento de novos programas, modelagens e das novas ferramentas utilizadas no processamento de imagens, permitem a representação tridimensional (3D) de sistemas porosos, entre eles, o solo.

Em uma linguagem computacional, um meio poroso com duas fases, a fase sólida é denominada grão e a fase das cavidades é denominada poro (Clennell, 1997). Por meio de imagens microtomográficas e de algoritmos específicos é possível quantificar propriedades físicas do solo tais como: tortuosidade e conectividade da rede de poros.

Na ciência do solo, estas propriedades são investigadas a fim de obter informações quantitativas e qualitativas de como os poros estão conectados, suas direções, bem como o quanto estão alinhados ao longo de um volume. Estas propriedades quando associadas à porosidade, distribuição de tamanhos e formas dos poros, ajudam a definir a estrutura do solo e conhecer seu funcionamento prevendo seu comportamento físico-hídrico nas direções transversal e em profundidade. Segundo Brito (2010), nos processos de fluxo de solutos no solo, a distribuição do tamanho e a conectividade dos poros são muito importantes, uma vez que os macroporos são drenados naturalmente pela força da gravidade, permitindo que ar atmosférico ocupe rapidamente esse espaço e, havendo conexões entre esses poros e os de menores diâmetros (mesoporos e microporos), as trocas gasosas entre a atmosfera do solo e o ar atmosférico são mais eficientes.

O sistema poroso do solo apresenta uma complexidade inerente e a visualização desta, através de aproximações geométricas mais simples, contém informações que levam a melhoria, tanto no(s) modelo(s) de rede do sistema poroso do solo, como uma melhor compreensão e cálculo dos fenômenos macroscópicos que ocorrem no interior do solo.

Dal Ferro et al. (2012) descrevem em seus trabalhos as vantagens e desvantagens das técnicas de tomografia computadorizada e o método de intrusão de mercúrio no estudo de agregados, distribuição de tamanho e forma dos poros em um solo sob diferentes quantidades de adubação. Os autores utilizaram um modelo de rede *Pore-Cor* (Matthews et al., 2010), para comparação de conectividade dos

resultados obtidos pelas diferentes técnicas e o recurso para estudo de rede de poros (*Pore-Cor*) mostrou-se uma ferramenta eficaz para o conhecimento da porosidade do solo permitindo a descrição de estruturas complexas.

Al-Raoush e Willson (2005) utilizaram um microtomógrafo síncrotron de raios X (alta resolução > 10  $\mu\text{m}$ ) para aquisição de imagens de amostras de contos de vidro e areia marinha natural (não consolidadas). Algoritmos foram aplicados para extrair a estrutura da rede de poros, os quais simplificam o espaço poroso para redes sob a forma de nós ligados (denominados de poro-garganta) aos caminhos (denominado de poro-corpo).

Os resultados destes pesquisadores mostraram que a microtomografia é uma ferramenta não-destrutiva e eficaz para extrair a estrutura, a distribuição espacial tridimensional por tamanho (e a correlação espacial entre tamanhos) e forma, conectividade, superfície específica e porosidade, bem como a determinação do volume representativo para a porosidade.

Roque e Valério (2012) apresentaram uma proposta para estimar o índice de qualidade dos reservatórios rochosos baseado na avaliação de parâmetros como porosidade, tortuosidade e área da superficial de grãos a partir da análise de imagens microtomográficas, partindo da premissa de que a permeabilidade não depende apenas da porosidade, mas sim da geometria dos poros e da distribuição dos grãos; apresentando uma equação que correlaciona estes parâmetros, estimando assim o índice de qualidade dos reservatórios.

Estas duas propriedades, conectividade e tortuosidade, são investigadas em outras áreas da ciência, ou seja, é de interesse científico abrangente, pois qualquer sistema poroso composto por duas fases apresenta estas propriedades; e grandes esforços vêm sendo realizados do ponto de vista matemático, na elaboração de algoritmos que compõem programas específicos onde as imagens binárias são geradas e processadas; para posterior quantificação dessas propriedades.

Em meios porosos, a tortuosidade, do ponto de vista matemático, é uma medida do grau de sinuosidade de um poro, entretanto a tortuosidade geométrica é um conceito definido para uma estrutura filamentosa qualquer (neste caso, os poros do solo). Quando a rede porosa apresenta forma sinuosa existe uma correlação positiva entre a tortuosidade, fração volumétrica dos poros e a característica de Euler-Poincaré – CEP (Roque et al. 2011; 2012).

A CEP pode ser estimada para um objeto 3D com base em observações de qualquer alteração topológica das intersecções de um plano 2D que varre completamente o objeto, independente da direção e orientação da varredura. Isto significa que a CEP pode ser calculada por um conjunto de *disectors*, observando os padrões de uma fatia e comparando com os padrões das fatias seguintes em um volume total composto por pares de imagens 2D. Quanto maior a estimativa da CEP menos objetos estão conexos em um volume de imagens (Gundersen, 1993).

## CAPÍTULO 3

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Tomografia Computadorizada

##### 3.1.1. Histórico

Em 1917, o matemático austríaco Johann Karl August Radon, sem qualquer interesse em tomografia, em um de seus trabalhos desenvolveu uma equação, a qual hoje é denominada de Transformada de Radon.

Esses cálculos puramente matemáticos e complexos são considerados a base da criação de uma imagem tomográfica. A transformada de Lorenz e a Transformada de Fourier também contribuíram para que Radon concluísse sua equação, a qual tinha como objetivo mostrar que um objeto tridimensional poderia ser reproduzido a partir de um conjunto de projeções. Assim, o inverso da transformada de Radon pode ser usado para reconstruir a densidade original, dando origem a imagem.

Em 1971, o primeiro protótipo de um aparelho de Tomografia Computadorizada foi desenvolvido pelo engenheiro elétrico inglês Godfrey Newbold Hounsfield. A ideia era explorar as informações que a radiação podia oferecer no diagnóstico de tumores cranianos.

No seu protótipo inicial, utilizou fonte de radiação gama ( $^{241}\text{Am}$ ) e o tempo de aquisição foi de 9 dias e o tempo para processar uma única imagem foi 150 minutos. Hounsfield então trocou a fonte de radiação gama por uma fonte de raios X, por ser uma radiação com suas propriedades já bem conhecidas na época e o aparelho registrou os dados obtidos pelos raios X em vários ângulos, conforme a descontinuidade de densidades; para então, por meio de um computador calcular os diferentes coeficientes de absorção (dos diversos tecidos). Ele conseguiu reduzir o tempo de aquisição para 9 horas, mas na análise dos dados faltou-lhe ainda, apoio matemático de reconstrução das imagens obtidas.

Hounsfield não tinha o conhecimento de que o físico sul-africano Allan MacLeod Cormack (1963) trabalhava com a distribuição de coeficientes de atenuação visando melhorar o alvo (tumores) no tratamento com radioterapia e no



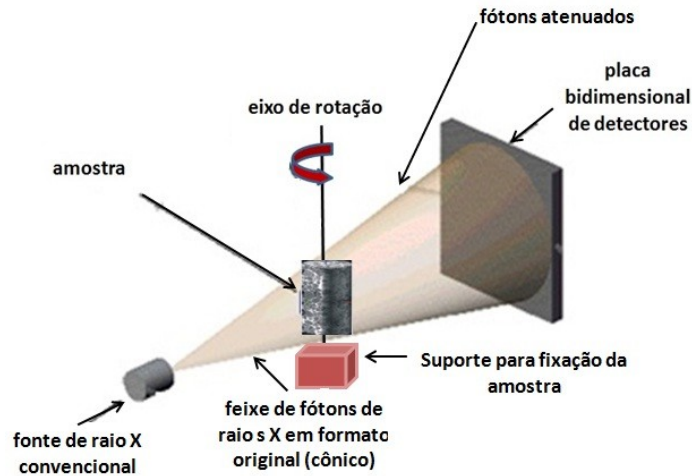
desenvolvimento de um algoritmo matemático para reconstrução (2D para 3D) de imagens tomográficas. No entanto, os esforços de Cormack foram reconhecidos em aplicações reais na área médica na técnica de diagnóstico tomográfico e ambos, Cormack e Hounsfield, receberam o Prêmio Nobel em Medicina em 1979. O nome de Hounsfield está imortalizado na unidade quantitativa de radiodensidade, unidade Hounsfield (UH), utilizada nos exames diagnósticos de TC (onde -1000 UH é o valor de referência para o ar e 0 UH é para a água e +1000 UH é para osso). Em outras áreas da ciência, assim como na ciência do solo esta unidade é denominada de Unidade Tomográfica (UT).

No Brasil a técnica de TC para uso em diagnóstico médico foi primeiramente aplicada na cidade de São Paulo em 1977. Após isso, em menos de quatro anos, a tecnologia aplicada a TC não parou de evoluir e várias “gerações” de aparelhos de tomografia foram sendo lançados no mercado. Atualmente dispomos de modelos cada vez mais eficientes, constituídos de múltiplos detectores, sistemas de aquisição helicoidal e volumétrico; os quais permitem a obtenção de imagens com melhor resolução com um tempo de aquisição dos dados bastante reduzido.

### **3.1.2. Tomografia Computadorizada por feixe cônico**

Esse sistema é conhecido como Tomografia Computadorizada Volumétrica ou por Feixe Cônico (TCFC), sendo desenvolvido em 1998 para fins odontológicos. Como o próprio nome sugere, é uma técnica revolucionária de obtenção de imagem que utiliza um feixe cônico de radiação associado a um receptor de imagens bidimensional (Figura 1).

Figura 1 – Esquema de um tomógrafo de raios X por feixe cônico, no qual a amostra gira durante a varredura abrangendo todo o seu volume.



Fonte: adaptado de Alves, 2012.

Durante o giro de 360° da amostra, múltiplas projeções bidimensionais em ângulos diferentes são obtidas e enviadas ao computador. Essas projeções contêm toda a informação necessária para compor a matriz de dados que será utilizada na reconstrução das imagens 3D. Cortes nos três planos do espaço podem então ser obtidos a partir desta imagem 3D. É possível também obter reconstruções panorâmicas a partir da imagem 3D inicial (Scarfe et al., 2006; Xaves et al., 2005; Ritter, 2007).

Dependendo do tamanho da amostra, se esta não for muito grande, uma das vantagens da TCFC comparada a Tomografia Computadorizada por Feixe em formato de leque (TCFL), é justamente o fato de que com uma única rotação de 360°, têm-se a aquisição imediata do volume total da amostra assemelhando-se ao sistema *multislice*, quando este possui um feixe não colimado (feixe original); o qual tem um tempo de exposição para cada varredura, muito menor que um segundo.

Outra diferença é a determinação do tamanho do *voxel*. Na TCFL o tamanho do *voxel* é determinado pela largura do feixe e pelo passo linear que o suporte da amostra (mesa) realiza para obter uma varredura completa da região de interesse; o que resulta em *voxels* anisotrópicos; *i.e.*, a altura (*y*) é igual à largura (*x*) e ambas são menores que a profundidade (*z*) e a espessura da fatia é igual a resolução axial, o que torna-o mais rápido que a tecnologia TC *multislice*.

Na TCFC o tamanho do *voxel* é obtido pelo tamanho do *pixel* no receptor de imagem, os quais geram *voxels* anisotrópicos; *i.e.*, altura, largura e profundidade possuem as mesmas dimensões e as imagens possuem melhor nitidez que as obtidas via TCFL.

Apesar do alto custo dos aparelhos, a tendência é que o sistema TCFC seja cada vez mais utilizado para pesquisas com materiais em diversas áreas.

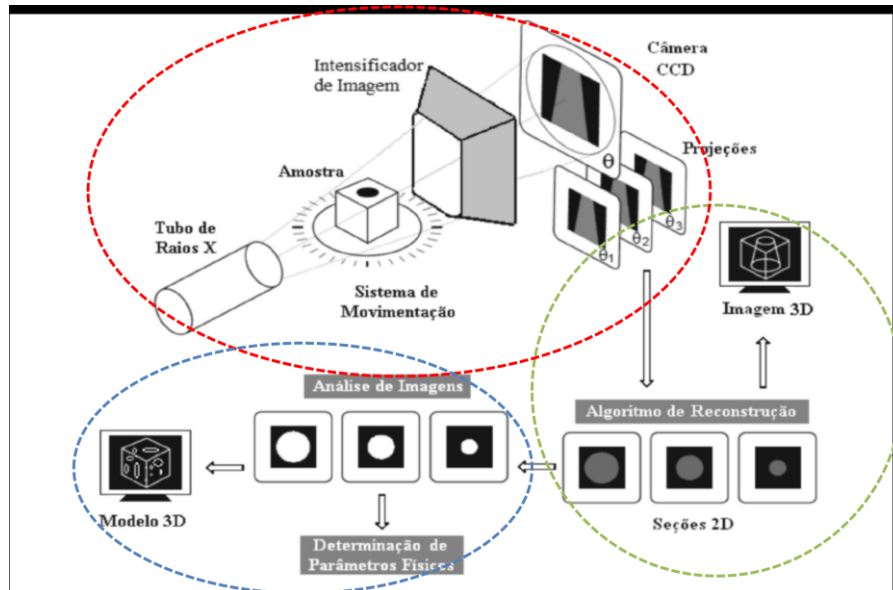
### **3.1.3. Princípios básicos da Tomografia Computadorizada**

Tomografia é uma palavra formada pela junção de dois termos gregos, *tomos* e *graphos* que significam, respectivamente, camadas e escrita. É uma técnica especializada que registra de maneira clara as diferentes estruturas dentro de um determinado plano e permite a observação da região selecionada com pouca ou nenhuma sobreposição de estruturas. Uma analogia comum é considerar a técnica como uma divisão da amostra em fatias bidimensionais. Cada fatia (corte axial, ou tomograma) mostra as diferentes densidades dentro de um corte claramente definido e em foco e a secção é então definida como o plano focal ou camada focal (Whaites, 2003).

O sistema tomográfico é constituído basicamente por: uma fonte de radiação, amostra, conjunto de detectores de radiação e um moderno sistema computacional. Independente da geração do sistema tomográfico, a forma como a informação (imagem) é gerada é a mesma. No entanto, o tempo necessário para aquisição de dados para formação da imagem depende do tamanho da amostra, da precisão e geração do aparelho e da resolução desejada.

O procedimento para aquisição de dados que serão transformados em imagens digitais está dividido conforme as técnicas de PDI: aquisição (sistema fonte-amostra-detector), pré-processamento (reconstrução matemática, filtros e segmentação) e processamento (análise quantitativa das propriedades de interesse) (Figura 2).

Figura 2 - Procedimento de aquisição (vermelho), pré-processamento (verde) e processamento (azul) de imagens tomográficas



Fonte: adaptado de Fernandes et al., 2009.

A seguir, são descritos os procedimentos de aquisição, pré-processamento e o processamento das imagens microtomográficas.

### 3.1.3.1. Aquisição

Durante o processo de aquisição ocorre o movimento de varredura do feixe de radiação sobre o objeto de interesse, no qual radiação sofre diferentes processos de interação com matéria ao atravessar a amostra. Cada feixe interage com um dado ponto no interior de uma secção transversal da amostra em diversos ângulos, sofrendo atenuações que se diferem com a densidade ou número atômico do material constituinte da amostra, onde então é detectado no lado oposto da fonte.

Portanto, cada ponto de uma secção transversal da amostra representa uma atenuação média dos vários ângulos varridos e os sinais elétricos analógicos são enviados ao sistema de computação que através de algoritmos específicos serão transformados em sinais digitais para compor as imagens que iremos ver na tela do computador. O tomograma calculado, ou seja, a imagem bidimensional (fatias das secções transversais) que vemos na tela do computador, corresponde a uma matriz

dos valores de atenuação do feixe, visualmente apresentada em tons de cinza, em formato analógico (Araújo, 2006; Hofer, 2010).

#### **3.1.3.1.1. Filtro (externo)**

O feixe de radiação que emerge do ânodo do tubo de raios X, não é monoenergético. Ele é formado por fótons que variam com a tensão total (kV) aplicada ao tubo de raios X, ou seja, por fótons originados desde uma tensão mais baixa (menos energéticos) até os originados de uma tensão mais alta (mais energéticos). A energia média dos fótons de raio X está na faixa de 50 keV à 70 keV e a energia máxima do feixe de radiação é determinada pela tensão de pico (kV máximo) aplicado ao tubo. Quanto menor a flutuação da tensão total aplicada ao tubo de raios X (mais próxima da tensão de pico), mais homogêneo tende a ser o feixe de radiação que irá incidir na amostra (Santos e Nacif, 2009).

O filtro controla o espectro de energia dos fótons de raios X (radiação útil, cerca de 10% apenas) emitidos pelo dispositivo. Sua função é bloquear feixes de menor energia (grande comprimento de onda) os quais são pouco penetrantes e não contribuem para a formação da imagem tomográfica, sendo assim, os filtros ficam localizados entre a fonte e a amostra.

#### **3.1.3.1.2. Ponto focal**

Do ponto de vista prático nem todo o ânodo está envolvido na produção de raios X. O ânodo dispõe de uma pequena área retangular localizada em sua superfície, a qual é determinada pela largura do feixe de elétrons e pela inclinação da superfície do ânodo, onde ocorre o impacto dos elétrons, a qual é denominada de ponto focal (Heck, 2009).

O tamanho do ponto focal tem um efeito muito importante na formação da imagem, ou seja, em conjunto com os detectores, é um dos fatores limitantes do poder de resolução (capacidade do sistema em identificar estruturas pequenas) do equipamento. Quanto menor o ponto focal, menor deve ser a corrente no ânodo, a qual diminui o processo de geração de calor, portanto menor será a potência radiante, tornando a imagem mais nítida (detalhada). Porém isso, aumenta o sinal-ruído e o tempo de aquisição da imagem.

Por outro lado, um ponto focal grande pode resistir mais ao calor do que um ponto focal pequeno. Sendo assim, deve-se encontrar métodos de se obter um ponto focal que forneça uma imagem bem detalhada e com boa dissipação de calor. O emprego do princípio de foco linear e rotação do ânodo podem ser boas opções (Buzug, 2008).

As dimensões do ponto focal variam entre 0,1 mm e 2,5 mm e os tubos são construídos para terem tamanhos específicos de ponto focal de acordo com a aplicação desejada. O tamanho e a forma do ponto focal dependem, basicamente, do tamanho do filamento que constitui o ânodo e das características de construção do dispositivo de focalização do tubo (Nersissian, 2004).

Os aparelhos de microtomografia computadorizada atuais, comparados aos aparelhos de tomografia computadorizada da área médica apresentam a vantagem de um ponto focal de menor dimensão, o que permite que a amostra seja colocada mais perto do tubo de raios X, gerando assim maior ampliação e maior resolução (Van Geet et al., 2000).

### **3.1.3.1.3. Detector**

Os detectores de radiação são responsáveis por captar a radiação que atravessa o objeto estudado, ou seja, a radiação que não foi absorvida totalmente durante sua trajetória.

Os detectores podem ser utilizados não só para detectar a presença de radiação ionizante, mas também para medir a energia da radiação. São responsáveis por converter as diversas intensidades de radiação, em sinal elétrico analógico (Pontes, 2010). Quanto maior número de fótons de raios X atingirem os detectores, maior é o pulso elétrico e a diferença de potencial que cada detector fornece ao computador. A informação que os sinais elétricos fornecem ao atingirem os detectores é sobre o quanto o feixe foi atenuado ao atravessar cada componente de uma amostra, ou seja, o coeficiente de atenuação (Oliveira, 2007).

Existe uma variedade de tipos de detectores, tais como: câmaras de ionização, cintiladores e semicondutores, os quais foram desenvolvidos para diferentes tipos de radiação e aplicações específicas, sendo que em seu desenvolvimento são levados em conta fatores que determinam a qualidade do sinal detectado e transmitido.

No geral, um detector é desenvolvido com material específico e sensível para uma determinada faixa de energia do espectro eletromagnético garantindo assim uma melhor eficiência do dispositivo.

As principais características dos detectores estão relacionadas com: custos, eficiência e velocidades. O custo dos detectores é o principal fator do elevado custo dos aparelhos de Tomografia Computadorizada.

Três fatores são levados em consideração quanto à eficiência de um detector:

- 1) A eficiência geométrica, que está associada à área sensível à radiação em relação à sua área total e aos espaçamentos entre as células detectoras, as quais reduzem o ruído originário de radiações secundárias.
- 2) A eficiência quântica, que está associada à parcela do feixe de raios X incidente sobre o detector que é absorvido e que contribui para a medição do sinal.
- 3) A eficiência de conversão, que é a capacidade de converter o sinal de radiação absorvida em um sinal elétrico. A eficiência total é o produto destas três sendo que quanto menor for essa eficiência (na faixa de 45% à 85%) maior poderá ser a intensidade do feixe (Santos e Nacif, 2009).

O detector utilizado neste estudo é constituído por um cintilador e câmera CCD, que formam uma placa bidimensional inflexível. Ambos estão conectados com fibras ópticas o que torna a transmissão de dados, mais rápida e segura.

#### **3.1.3.1.4. Cintilador**

O cintilador é uma tela fina transparente composta por cristais de Iodeto de Césio dopado com Tálcio [(CsI (TI)] que apresenta caráter luminescente, isto é, produz pequenos flashes de luz quando excitada pelos raios X. Este tipo de material possui um coeficiente de absorção melhor que os cintiladores de Iodeto de Sódio (NaI) para os fótons altamente energéticos como os raios X e radiação gama (Pontes, 2010).

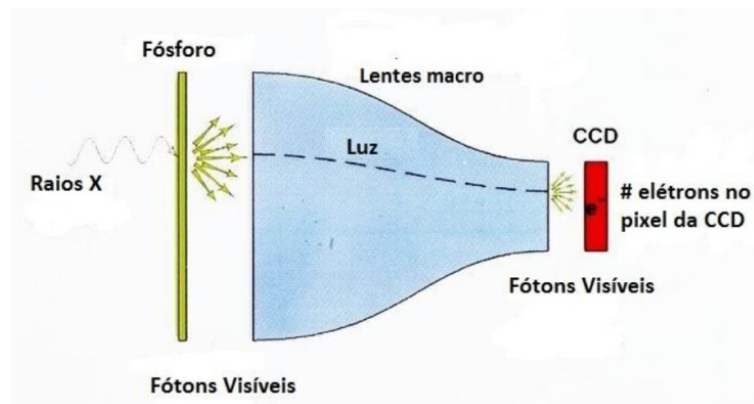
Devido à estrutura eletrônica de banda encontrada nos cristais, uma partícula pode excitar um elétron de uma banda de condução, de valência ou de excitação,

separados por um *gap* de energia. Quando dopados, cria-se níveis eletrônicos na zona proibida, exatamente onde se localizava a separação entre as bandas. Na região de excitação, os elétrons estão fracamente ligados em pares buracos-elétrons, até serem capturados pelas impurezas. Por isso é importante a escolhas dessas impurezas para a eficiência do material cintilador.

Os fótons de radiação, que são captados pelos cristais fotossensíveis do detector são absorvidos por esse, excitando os elétrons dos átomos do material e quando estes elétrons retornam ao estado de menor energia emitem luz visível (Figura 3).

Essa luz ao atingirem a câmera CCD são convertidos em cargas elétricas. Portanto, cada uma destas células fotossensíveis gera um ponto da imagem, denominado pixel, ou seja a intensidade do sinal do detector é uma medida da atenuação sofrida pelo feixe de radiação ao interagir com o meio material.

Figura 3 – Os raios x atingem o material cintilador e este emite luz. A luz converge por meio de lentes onde é detectada pela câmera de CCD localizada logo atrás do detector formando a imagem.



Fonte: Alves, 2012.

### 3.1.3.1.5. Câmera CCD

O CCD (dispositivo de carga acoplada), localizada atrás do cintilador permite a conversão de fótons detectados em cargas elétricas, podendo medir estas cargas e a imagem projetada no cintilador é gravada pela câmera em formato digital.

Denominado tecnicamente de transdutor, a CCD é responsável por converter sinal elétrico analógico em informação digital (ou vice-versa), a qual é



representada através de *bits*. Este dispositivo produz um sinal elétrico (tensão de saída) diretamente proporcional ao nível de radiação detectada (Maher, 2006).

Muitas das grandezas físicas com as quais lidamos são grandezas analógicas por natureza e são representadas por valores contínuos, sendo que para poderem ser processadas por sistemas digitais precisam ser convertidas para uma cadeia de *bits*, os quais são representados por valores discretos (Edusp, 2005).

De maneira geral seu funcionamento se dá através de lentes ópticas a imagem é projetada na região fotoativa, onde existem capacitores, de forma que cada um deles acumula uma carga proporcional à intensidade de luz detectada nesta região. Um circuito eletrônico permite a transferência de cada capacitor, um a um. Um último capacitor transfere toda a carga acumulada em um amplificador, o qual converte esta carga acumulada em uma voltagem. Este procedimento é repetido para todas as séries de capacitores, obtendo-se uma voltagem diferente para cada série, respectiva às cargas acumuladas no último capacitor de cada uma das séries. Esta informação é então digitalizada.

### **3.1.3.2. Pré-Processamento**

Esta etapa pode ser dividida em: pré-processamento, realce e classificação. No pré-processamento é realizado o processamento dos dados brutos para calibração da imagem, correção de distorções geométricas e remoção de ruídos (parâmetros de reconstrução e método matemático de reconstrução). O realce visa melhorar a qualidade da imagem, permitindo uma melhor discriminação dos constituintes da amostra (filtros na imagem) e na classificação são atribuídas classes aos objetos presentes nas imagens (segmentação).

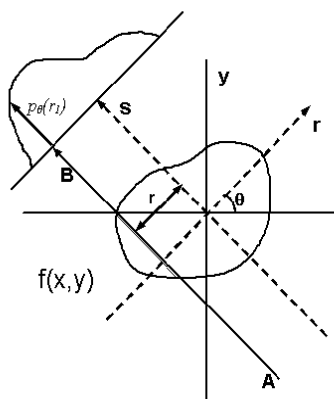
#### **3.1.3.2.1. Reconstrução**

Uma imagem tomográfica digital é construída matematicamente por meio de algoritmos matemáticos (método teórico de reconstrução) utilizando os dados brutos (analógicos) coletados pelos detectores apenas dos volumes de interesse.

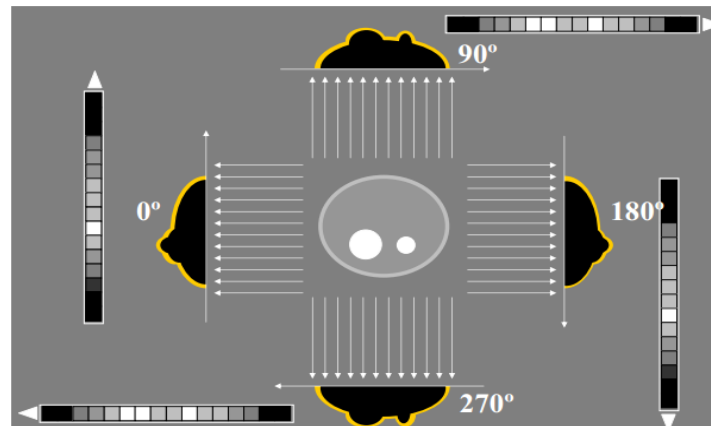
Para que a imagem de tomografia possa ser reconstruída de forma a demonstrar as estruturas em sua forma real, faz-se necessário, múltiplas tomadas de dados em diferentes ângulos de projeção.

A base matemática para determinar a distribuição espacial dos materiais constituintes é realizada através da Transformada de Radon. Em duas dimensões (2D), a Transformada de Radon consiste da projeção de um meio material num dado ângulo  $\theta$  composta por um conjunto de integrais de linha de uma função  $f(x,y)$ , as quais representam a atenuação total do feixe à medida que este atravessa o meio material em linha reta. Sendo assim, a função  $f(x,y)$  é representada pelo coeficiente de atenuação linear  $\mu(x,y)$  que forma a imagem resultante na tela. O feixe de radiação que atravessa o material é denominado de raio (pequena parte do feixe de raios X formado pelos fótons que saem do ponto focal e intercepta um único elemento detector) e a integral de  $f(x,y)$  ao longo de um raio, é denominado de raio soma. O conjunto de raios-soma para um determinado ângulo  $\theta$  é denominado de projeção  $P_r(\theta)$  (Figura 4) (Natterer, 2001; Carlos, 2002; Santos e Nacif, 2009, Charamba, 2013).

Figura 4 – (a) Projeção de uma função  $f(x,y)$  associada; (b) Conjunto de projeções em diferentes ângulos  $\theta$ .



(a)



(b)

Fonte: (a) Natterer, 2001; (b)

[http://www.walmorgodoi.com/arquivos/Palestra\\_Reconstrucao\\_Imagens.pdf](http://www.walmorgodoi.com/arquivos/Palestra_Reconstrucao_Imagens.pdf)

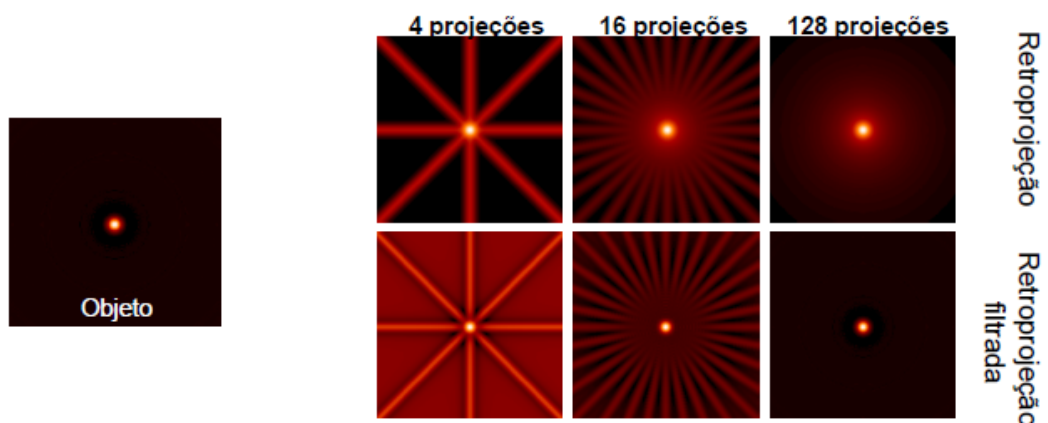
Por outro lado, a transformada inversa (método analítico e iterativo) é realizada para determinar a magnitude da propriedade em cada coordenada dentro do material, ou seja, tem como objetivo recuperar, através desses dados, a informação relacionada com a densidade do meio material analisado. A técnica mais simples para a transformação inversa é a técnica reconstrução algébrica (TRA), mas esta possui limitações quando o conjunto de dados é grande (Heck, 2009).

O sistema de coordenadas da função  $f(x,y)$  apresentado acima, refere-se a uma análise bidimensional (feixes em formato de leque), podendo ser reduzida para feixes pontuais (feixes em formato de lápis) e no caso de um feixe em formato cônico é deve-se acrescentar a coordenada  $z$ , obtida pelo algoritmo de feldkamp (Feldkamp, 1984; Wang et al., 1994; Natterer, 2001; Buzug, 2008).

Após a projeção a reconstrução tomográfica pode ser através de métodos de retroprojeção filtrada ou não filtrada. O valor da retroprojeção é calculado por interpolação (ajustes dos valores da matriz de projeção) da projeção por meio do método dos *pixels* vizinhos mais próximos (linear ou por convolução cúbica) que alteram os valores originais detectados pelos cintiladores. Neste contexto, na retroprojeção sem o uso de filtros, a imagem é formada pela soma de todos os raios que passam pelo ponto  $(x,y)$  nos diferentes ângulos de varredura, ou seja, é a soma dos resultados obtidos em cada projeção. A imagem reconstruída nestas condições perde resolução espacial e fica com muito brilho no centro, devido às propriedades aditivas da retroprojeção.

Os sistemas atuais de tomografia computadorizada empregam a técnica de retroprojeção filtrada, para melhorar a eficiência de reconstrução de imagem, obtendo imagens de melhor qualidade (Figura 5) (Kak e Slaney, Buzug, 2008).

Figura 5 – Reconstrução de acordo com o número de projeções sem o uso de filtro (superior) e reconstrução de acordo com o número de projeções com o uso de filtro (inferior). Em ambos os casos nota-se que quanto mais projeções forem realizadas, melhor será a resolução espacial da imagem.



Fonte: [http://www.walmorgodoi.com/arquivos/Palestra\\_Reconstrucao\\_Imagens.pdf](http://www.walmorgodoi.com/arquivos/Palestra_Reconstrucao_Imagens.pdf)

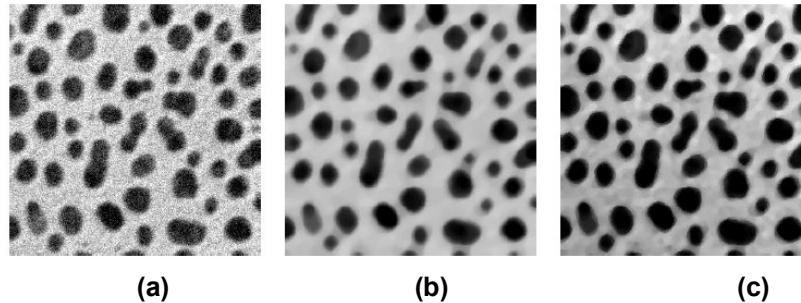
As técnicas de pré-processamento têm a função de melhorar a qualidade da imagem digital. Duas categorias principais envolvem estas técnicas: métodos que

operam no domínio espacial (filtros por convolução) e métodos que operam no domínio da frequência da imagem (análise de Fourier). A primeira baseia-se em filtros que manipulam o plano da imagem e a segunda, os filtros agem sobre o espectro da imagem.

No domínio das frequências a filtragem consiste em retirar ou minimizar certas frequências espaciais que estão presentes nas projeções, as quais são responsáveis pela degradação da resolução espacial da imagem tomográfica. Mais recentemente, técnicas baseadas nas Transformadas de Fourier (discreto e inverso) foram desenvolvidas para reconstrução de imagens tomográficas (Kalender, 2005).

É comum em imagens tomográficas combinar os métodos como a aplicação: de filtro mediana para a redução de ruídos, filtros passa-alta para realce dos contornos e bordas dos objetos da imagem (Figura 6) (Gonzalez e Woods, 1993).

Figura 6 – Exemplo de um pré-processamento simples: (a) imagem original com a presença de ruído gaussiano, (b) imagem após aplicação de um filtro mediana para redução do ruído e (c) imagem após aplicação de um filtro passa-alta para realce dos contornos.



Fonte: Gonzalez e Woods, 1993.

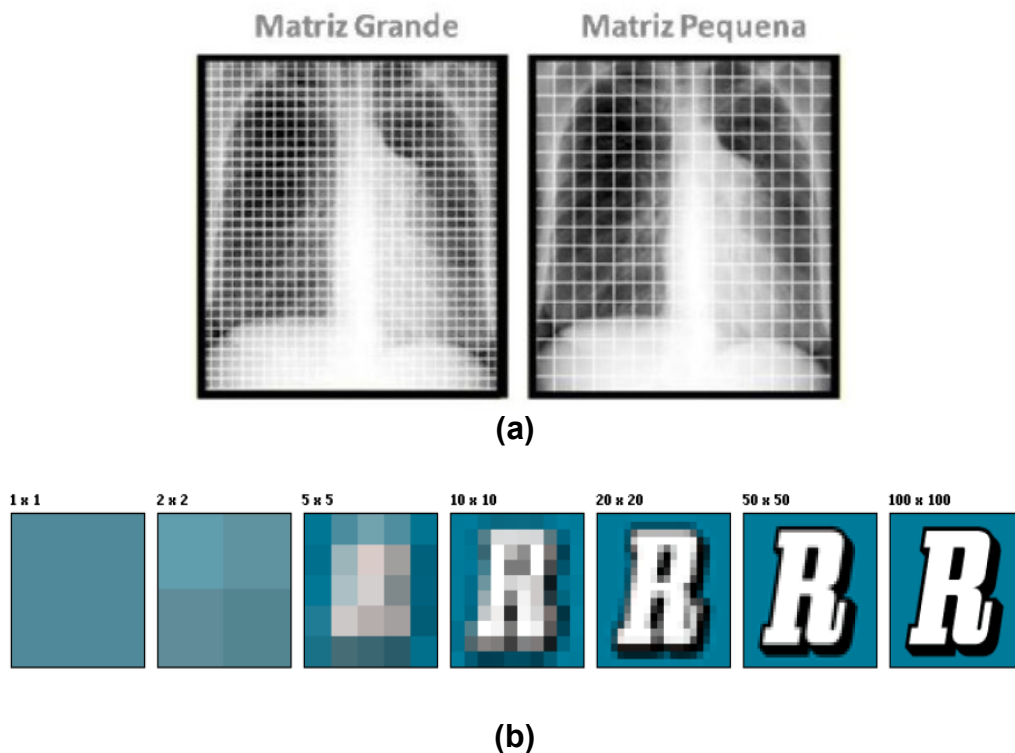
### 3.1.3.2.2. Parâmetros de reconstrução e fatores que influenciam na qualidade da imagem

#### a) Campo de visão (FOV – *field of view*)

O FOV é definido como o diâmetro (ou tamanho da área) máximo na imagem reconstruída. Um FOV pequeno reduz o tamanho do *voxel*, uma vez que se utiliza toda a matriz de reconstrução para uma região menor do que para o caso de um FOV maior (Figura 7a). Isto traz a vantagem de melhorar a resolução espacial da

imagem. A resolução espacial (RE) da imagem é a capacidade do sistema de mostrar detalhes (distinguir dois pontos mais próximos) das estruturas (alto contraste) acima de 10%. É a menor distância entre dois objetos pequenos que podem ser viabilizados em uma imagem. É importante notar que a resolução e o tamanho do *pixel* ou tamanho do *voxel* são coisas distintas. O *pixel* ou *voxel* é definido como o tamanho que representa um espaço elementar ocupado em uma imagem. Já a resolução é limitada pelo tamanho do *pixel* ou *voxel* (Hofer, 2010; Santos e Nacif, 2009).

Figura 7 – (a) Matriz de reconstrução da imagem tomográfica do tórax humano: para um FOV pequeno obtém-se uma matriz grande com maior número de pixel e melhor resolução espacial (esquerda) e para um FOV grande obtém-se uma matriz grande com quantidade reduzida do número de *pixels* e com resolução espacial de baixa qualidade (direita) e (b) da esquerda para direita uma mesma matriz com diferentes resoluções espaciais.



Fonte:

[http://www.portalciep.com.br/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&download=26:tomografia-computadorizada&id=4:modulo-iii&Itemid=71](http://www.portalciep.com.br/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=26:tomografia-computadorizada&id=4:modulo-iii&Itemid=71)

Ao se selecionar o FOV deve ser ponderado se todas as regiões de interesse foram incluídas. O FOV muito pequeno pode excluir informações importantes de uma amostra. Assim para o estudo de estruturas pequenas o FOV é pequeno, enquanto para o estudo de estruturas maiores no interior de uma amostra

o FOV é maior. Um FOV grande representa perda de foco, e conseqüentemente radiação X secundária. Uma vez que sabemos o valor do campo de visão e a matriz escolhida, podemos calcular o quanto representa, ou qual a dimensão de cada *voxel* em termos de medidas reais. Para tanto, basta dividir a dimensão do campo de visão pelo valor da matriz, sendo a profundidade definida pela espessura do feixe incidente (espessura de corte). No entanto, para o sistema de  $\mu$ TCFC, a dimensão do *voxel* é isotrópica.

Se aumentarmos o FOV, sem alterar a matriz, maior será o número de *pixels*, mas por outro lado, menor será o coeficiente sinal/ ruído (S/R) (Figura 7b).

### **b) Razão Sinal-Ruído (S/R)**

O sinal é uma informação útil e o ruído é uma informação não-útil. O ruído apresenta aspecto granulado observado na imagem de TC. É resultado da natureza quântica dos fótons de raios X detectados, a qual gera uma flutuação estatística local nos valores atribuídos aos *voxels* de uma imagem de uma região homogênea da amostra. Com isso, mostra-se dependente da eficiência dos detectores de radiação e do fluxo de fótons que atinge o detector. Este fluxo é determinado pela tensão aplicada a fonte de raios X, pela corrente no tubo, pelo filtro físico, espessura de corte, espessura e composição da região de interesse e pelo algoritmo de reconstrução (núcleo de convolução). A magnitude do ruído é determinada pelo desvio padrão dos valores de UT (associados aos *voxels*) sobre uma região de interesse (ROI) em um meio material homogêneo.

Em geral, o ruído é espalhado uniformemente por toda a imagem, mas o sinal está concentrado em áreas específicas. Por exemplo, cada vez que uma imagem é extraída da câmera CCD, há um pouco de ruído (incerteza) nos valores, pois o processo de leitura do *chip* e transferência de informação não é perfeito. Isso é chamado de o ruído de leitura, ou seja, um único *pixel* tem um pouco de sinal e ruído.

A razão S/R é afetada por parâmetros de digitalização, pois nem todos os fótons emitidos pela fonte são capturados pelos detectores. Durante uma varredura uma média de  $n$  fótons é absorvida por cada unidade de área do detector. Devido à natureza estocástica (estatística) dos processos de atenuação (absorção e

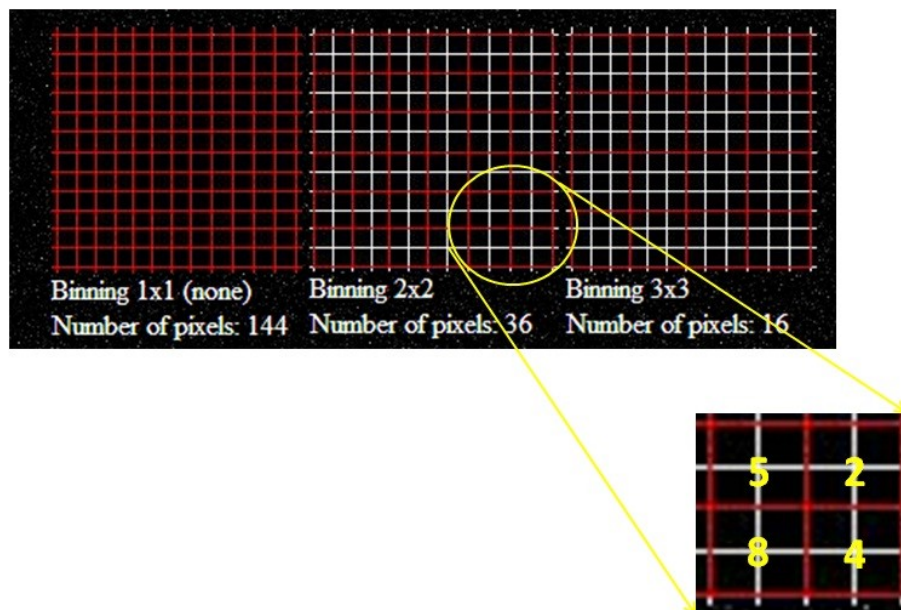
espalhamento), o número real de fótons absorvidos varia com a unidade de área da imagem, ou seja, de um *pixel* para outro (Hofer, 2010; Santos e Nacif, 2009).

A intensidade do sinal na imagem aumenta linearmente com  $n$ , enquanto que o ruído na imagem geralmente aumenta com a raiz quadrada de  $n$ . Portanto, a fim de aumentar a razão S/R por um fator de dois,  $n$  deve ser aumentado por um fator de quatro. Isto pode ser conseguido através do aumento do *binning* ou fazendo a média de quatro quadros em conjunto.

### c) *Binning*

Usando esta técnica, melhora-se a razão sinal-ruído. Ao adicionar os valores de *pixel* em conjunto, o efeito do ruído sobre os valores de *pixel* é reduzido, e o efeito do sinal é aumentado. Isso significa que a combinação da informação em *pixels* adjacentes torna-os um *pixel* eficaz (*superpixel*) (Figura 8).

Figura 8 – Representação de um detector de 144 *pixels*. Os quadrados vermelhos indicam o modo de *binning* adotado para três situações: 1x1, 2x2 e 3x3. Abaixo um *zoom* de uma matriz 2x2 com os respectivos valores de UT para cada *pixel*.



Fonte: adaptado de <http://www.noao.edu/outreach/aop/glossary/binning.html>

Se o modo de *binning* for do tipo 2x2 e os números de UT dos quatro *pixels* adjacentes forem 5, 2, 8 e 4; os valores dos quatro *pixels* são somados (19) e não é

realizada a média, sendo a soma considerada como uma peça única de dados. Neste caso a relação será 4 vezes o sinal dividido pelo ruído ( $4 \cdot \text{sinal} / \text{ruído}$ ). Um inconveniente do *binning* é a perda de resolução (Manual Locus, 2004).

#### **d) Janelas**

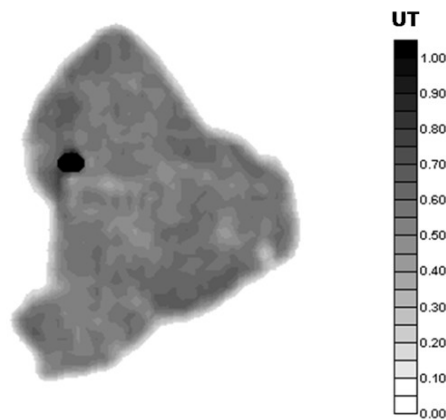
As janelas são recursos computacionais que permitem, após a reconstrução das imagens tomográficas, que a escala de cinza possa ser alargada ou estreitada, facilitando a diferenciação entre certas estruturas de acordo com a necessidade. É uma forma de mostrar apenas uma faixa de tons de cinza que nos interessa. A janela é composta por dois elementos: o contraste (largura) e a densidade óptica (centro). A largura da janela controla o contraste, ou seja, uma janela ampla indica maior número de UTs que refletem uma escala longa e portanto, menos contraste na imagem. Por outro lado o centro da janela, também denominado de nível, controla a densidade da imagem e esse valor determina o número de UT que será o cinza central e os extremos da largura da janela (Santos e Nacif, 2009).

#### **e) Unidade Tomográfica (UT)**

Os diferentes tons de cinza, os quais são proporcionais ao coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) da amostra, representam as intensidades dos *pixels* nas imagens tomográficas e são apresentados em termos de Unidade Tomográfica (UT). Na verdade, ocorre uma equivalência na escala de cinza entre o valor codificado e a escala de valores em UT (Carlos, 2002). Devemos lembrar que este valor de atenuação na realidade corresponde à quantidade média de absorção de radiação pelo material representado pelo *pixel* no monitor. Após calibração do sistema tomográfico, o meio de referencia é o ar, o qual apresenta a menor atenuação sofrida pela radiação ao atravessar a matéria. Para o solo, a UT corresponde à contribuição das partículas minerais, matéria orgânica, da água e do ar; gerando diferentes valores de  $\mu$  para cada caminho cruzado pelo feixe de radiação (Figura 9).



Figura 9 – Os diferentes tons de cinza em uma imagem tomográfica em termos de Unidade Tomográfica (UT); onde o maior valor de UT, 1,0, representa a menor atenuação sofrida pela matéria em uma amostra de solo que corresponde ao poro.



Fonte: Borges et al., 2012.

#### f) Contraste

É a capacidade de distinguir a diferença entre as densidades máxima (branca) e mínima (preta) da imagem tomográfica, inclusive pode ser influenciada pelo nível de exposição da radiação espalhada.

Na prática, isso ocorre na interação da radiação com o material alvo, a absorção (efeito Fotoelétrico) resulta em maior contraste da imagem do que a difusão (espalhamento Compton). Para reduzir a difusão, aumenta-se a absorção reduzindo a energia total do feixe de radiação (redução da tensão) e conseqüentemente aumentando a intensidade do feixe (aumento da corrente) (Santos e Nacif, 2009).

Em imagens digitais o parâmetro que define essa propriedade é a profundidade da imagem, ou seja, o número de *bits* por *pixel*; pois este define a amplitude nas variações dos níveis de cinza. Uma estrutura só será detectada se seu contraste com o meio for de três a cinco vezes maior que o nível de ruído e quanto maior for a estrutura, melhor será a resolução de contraste. Quanto maior o *pixel*, maior a matriz, menor será o ruído, maior espessura de corte; melhor será o contraste.

### **g) Voxels mistos**

*Voxels* mistos é o resultado que se tem no processo de aquisição dos dados brutos da atenuação dos fótons de raios X sofrida no interior da amostra. O menor detalhe que se possa ter em uma imagem microtomográfica não corresponde necessariamente ao menor detalhe que possa ser visualizado em uma amostra. De modo que, uma estrutura que represente um alto contraste em relação a sua vizinhança e de tamanho menor que a dimensão de um *voxel*, pode influenciar no valor médio do coeficiente de atenuação aparecendo na imagem com um contraste relativamente muito próximo em relação aos *voxels* vizinhos. Ou seja, é um processo que depende da resolução do sistema tomográfico, pois nem sempre a resolução consegue representar exatamente o tamanho real de uma partícula no interior da amostra.

Em termos práticos para o solo ocorrem quando o espaço real representado por um *voxel* é ocupado por dois ou mais elementos (objeto escaneado menor que duas vezes a resolução do sistema); por exemplo: quartzo, óxido de ferro e ar. Da mesma forma, macroporos e grandes mesoporos podem ser distinguidos, enquanto pequenos mesoporos e microporos poderão ser misturados com minerais de alta densidade que estejam na vizinhança. O valor médio da atenuação será utilizado para gerar a UT. No entanto este inconveniente pode ser minimizado, Elliot e Heck (2007) apresentam um método estatístico para extração de *voxels* mistos em imagens tomográficas.

### **h) Nitidez**

É a delimitação mensurável dos detalhes de uma imagem, ou seja, a boa visualização dos contornos de uma região. A falta de nitidez em uma imagem tomográfica corresponde a uma imagem com os contornos pouco definidos (borrados). Este tipo de imagem indesejada decorre dos fatores geométricos da formação da imagem (estático) ou de movimentos da amostra (dinâmico) durante a varredura.

### 3.1.3.2.3. Características de uma imagem digital

A imagem digital é uma matriz bidimensional, na qual cada elemento de matriz é denominado *pixel* e cada *pixel* recebe um valor numérico. O *pixel* não tem uma dimensão ou comprimento definido, pois depende do tamanho do campo de visão e da matriz de imagem.

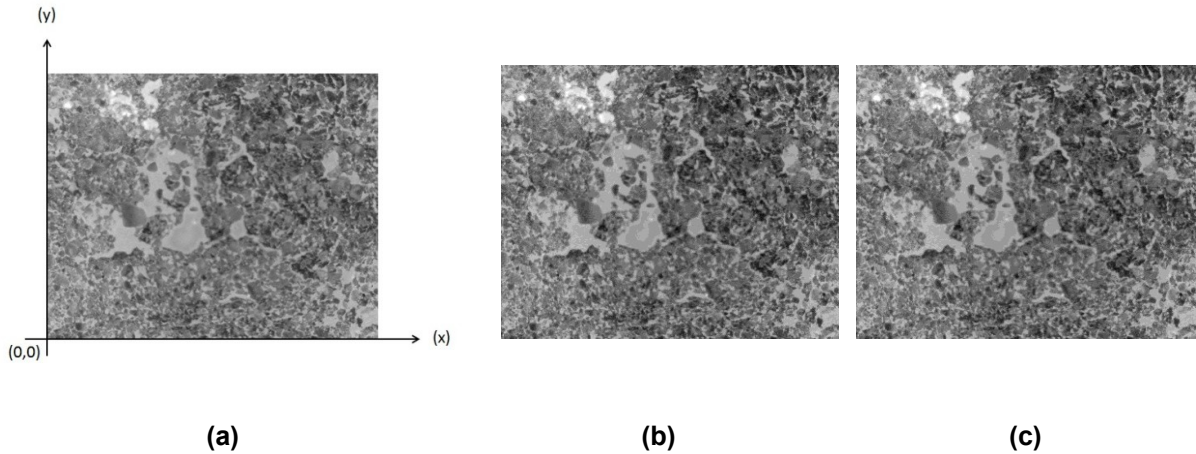
A imagem obtida em um corte 2D da amostra pode ser representada por pontos de diferentes valores, sendo dividida em uma matriz M x N pontos. A imagem tomográfica é gerada com matrizes a partir de 256 x 256 pontos, passando por 320 x 320 até 512 x 512 pontos. Equipamentos mais modernos chegam a trabalhar com matrizes de 1024 x 1024 pontos, o que significa dividir a imagem em mais de 1 milhão de pontos. Se uma mínima diferença nas densidades existir entre dois pontos consecutivos, o computador atribuirá um tom de cinza para cada um dos pontos.

Os computadores utilizam o sistema binário em que um *bit*, do inglês *binary digity*, é a menor unidade de informação que pode ser armazenada ou transmitida. Um bit pode assumir somente 2 valores: 0 ou 1. Portanto  $n$  bits podem codificar  $2^n$  valores o que nos permite obter uma gama de valores na escala de cinza que é justamente a combinação destes dois dígitos.

Em sistemas de informação na forma serial, a informação é transmitida *bit a bit*, sendo este, uma unidade de medida que vem acompanhada de um *byte*, que equivale a 8 bits (mínimo). Um total de 256 tons de cinza ( $2^8$ ) é, portanto, codificado em um *byte*. Isto significa que, os diferentes tons de cinza num intervalo de 256 tons dependerão exclusivamente das diferentes combinações binárias disponíveis, pois: 0 [00000000] equivale ao preto e 255 [11111111] equivale ao branco (Marques e Vieira, 2009).

Do ponto de vista matemático, uma imagem monocromática é uma função  $f(x,y)$  da intensidade luminosa (Figura 10), ou seja, qualquer ponto no plano x (coluna) e y (linha) é proporcional ao nível de cinza (brilho da imagem).

Figura 10 - (a) Imagem de solo monocromática digital com sistema de coordenada  $(x, y)$  e com 8 bits ( $2^8$ ) = 256 níveis de cinza, (b) mesma imagem com 16 bits ( $2^{16}$ ) = 65.536 níveis de cinza e (c) com 32 bits ( $2^{32}$ )  $\approx 4,3 \times 10^9$  níveis de cinza.



Fonte: A autora

Contudo, o olho humano normalmente distingue de 20 a 30 tons diferentes, o que faz do processo de segmentação um procedimento primordial na visualização de estruturas de interesse nas imagens.

A técnica de realce de contraste melhora a qualidade das imagens sob os critérios subjetivos do olho humano. O contraste entre dois objetos pode ser definido como a razão entre os seus níveis de cinza médios e a manipulação do contraste consiste na mudança de intensidade em cada *pixel*, com o objetivo de aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes na imagem. Isso pode ser realizado visualmente, entretanto, um exame prévio do histograma da imagem pode ser útil.

### a) Histograma

O histograma de uma imagem digital com  $k$  níveis de cinza é definido como uma função discreta, conforme equação (1):

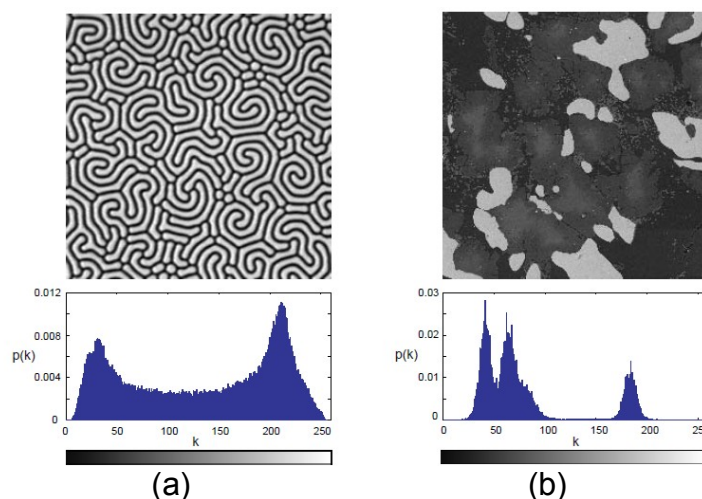
$$p(k) = \frac{n_k}{n} \quad (1)$$

onde o argumento  $k$  representa os níveis de luminância discretos,  $n_k$  representa o número de *pixels* na imagem com intensidade  $k$  e  $n$  é o número total de *pixel* da imagem, ou seja,  $n = M \times N$ .

Portanto o histograma de uma imagem representa a contagem dos níveis de cinza podendo informar a distribuição dos *pixels* dentro de  $k$  níveis possíveis. O histograma pode ser considerado como uma função distribuição de probabilidades, obedecendo os axiomas e teoremas de probabilidades (normalização da função distribuição) fornecendo uma visão estatística sobre a distribuição dos *pixels*, sobre o contraste da imagem e os níveis de iluminação (Gonzalez e Woods, 1993). Por isso, o histograma é uma importante ferramenta na segmentação de imagens onde se utiliza da similaridade entre os valores de *pixels*.

Os histogramas podem ser do tipo bimodal e multimodal. O do tipo bimodal apresenta a presença de dois picos (regiões de luminância com maior incidência de *pixels* na imagem) e ocorrem quando os objetos de fundo são bem definidos em uma imagem (Figura 11a). O do tipo multimodal apresenta os *pixels* distribuídos em mais de duas regiões de níveis de cinza (Figura 11b) resultando em três ou mais picos.

Figura 11 - Em (a) imagem com histograma bimodal e em (b) imagem com histograma multimodal.



Fonte: Gonzalez e Woods, 1993.

Outra característica importante em uma imagem digital é a conectividade dos *pixels* em uma imagem. Um *pixel* não apresenta as mesmas propriedades em

todas as direções, ou seja, ele é anisotrópico (exceto em uma imagem tomográfica volumétrica). No entanto, esta propriedade faz com que um *pixel* tenha quatro vizinhos e borda e quatro vizinhos na diagonal, e isto implica o tipo e conectividade que será utilizada (B4, B8) e no caso de *voxels* B6. Como consequência, as distâncias entre um ponto e seus vizinhos será igual a 1 para vizinhos de borda e  $\sqrt{2}$  para vizinhos da diagonal.

#### **3.1.3.2.4. Artefatos na imagem microtomográfica**

O artefato de uma imagem é qualquer estrutura fora do padrão que não corresponde ao objeto de estudo. Na medida em que se conhece sua procedência é possível eliminar ou minimizar estes.

Os principais artefatos nas imagens de TC são oriundos: da falta de precisão no sistema de rotação, dos constituintes de alta atenuação no interior da amostra e desbalanceamento dos detectores.

##### **a) Endurecimento do feixe (*beam hardening*)**

Este tipo de artefato aparece quando o feixe de raios X é pouco energético aliado a presença de um material muito denso de uma amostra (Figura 12). O fenômeno de endurecimento do feixe reflete uma atenuação aparente, ou seja, menor do que a esperada quando atinge objetos de alta densidade (Van Geet et al., 2001).

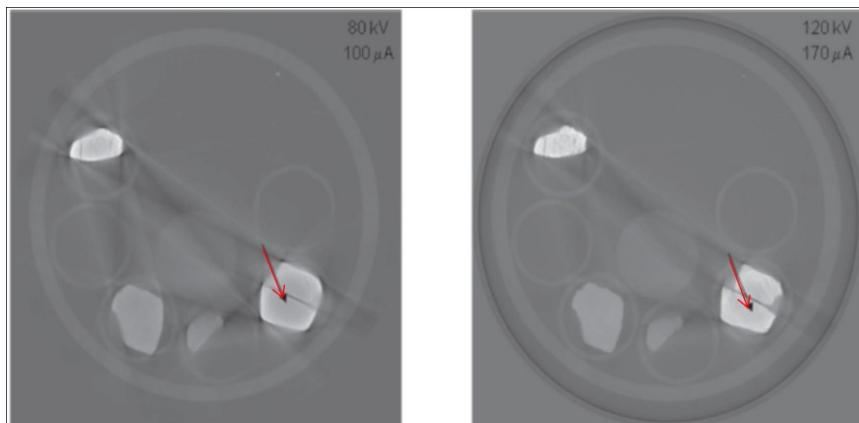
Isso ocorre quando um feixe contínuo de raios X penetra em uma amostra, os fótons de baixa energia são absorvidos em grande quantidade e a distribuição de energia que atravessa o objeto muda de baixa para alta energia, tornando o feixe duro. Se a amostra é espessa, este artefato fica mais evidente fazendo com que a amostra pareça mais densa do que realmente é. Esse artefato é pouco comum em  $\mu$ TCFC (Holberg, 2005).

### b) Efeito estrela

Estes artefatos são mais acentuados quando os fótons incidentes são menos energéticos. São projeções aparentes que ocorrem a partir das bordas de um objeto com alta densidade (Van Geet et al., 2001).

Ambos os tipos de artefatos (endurecimento e estrela – Figura 12) podem ser reduzidos pelo uso de um feixe de raios X mais energético e / ou pré-filtragem (Al ou Cu), para retirar a radiação “macia” antes de entrar na amostra. No entanto, esses procedimentos podem diminuir o contraste da imagem ou aumentar o tempo necessário para a sua aquisição (Heck, 2009).

Figura 12 – Os dois artefatos estão indicados por setas vermelhas: o efeito estrela e o efeito de endurecimento do feixe. As imagens foram obtidas com diferentes energias, onde observa-se que estes efeitos são mais pronunciados com menor energia dos raios X (esquerda). Os artefatos em forma de estrela são representados pelas projeções fora da borda do material de alta densidade. E o endurecimento do feixe é o reflexo mais escuro da imagem (aparentemente mais denso).



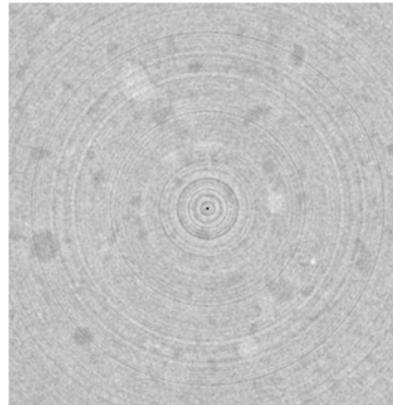
Fonte: Heck, 2009

### c) Anéis

Uma reconstrução bem sucedida depende do centro de rotação do sistema tomográfico. O centro de rotação está diretamente ligado com o posicionamento da amostra. Quando mal posicionado os detectores de radiação geram propriedades de entrada e saída diferentes entre canais. Assim, este artefato é resultado da não uniformidade dos fótons que chegam aos detectores ou instabilidade do feixe de raios X durante a varredura devido a má calibração do sistema. Por isso, uma boa

calibração evita este inconveniente nas imagens reconstruídas. Estes anéis são sombras centradas ao redor do FOV (Figura 13). No entanto, métodos corretivos baseados em algoritmos específicos para aplicação nas imagens após a reconstrução foram discutidos por Heck e Kyriakou et al. (2009).

Figura 13 – Imagem tomográfica com artefatos em forma de anel, obtida por meio de um  $\mu$ TCFC



Fonte: A autora

#### **d) Efeito de volume parcial (EVP)**

Ocorre do resultado da sobreposição dos valores de UT de um ou mais materiais contidos na amostra (Johns et al., 1993; Hsieh, 1999; Ketcham e Carlson, 2001). Neste caso, o tom de cinza apresentado por este *pixel* equivalerá à média do coeficiente de atenuação dos raios X, prejudicando a visualização nítida do limite de tal estrutura (Parks, 2000). Está intimamente relacionado ao efeito de *voxels* mistos, pois todo *voxel* misto está sujeito ao EVP.

#### **3.1.3.2.5. Segmentação**

Segmentar uma imagem significa, de modo simplificado, separar a imagem como um todo nas partes que a constituem e que se diferenciam entre si (Gonzalez e Woods, 1993).

É usual denominar “objetos” da imagem os grupos de *pixels* de interesse e denominar de “fundo” da imagem o grupo de *pixels* que não se tem interesse. No



caso do presente estudo, os objetos de interesse são os poros e o fundo é a fase sólida do solo.

O processo de obtenção de uma imagem tomográfica digital consiste de inúmeros processos estatísticos desde a aquisição dos dados brutos até os tratamentos realizados na imagem final reconstruída. Isto ocorre, pelo simples fato, de buscarmos melhor qualidade da imagem, para posteriormente executar a extração de propriedades estruturais de interesse.

A segmentação é considerada, dentre todas as etapas de PDI, a etapa mais crítica do tratamento da informação. Uma questão central na extração de informações a partir de uma imagem digital é a redução das informações dessa imagem que ocorre em regiões mais ou menos homogêneas correspondentes aos *voxels* de baixa variabilidade. É nesta etapa de segmentação que são definidas as regiões de interesse para processamento e análise posteriores e, como consequência disso, qualquer erro ou distorção, refletirão nas demais etapas de forma negativa. Isto consiste no problema da segmentação, e têm dado origem ao desenvolvimento de várias soluções (Elliot e Heck, 2007a-b; Tarquis et al., 2008; 2009; 2012).

Vários algoritmos e técnicas de segmentação de imagens estão sendo desenvolvidos, mas não há uma solução geral para este problema. Muitas vezes para a resolução de um problema de segmentação de imagem é necessário a combinação das técnicas de modo à sua adaptação ao domínio do problema.

Geralmente, as técnicas de segmentação utilizam duas abordagens principais: a de similaridade entre os *pixels* e a descontinuidade entre eles.

A primeira consiste na binarização (imagem preta e branca) ou *image thresholding*. Nesta, se obtém na saída do sistema, uma imagem binária, ou seja, dois níveis de luminância: preto e branco.

Este tipo de segmentação é utilizado quando as amplitudes dos níveis de cinza são suficientes para caracterizar os poros na imagem (objetos), o que para o caso do solo isso não ocorre. Esta distribuição das amplitudes dos níveis de cinza, são facilmente visualizadas em um histograma o qual pode ser manipulado de forma a definir o melhor valor do limiar.

Para o solo a fase sólida é composta por inúmeros níveis de cinza (dos mais claros – próximos ao branco, até os mais escuros – próximos do preto) e é

justamente nesta etapa que se deve encontrar um melhor valor do limiar que defina o que realmente é poro e o que realmente é sólido no solo.

Quando a binarização é realizada de modo automático ou semi-automático, cujos aplicativos estão disponíveis em programas específicos para o processamento de imagens digitais; um nível de cinza é considerado como um limiar de separação entre os *pixels* que compõem os poros e os *pixels* que compõem a fase sólida, o qual provavelmente não representa um limiar de separação adequado.

O mais adequado para o solo é a técnica baseada na descontinuidade entre *pixels*. Nesta, procura-se determinar variações abruptas do nível de luminância entre *pixels* vizinhos. Estas variações permitem identificar o grupo de *pixels* que delimitam os contornos e bordas dos objetos na imagem, denominada de detecção de borda (Gonzalez e Woods, 1993). Se bem definidos os grupos de *pixels* que delimitam os contornos e bordas dos objetos na imagem e as suas probabilidades, a segmentação reduz-se a um problema clássico de decisão estatística.

### 3.1.3.3. Processamento

A etapa final de um sistema de processamento de imagens é a que se extrai as informações úteis da imagem processada. Quando o objetivo do processamento obter informações numéricas, realiza-se a extração de propriedades da imagem.

#### 3.1.3.3.1. Tortuosidade e conectividade da rede de poros do solo

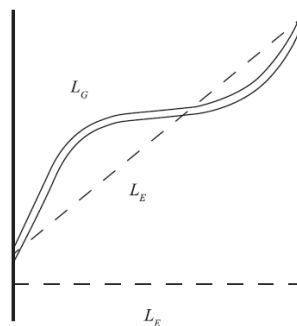
Em um meio poroso a tortuosidade  $\tau$  desempenha um papel importante na descrição da estrutura sendo que do ponto de vista matemático, a tortuosidade caracteriza a sinuosidade de um filamento em uma dada direção (Roque et al., 2012). Neste trabalho, este conceito é aplicado aos poros do solo. Geometricamente, a tortuosidade  $\tau$  é definida pela equação (2):

$$\tau = \frac{L_G}{L_E} \quad (2)$$

onde  $L_G$  é a distância geodésica entre dois pontos conexos na rede de poros, e  $L_E$  é a distância Euclidiana entre eles.

Alguns autores consideram a distância Euclidiana na equação (2), como sendo à distância em linha reta entre dois pontos do poro, independente da geometria das fases. No entanto, quando o espaçamento entre os planos de varredura são pequenos, as distâncias Euclidianas entre os pontos e entre os planos paralelos que delimitam a estrutura podem ser consideradas aproximadamente iguais; neste caso, é comum considerar  $L_E$  como a distância entre os planos (Wua et al., 2006), como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Ilustração da distância geodésica  $L_G$  e da distância Euclidiana  $L_E$ , tomada entre pontos e entre planos



Fonte: Roque et al., 2012

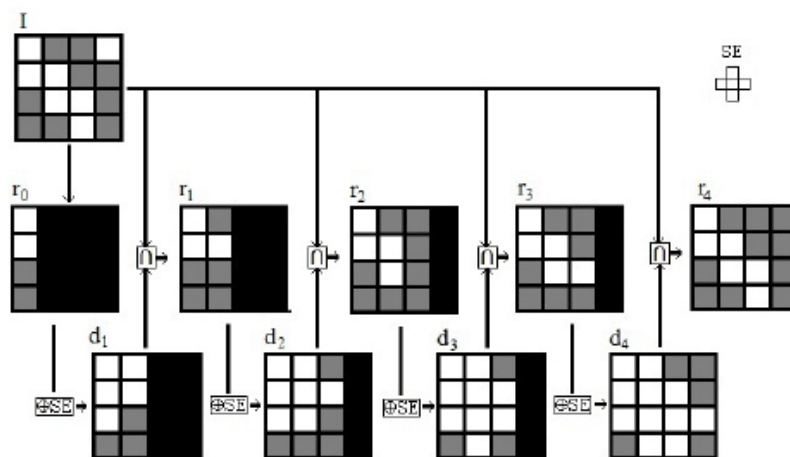
Em uma imagem tomográfica, o cálculo da tortuosidade é realizado por meio de algoritmos que calculam a tortuosidade baseados nos *voxels* que representam os poros. A técnica utilizada neste trabalho está fundamentada no princípio da reconstrução geodésica (RG), a qual busca associar um valor de tortuosidade para toda a rede de poros.

A RG pode ser aplicada em imagens binárias bidimensionais e tridimensionais. No caso de imagens tridimensionais, essa técnica reconstrói a imagem do espaço poroso *voxel* a *voxel*, crescendo sempre na direção ao longo do poro. Dessa forma, para reconstruir uma imagem depende de quanto é sinuoso o poro sendo que quanto mais sinuoso for o poro, mais reconstruções serão necessárias para recobrir a imagem (Roque et al., 2011).

O algoritmo funciona como um plano varredor partindo de  $z=0$ , o qual inicia copiando o plano inicial (*voxels* brancos - poros) denotado por  $r_0$  e em seguida a operação de dilatação é realizada com o elemento estruturante ( $\otimes EE_6$  - *voxels* cinzas), que resulta em uma imagem  $d_1$ . A interseção da imagem  $d_1$  é

realizada com a imagem inicial  $I$ , resultando em  $r_1$ . Novamente é realizada a operação de dilatação que resulta em uma imagem  $d_2$ , a qual é interseccionada obtendo  $r_2$  e o procedimento é repetido até que uma imagem dilatada resulte em uma intersecção vazia com  $I$ . A operação de intersecção é realizada do modo usual, ou seja, o *voxel* assume valor 1 (branco), se e somente se, nas imagens o *voxel* tiver valor 1 (Figura 15).

Figura 15 – Esquema do funcionamento do algoritmo de RG para uma imagem 2D 4x4 *pixels*. Note que o *pixel* isolado no canto superior direito em  $I$  é eliminado durante o procedimento em  $r_4$ . No caso de uma imagem binária volumétrica serão *voxels*, o elemento estruturante é baseado nos 6-vizinhos (EE<sub>6</sub>) substituindo-se agora a linha de varredura por um plano varredor, a coluna inicial por um plano inicial.



Fonte: Roque et al., 2011.

Segundo Roque et al. (2011; 2012), a técnica RG consiste em determinar um sentido de referência da rede porosa, ou seja, na direção positiva do eixo  $z$ , denominada  $+z$ . Assim, a estrutura é varrida por um plano normal ao sentido  $+z$  e utilizando o procedimento da RG, é estimada a distância geodésica  $L_G$  de um poro. Geralmente a RG é efetuada em planos normais nos principais sentidos do volume, ou seja,  $z^+$ ,  $z^-$ ,  $y^+$ ,  $y^-$ ,  $x^+$  e  $x^-$ .

Isso é realizado partindo do plano inicial da varredura até uma fatia  $m$  e o número de RGs necessário para alcançar a  $m$ -ésima fatia é representado por  $n$  (número total de fatias). As RGs recobrem todos os *voxels* (que correspondem aos

poros) que estão conectados aos da fatia inicial. Por outro lado, a distância Euclidiana  $L_E$  é determinada pelo número de fatias obtidas pela propagação paralela do plano de varredura. O número  $n$  de RGs necessário para recobrir todos os poros conexos até a  $m$ -ésima fatia é tal que  $m \leq n$ , onde a igualdade ocorre apenas quando a rede de poros é perpendicular ao plano de varredura.

Como são necessárias mais reconstruções (RGs) do que o número de fatias para recobrir toda a rede de poros de  $m=1.....N$  até a  $m$ -ésima fatia; e como cada fatia apresenta certa distância Euclidiana  $L_E(m)$ , portanto, tem-se diversos valores de distâncias geodésicas ( $L_G$ ). Isso significa que temos uma distribuição  $\rho(L_E, L_G)$  de distâncias Euclidianas e geodésicas, onde  $\rho dL_G dL_E$  é proporcional ao número de pontos com distância Euclidiana  $[L_E, L_E + dL_E]$  e distância geodésica  $[L_G, L_G + dL_G]$ .

Para estimar a tortuosidade da rede de poros, é definida a  $\langle L_G(m) \rangle$  como a distância geodésica média para uma certa distância Euclidiana  $L_E(m)$ . Um gráfico de dispersão dos pontos  $(L_E(m), \langle L_G(m) \rangle)$  pode ser obtido a partir das imagens e, assim, a tortuosidade pode ser estimada por meio da equação (2) como sendo a inclinação da reta de melhor ajuste linear para a distribuição das distâncias referentes a cada sentido da amostra.

Os valores de tortuosidade obtidos para uma rede de poros em todas as direções devem ser analisados em conjunto com os valores de conectividade (Característica de Euler-Poincaré em função dos *disectors*) e em termos de Desvio de Tortuosidade Direcional (DTD) em todas as direções (transversal e em profundidade), a qual se obtém pela equação (3):

$$DTD = |\tau_{x+} - \tau_{x-}| \quad (3)$$

onde está sendo considerado apenas na direção  $x$ , mas deve ser aplicado nas direções  $y$  e  $z$  também.

Quanto maior for a diferença entre os valores de DTDs, menos isotrópico será o meio, representando o quanto o sistema poroso não é homogêneo.

Por outro lado, menores valores de DTD indicam que o sistema poroso tende a se alinhar em uma direção preferencial; o que no caso do solo ajuda inferir sobre o comportamento dinâmico da água através do solo. Menores valores de DTD também significam boa conectividade.

A conectividade também é uma propriedade que oferece informações sobre a estrutura de um meio poroso. Ela é obtida por meio da característica de Euler-Poincaré (CEP) a qual refere-se a uma medida geométrica integral que pode oferecer uma estimativa da conectividade da estrutura do espaço poroso. Um aspecto importante da CEP é que ela não sofre alterações sob uma deformação ou mudança de escala de um objeto (invariante topológica). Tridimensionalmente a CEP é definida pelo número de partes isoladas menos a conectividade de dimensão zero e como tal, deve ser estimada como uma sonda 3D a qual é aproximada por um conjunto de duas seções paralelas em 2D (desde que nenhuma alteração morfológica apareça entre elas). Essas duas seções formam o chamado *disector*, o qual é calculado a partir de pares consecutivos de duas imagens igualmente espaçadas que delimitam um volume da estrutura que está sendo analisada (Roque et al., 2009).

Em termos das estruturas naturais de uma rede tridimensional de poros, matematicamente a CEP é definida pela equação (4):

$$CEP = D_v - C_v \quad (4)$$

onde  $D_v$  é o número de partes desconectadas do espaço poroso por unidade de volume (conhecido como número de Betti zero) e  $C_v$  é a conectividade por volume da unidade (conhecido como Genus ou primeiro número de Betti).

O número de partes desconectadas  $D_v$  corresponde ao número de objetos isolados (ilhas), #I, e a conectividade corresponde ao número de túneis (ramos), #B, e o número de cavidades fechadas (orifícios), #H. O número de conectividade corresponde ao número máximo de cortes por um objeto que não produz dois objetos desconectados. Objetos com a mesma conectividade são topologicamente equivalentes, por exemplo, podemos deformar esses objetos (dobrar ou esticar) sem precisar cortar.

A estimativa da CEP é alta para objetos com menor conectividade e baixa para objetos com alta conectividade. Ou seja, quanto mais conectada se apresenta a estrutura, menores e negativos são os valores da CEP (Chappard *et al.*, 1999). Para se ter uma estimativa imparcial da CEP, os efeitos de borda devem ser considerados, para isso seguimos a estrutura de contagem bidimensional imparcial padrão (Kroustrup e Gundersen, 2001).

Segundo Gundersen et al.(1993), a CEP pode ser estimada para um objeto 3D com base em observações de qualquer alteração topológica das intersecções de um plano 2D que varre completamente o objeto, independente da direção e orientação da varredura.

Isto significa que a CEP pode ser calculada por um conjunto de *disectors*, observando os padrões de uma fatia e comparando com os padrões das fatias seguintes; assim a CEP de uma coleção de imagens 3D é dada pela equação (5):

$$CEP = \frac{1}{2} (\#I + \#B - \#H) \quad (5)$$

onde os valores são divididos por 2 devido ao fato de que a contagem dessas quantidades é realizada nas duas direções simultaneamente.

Com base nos casos topológicos, para um *disector* de imagens binárias, temos  $D_i$  com  $i=1, \dots, n-1$ , onde  $n$  é o número de seções/imagens. Então a CEP pode ser calculada pela equação (6):

$$CEP_i = \frac{1}{2} (N_i + N_{i+1} - 2N_{i \cap i+1} + 2L_{i \cap i+1} - L_i - L_{i+1}) \quad (6)$$

onde  $N_i$  é o número total de objetos desconexos (todas as partes do espaço poroso), observados em uma imagem binária  $i$ ,  $N_{i \cap i+1}$  é o número de objetos na seção resultante obtida pela intersecção  $i \cap i + 1$ ,  $L_i$  é o número total de orifícios em todos os objetos e  $L_{i \cap i+1}$  é o número de orifícios na intersecção.

A conectividade no *disector*  $D_i$  pode ser obtida pela sua intersecção aplicando o operador lógico *AND* (Vogel e Kretzchmar, 1996).

Tendo estimado o valor da CEP em cada *disector* de uma amostra, a soma dos valores destes *disectors* fornece uma estimativa do número de conexões presentes na estrutura e como as amostras utilizadas têm volumes iguais, o número da CEP é dado por volume (mm<sup>3</sup>).

Os valores de CEP são obtidos em profundidade (a mesma direção da aquisição das imagens). Neste sentido, temos o quanto é ou não é conexo o solo, mas não sabemos em qual direção ela predomina. Já os valores de tortuosidade são obtidos em todas as direções. No geral, quanto menor os valores de tortuosidade em uma dada direção, melhor será a conectividade (Roque et al, 2009).

## CAPÍTULO 4

### 4. MATERIAL E MÉTODOS

#### 4.1. Solo e preparação das amostras

Os blocos de solo utilizados para este estudo foram coletados no Instituto Agrônômico do Paraná – IAPAR, na cidade de Ponta Grossa – PR (25°06'L; 50°10'O; 875 m acima do nível do mar). As áreas coletadas foram submetidas a sistemas de manejo distintos sendo eles: plantio direto (PD) e plantio convencional (PC).

O sistema de plantio direto (PD) é conduzido ininterruptamente na área há 24 anos. Nestas áreas adota-se a rotação de culturas, sendo que no inverno, são utilizadas culturas de cobertura como aveia ou ervilhaca, e no verão, são cultivados milho ou soja, com alternância anual. Neste sistema o maquinário agrícola passou uma vez para a semeadura de cada cultura, outra para a colheita e uma eventual para tratamentos fitossanitários para as culturas de verão.

No sistema de plantio convencional o solo foi revolvido durante os meses de abril (inverno) e outubro (verão), onde a profundidade de revolvimento fica entre 20 e 25 cm. Neste sistema o maquinário agrícola foi: uma passagem de arado e duas passagens de grade leve para o preparo do solo, mais duas passadas, uma para a semeadura e outra para a colheita, eventualmente realizou-se uma ou mais passadas de maquinário visando tratamentos fitossanitários.

De acordo com o Mapa de solos do Estado do Paraná (2008), o solo investigado é caracterizado como um Latossolo Vermelho distrófico úmbrico (Rhodic Ferralsol), sendo que o solo sob PD apresenta textura argilosa (500 g.kg<sup>-1</sup> de argila, 330 g.kg<sup>-1</sup> de silte e 170 g.kg<sup>-1</sup> de areia) e o solo sob PC textura muito argilosa (610 g.kg<sup>-1</sup> de argila, 220 g.kg<sup>-1</sup> de silte e 170 g.kg<sup>-1</sup> de areia).

Algumas propriedades físicas e químicas deste solo são apresentadas na Tabela 1.



Tabela 1 - Propriedades físicas e químicas do Latossolo Vermelho distrófico submetido ao plantio direto (PD) e ao plantio convencional (PC) em diferentes camadas.

Manejo	Camada (cm)	Características Físicas				
		$\rho_s$ (g cm <sup>-3</sup> )	CV (%)	$\phi_t$ (cm <sup>3</sup> . cm <sup>-3</sup> )	Micro (cm <sup>3</sup> . cm <sup>-3</sup> )	Macro (cm <sup>3</sup> . cm <sup>-3</sup> )
PD	0-10	1,04	7,5	0,61	0,52	0,09
	10-20	1,15	2,5	0,55	0,46	0,09
	20-30	1,08	2,7	0,58	0,49	0,09
PC	0-10	1,10	6,4	0,56	0,45	0,11
	10-20	1,23	1,6	0,52	0,46	0,06
	20-30	1,24	2,4	0,52	0,46	0,06

Características Químicas				
	P (mg dm <sup>-3</sup> )	Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> de solo)	Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> de solo)	K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> de solo)
PD	23,90	4,20	2,10	0,33
PC	4,40	3,30	1,50	0,24

Fonte: Borkowski, 2009.

Nota:  $\rho_s$  representa a densidade do solo;  $\phi_t$ , a porosidade total; Micro, a microporosidade; Macro, a macroporosidade e CV, o coeficiente de variação. Os valores de micro e macroporosidade foram estabelecidos com base no raio de poro  $R = 25 \mu\text{m}$  e potencial de 60 cm de H<sub>2</sub>O.

Para a coleta das amostras foram abertas trincheiras e retirados blocos com dimensões de aproximadamente 20x20x10 cm. A amostragem foi realizada pós-colheita. Foram coletadas três amostras para cada um dos sistemas de plantio e em três camadas diferentes (Figura 16a), as quais foram posteriormente embaladas em papel alumínio.

As imagens microtomográficas foram obtidas por meio de parceria científica firmada com o Prof. Dr. Richard Heck (*Department of Land Resource Science, University of Guelph*). Para isto, primeiramente os blocos foram cuidadosamente desbastados e acondicionados em tubos de acrílico com diâmetro interno de 6,4 cm e externo de 7,0 cm, com 15,0 cm de altura (Figura 16b), e deixados secar ao ar.

Figura 16 - (a) Relação das amostras utilizadas para cada sistema de manejo e suas respectivas camadas coletadas; (b) Foto de um tubo de acrílico similar àqueles utilizados na presente pesquisa. Este apresentado aqui possui dimensões de 6,4 cm e externo de 7,0 cm, com 7,5 cm de altura.

Sistema de Manejo	Camada (cm)
Plantio Direto (PD)	0-10
	10-20
	20-30
Plantio Convencional (PC)	0-10
	10-20
	20-30

(a)



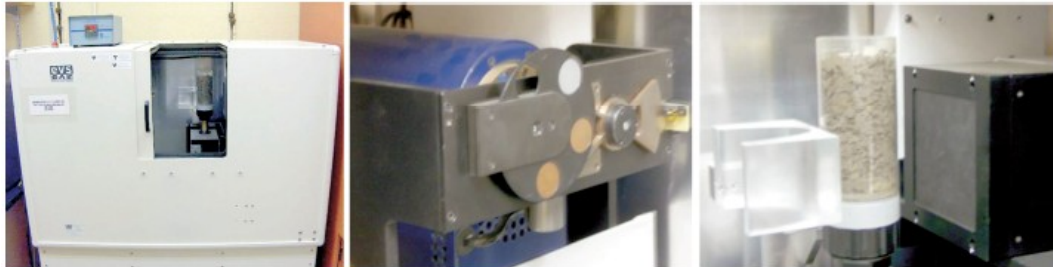
(b)

Fonte: (a) A autora; (b) Cortesia Fabiano Meira Moura Luz

#### 4.2. Aquisição das imagens microtomográficas

As amostras foram escaneadas com um aparelho de microtomografia de raios X GE *Medical*  $\mu$ CT EVSMS-8 (Figura 17). Este equipamento possui um sistema de terceira geração, o qual realiza um giro de 360°, e placa de detectores de geometria bidimensional. O feixe de raios X produzido pelo equipamento é do tipo cônico. A voltagem aplicada no tubo de tungstênio da fonte de raios X foi de 120 kV, e a corrente de 80 mA.

Figura 17 - Microtomógrafo utilizado para a obtenção das imagens tomográficas das amostras de solo (à esquerda), fonte e filtros (centro); amostra e detectores (à direita).



Fonte: Heck, 2009.

Um filtro externo de cobre foi utilizado entre a fonte e a amostra o que permitiu a atenuação de fótons de raios X de baixas frequências e a passagem de um feixe monoenergético. Essa etapa foi realizada visando à minimização de artefatos como endurecimento do feixe que podem ocorrer durante a atenuação na interface de materiais com diferentes densidades dentro de uma mesma amostra.

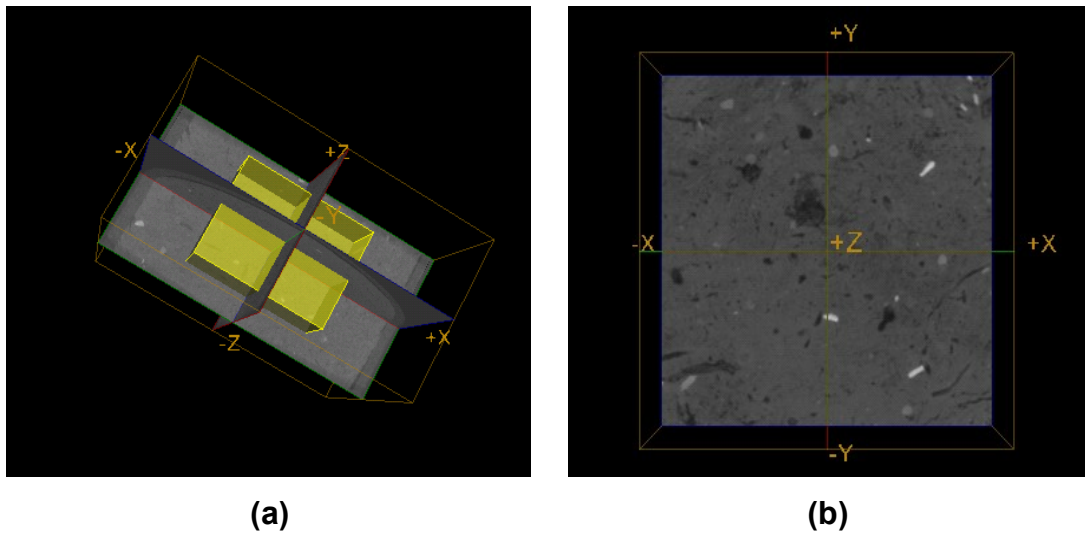
Devido à distância focal do equipamento (fonte-amostra-detector), cada tubo de 15,0 cm de altura, contendo as amostras de solo, foi submetido ao comando de 4 vezes *scann*. A resolução de aquisição das imagens foi de 20  $\mu$ m (tamanho do *voxels* de 20 x 20 x 20  $\mu$ m), para um volume externo de amostra de 7,0 x 7,0 x 3,7 cm e interno de 6,4 x 6,4 x 3,5 cm. A varredura foi realizada na direção vertical, da parte inferior para a superior do cilindro. O tempo de exposição para cada volta completa foi de 3500 ms, com um passo linear ( $\theta$ ) de 0,5°, totalizando em um tempo de aquisição de 12 horas para cada tubo de amostra.

### 4.3. Pré-Processamento: reconstrução, tratamento e segmentação

#### 4.3.1. Seleção dos sub-volumes para reconstrução

As imagens foram obtidas com uma resolução de 20  $\mu\text{m}$  e a partir destas, foram selecionados os sub-volumes de interesse (ROI) os quais foram reconstruídos com resolução de 60  $\mu\text{m}$  (processo conhecido como *binning* o qual diminui o ruído nas imagens, porém perde-se resolução). Os sub-volumes foram selecionados utilizando o programa GEHC *Microview* (2006), partindo do centro da imagem excluindo as bordas da amostra cilíndrica (Figura 18a) resultando em um sub-volume de 58,212  $\text{cm}^3$  (550 fatias). O pré-requisito para a determinação deste tamanho é que o tamanho final do arquivo, contendo toda a sequência de imagens (3D), não ultrapassasse 800 Mb devido a limitações computacionais.

Figura 18 – (a) Sub-volume (58,212  $\text{cm}^3$ ) selecionado para reconstrução e (b) imagem (16 bit) reconstruída com resolução de 60  $\mu\text{m}$ . Nesta imagem os materiais menos densos (poros) da amostra estão representados por tons de cinza mais escuro e os menos densos (minerais) por tons de cinza mais claro.



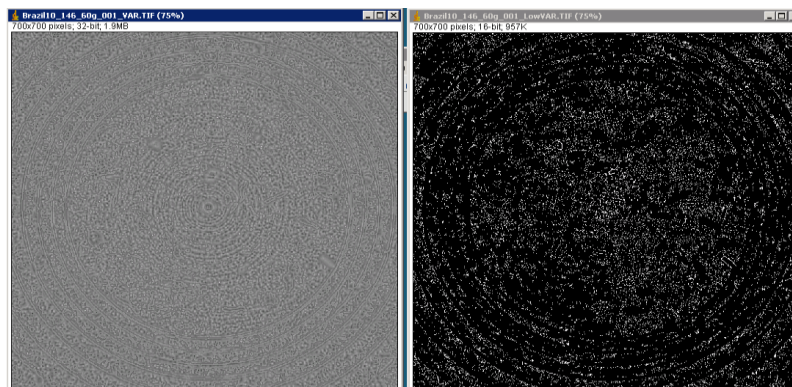
Fonte: A autora.

A reconstrução das imagens foi realizada pelo método de retroprojeção filtrada (Buzug, 2008). Além disso, um filtro gaussiano local foi aplicado para eliminar e/ou reduzir o ruído das imagens (Figura 18b).

#### 4.3.2. Imagens auxiliares: histograma e voxels de baixa variabilidade

Utilizando o programa de domínio público *Image J* (Rasband, 1997-2007), as sequências de imagens foram submetidas ao seguinte comando: *Plugins/Pure voxel Extraction/File Builder*, o qual converteu o banco de dados das imagens já filtradas (.vff\_g) em arquivos formato .txt. Estes foram submetidos ao comando: *Plugins/Pure voxel Extraction/SD Variance*, o qual originou sequências de imagens (fatias 2D) *DIR*, *LowVAR* e *VAR* (Figura 19).

Figura 19 – Imagens geradas: *VAR* (à esquerda) e *LowVAR* (à direita).



Fonte: A autora.

As imagens *DIR* (real) são de 16 *bits* com os valores de *voxels* que correspondem a  $\pm 32.768$  tons de cinza, totalizando em 65.536 tons possíveis em uma imagem. As imagens *LowVAR* (baixa variância) geraram o histograma em formato .txt.

As imagens *LowVAR* e *VAR* (extensão de arquivo tipo .tif) foram utilizadas com o objetivo de encontrar *voxels* de baixa variância na vizinhança de um *voxels* central, ou seja, *voxels* relativamente puros (baseado no valor da imagem real – *DIR*).

O procedimento para encontrar os *voxels* de baixa variância (em UT) foi realizado em duas etapas (Elliot e Heck, 2007a-b):

- 1) A avaliação inicial dos *voxels* foi feita da seguinte maneira: a) cálculo da média dos *voxels* vizinhos; b) comparação da média com o valor do *voxel* central e c) cálculo de  $\sigma$ .
- 2) Com isso foi verificado se a variabilidade dos 124 *voxels* vizinhos de um *voxel* central (janela 5x5x5) era menor que 10% (desvio padrão  $\sigma=0,1$ ).

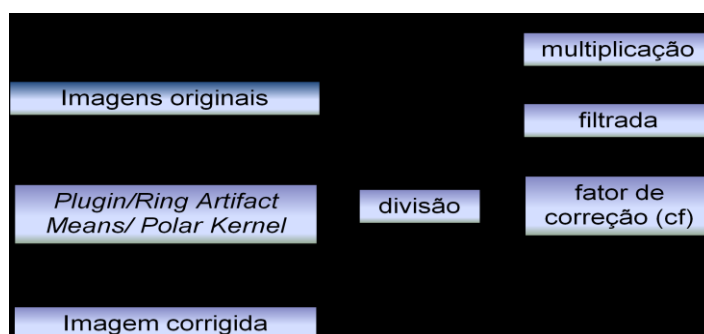
Para valores de  $\sigma < 0,1$ , este *voxel* torna-se um candidato a ser classificado como de baixa variabilidade - LV (*Low Var*). Os *voxels* que apresentaram variabilidade  $\sigma > 0,1$  em relação ao *voxel* central são *voxels* de alta variabilidade - HV (*High Var*), sendo que estes foram desconsiderados nesta análise. Pois com isso foi possível definir o valor para os *voxels* puros correspondentes às fases sólida e gasosa determinados pela alta variabilidade entre os *voxels* vizinhos.

Os *voxels* LV são aqueles situados em uma vizinhança relativamente homogênea (decorrentes de elementos de composição similar), enquanto que os *voxels* HV encontram-se em uma vizinhança heterogênea. Portanto, para os *voxels* LV, foi atribuído um mesmo valor na escala de cinza dentro de uma janela de 5x5x5, eliminando assim uma boa parte da gama de valores correspondentes aos diferentes tons de cinza desta região homogênea.

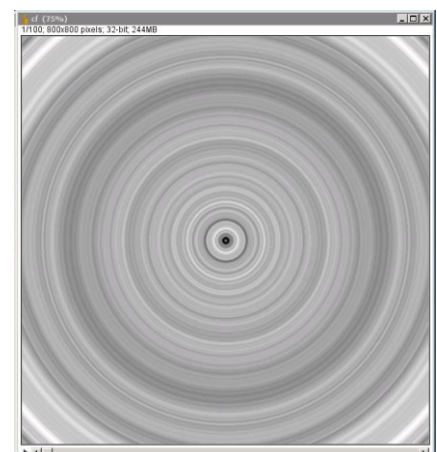
#### 4.3.3. Correção de artefatos

As sequências de imagens reais (*DIR*) apresentaram artefatos bem acentuados em forma de anéis (Heck, 2009) e foram corrigidas por meio de operações matemáticas utilizando aplicativos específicos oferecido no programa *Image J*, conforme fluxograma apresentado na figura 20:

Figura 20 – (a) Fluxograma do processo executado para minimização dos artefatos em forma de anéis presentes nas imagens microtomográficas. (b) Imagem criada durante o processo de extração dos artefatos em forma de anéis. Este é o fator de correção (*cf*) que corresponde à parte “defeituosa”, o qual nesta etapa apresentada na figura, ainda não foi aplicado o filtro. Após a passagem dos filtros ela é “devolvida” para a imagem original.



(a)

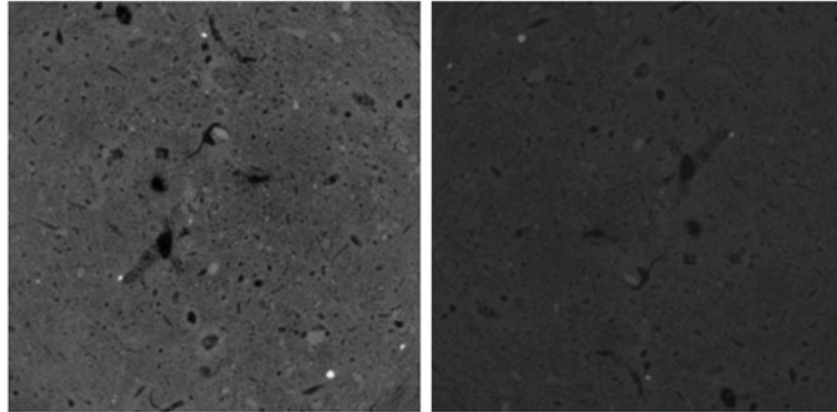


(b)

Fonte: A autora.

Na figura 21 são apresentadas as imagens originais sem a correção dos artefatos e após o procedimento de correção dos artefatos.

Figura 21 - As imagens são de antes (esquerda) e depois (direita) da aplicação do *plugin* para correção dos artefatos em forma de anéis.



Fonte: A autora.

#### 4.3.4. Segmentação

O processo de segmentação teve como principal objetivo encontrar dois melhores valores de *threshold* que representassem a fase sólida e o ar do solo. Para isso foi dividido em duas etapas: 1) Determinação dos valores de centro máximo (CM) e variância (VAR), correspondentes ao ar e ao sólido: método estatístico para segmentação e 2) Determinação do melhor valor correspondente ao ar e ao sólido: método visual para a segmentação.

##### 4.3.4.1. Determinação dos valores de centro máximo (CM) e variância (VAR), correspondentes ao ar e ao sólido: método estatístico para segmentação

Para o método estatístico o processo de segmentação foi o seguinte:

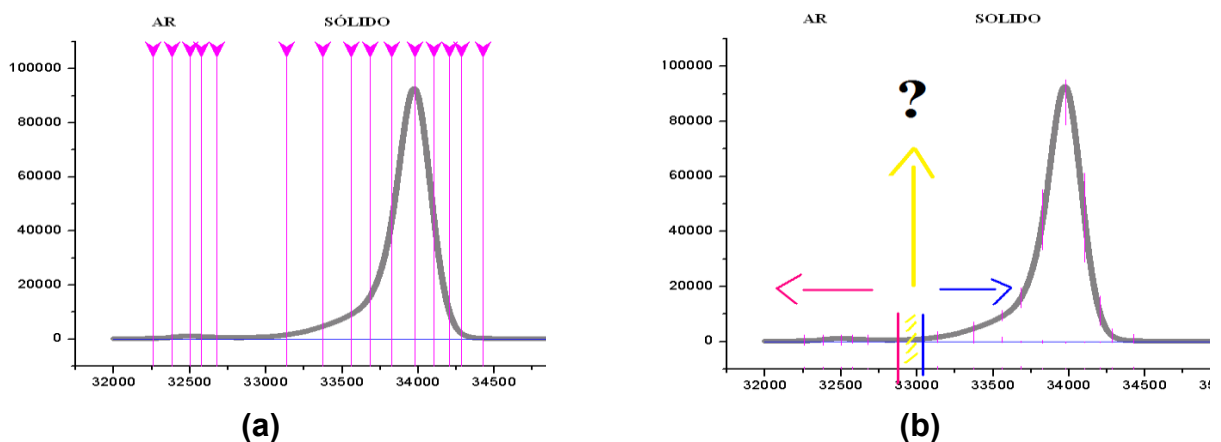
- 1) Os valores do novo histograma gerado foram transferidos para uma planilha do *OriginPro* (2006) e submetidos ao comando *Peak Fitting*, o qual gerou um gráfico.
- 2) Dado o comando *Choose Data/Data Set/Data1\_B/Full Range* foram preenchidos dois valores que variaram entre 31.000 à 35.000. Estes valores dependem da localização dos picos de ar e sólido de cada amostra



e do melhor valor de escala para o eixo y; o qual deve ficar em torno de  $\pm 20.000$ , para que os picos ar-sólido fiquem visíveis (mesmo que pouco definido, como foi o caso para o pico referente ao ar em todas as amostras usadas para este estudo).

- 3) Em seguida foi passado um filtro de suavização da curva, por meio do comando *Precondition Data/Filters/Adjacent Averaging/25/Run Filter*. Este filtro realiza a média entre os 25 vizinhos de cada ponto e substitui o seu valor pelo valor médio.
- 4) Sob o comando *Define Peaks* foram selecionados primeiramente um dos picos do gráfico (normalmente o melhor definido, correspondente à fase sólida da amostra) para a determinação dos valores para a segmentação.
- 5) Após submeter ao comando *Done*, a ferramenta *Residuals* ficou disponível. Por meio desta foi gerado um gráfico auxiliar (em menor escala) logo abaixo do gráfico principal. Com o gráfico auxiliar foi possível determinar mais pontos nas curvas, referentes aos picos que até então não tinham sido identificados (Figura 22). Foram inseridas de 4 a 8 setas no gráfico principal, cada uma correspondente a um pico. Quanto maior o número de setas inseridas, melhor o ajuste e mais valores de centro máximo (CM) e variância (VAR) foram obtidos (um conjunto de valores para cada pico).

Figura 22 – (a) Interface do programa *Origin* para determinação dos picos correspondentes às fases sólida e gasosa das amostras de solo; (b) Local da distribuição da escala de cinza em que ocorre a dúvida do que é sólido e do que é ar dentro da amostra.



Fonte: A autora

- 6) Adicionadas todas as setas nos picos, o comando *Done* foi executado novamente. Ao inserir estas setas estamos tentando definir valores para os picos referentes às fases sólida e gasosa. Embora saibamos que os picos da esquerda (com menores valores) correspondem ao ar e os da direita, ao sólido, não temos a certeza de onde eles iniciam e onde eles terminam, por tratar-se de uma distribuição de valores de cinza (Figura 22b).
- 7) Por meio do comando *Peak Edit Control* foi possível ajustar a curva do gráfico para cada seta adicionada no procedimento anterior, que corresponde aos picos. Este processo foi finalizado com o comando *Fit*.
- 8) O comando *Results/Worksheet* gerou uma planilha com os valores de CM (y) e VAR (y) para cada um dos picos selecionados. Estes resultados foram transferidos para uma planilha do *Excel* contendo valores de média, variância e contagem em z (referente a valores para a direita e para a esquerda dos picos).
- 9) As imagens originais corrigidas foram submetidas ao comando: *Plugins/CT Segmentation/CT Segmentation SD Variant*. Na janela *CT Segmentation SD (Variant)*, foram preenchidos os valores de *Mean* e *Variance, left* (ar) e *right* (solo). O valor de desvio padrão foi calculado e preenchido automaticamente pelo programa (Figura 23).

Figura 23 - Exemplo de parâmetros utilizados para a segmentação de um conjunto de imagens com resolução de 60  $\mu\text{m}$ . A janela é aberta no programa *Image J* após o comando *Plugin/CT Segmentation/CT Segmentation SD Variant*.



Fonte: A autora

Para confirmar se estes valores são realmente os que melhor representam a porosidade da amostra devemos encontrar valores de *ZScore*. O *ZScore* é uma



variável que aproxima mais as duas curvas de ar e sólido, para que o resultado seja mais preciso. Assim, +Z (para o ar) aproxima a curva para a direita e -Z (para o sólido), aproxima a curva para a esquerda e no final desse processo tem-se uma região de transição menor que a inicial. Geralmente inicia-se com -1 (*Left*) e 1 (*Right*) para fins de teste, até encontrar a imagem que melhor se adéqua aos poros e ao sólido. Vale lembrar que o computador sempre é mais “agressivo” com o poro, então por isso que o valor de -Z sempre será muito maior em módulo que o valor de +Z (tabela 2).

Preenchendo os valores de ZScore (Figura 23) o programa calculou automaticamente o valor de *Clamp* (figura 23), o qual também deve retornar valores da esquerda sempre menores que os da direita. Os valores obtidos a partir deste processo foram salvos em uma planilha. O conjunto completo de valores utilizados para cada amostra é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Relação dos valores utilizados para a segmentação das imagens (com resolução de 60  $\mu\text{m}$  de cada amostra utilizada).

Amostra	Pico	Média	Variância	$\sigma$	ZScore	Clamp
20-30 (PD)	Direito	32392,94	63519,39	252,03	0,20	32443,35
	Esquerdo	33658,89	43611,80	208834,00	-3,00	33032,39
10-20 (PD)	Direito	32971,28	49144,75	221,69	0,20	33015,62
	Esquerdo	33701,99	35366,20	188,06	-3,00	33137,81
0-10 (PD)	Direito	33042,34	15102,17	122,89	0,10	33054,63
	Esquerdo	33671,56	72255,50	268,80	-2,25	33066,75
20-30 (PC)	Direito	32628,01	406,24	20,15	0,75	32643,13
	Esquerdo	33293,32	23050,74	151,82	-1,25	33103,54
10-20 (PC)	Direito	32578,88	870,90	29,51	0,30	32587,73
	Esquerdo	33038,05	56208,35	237,08	-0,50	32919,51
0-10 (PC)	Direito	32693,29	54611,93	233,69	0,25	32751,71
	Esquerdo	33416,34	43188,24	207,82	-1,50	33104,61

Fonte: A autora

Neste processo de segmentação, uma sequência de imagens foi gerada (Figura 24):

(a) Imagem original tratada;

(b) *Clamped*: trata-se de uma variação da imagem original. Em preto são os poros e, em cinza, o restante;

(c) *Laplacian*: resulta da aplicação de filtro para suavização. Os valores positivos correspondem à transição de sólido para ar, e os valores negativos, transição de ar para sólido;

(d) *Zero-crossing*: acentua a área de transição entre um material e outro (bordas e arestas);

(e) *Unknown*: área correspondente aos poros e regiões de transição é apresentada em branco (valor 0). As partículas são apresentadas em preto (255);

(f) *Unknown: Laplacian*: a região que apresenta maior probabilidade de corresponder aos sólidos (valores negativos) é apresentada em cinza e, em branco, a região com maior probabilidade de corresponder aos poros (valores negativos). As linhas de contorno e todo o restante em preto não possuem um valor definido (*Not a number, NaN*);

(g) As regiões que apresentam maior probabilidade de corresponder ao ar são apresentadas com o valor 255, o restante possui valor 0 (referente ao desconhecido);

(h) a situação contrária é apresentada, ou seja, regiões com maior probabilidade de corresponder aos sólidos possuem valor 255 e, o restante, valor 0 (desconhecido);

(i) As regiões que com certeza correspondem ao ar possuem valor 255, e o restante, valor 0.

(j) é a situação inversa a (i);

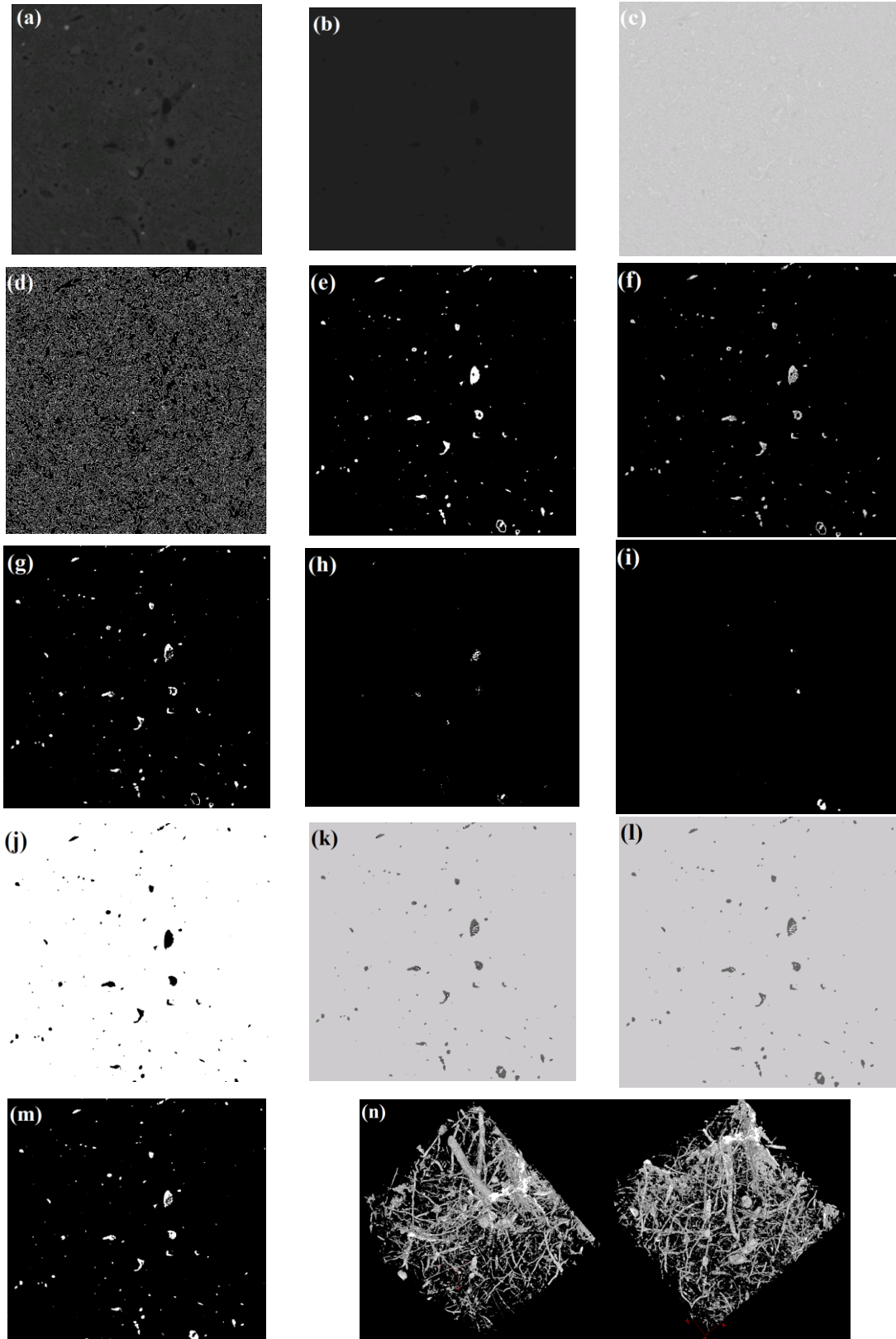
(k) *Seed Image Unknown*: A fase gasosa possui valor 1 (cinza escuro), a região desconhecida, valor 0 (contornos em preto), e a fase sólida, com valor 2 (cinza claro). Estas imagens são geradas a partir da original por meio de processos estatísticos, e auxiliam da classificação dos valores dos *voxels*;

(l) Uma sequência de imagens *SRG* foi gerada ao final do procedimento. Estas foram submetidas a um novo comando: *Plugin/CT Segmentation/Large Bit width Thresholding*, em que o parâmetro 1 (para identificação dos poros em branco) em ambas as janelas foi preenchido;

(m) As imagens foram convertidas em imagens binárias (preto e branco).

(n) Para uma visualização tridimensional dos poros, a sequência de imagens foi submetida ao comando *Plugins/3D/3D Viewer*.

Figura 24 - (a) Imagem original; (b) *Clamped*; (c) *Laplacian*; (d) *Zero-crossings*; (e) *Unknown: 255, rest: 0*; (f) *Unknown: Laplacian, other: NaN*; (g) *More Air: 255, rest: 0*; (h) *More Solid: 255, rest: 0*; (i) *Air: 255, rest: 0*; (j) *Solid: 255, rest: 0*, (k) *Seed Image, Unknown:0, Air:1, Solid: 2*; (l) *SRG*; (m) *imagem binária, onde os poros estão representados pela cor branca*; (n) Sequência de imagens renderizadas.



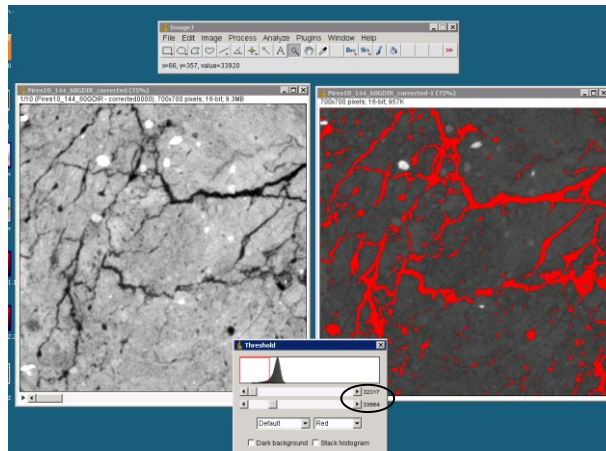
Fonte: A autora

#### 4.3.4.2. Determinação do melhor valor correspondente ao ar e ao sólido: método visual para a segmentação

Para definirmos dois picos, dentre todos os selecionados, que melhor representem o valor correspondente para as duas fases, o seguinte procedimento foi realizado:

- 1) No programa *Image J*, foi aplicado o contraste automático: *Image/Adjust/Brightness/Contrast/Auto* na sequência de imagens corrigidas.
- 2) A sequência de imagens foi duplicada por meio do comando *Image/Duplicate*, com o objetivo de termos uma sequência de imagens como referência para realizar o *threshold* manual, deixando-as lado a lado.
- 3) Foi selecionada uma das sequências de imagens, na qual foi aplicado o *threshold* por meio do comando: *Image/Adjust/Threshold*. Na janela para definição do valor de *threshold* manual, a barra superior corresponde ao ajuste para sólidos e a inferior para poros.
- 4) Para determinação do valor correspondente aos poros: a barra superior foi deixada totalmente à esquerda (nesta etapa os poros ficam com a cor vermelha) e a barra inferior foi regulada, ajustando a extensão dos poros, tendo como referência a imagem original ou a sua réplica. Quanto mais à esquerda estiver a barra inferior, menor será a porosidade da imagem (Figura 25). O valor de *threshold* foi selecionado de acordo com a melhor aproximação da imagem original, tentando não superestimar e nem subestimar a porosidade da imagem. O valor correspondente foi anotado.

Figura 25 - Interface do programa *Image J* para determinação do valor de *threshold* aplicado para definição dos poros na imagem.



Fonte: A autora.

- 5) Para determinação do valor correspondente ao solo: as duas barras foram deixadas totalmente à direita, ajustando somente a barra superior. Agora, o que ficou em vermelho corresponde à fase sólida. Novamente buscou-se a imagem segmentada que melhor represente à original. O valor correspondente foi anotado.
- 6) Na tabela contendo todos os valores de  $CM(y)$  e  $VAR(y)$  de todos os picos ajustados no programa (disponível na área remota) *OriginPro*, verificamos quais os valores dos picos são mais próximos dos valores encontrados no processo de *threshold* manual. Por este motivo, é importante selecionar o maior número de picos possível, para que a propriedade investigada esteja o mais próximo do real. O mesmo par de valores deve ser adotado para todo o conjunto de imagens. Os valores obtidos indicam que, tudo que for menor que o valor do pico de ar, será considerado ar; e tudo o que for maior que o valor de sólido, será considerado sólido. Os valores que se encontraram entre estes dois picos correspondem aos tons de cinza de transição, os quais não sabemos se é ar ou sólido, e que serão classificados posteriormente pelo computador automaticamente.

#### 4.4. Processamento

##### 4.4.1. Classificação do tamanho e forma dos macroporos

Para a caracterização micromorfológica dos macroporos (MAP) presentes nas amostras, estes foram divididos em três classes de tamanho: pequenos (P), médios (M) e grandes (G). Esta classificação foi necessária devido a limitações computacionais, pois além do grande número de imagens processadas para cada amostra, o programa *Image J* realiza medidas de diversos parâmetros simultaneamente, os quais são úteis para a caracterização dos poros.

Os volumes máximo e mínimo, para cada classe de macroporo, foram determinados conforme mostra a Tabela 3:

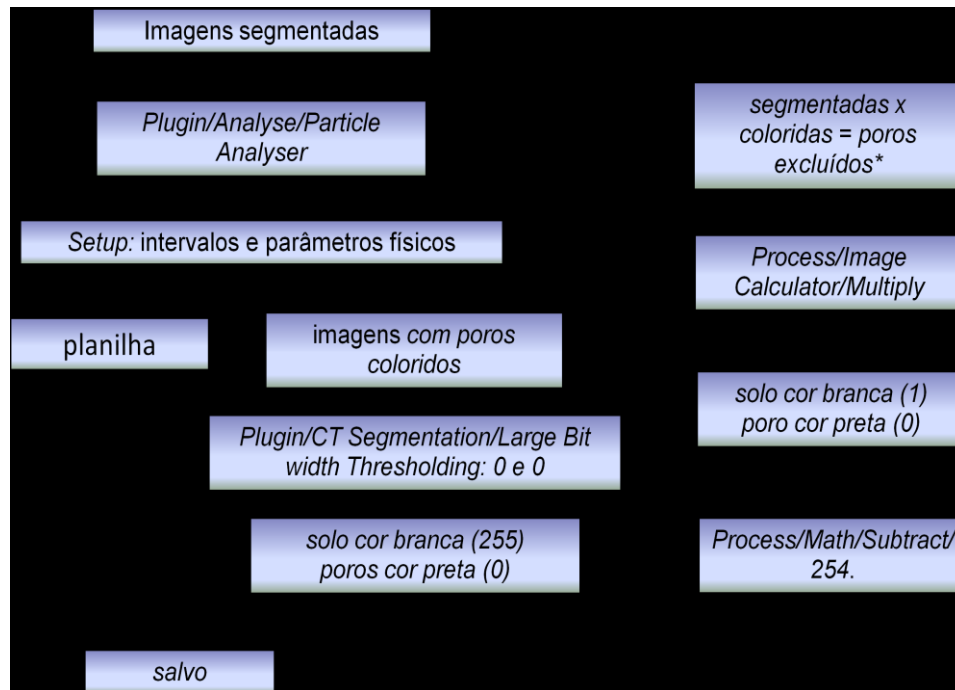
Tabela 3 - Classificação dos macroporos: pequeno (P), médio (M) e grande (G); seus respectivos volumes máximos e mínimos ( $\text{mm}^3$ ) para a resolução de  $60 \mu\text{m}$ .

<b>Classificação dos Macroporos (MAP)</b>	<b>Tamanho (voxel)</b>	<b>Volume (<math>\text{mm}^3</math>)</b>
Pequeno (P)	1 – 8	$2,64 \times 10^{-4}$ – $1,73 \times 10^{-3}$
Médio (M)	9 -100000	$1,94 \times 10^{-3}$ – 21,6
Grande (G)	>100000	> 21,6

Fonte: A autora

Com isso, os procedimentos que seguem, tiveram como principal objetivo, extrair cada classe de macroporo separadamente das imagens seguido de posterior processamento. Abaixo um fluxograma (Figura 26) dos procedimentos realizados no programa *Image J*:

Figura 26 – Fluxograma do procedimento de classificação, binarização e contabilização de parâmetros físicos que definem forma, tamanho, número total de poros e porosidade.\*Na primeira etapa são excluídos os poros G+M, na segunda são excluídos os G e por último restam apenas os poros M.



Fonte: A autora

Os macroporos do tipo (P) não foram classificados quanto à sua forma sob a premissa de que quanto menor os poros, mais próximos a uma esfera eles são, ou seja, são do tipo esferoidal (ES).

Os macroporos do tipo (G) também não foram classificados quanto à sua forma pelo fato de serem poros complexos, os quais estão presentes ao longo de toda a amostra de uma extremidade à outra e em qualquer direção da mesma. Sendo que estas propriedades estão diretamente relacionadas aos diversos processos de formação desses poros (bioporos, fissuras, etc). Contudo, partimos da premissa de que poros grandes são do tipo complexo ou irregular, ou seja, do tipo não classificado (NC).

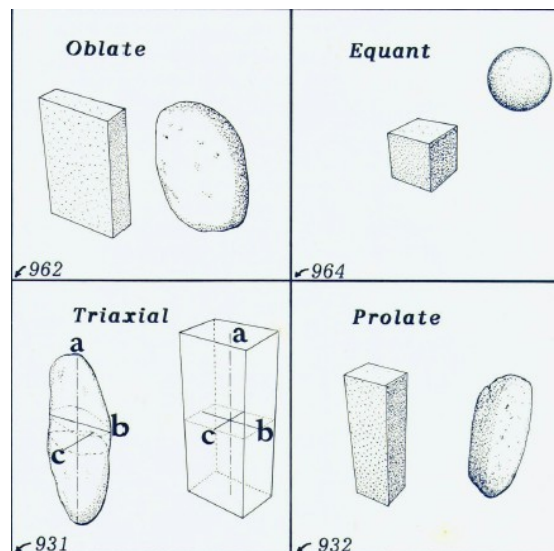
Já os macroporos do tipo (M) foram classificados utilizando parâmetros como eixo menor (me), eixo maior (ma) e eixo intermediário (in) de acordo com as terminologias sugeridas por Bullock et al.,(1985), (Tabela 4 e Figura 27):

Tabela 4 - Classificação dos macroporos do tipo médio (M) quanto à sua forma e as condições que foram utilizadas para classificação.

Classificação quanto à forma para macroporos (M)	Condições de forma
disco ( <i>oblate</i> )	$in/ma \geq 2/3$ ; $me/in < 2/3$
Esferoidal ( <i>equant</i> )	$in/ma \geq 2/3$ ; $me/in \geq 2/3$
Elipsoidal ( <i>triaxial</i> )	$in/ma < 2/3$ ; $me/in \geq 2/3$
Haste ( <i>prolate</i> )	$in/ma < 2/3$ ; $me/in \geq 2/3$

Fonte: adaptado de Bullock et al., 1985

Figura 27 - Formato de um objeto definido por meio de seus eixos principais: maior (ma), menor (me) e intermediário (in) sugeridos por Bullock et al.,(1985) utilizados para a classificação dos poros médios (M).



Fonte: Adaptado de Bullock et al., 1985.

#### 4.5. Análise dos dados

O volume por poro (em *voxel*) dos macroporos do tipo (P), (M) e (G) fornecido pelas planilhas de resultados geradas durante o procedimento anterior, foi utilizado para o cálculo da macroporosidade (MAP) percentual (%) por volume de amostra (em  $\text{mm}^3$ ).

Para isso, o volume em *voxels* contabilizado por macroporo (P, M e G) para cada amostra foi multiplicado pela resolução em  $\text{mm}^3$ , conforme equação (7):

$$V_{\text{poro}} = V_{\text{voxel}} \cdot (0,06^3) \quad (7)$$



Para obter o volume total dos macroporos (em  $\text{mm}^3$ ) para cada amostra o volume de cada tipo macroporo foi somado conforme equação (8):

$$V_{total} = \sum V_{poro} \quad (8)$$

#### 4.5.1. Macroporosidade: por forma e volume de macroporo

A macroporosidade percentual,  $MAP(\%)$ , dos macroporos pequenos (P), médios (M) e grandes (G) contidos em cada uma das amostras, foi obtida a partir do volume de cada tipo de macroporo dividido pelo volume total da amostra ( $58,212 \text{ cm}^3$ ), conforme equação (9):

$$MAP(\%) = \frac{V_{poro}}{V_{amostra}} \times 100 \quad (9)$$

A macroporosidade total,  $MAP_{total}(\%)$ , em cada uma das amostras, foi obtida da soma das porosidades percentuais dos diferentes tipos de macroporos (P, M e G) conforme equação (10):

$$MAP_{total}(\%) = MAP(\%)_P + MAP(\%)_M + MAP(\%)_G \quad (10)$$

A macroporosidade percentual para o intervalo de tamanho correspondente ao tipo médio,  $MAP(\%)_M$ , foi subdividida em classes quanto à sua forma (Tabela 4): disco (DI), esférico (ES), elipsoidal (EL), haste (HA) e não-classificado (NC) conforme equação (11):

$$MAP(\%)_M = MAP(\%)_{DI} + MAP(\%)_{ES} + MAP(\%)_{EL} + MAP(\%)_{HA} + MAP(\%)_{NC} \quad (11)$$

Da mesma forma, foi obtida a  $MAP(\%)_M$  para cada intervalo de tamanho (Tabela 5), conforme equação (12):

$$MAP(\%)_M = MAP(\%)_{0,00194-0,0216} + MAP(\%)_{0,0218-0,108} + \dots \quad (12)$$

A macroporosidade percentual média,  $\overline{MAP}(\%)$ , para cada sistema de manejo, PD e PC, foi determinada conforme equação (13), onde a soma foi feita sob as diferentes camadas:

$$\overline{MAP}(\%) = \frac{MAP_{total}(\%)_{0-10} + MAP_{total}(\%)_{10-20} + MAP_{total}(\%)_{20-30}}{3} \quad (13)$$

A diferença relativa foi determinada por meio da equação (14), tomando como referencia a camada de 20-30 cm, onde x representa a camada 0-10 e 10-20 cm, respectivamente.

$$DR(\%) = \frac{MAP_{total}(\%)_{20-30} - MAP_{total}(\%)_x}{MAP_{total}(\%)_{20-30}} \times 100 \quad (14)$$

A diferença relativa entre as três camadas dos diferentes sistemas foi determinada por meio da equação (15), tomando como referencia as camadas sob PD.

$$DR(\%) = \frac{MAP_{PD}(\%)_{0-10} - MAP_{PC}(\%)_{0-10}}{MAP_{PD}(\%)_{0-10}} \times 100 \quad (15)$$

Para os diferentes sistemas de manejo a diferença relativa entre as médias foi realizada por meio da equação (16), tomando como referencia o sistema de manejo PD.

$$DR(\%) = \frac{\overline{MAP}(\%)_{PD} - \overline{MAP}(\%)_{PC}}{\overline{MAP}(\%)_{PD}} \times 100 \quad (16)$$

#### 4.5.2. Número de macroporos: por forma e volume de macroporo

O número macroporos poros (NMAP): pequeno (P), médio (M) e grande (G) para cada volume amostral foi fornecido pela própria planilha de resultados. Os macroporos do tipo médios (M) e pequenos (P) foram quantificados em intervalos de tamanho subdivididos conforme Tabela 5. Para isso foram utilizadas equações lógicas oferecidas pela planilha eletrônica.

Tabela 5 – Sub classes de macroporos por volume (mm<sup>3</sup>) de macroporo.

Macroporos	Tamanho (voxel)	Volume (mm <sup>3</sup> )
Pequeno (P)	1-4	0,000216 – 0,000864
	5-8	0,00108 – 0,00173
Médio (M)	9-100	0,00194 – 0,0216
	101-500	0,0218 – 0,108
	501-1000	0,108 – 0,216
	1001-5000	0,216 – 1,08
	5001-10000	1,08 – 2,16
	10001-50000	2,16 – 10,8
	50001-100000	10,8 – 21,6

Fonte: A autora

As diferenças relativas de NMAP entre camadas e entre sistemas de manejo foram realizadas da mesma forma que para a macroporosidade equações (14) e (15).

#### 4.5.3. Tortuosidade e conectividade do espaço poroso

Para a análise de tortuosidade e conectividade dos poros foram utilizadas as sequências de imagens já binarizadas.

Os valores de CEP (Característica de Euler-Poincarè) e de tortuosidade foram realizados no programa *OsteoImage* com a parceria firmada com o Prof. Dr. Waldir L. Roque (Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada).

Os valores de CEP (conectividade) do espaço poroso foram obtidos pela equação (5) já mencionada no capítulo 3:

$$CEP = \frac{1}{2} \#I - \#B + H\# \quad (5)$$

onde #I é o número de parte isoladas, #B é o número de ramificações e H# é o número de cavidades fechadas.

Os gráficos de correlação linear da CEP em função dos *disectors* (par de imagens contínuas) foram analisados em profundidade (z+) concomitantemente com o conjunto de valores de CEP.

A tortuosidade  $\tau$ , foi determinada pela equação (2) nas seis direções (x+, x-, y+, y-, z+ e z-):

$$\tau = \frac{L_G}{L_E} \quad (2)$$

onde  $L_G$  é a distância Geodésica entre dois pontos conexos e  $L_E$  é a distância Euclidiana entre os planos. Com os valores da tortuosidade em cada uma das direções foi analisada a anisotropia do sistema poroso para cada amostra.

O Desvio de Tortuosidade Direcional (DTD) foi obtido para todas as três direções (x, y e z) pela equação (3):

$$DTD = |\tau_+ - \tau_-| \quad (3)$$

Os valores de DTD foram utilizados para inferir sobre a direção preferencial do sistema poroso em cada uma das amostras.

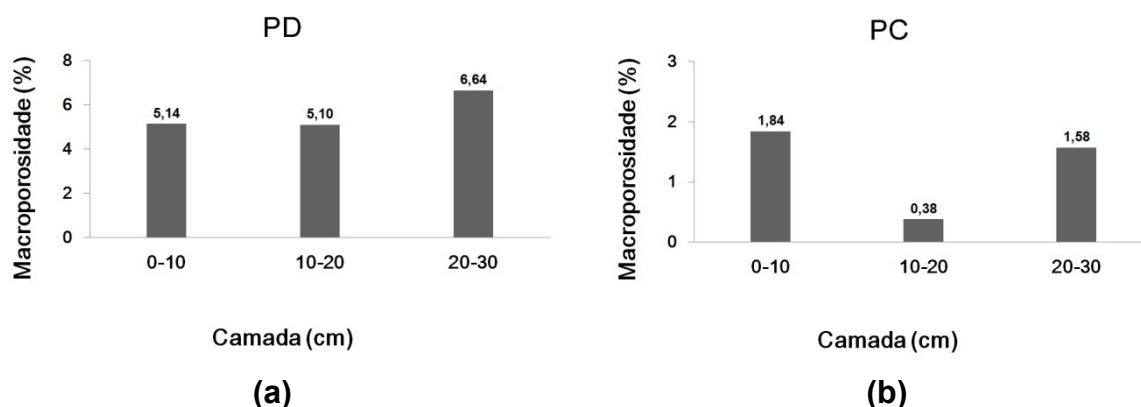
## CAPÍTULO 5

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1. Macroporosidade:

Na figura 28 são apresentados os resultados de  $MAP_{total}(\%)$ , por volume de amostra ( $58,212 \text{ cm}^3$ ), para cada uma das camadas coletadas (0-10, 10-20 e 20-30 cm), para os dois manejos estudados (PD e PC).

Figura 28 – Macroporosidade total percentual,  $MAP_{total}(\%)$ , por volume de amostra para cada camada: 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm e para os sistemas de manejo: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC).



A diferença relativa  $DR(\%)$  entre camadas para o PD (Figura 28a) foi de 22% (para menos) para a camada de 0-10 cm em relação à camada 20-30 cm e de 23% (para menos) para a camada de 10 -20 cm em relação à mesma camada, indicando adensamento nas camadas superficiais (0-20 cm).

Em conformidade com estes resultados, no sistema de manejo PD, o solo não é revolvido e é submetido a uma menor intensidade de tráfego de implementos e máquinas agrícolas se comparado com o PC, isso tende a provocar uma maior compactação da camada superficial (0-5 cm), aumentando sua densidade e diminuindo sua macroporosidade, principalmente para solos com textura argilosa (Raghavan et al., 1977; Sidiras et al., 1984; Stone e Silveira, 2001; Costa et al., 2003).

Tormena et al. (2002) também investigaram diferentes sistemas de manejos de um Latossolo Vermelho distrófico, e encontraram uma menor porosidade na camada de 0-10 cm para o sistema de manejo PD, corroborando com os resultados encontrados neste trabalho.

Embora apresentem diferenças relativas entre as camadas, estas não são significativas em termos práticos para o manejo PD.

Para o PC (Figura 28b), a  $DR(\%)$  entre camadas foi de 16% (para mais) para a camada de 0-10 cm em relação à camada 20-30 cm e de 80% (para menos) para a camada de 10-20 cm em relação à mesma camada, indicando compactação do solo na camada intermediária (10-20 cm) ocasionado pelo uso de implementos como a grade, o qual foi utilizado para o preparo do solo estudado em profundidades de até 25 cm. Segundo Gupta e Allmaras (1987), a compactação do solo é verificada quando ocorre uma compressão em uma condição não saturada, que expulsa o ar do espaço poroso, reduzindo o volume de poros e aumentando a sua densidade.

Comparando os sistemas de manejo, observou-se que para o PD as  $MAP_{total}(\%)$  são maiores que no PC em todas as camadas (Figura 28a e b). A  $DR(\%)$  do PC em relação ao PD foi de 64% (para menos) na camada de 0-10 cm, 92% (para menos) na camada de 10-20 cm e 76% (para menos) na camada de 20-30 cm.

A macroporosidade média  $\overline{MAP}(\%)$  para o PD foi de 5,6% e para o PC de 1,3%, com uma  $DR(\%)$  de 77% (para mais) para o PD.

De acordo com estes resultados, a  $MAP_{total}(\%)$ , varia de solo para solo, de perfil para perfil e depende do sistema de manejo adotado; e este se praticado inadequadamente em solos argilosos, pode causar compactação implicando em menor macroporosidade (Embrapa, 2006).

Por outro lado, Assis e Lanças (2005), analisaram um Nitossolo Vermelho sob os sistemas de manejo PD (de 1 ano à 12 anos) e PC, concluindo que ao longo dos anos, não ocorrem diferenças significativas entre os sistemas de manejo. Sendo que o PD (12 anos) apresentou aumento da macroporosidade e diminuição da microporosidade na camada de 0–5 cm em relação aos demais. Que está em acordo com Albuquerque et al. (1995), os quais constataram que, ao final de 7 anos, para um Latossolo Vermelho distrófico, não ocorreram diferenças de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade entre os sistemas de PD e o PC.

Segundo Losekann (2009), solos submetidos ao uso intensivo, como é o caso do PC, geralmente apresentam menor macroporosidade em decorrência da maior compactação ocasionada pelo uso de máquinas agrícolas, da ausência de resíduos orgânicos e de como as partículas sólidas estão distribuídas no solo; pois esta organização das partículas sólidas é que define a estrutura do solo, bem como, o espaço poroso entre elas.

Jorge et al. (2012), investigaram a distribuição de poros e a densidade de um Latossolo sob diversos tipos de manejo e concluíram que os manejos com intensa mobilização do solo, como PC, foram os que mais afetaram negativamente os atributos físicos como a macroporosidade, microporosidade e densidade do solo.

Segundo Costa et al., (2003) é possível que a menor macroporosidade obtida sob o sistema de manejo PC em relação ao PD na camada de 10-20 cm seja decorrente da transmissão da pressão realizada na superfície do solo pelas máquinas e implementos, pela compressão exercida pela lâmina dos discos do arado, bem como do pneu do trator rodando no sulco de aração no sistema de PC, corroborando com o alto percentual relativo para a camada de 10-20 cm.

As  $MAP_{total}(\%)$  obtidas, são baixas comparadas ao método tradicional por meio da Câmara de Richards, no qual amostras de solo saturadas em água, forma submetidas a diferentes potenciais. Neste método, a porosidade total é obtida baseada no tamanho do raio equivalente de poro, obtendo-se a microporosidade e macroporosidade das amostras separadamente.

Segundo a Embrapa (1997), macroporos são poros com raio maior que 0,025 mm e microporos são poros com raio menor que 0,025 mm. Neste trabalho, contabilizou-se apenas os macroporos com raios a partir de 0,030 mm e por isso os resultados aqui apresentados como  $MAP_{total}(\%)$  são na verdade resultados parciais de macroporosidade (%).

Borkowski (2009), utilizando a câmara de Richards, e amostras coletadas em uma mesma área de manejo (PD e PC) das utilizadas neste trabalho, obteve uma  $\overline{MAP}(\%)$  de 9% para cada uma das camadas sob o sistema de manejo PD; e uma macroporosidade média que variou nas camadas de 0-30 cm de 6% à 11% para o PC.

Do ponto de vista metodológico, a baixa  $MAP_{total}(\%)$  obtida, provém da técnica de microtomografia de raios X utilizada para obtenção das imagens das amostras de solo, embora seja um método direto e não destrutivo, o método tende a

subestimar a porosidade devido às propriedades inerentes do sistema, entre as principais:

- a) Embora tenha-se as imagens com uma resolução de 20  $\mu\text{m}$ , o sistema computacional atual não permitiu a reconstrução de todo o volume amostral nesta resolução. Tive-se uma limitação no tamanho do arquivo gerado que nos levou a reduzir o volume amostral (ROI) e para que este não fosse muito pequeno, tivemos que aumentar a resolução de reconstrução dos sub-volumes para 60  $\mu\text{m}$ .
- b) Uma maior resolução é igual à perda de informação, pois os valores dos *voxels* da imagem de 16 *bits* reconstruída com resolução de 60  $\mu\text{m}$  são a soma (*binning*) dos *voxels* da imagem de 16 *bits* obtidas com resolução de 20  $\mu\text{m}$ . Ou seja, o histograma (distribuição dos diferentes tons de cinza) da imagem reconstruída na resolução de 60  $\mu\text{m}$ , é diferente do histograma original.
- c) E por último, talvez o que mais contribuiu para a menor porosidade foram os procedimentos de filtros e operações para extração de artefatos, bem como a própria segmentação das imagens que foi realizada a partir de aproximações, médias e comparações entre imagens ao olho nu para determinação de *voxels* que representam poro e solo nas imagens (ver item 3.3 – material e métodos deste trabalho). A cada procedimento destes, embora estejamos buscando o melhor valor para expressar as propriedades físicas do solo, estamos eliminando informações que continham a realidade da estrutura do solo; ou seja, são processos que apenas aproximam do que é real.

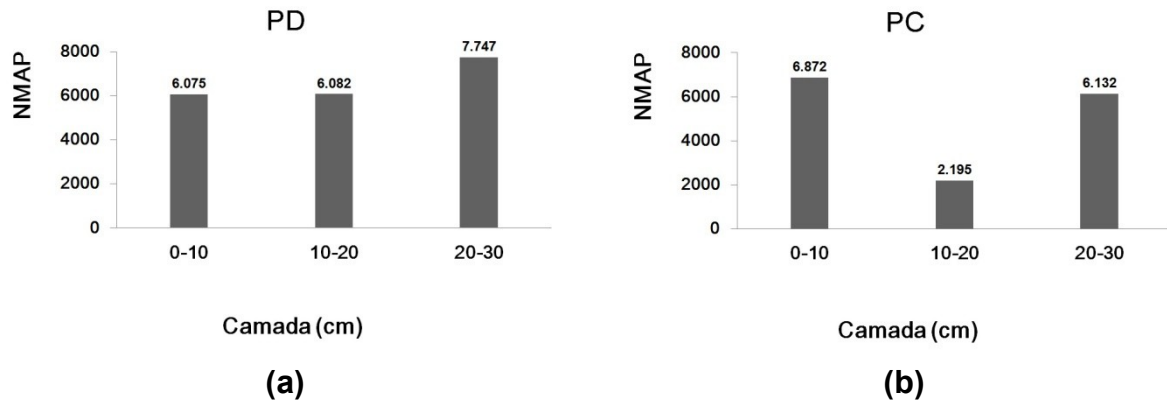
Em contrapartida, ver-se-á mais adiante, que a técnica de microtomografia de raios X no estudo do solo, permite caracterizar outras propriedades físicas estruturais importantes para a compreensão do espaço poroso deste meio.

## 5.2. Número de Macroporos:

Na figura 29 são apresentados os resultados de *NMAP* por volume de amostra (58,212  $\text{cm}^3$ ), para cada uma das camadas coletadas (0-10, 10-20 e 20-30 cm), para os dois manejos estudados (PD e PC)



Figura 29 – Número de macroporos, (NMAP), por volume de amostra para cada camada: 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm e para os sistemas de manejo: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC)



A  $DR(\%)$  entre camadas do NMAP para o PD (Figura 29a) foi de 21% (para menos) para a camada de 0-10 cm em relação à camada 20-30 cm e de 21% (para menos) para a camada de 10-20 cm em relação à mesma camada, corroborando com  $DR(\%)$  de  $MAP(\%)$ .

Para o PC (Figura 29b), a  $DR(\%)$  entre camadas foi de 12% (para mais) para a camada de 0-10 cm em relação à camada 20-30 cm e de 64% (para menos) para a camada de 10-20 cm em relação à mesma camada, corroborando com as  $DR(\%)$  de  $MAP(\%)$ .

Comparando os sistemas de manejo, observou-se que para o PD os NMAP são maiores que no PC nas camadas de 10-20 e 20-30 cm (Figura 28a e b), pois a diferença relativa do PC em relação ao PD foi de 13% (para mais) na camada de 0-10 cm, 63% (para menos) na camada de 10-20 cm e 21% (para menos) na camada de 20-30 cm. A diferença relativa para mais do PC em relação ao PD para a camada superficial, corrobora com o fato de que no sistema PD essa camada possui menor macroporosidade devido ao re-arranjo natural o qual modifica a estrutura do solo quando não ocorre o revolvimento (Stone e Silveira, 2001).

O número de macroporos médio  $\overline{NMAP}(\%)$  para o PD foi de 6.634 macroporos e para o PC de 5.066 macroporos, com uma diferença relativa de 24% (para mais) para o PD. Essa diferença relativa é muito menor que a encontrada para a macroporosidade média, indicando um rearranjo das partículas resultando em uma nova configuração da estrutura do solo e como consequência, o espaço poroso. O adensamento do solo consiste na redução natural do espaço poroso pelo rearranjo

de suas partículas, que, conseqüentemente, leva ao aumento da densidade de camadas do solo (Curi, 1993). O termo adensamento não é utilizado apenas quando há redução de volume resultante de um processo pedogenético, mas também quando há expulsão de água do espaço poroso provocado por uma compressão do solo (Dias Junior, 2000) resultante da aplicação de pressão por meios mecânicos (Fante Júnior, 2002).

Observou-se que o NMAP para o PD (Figura 29a) apresentou o mesmo comportamento da  $MAP_{total}(\%)$  (Figura 28a), ou seja, o NMAP aumentou com a profundidade. No entanto, o aumento do NMAP da profundidade 0-10 cm para a profundidade de 10-20 cm é o inverso do que ocorreu para as mesmas camadas na análise da  $MAP_{total}(\%)$ . Isso significa que, nem sempre para uma maporosidade maior, o solo terá um número de macroporos também maior, pois um único poro com grande volume pode corresponder à  $MAP(\%)$  do solo, o que corrobora com o rearranjo das partículas discutido por Curi (1993).

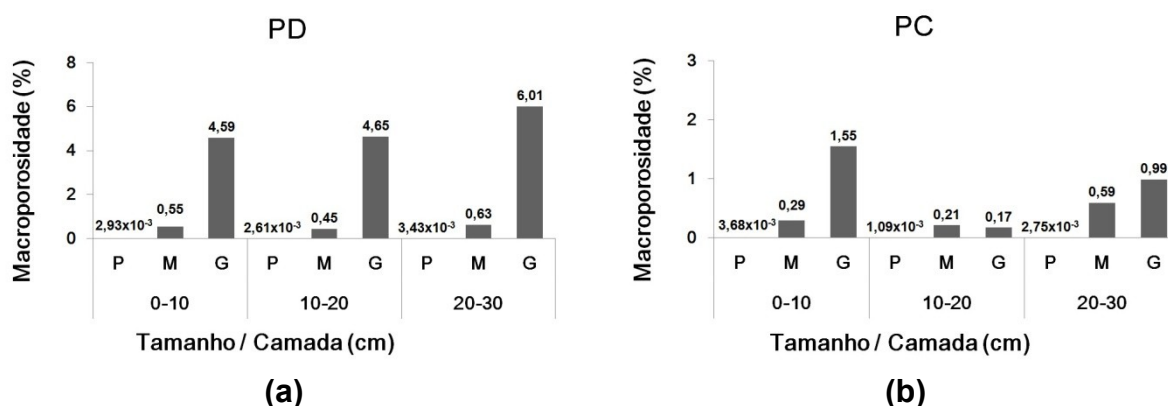
Este comportamento pode ser observado também se comparados os valores de NMAP para os dois sistemas de manejo, onde para a profundidade de 0-10 cm do PD, o NTP foi de 6.075 com  $MAP_{total}(\%)$  de 5,14% e para o PC um NMAP de 6.872 com  $MAP_{total}(\%)$  de 1,84%, isto é, embora a  $MAP_{total}(\%)$  seja bem menor para o PC, este apresenta um NMAP maior. Isto ocorreu provavelmente porque no sistema de manejo PC a predominância é de macroporos menores (mas não microporos), o que significa um menor volume de poros na camada superficial devido à compactação do solo para este sistema de manejo (Tormena et al., 2002; Costa et al., 2003).

Para o PC, também foi observado um comportamento similar aos resultados obtidos para a  $MAP_{total}(\%)$  em que ocorreu uma diminuição do NMAP na camada intermediária (10-20 cm).

### **5.3. Macroporosidade em função do tamanho dos macroporos:**

Na figura 30 são apresentados os resultados de macroporosidade  $MAP(\%)$  por volume de amostra para cada tamanho dos macroporo: pequenos (P), médios (M) e grandes (G) para as camadas coletadas nos sistemas de manejo PD e PC.

Figura 30 – Macroporosidade percentual,  $MAP(\%)$ , por volume de amostra em função do volume dos macroporos: pequeno (P), médio (M) e grande (G); nas camadas: 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm para os sistemas de manejo: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC).



Para o PD e PC a macroporosidade correspondente aos macroporos pequenos  $MAP(\%)_p$ , contida nos volumes amostrais ficou próximo de 0% para todas as camadas em ambos os sistemas de manejo, PD e PC (Figuras 30a e b).

Vale lembrar, que embora estes poros estejam classificados neste trabalho como pequenos (P) estes não são microporos, pois pertencem ao intervalo de tamanho dos macroporos, conforme Embrapa (1997).

Para o PD (Figura 30a), na camada de 0-10 cm, os macroporos pequenos (P) contribuíram com uma porosidade de 0,00293% que correspondeu a um volume de  $1,71 \text{ mm}^3$ . Na camada de 10-20 cm a  $MAP(\%)_p$  foi de 0,00261% que correspondeu a um volume de  $1,52 \text{ mm}^3$  e na camada de 20-30 cm os macroporos pequenos (P) contribuíram com uma porosidade de 0,00343% que correspondeu a um volume de  $2,00 \text{ mm}^3$ .

Para o PC (Figura 30b), na camada de 0-10 cm, os macroporos pequenos (P) contribuíram com uma porosidade de 0,00368% que correspondeu a um volume de  $2,14 \text{ mm}^3$ . Na camada de 10-20 cm a  $MAP(\%)_p$  foi de 0,00109% que correspondeu a um volume de  $0,64 \text{ mm}^3$  e na camada de 20-30 cm os macroporos pequenos (P) contribuíram com uma porosidade de 0,00275 % que correspondeu a um volume de  $1,60 \text{ mm}^3$ .

Considerando as três camadas a  $\overline{MAP}(\%)_p$  foi de 0,003% para o PD e de 0,003% para o PC, com uma diferença relativa de 0% . Ou seja, o tipo de sistema de manejo adotado não afeta na macroporosidade para este tamanho de macroporo pequeno.

Essa baixa  $MAP(\%)_P$  nos volumes amostrais, para ambos os sistemas de manejo, ocorreu devido ao pequeno volume ocupado por estes macroporos se comparados ao volume total ( $58,212 \text{ cm}^3$ ) de cada amostra (camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20- 30 cm). Isso não significa que não existam macroporos pequenos (P), mas sim que a soma dos volumes destes não é significativa comparada ao volume total da amostra.

Estes resultados para os macroporos pequenos (P) apresentam um comportamento do solo, o qual indica a presença de uma classe de tamanho de macroporo ( $0 \text{ à } 0,00173 \text{ mm}^3$ ), a qual praticamente não contribui para a porosidade do solo, independente do sistema de manejo adotado.

Os macroporos grandes (G) contribuíram para a maior parte da  $MAP_{total}(\%)$  por volume amostral em ambos os sistemas de manejo (Figuras 30a e b), exceto na camada intermediária (10-20 cm) do PC, em que o tamanho de macroporo que mais contribui para a  $MAP_{total}(\%)$  foi o de tamanho médio (M).

Os macroporos grandes (G) geralmente são formados pela presença de minhocas e cupins e pelo desenvolvimento de raízes no interior do solo. Camadas superficiais do solo normalmente são dotadas de bioporos e resíduos de raízes. E, se presentes, estes grandes poros são preenchidos com água na saturação, dominando completamente o transporte de água na amostra (Dirksen, 1991). No entanto, para o PD, observou-se que estes bioporos apareceram desde a superfície até a camada de 30 cm, mantendo-se quase que constante ao longo do volume amostral. Em contrapartida, para o PC, os macroporos grandes estão presentes na camada superficial e tendem a diminuir em volume com a profundidade (Figura 30b) mas não em número (Figura 31b).

Considerando as três camadas a  $\overline{MAP}(\%)_G$  foi de 5,1% para o PD e de 0,9% para o PC, com uma  $DR(\%)$  de 82% para menos para o PD, indicando que o adensamento no PD, provocado pela compressão de maquinário agrícola, (Dias Júnior, 2000), é mais sensível para macroporos grandes do que para macroporos pequenos, corroborando com a diferença relativa de 0% para macroporos pequenos.

Já para os macroporos de tamanho médio (M) observou-se que a  $\overline{MAP}(\%)_M$  foi de 0,5% para o PD e de 0,4% para o PC, com uma  $DR(\%)$  de 20% para menos para o PC. Ou seja, este tamanho de macroporo é mais afetado pelo sistema de

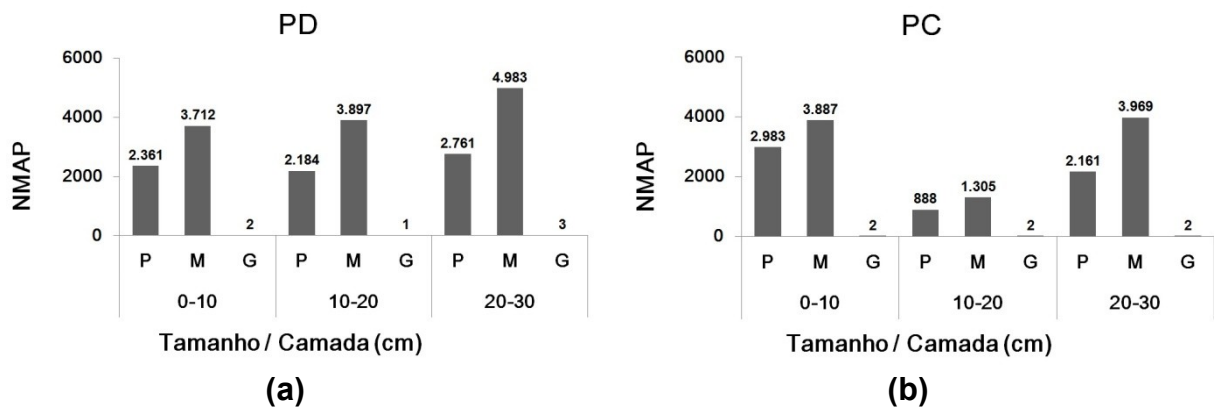
manejo adotado que o pequeno macroporo é menos afetado que o grande macroporo.

No geral, observa-se que o PD apresentou maiores valores de macroporosidade total para todos os tamanhos de macroporo (P, M, G), exceto para macroporos pequenos (P) na camada de 0-10 cm.

#### 5.4. Número de macroporos em função do tamanho dos macroporos:

Na figura 31 são apresentados os resultados do número de macroporos (NMAP) por volume de amostra para cada tamanho de macroporo: pequenos (P), médios (M) e grandes (G), para cada uma das camadas e sistemas de manejo PD e PC.

Figura 31 – Número de macroporos, (NMAP), por volume de amostra em função do volume dos macroporos: pequeno (P), médio (M) e grande (G); nas camadas: 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm para os sistemas de manejo: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC).



Para o PD (Figura 31a), a  $DR(\%)$  do número de macroporos grandes (G) entre camadas foi de 33% (para menos) para a camada de 0-10 cm e 66% (para menos) para a camada de 10-20 cm com relação a camada de 20-30 cm, indicando maior quantidade de macroporos grandes (G) nesta última camada.

A  $DR(\%)$  do número de macroporos médios (M) entre camadas foi de 25% (para menos) para a camada de 0-10 cm e de 22% (para menos) para a camada de 10-20 cm com relação à camada de 20-30 cm, indicando maior quantidade de macroporos médios nesta última camada (Figura 31a).

A  $DR(\%)$  do número de macroporos pequenos (P) entre camadas foi de 14% (para menos) para a camada de 0-10 cm e de 21% (para menos) para a camada de

10-20 cm com relação a camada de 20-30 cm, indicando maior quantidade de macroporos médios (M) nesta última camada (Figura 31a), o que era de se esperar no caso do sistema PD.

Para o PC (Figura 31b), a  $DR(\%)$  do número de macroporos grandes (G) entre camadas foi de 0%.

A  $DR(\%)$  do número de macroporos médios (M) entre camadas foi de 2% (para menos) para a camada de 0-10 cm e de 67% (para menos) para a camada de 10-20 cm com relação à camada de 20-30 cm, indicando que o sistema de manejo afetou o NMAP para este tipo de macroporo na camada de 10-20 cm (Figura 31b), que corrobora com o menor valor de  $MAP(\%)_M$  de 0,21% nesta camada.

A  $DR(\%)$  do número de macroporos pequenos (P) entre camadas foi de 38% (para mais) para a camada de 0-10 cm e de 59% (para menos) para a camada de 10-20 cm com relação à camada de 20-30 cm. Como era de se esperar, no PC a camada superficial é revolvida a cada manejo, resultando maior quantidade de macroporos pequenos (P) na superfície que na camada de 20-30 cm. Isso pode ser observado nas Figuras 31a e b para a camada de 0-10 cm, onde o PC apresenta maior quantidade de macroporos pequenos (P) que o PD.

O NMAP dos macroporos grandes (G), contido nos volumes amostrais ficou entre 1 e 3 macroporos para todas as camadas em ambos os sistemas de manejo (Figuras 31a e b). Sendo o número médio de macroporos grandes,  $\overline{NMAP}$  de 2 para o PC e PD, com uma  $DR(\%)$  de 0% para este tamanho de macroporo. Isso indica que para estas amostras a quantidade de macroporos grandes (G) não é afetada, no entanto os resultados de macroporosidade,  $\overline{MAP}(\%)_G$ , revelam a alteração no volume destes com o sistema de manejo adotado.

Como vimos no item 5.3, a maior contribuição da  $MAP_{total}(\%)$  foi para esta classe de macroporos grandes (G), em todos os volumes amostrais correspondentes às diferentes camadas de um mesmo solo submetido a diferentes tipos de manejo (PD e PC). Isto era de se esperar, pois um único macroporo pode ocupar um grande espaço dentro do volume amostral e a soma destes volumes dos macroporos grandes, refletem diretamente no alto percentual de porosidade em todas as camadas analisadas, corroborando com os resultados de porosidade para este tamanho de macroporo (G).

Outro fator importante a se considerar é que para determinação do intervalo correspondente aos macroporos do tipo grande (G) na classificação (Tabela 3), foi considerada a continuidade destes macroporos presentes nas amostras, ou seja, macroporos do tipo grande (G) estavam presentes da parte superior até a parte inferior da amostra, representando sempre um volume maior que  $21,6 \text{ mm}^3$  dentro dos volumes amostrais. Isso explica o baixo NMAP para os macroporos grandes (G) em todas as camadas.

O NMAP médio de macroporos médios (M),  $\overline{NMAP}$  foi de 4.197 macroporos para o PD e de 3.054 macroporos para o PC (Figuras 31a e b), com uma  $DR(\%)$  de 27% (para menos) para o PC, corroborando com os valores obtidos de  $\overline{MAP}(\%)_M$  (Figuras 30a e b).

Os macroporos médios (M) foram os que apresentaram maior NMAP em ambos os sistemas de manejo e em todas as camadas (Figuras 31a e b).

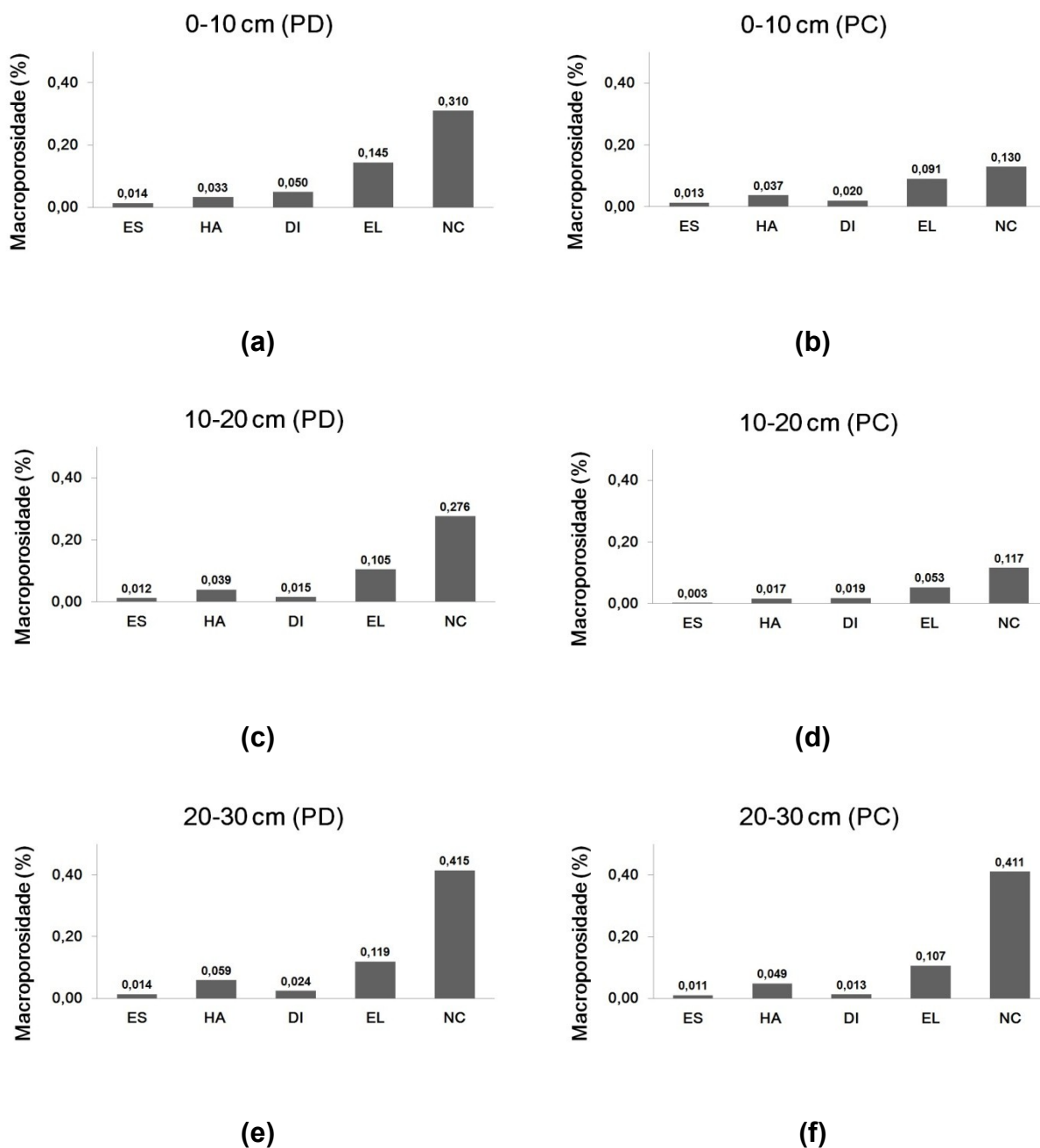
O NMAP médio de macroporos pequenos (P),  $\overline{NMAP}$  foi de 2.435 macroporos para o PD e de 2.011 macroporos para o PC (Figuras 31a e b), com uma diferença  $DR(\%)$  de 17% (para menos) para o PC.

Embora os macroporos médios (M), não tenham contribuído com a maior  $MAP_{total}(\%)$  por volume de amostra, em todas as camadas, para os dois sistemas de manejo; este tipo de poro representou um grande NMAP e uma variabilidade em termos estruturais dentro das amostras do solo. São poros que estão conectados entre si e entre os macroporos grandes de alguma forma dentro do volume amostral. Diante disso, realizamos um estudo mais detalhado sobre os poros médios (M) apresentando os resultados da caracterização micromorfológica destes (item 5.5 e 5.6).

### **5.5. Macroporos médios (M) - Macroporosidade em função da forma dos macroporos:**

Na figura 32 são apresentados os resultados da macroporosidade por volume de amostra para os macroporos médios (M) em função da sua forma: esferoidal (ES), haste (HA), disco (DI), elipsoidal (EL) e não classificados (NC); para cada uma das camadas coletadas. Para a classificação dos macroporos médios (M) quanto ao seu formato foram considerados os três eixos que interceptam os poros (Figura 26).

Figura 32 – Macroporosidade percentual,  $MAP(\%)_M$ , por volume de amostra em função da forma dos macroporos médios (M): esferoidal (ES), haste (HA), disco (DI), elipsoidal (EL) e não-classificados (NC); para a camada 0-10 cm: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC); para a camada 10-20 cm: (c) Plantio Direto (PD) e (d) Plantio Convencional (PC) e para a camada 20-30 cm: (e) Plantio Direto (PD) e (f) Plantio Convencional (PC).



Os macroporos do tipo esferoidal (ES) contribuíram com a menor  $MAP(\%)_M$  dentro do volume amostral em ambos os sistemas de manejo e em todas as camadas (Figuras 32a, b, c, d, e e f). Isso era de se esperar, pois poros esferoidais (ES) são predominantes na microporosidade do solo, ou seja, com diâmetros



inferiores a 0,025 mm pois sua função principal no solo é armazenagem de água (Embrapa, 1997).

Por outro lado, a maior  $MAP(\%)_M$  foi para os macroporos do tipo não classificado (NC) em todas as camadas e para ambos os sistemas de manejo (Figuras 32a, b, c, d, e e f). Isto ocorreu devido à limitação inerente ao algoritmo do programa utilizado (*Image J*) que ao realizar a contagem dos *voxels* na medida dos três eixos (eixo maior, eixo intermediário e eixo menor) que interceptam os poros, este não consegue finalizar estas operações. Isto é, na falta da medida de um único eixo dentro de um poro, automaticamente o programa classifica como um poro do tipo não classificado (NC), pois as equações que definem forma dependem diretamente destas medidas (Tabela 4). No entanto, o PD apresentou uma maior porosidade de poros NC em todas as camadas quando comparados às mesmas camadas do PC. Porém, a diferença de macroporosidade entre PC e PD na camada (20-30 cm) para os poros do tipo NC é muito pequena, indicando que a partir de 20 cm não ocorrem alterações micromorfológicas oriundas do tipo de sistema de manejo adotado (Figuras 32e, f).

Em uma perspectiva 2D pode-se inferir que estes macroporos do tipo NC, são equivalentes aos poros complexos (Cooper e Vidal-Torrado, 2005) e/ ou irregulares (Bouma et al, 1977). Neste sentido, observou-se que existe uma relação de inversão de proporcionalidade entre macroporos do tipo ES e NC, ou seja, onde há uma proporção da macroporosidade de NC alta, a macroporosidade de ES, é baixa; corroborando com o estudo realizado por Cooper e Vidal-Torrado (2005) em um perfil de um Nitossolo Nítico.

Desconsiderando os macroporos do tipo NC, os macroporos que mais contribuíram com a  $MAP(\%)_M$  dentro dos volumes amostrais, foram os macroporos do tipo elipsoidal (EL) para ambos os sistemas de manejo e em todas as camadas (Figuras 32a, b, c, d, f). Sendo que o PD apresentou maior macroporosidade de EL, quando comparado ao PC em todas as camadas. E ainda, observa-se que o comportamento desse macroporo oscila em camada em ambos os sistemas de manejo, ou seja, ele tende a diminuir na camada de 10-20 e volta a aumentar na camada de 20-30 cm. Neste sentido, conclui-se que os sistemas de manejo não afetaram a distribuição deste tipo de macroporo ao longo do perfil do solo.

O contrário foi observado para o macroporo do tipo HA. Este alterou muito pouco em camada para o PD, sendo o maior percentual, para a camada de 20-30

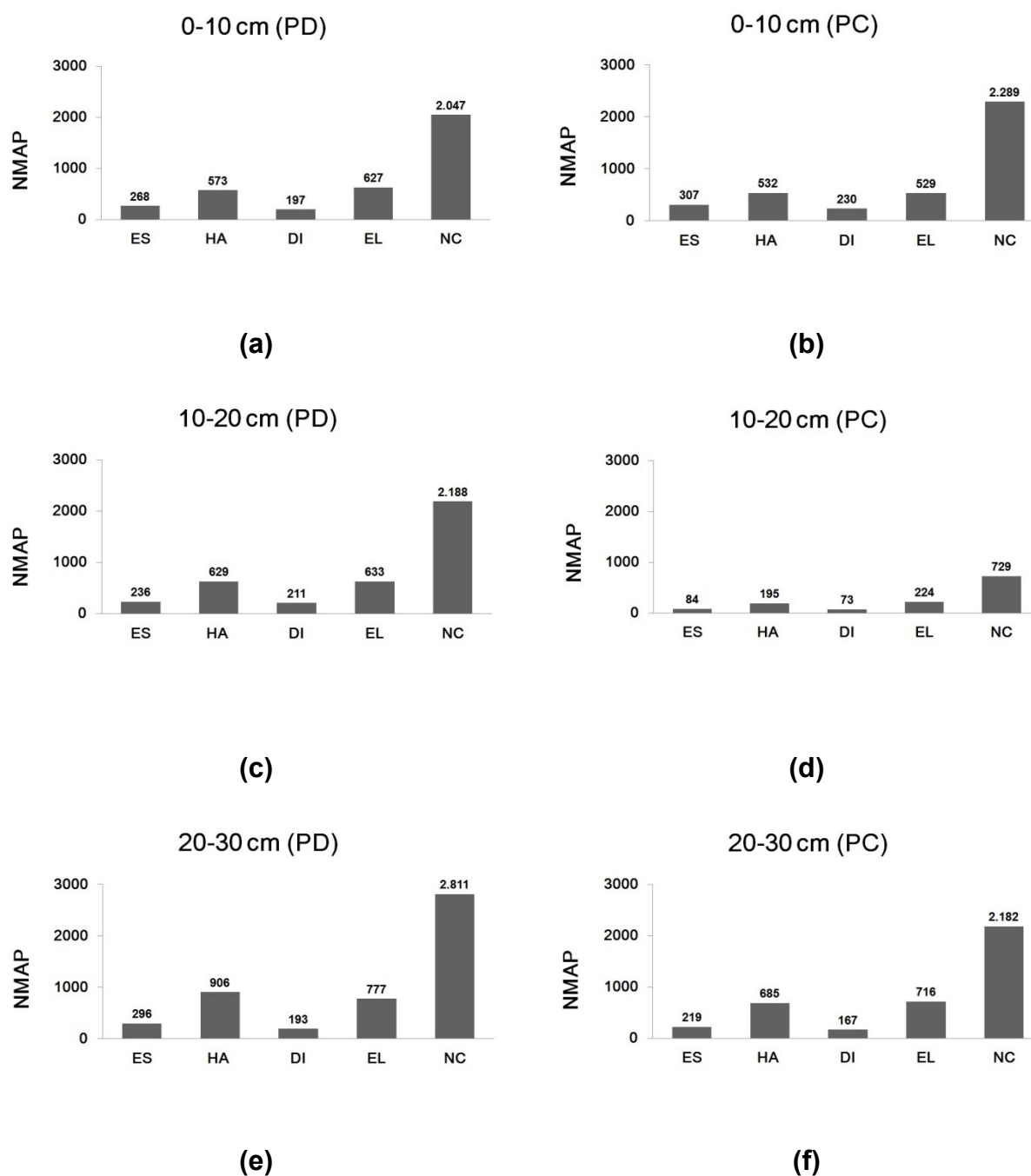
cm (Figuras 32a, c, e). Já para o PC, isso não ocorreu. Observa-se nas Figuras 35b, d e f; uma oscilação nos valores percentuais de macroporosidade em camada para o tipo de macroporo HA. Ou seja, pode-se concluir neste caso, que o sistema de manejo PC modificou a estrutura do solo e conseqüentemente a distribuição deste poro ao longo de seu perfil.

Embora pequena a contribuição para a  $MAP(\%)_M$ , os macroporos do tipo disco (DI) também apresentam uma distribuição irregular dentro das amostras. Para o sistema de manejo PD, a porosidade diminui da superfície (0-10 cm) para a camada intermediária (10-20 cm) e aumenta na camada seguinte (20-30 cm). E para o PC, ocorreu o inverso (Figuras 32b, d, f). Importante salientar que, este tipo de poro (DI), foi o único, dentre todos, que apresentou maior porosidade percentual, quando comparado ao PD (na camada de 10-20 cm) (Figura 32d).

#### **5.6. Macroporos médios (M) – Número de macroporos em função da forma dos macroporos:**

Na figura 33 são apresentados os resultados do número de macroporos (NMAP) por volume de amostra para os macroporos médios (M) em função da sua forma: esferoidal (ES), haste (HA), disco (DI), elipsoidal (EL) e não classificados (NC); para cada uma das camadas coletadas.

Figura 33 – Número de macroporos,(NMAP), por volume de amostra em função da forma dos macroporos médios (M): esferoidal (ES), haste (HA), disco (DI), elipsoidal (EL) e não classificados (NC); para a camada 0-10 cm: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC); para a camada 10-20 cm: (c) Plantio Direto (PD) e (d) Plantio Convencional (PC) e para a camada 20-30 cm: (e) Plantio Direto (PD) e (f) Plantio Convencional (PC).



Em geral o NMAP dentro do solo não acompanha o aumento ou a diminuição da macroporosidade percentual (Figuras 32a, b, c, d, e, f). E isso foi observado para os dois sistemas de manejo e também em todas as camadas, exceto para a classe

de macroporos do tipo NC, o qual continuou sendo predominante nas amostras tanto em NMAP quanto em macroporosidade (%).

Para o PD na camada de 0-10 cm, esta afirmação observa-se claramente, pois a macroporosidade (%) apresentou-se crescente para o tipo ES ao NC (Figura 32a), enquanto que para o NMAP (Figura 33a) isso não ocorreu. Como exemplo pode-se citar: o menor NMAP foi para o macroporo do tipo disco (DI), enquanto que a menor porosidade (%) foi para o do tipo esferoidal (ES). Sendo assim, realizou-se a análise comparativa entre camadas e entre sistemas de manejo.

Nas figura 33a, c, e, o NMAP do tipo ES diminuiu na camada de 10-20 cm comparada à superficial e voltou a aumentar na última camada (20-30 cm). O mesmo ocorreu para o sistema de manejo PC (Figuras 33b, d, f), no entanto as diferenças foram maiores quando comparadas as do PD. Esse comportamento observou-se também para o tipo EL no sistema de manejo PD e no PC; e para os tipos DI e HA sob sistema de manejo PC.

O contrário é observado para os macroporos do tipo DI, o qual sofreu um aumento no NMAP na camada de 10-20 cm e diminui na camada de 20-30 cm para o sistema de manejo PD.

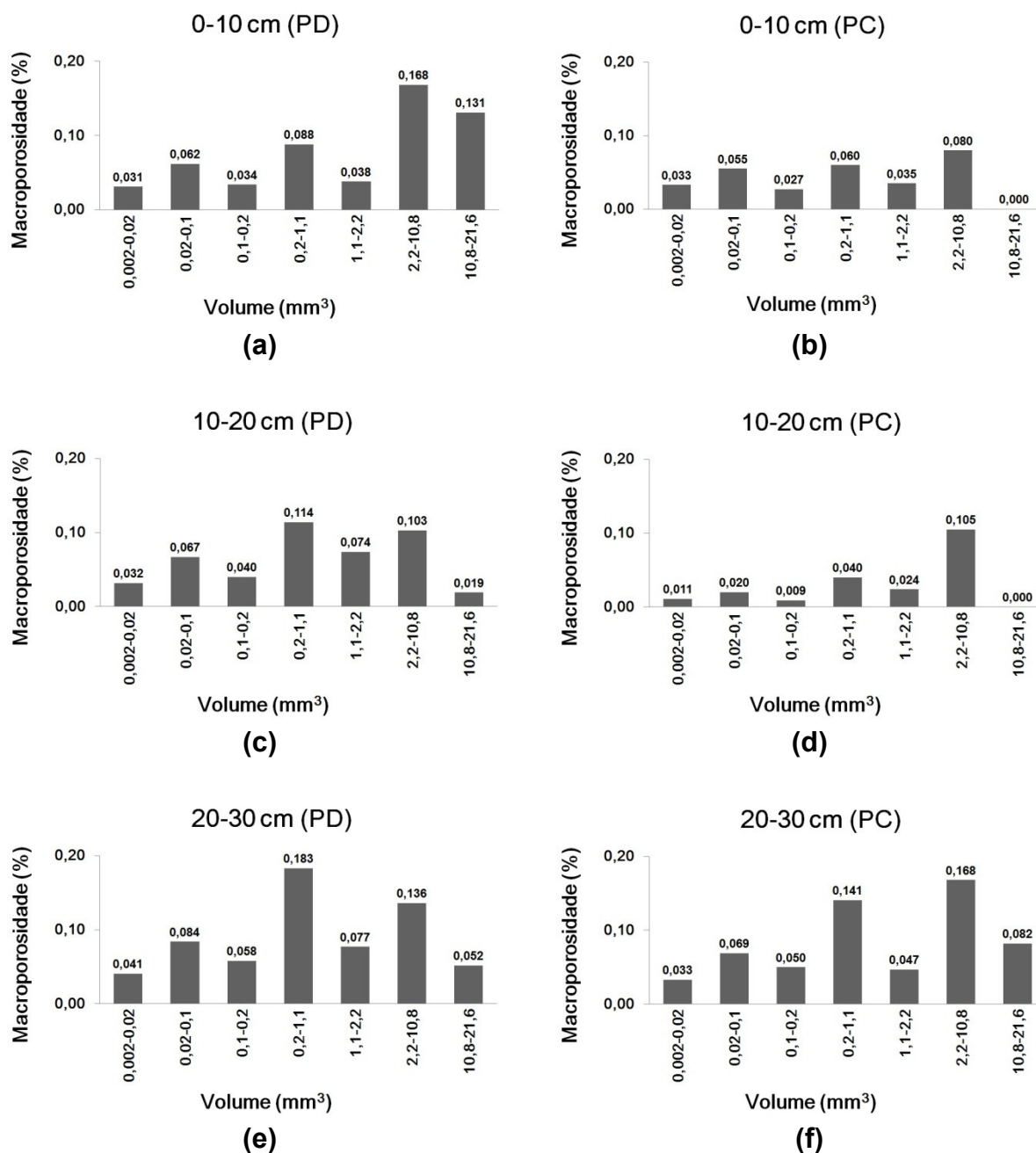
Já o NMAP do tipo HA no PD, apenas aumentou em camada (Figuras 33a, c, e).

No geral, conclui-se por meio destes resultados discordantes, que não há como inferir sobre o que pode acontecer com o NMAP desses tipos de macroporos quando um solo é submetido à sistemas de manejo diferentes. Porém, uma maneira de confirmarmos se isso realmente ocorre, é realizar as análises em um maior número de repetições, visto que foram analisadas apenas uma amostra para cada camada para cada um dos manejos.

#### **5.7. Macroporos médios (M) - Macroporosidade em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos:**

Na figura 34 são apresentados os resultados da macroporosidade,  $MAP(\%)_M$ , por volume de amostra dos macroporos médios (M) em função de seu volume ( $\text{mm}^3$ ) para cada uma das camadas coletadas.

Figura 34 – Macroporosidade percentual,  $MAP(\%)_M$ , por volume de amostra em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos médios (M) para a camada 0-10 cm: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC); para a camada 10-20 cm: (c) Plantio Direto (PD) e (d) Plantio Convencional (PC) e para a camada 20-30 cm: (e) Plantio Direto (PD) e (f) Plantio Convencional (PC).



Para o sistema de manejo PD na camada 0-10 cm a maior contribuição para a macroporosidade dos macroporos médios (M) foi para o intervalo de volume 2,2-10,8  $\text{mm}^3$  (figura 34a). Nas camadas de 10-20 cm e 20-30 cm, a maior contribuição foi para o intervalo de volume 0,2-1,1  $\text{mm}^3$  (Figuras 34c, e).

Para o sistema de manejo PC na camada 0-10 cm a maior contribuição para a macroporosidade dos macroporos médios (M) foi para o mesmo intervalo de volume 2,2-10,8 mm<sup>3</sup>; quando comparado ao sistema de manejo PD na mesma camada (Figura 34a). E este intervalo de volume de macroporo continua sendo o que mais contribui nas camadas de 10-20 cm e 20-30 cm para o PC.

As maiores diferenças apresentadas entre os sistemas de manejo PD e PC, foram para os intervalos de volume de 2,2-10,8 mm<sup>3</sup> e 10,8-21,6 mm<sup>3</sup> (Figuras 34a, b). Observa-se que o maior intervalo (10,8-21,6 mm<sup>3</sup>) desaparece completamente na camada superficial quando submetido ao PC.

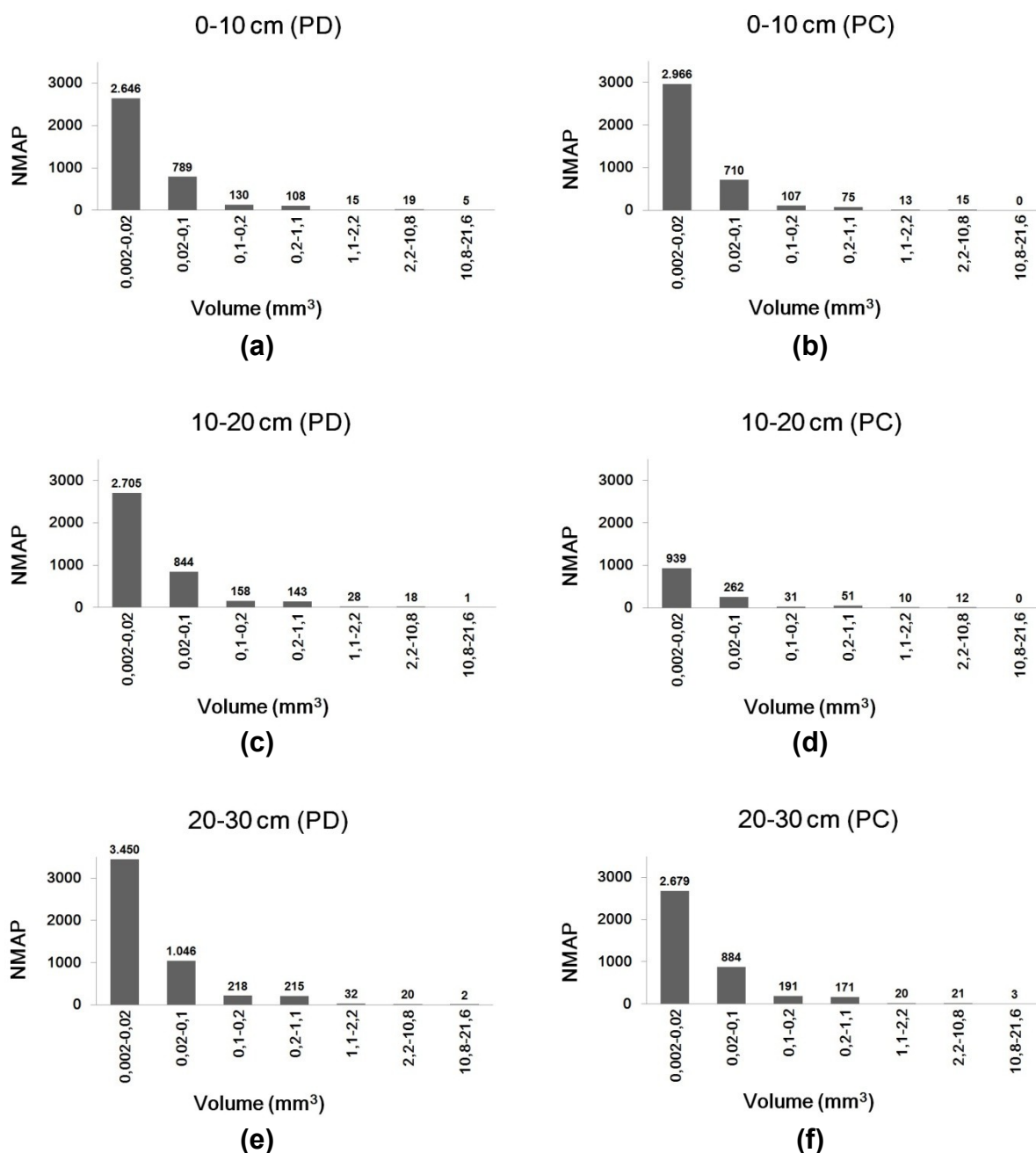
No geral, comparando as camadas de 0-10 cm e 10-20 cm para o PD, a maior diferença ocorre para o intervalo de volume 10,8-21,6 mm<sup>3</sup>, diminuindo de 0,131% para 0,019%. No entanto, este intervalo não desaparece como é o caso do PC, onde esta classe desapareceu logo na superfície e continuou ausente na intermediária (Figura 34d). Sendo assim pode-se inferir que sob o sistema de manejo PD os macroporos com maiores volumes estão presentes ao longo de sua profundidade.

Um ponto interessante foi que, para a camada de 20-30 cm, tanto o PD como o PC, apresentaram poucas diferenças entre todos os intervalos de volume. *A priori* pode-se dizer que em camadas mais profundas, ao longo do perfil do solo, os efeitos dos sistemas de manejo já não mais afetam a distribuição de tamanho de macroporos no solo (Figuras 34e, f).

#### **5.8. Macroporos médios (M) – Número de macroporos em função do volume (mm<sup>3</sup>) dos macroporos:**

Na figura 35 são apresentados os resultados de número de macroporos (NMAP) por volume de amostra para a classe dos macroporos médios (M) em função de seu volume (mm<sup>3</sup>) para cada uma das camadas coletadas.

Figura 35 – Número de macroporos, (NMAP), por volume de amostra em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos médios (M) para a camada 0-10 cm: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC); para a camada 10-20 cm: (c) Plantio Direto (PD) e (d) Plantio Convencional (PC) e para a camada 20-30 cm: (e) Plantio Direto (PD) e (f) Plantio Convencional (PC).



Observa-se um comportamento similar para todos os intervalos de tamanho e em todas as camadas em ambos os sistemas de manejo; exceto pelo fato de que no PD o NMAP é sempre maior (como já foi discutido anteriormente).

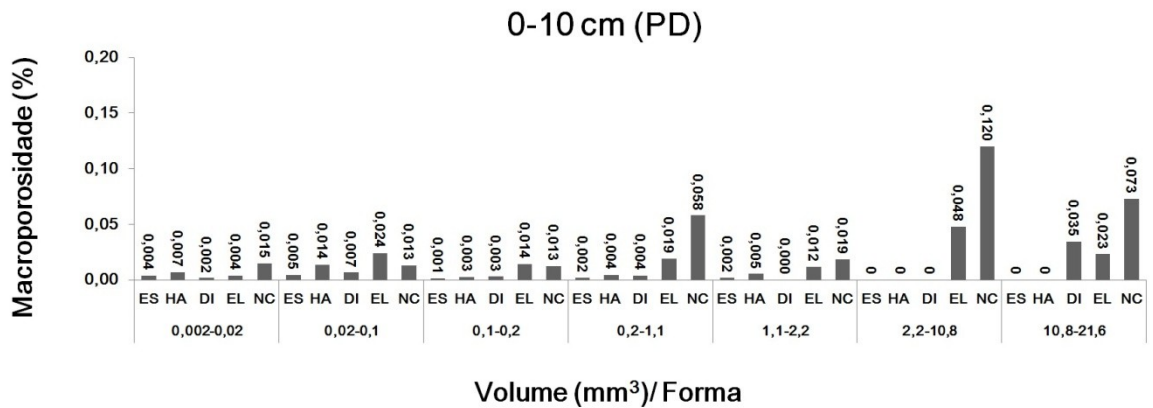
A predominância do NMAP em todas as amostras foi para o intervalo de 0,002-0,02 mm<sup>3</sup> diminuindo em NMAP conforme aumenta o volume do poro. Isso indica que em ambos os sistemas de manejo, macroporos com menor volume estão presentes em maior quantidade ao longo da profundidade do solo. Contudo, não são estes macroporos que contribuem para a maior  $MAP(\%)_M$  dentro das amostras como foi verificado e discutido na Figura 34.

#### 5.9. Macroporos Médios (M) – Macroporosidade em função da forma e do volume (mm<sup>3</sup>) dos macroporos:

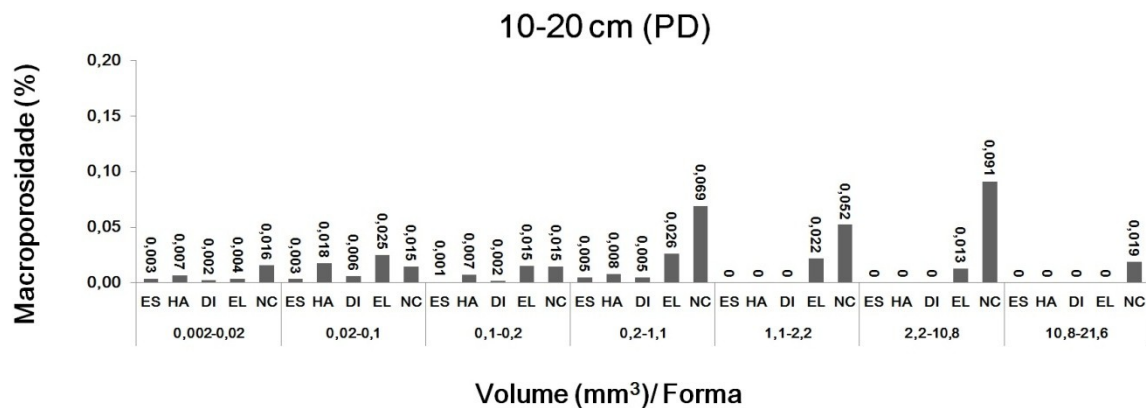
Na figura 36 e 37 são apresentados os resultados de  $MAP(\%)_M$  por volume de amostra para os macroporos médios (M) em função de sua forma e do volume (mm<sup>3</sup>) para cada uma das camadas coletadas para o PD e PC.



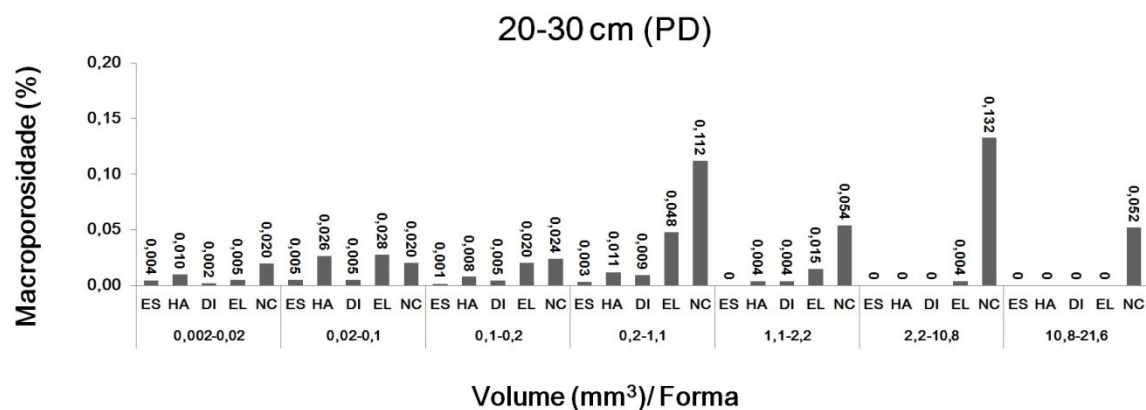
Figura 36 – Macroporosidade percentual,  $MAP(\%)_M$ , por volume de amostra em função da forma e do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos médios (M) para o PD: (a) camada de 0-10 cm, (b) camada de 10-20 cm e (c) camada 20-30 cm.



(a)



(b)



(c)

Na Figura 36a observa-se que a maior contribuição para a macroporosidade continua sendo para os macroporos com volume 2,2-10,8  $\text{mm}^3$  corroborando com os resultados obtidos na Figura 34a. E também os macroporos do tipo NC,

continuam sendo os que mais representam a macroporosidade nas amostras (exceto para alguns intervalos específicos), corroborando com os resultados da Figura 32<sup>a</sup>. Sendo que e os macroporos que menos contribuem para a macroporosidade continuam sendo os macroporos do tipo ES. Os macroporos EL com volume de 0,02 à 1,1mm<sup>3</sup>, foram os que contribuíram com uma macroporosidade maior nesta amostra.

No entanto, pode-se observar (ainda na Figura 36a) que alguns tipos de macroporos como os ES,DI e HA não contribuem para a macroporosidade desta amostra em alguns intervalos de volume, sendo estes: 1,1-2,2 mm<sup>3</sup> (DI); 2,2-10,8 mm<sup>3</sup> (ES, DI e HA) e 10,8-21,6 mm<sup>3</sup> (ES e HA). Analisando a Figura 36b, os tipos de macroporos que não contribuem para a macroporosidade em alguns intervalos de volume são os macroporos ES, HA, DI e EL. Sendo que para os intervalos de 1,1-2,2 mm<sup>3</sup> e de 2,2-10,8 mm<sup>3</sup> os macroporos que não contribuíram foram do tipo ES, HA, DI e no intervalo 10,8-21,6 mm<sup>3</sup> foram os macroporos do tipo ES, HA, DI e EL. Na Figura 36c, os tipos de macroporos que não contribuem para a macroporosidade em alguns intervalos de volume são os mesmos da camada de 10-20 cm. Porém com algumas diferenças para alguns intervalos de volumes, sendo que para o intervalo de 1,1-2,2 mm<sup>3</sup> os macroporos que não contribuíram foram os do tipo ES e para os intervalos de 2,2-10,8 mm<sup>3</sup> e de 10,8-21,6 mm<sup>3</sup> foram os mesmos tipos de macroporos iguais os da camada de 10-20 cm; indicando que estes não se alteram em camada para os sistema de manejo PD.

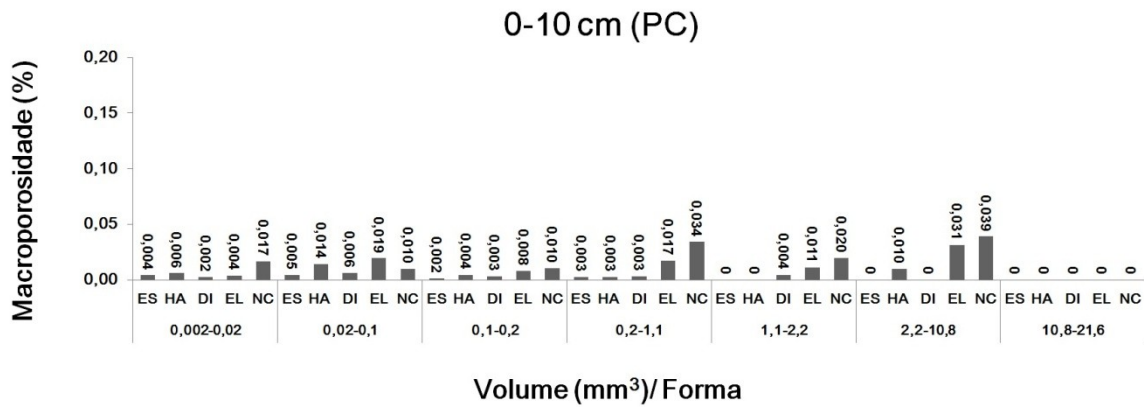
No geral, pode-se inferir com estes resultados que macroporos com volumes maiores nos formatos ES, DI, HA e EL deixam de contribuir para a macroporosidade, além disso, quanto maior o volume do macroporo, mais ele tende a ser classificado como NC. Isso justifica o fato de não termos realizado análises quantitativas quanto à forma dos macroporos grandes (G).

No caso do PC (Figura 37b), os mesmos tipos de macroporos não contribuem para a macroporosidade, nos mesmos intervalos de volume se comparado com o PD para a mesma camada. No entanto, para o intervalo de 10,8-21,6 mm<sup>3</sup> nenhum dos tipos de macroporos contribui para a macroporosidade, o que corrobora com a figura 34b e 32b.

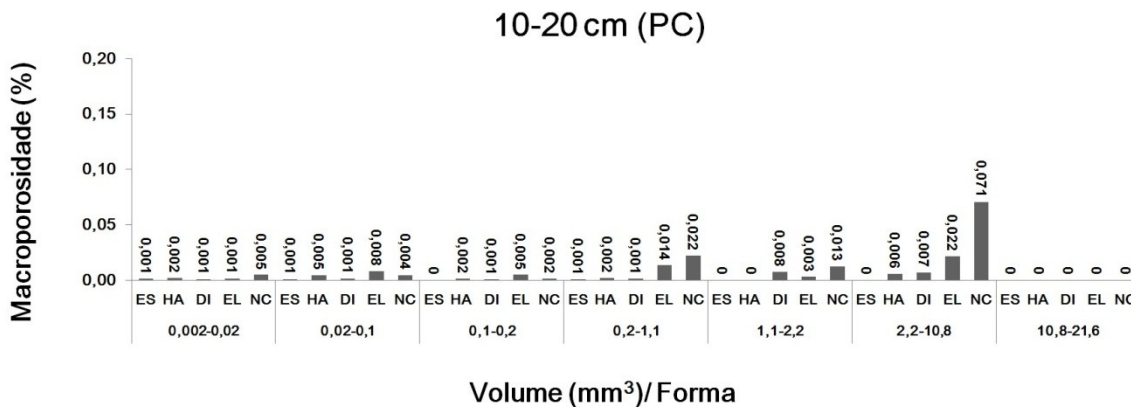
Na Figura 37b alguns tipos de macroporos já não contribuem para a macroporosidade a partir do intervalo de volume 0,1-0,2 mm<sup>3</sup> como é o caso dos macroporos tipo ES e DI.

As Figuras 36c e 37c corroboram fortemente com os resultados apresentados e já discutidos nas Figuras 34e,f.

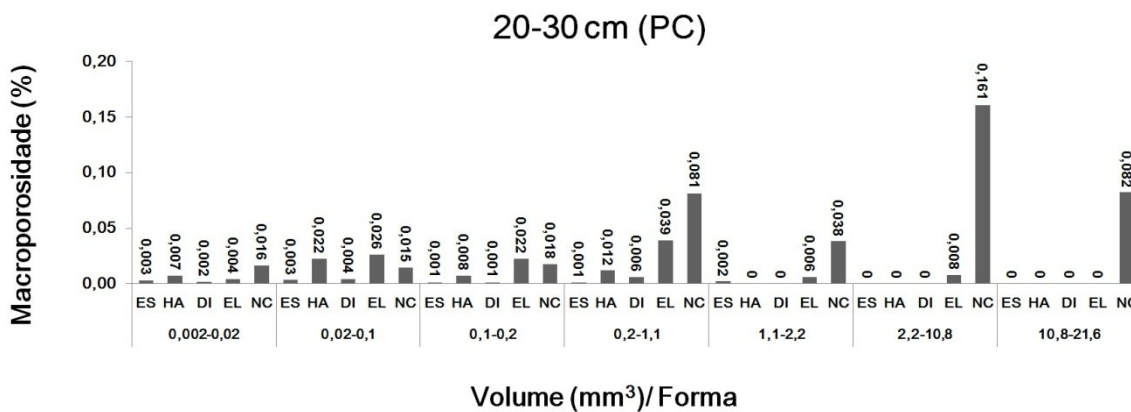
Figura 37 – Macroporosidade percentual,  $MAP(\%)_M$ , por volume de amostra em função da forma e do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos médios (M) para o PC: (a) camada de 0-10 cm, (b) camada de 10-20 cm e (c) camada 20-30 cm.



(a)



(b)

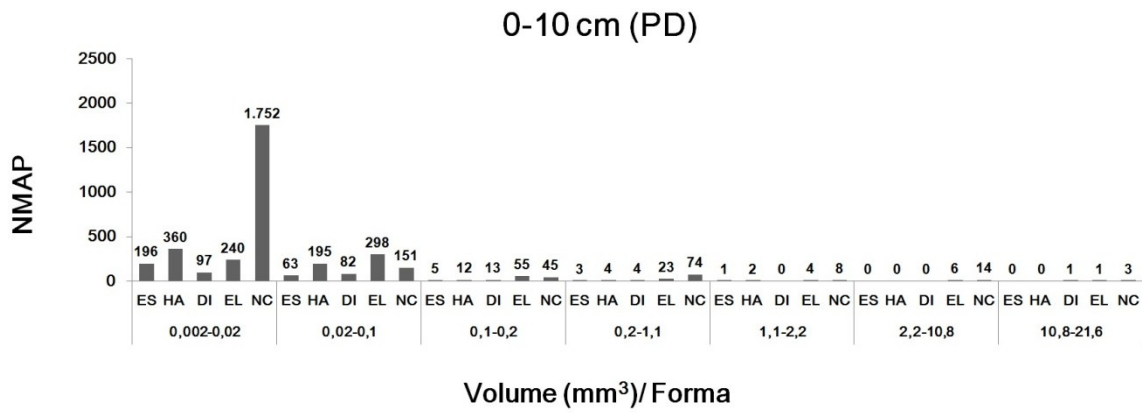


(c)

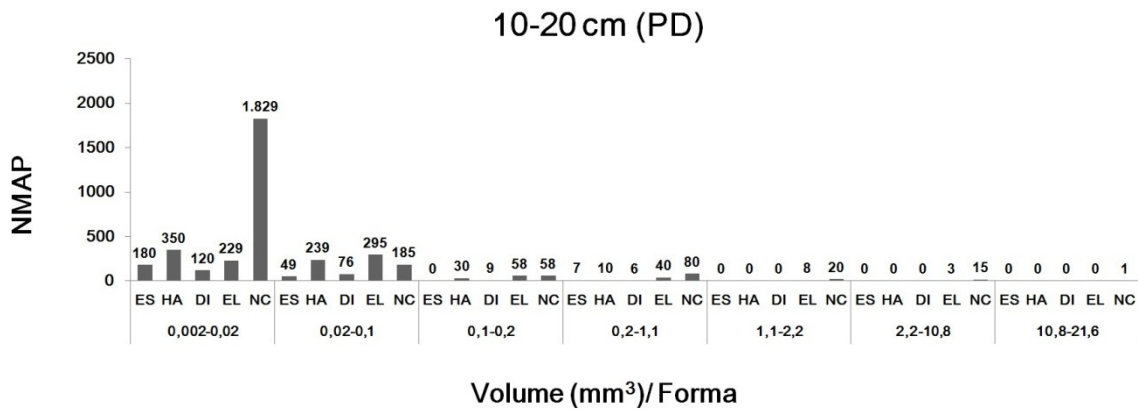
#### **5.10. Macroporos Médios (M) – Número de Macroporos em função da forma e do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos:**

Na figura 38 e 39 são apresentados os resultados do número de macroporos (NMAP) por volume de amostra para os macroporos médios (M) em função de sua forma e do volume ( $\text{mm}^3$ ) para cada uma das camadas para o PD e PC.

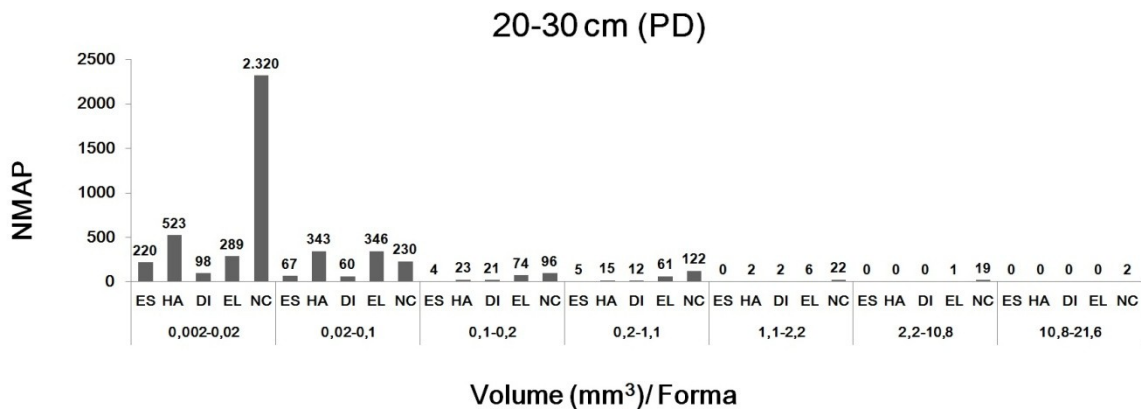
Figura 38 – Número de macroporos, NMAP, por volume de amostra em função da forma e do volume (mm<sup>3</sup>) dos macroporos médios para o PD: (a) camada de 0-10 cm, (b) camada de 10-20 cm e (c) camada 20-30 cm.



(a)

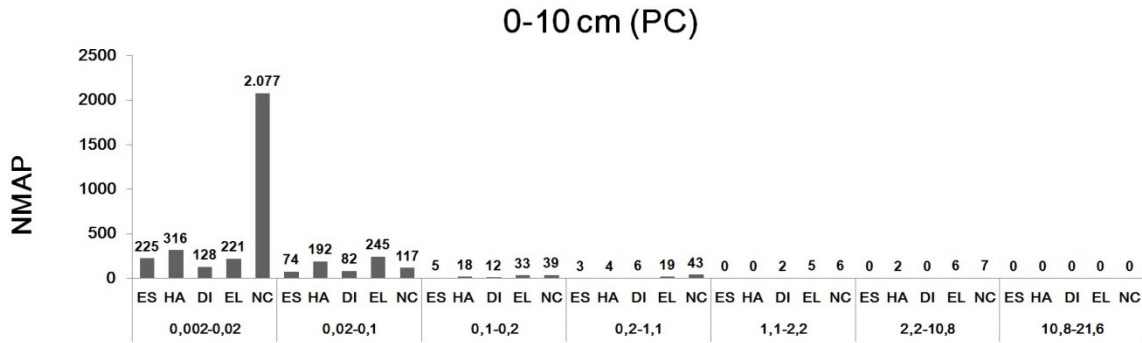


(b)



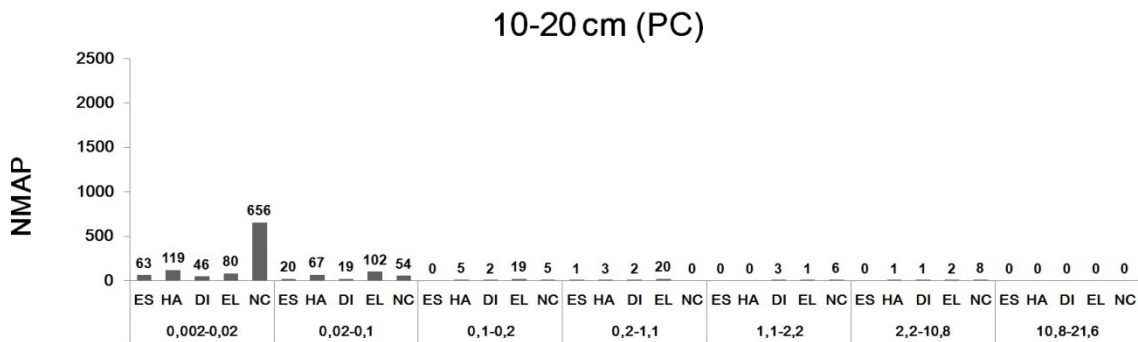
(c)

Figura 39 – Número de macroporos, NMAP, por volume de amostra em função da forma e do volume (mm<sup>3</sup>) dos macroporos médios para o PC: (a) camada de 0-10 cm, (b) camada de 10-20 cm e (c) camada 20-30 cm.



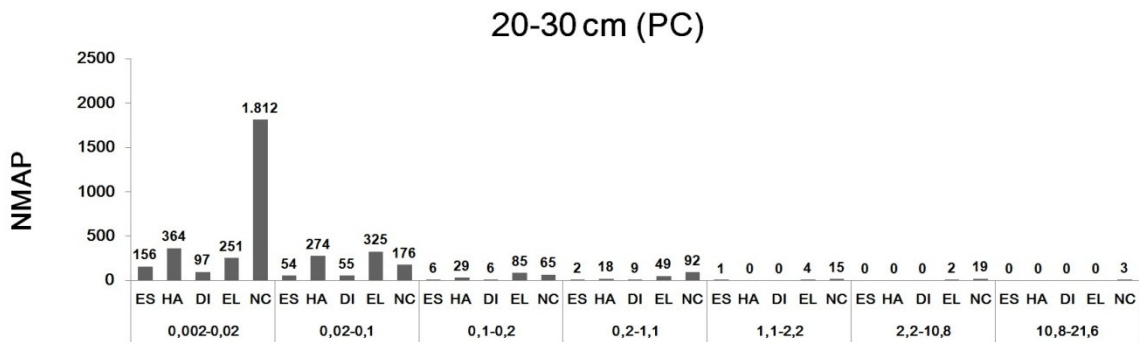
Volume (mm<sup>3</sup>)/ Forma

(a)



Volume (mm<sup>3</sup>)/ Forma

(b)



Volume (mm<sup>3</sup>)/ Forma

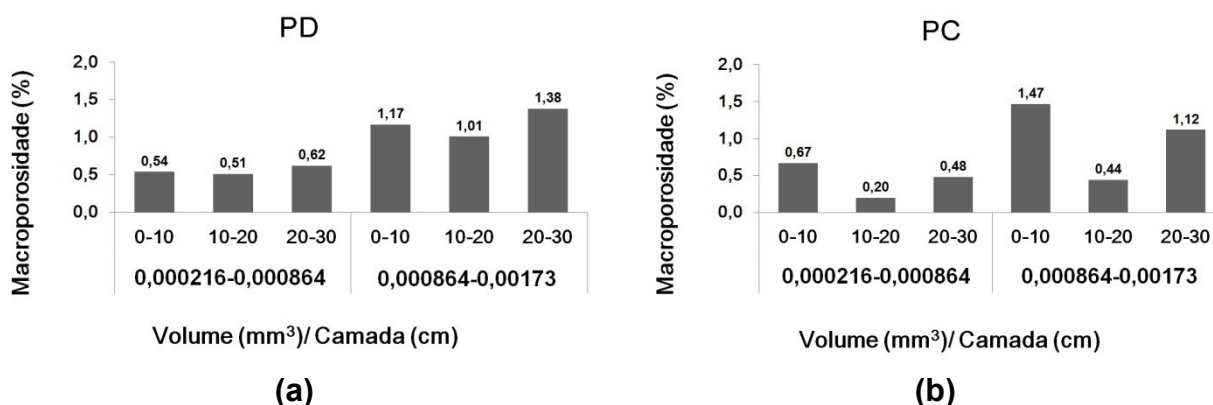
(c)

Observa-se nas Figuras 38a, b e na 39a, b e c que os resultados de NMAP por volume amostral em função do formato e do volume dos macroporos médios corroboram com àqueles analisados e discutidos na Figuras 35 e 33.

### 5.11. Macroporos Pequenos (P) – Macroporosidade em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos:

Na figura 40 são apresentados os resultados de  $MAP(\%)_P$  por volume de amostra para os macroporos pequenos (P) em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos para cada uma das camadas.

Figura 40 – Macroporosidade percentual,  $MAP(\%)_P$ , por volume de amostra em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos pequenos (P) para as camadas 0-10 cm; 10-20 cm e 20-30 cm sendo em: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC).



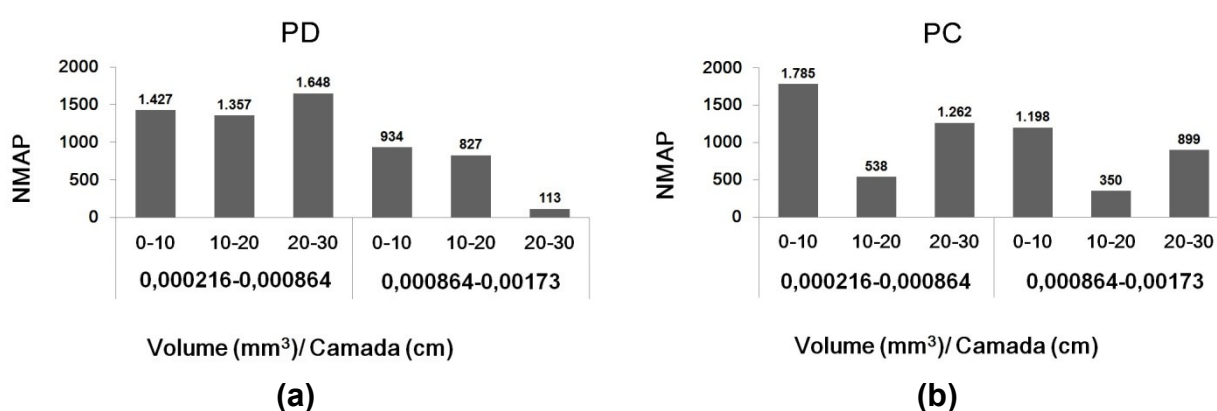
Os macroporos pequenos (P) com intervalo de volume  $0-8,64 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  e  $0-8,64 \times 10^{-3}-1,7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  contribuíram com valores de macroporosidade similares ao longo das camadas no sistema de manejo PD (Figura 40a). O que não ocorreu com os macroporos de mesmo volume para o PC.

Para o PD a  $\overline{MAP}(\%)_{0,000216-0,000864}$  foi de 0,56% e de  $MAP(\%)_{0,000864-0,00173}$  foi de 1,19% (Figura 41a). Para o PC a  $\overline{MAP}(\%)_{0,000216-0,000864}$  foi de 0,45% e de  $\overline{MAP}(\%)_{0,000864-0,00173}$  foi de 1,01% (Figura 41b). A  $DR(\%)$  entre os valores médios dos sistemas de manejo para o volume  $\overline{MAP}(\%)_{0,000216-0,000864}$  foi de 19,6% (para menos) comparado ao PD e de 15,1% ( $\overline{MAP}(\%)_{0,000216-0,000864}$ ) também para menos comparado ao PD.

### 5.12. Macroporos Pequenos (P) – Número de macroporos em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos:

Na figura 41 são apresentados os resultados do número de macroporos por volume de amostra para os macroporos pequenos (P) em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos para cada uma das camadas.

Figura 41 - Número de macroporos, NMAP, por volume de amostra em função do volume ( $\text{mm}^3$ ) dos macroporos pequenos (P) para as camadas 0-10 cm; 10-20 cm e 20-30 cm: (a) Plantio Direto (PD) e (b) Plantio Convencional (PC).



No sistema de manejo PD (Figura 41a) o NMAP é maior em todas as camadas para o intervalo de volume de  $0,000216$  à  $0,000864 \text{ mm}^3$ . Intervalos de volume que representam um maior volume no solo tendem a diminuir com a profundidade, como pode ser observado na camada de 20-30 cm.

No sistema de manejo PC (Figura 41b) o NMAP oscila em camada para cada um dos intervalos de volume, ou seja, pode-se inferir que ocorre uma reorganização na estrutura do solo, a qual modifica o sistema poroso do solo.

Para o PD a  $\overline{NMAP}_{0,000216-0,000864}$  foi de 1.477 macroporos pequenos (P) e de  $\overline{NMAP}_{0,000864-0,00173}$  foi de 628 macroporos pequenos (Figura 41a). Para o PC a  $\overline{NMAP}_{0,000216-0,000864}$  foi de 1.195 macroporos pequenos e de  $\overline{NMAP}_{0,000864-0,00173}$  foi de 816 macroporos (Figura 41b). A  $DR(\%)$  entre os valores médios dos sistemas de manejo para o volume  $\overline{NMAP}_{0,000216-0,000864}$  foi de 19,1% (para menos) comparado ao PD, que corrobora com a diferença relativa obtida para a macroporosidade para este e de 30 % ( $\overline{MAP}(\%)_{0,000216-0,000864}$ ) para mais

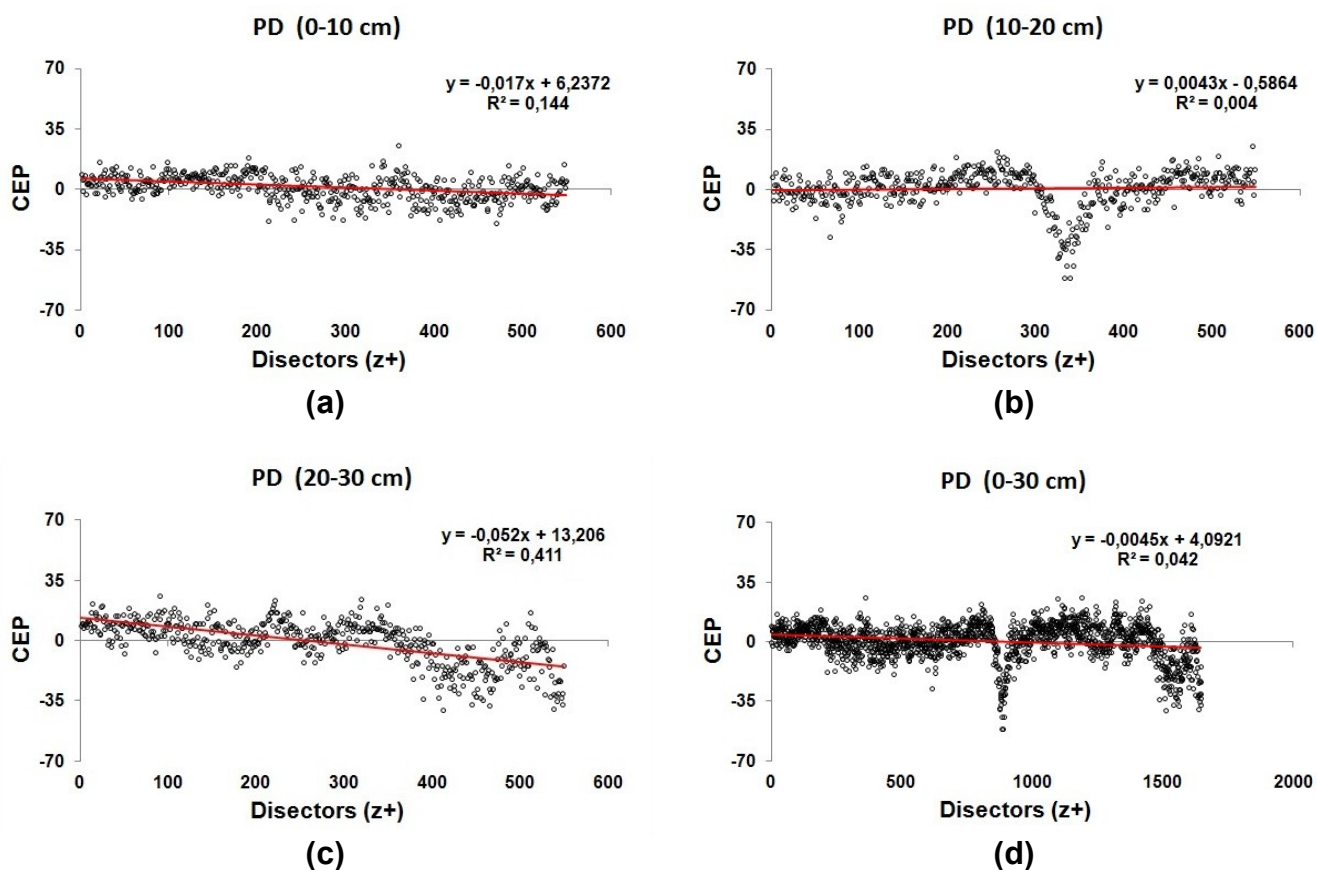


comparado ao PD, ao contrário do que foi obtido para a macroporosidade para este intervalo de volume.

### 5.13. Conectividade do Sistema Poroso do Solo

Na sequência são apresentados os valores da Característica de Euler-Poincaré (CEP), a qual estima a conectividade dos poros (pontos pretos vazados), para cada *disector* (par de imagens contínuas) obtidos na direção  $z^+$ , isto é, na direção da obtenção das imagens microtomográficas.

Figura 42 – Valores da Característica de Euler-Poincaré (CEP) em função dos *disectors* ( $z^+$ ) para o sistema de manejo Plantio Direto (PD), nas camadas de (a) 0-10 cm; (b) 10-20 cm, (c) 20-30 cm e (d) 0-30 cm.



Cada *disector* fornece um valor de CEP e os valores médios das CEPs por volume analisado foram de 1,5564 (0-10 cm); 0,5911 (10-20 cm) e -1,0874 (20-30 cm) indicando maior conectividade para esta última camada (menor valor)(Figura 42c), que corrobora com a Figura 44c. Como as amostras para o PD possuem o

mesmo volume e os valores médios das CEPs são obtidos por volume de amostra, não ocorrem alterações na análise final da conectividade. Os valores médios das CEPs por volume foram de  $2,6737 \times 10^{-5} / \text{mm}^3$  (0-10 cm);  $1,0154 \times 10^{-5} / \text{mm}^3$  (10-20 cm) e  $-1,8680 \times 10^{-5} / \text{mm}^3$  (20-30 cm), ou seja, o menor valor continua sendo para a camada de 20-30 cm.

O conjunto dos menores valores da CEP representa uma melhor conectividade do espaço poroso analisado como um todo (não isoladamente, ou em função de *disectors* locais); e isso observa-se na camada 20-30 cm (Figura 42c e 44c), corroborando para a análise anterior. Observa-se que para o PD, o volume amostral inicia com uma conectividade de poros um pouco baixa (números positivos), aumentando em profundidade (sentido positivo do eixo z+). Já a camada de 10-20 cm (Figura 42b e 44b) possui uma conectividade homogênea de poros ao longo da amostra (+z). A camada de 0-10 cm (Figura 42a e 44a) apresenta um pequeno aumento na conectividade quando comparado com o aumento que a camada de 20-30 cm apresentou.

A Figura 42d é resultado da junção das três camadas (0-30 cm) onde o coeficiente de determinação praticamente nulo ( $R^2=0,042$ ) indica o quanto o espaço poroso para o PD é homogêneo e com boa conectividade ao longo da profundidade, principalmente se comparada ao PC (Figura 43d).

Para o PC (Figura 43), os valores médios das CEPs foram de 8,0537 (0-10 cm); 3,4735 (10-20 cm) e 7,9756 (20-30 cm)<sup>1</sup>. Neste caso, houve alteração no volume da amostra referentes à camada de (20-30 cm), portanto, os valores médios das CEPs por volume de amostra foram de  $1,3835 \times 10^{-4} / \text{mm}^3$  (0-10 cm);  $5,9671 \times 10^{-5} / \text{mm}^3$  (10-20 cm) e  $1,5376 \times 10^{-4} / \text{mm}^3$  (20-30 cm); onde o menor valor médio de CEP/ $\text{mm}^3$  foi para a camada superficial, indicando uma melhor conectividade nesta camada quando comparada às demais.

Neste sistema de manejo observou-se que para todas as camadas o sistema poroso apresenta baixa conectividade, pois o conjunto de valores da para as CEPs resultaram em valores positivos (acima de zero). No entanto a camada de 10-20 cm (Figura 43b) apresentou uma conectividade muito abaixo quando comparada às demais camadas. Isso pode ser corroborado na Figura 44e e com os resultados de baixa porosidade para esta camada.

<sup>1</sup> Para esta amostra o número de imagens analisadas foi reduzido, resultando em um volume amostral de  $5,1874 \times 10^4 \text{mm}^3$  (redução de 10,9% comparado ao volume padrão adotado. Isto foi necessário, devido a presença de ruídos causados na microtomografia.

Por outro lado, quando comparados os valores das CEPs para os dois sistemas de manejos, observou-se que o PD (Figuras 43a, b, c) apresentou maior conectividade do que o PC (Figuras 44d, e, f), corroborando com os valores obtidos de porosidade (%) por volume amostral, os quais foram maiores para o PD nas três camadas, e menores para o PC (Figura 28).

Em uma perspectiva bidimensional, segundo Souza et al. (2006), poros arredondados significam baixa conectividade, enquanto que poros do tipo complexos indicam maior conectividade do sistema poroso. Neste contexto, em uma perspectiva tridimensional, pode-se corroborar os resultados de baixa conectividade apresentado pelo sistema de manejo PC, pois os poros do tipo NC aparecem em menor proporção quando comparados ao PD nas camadas e 10-30 cm (Figuras 32 e 33).

Figura 43 – Valores da Característica de Euler-Poincaré (CEP) em função dos *disectors* ( $z^+$ ) para o sistema de manejo Plantio Convencional (PC), nas camadas de (a) 0-10 cm; (b) 10-20 cm, (c) 20-30 cm e (d) 0-30 cm.

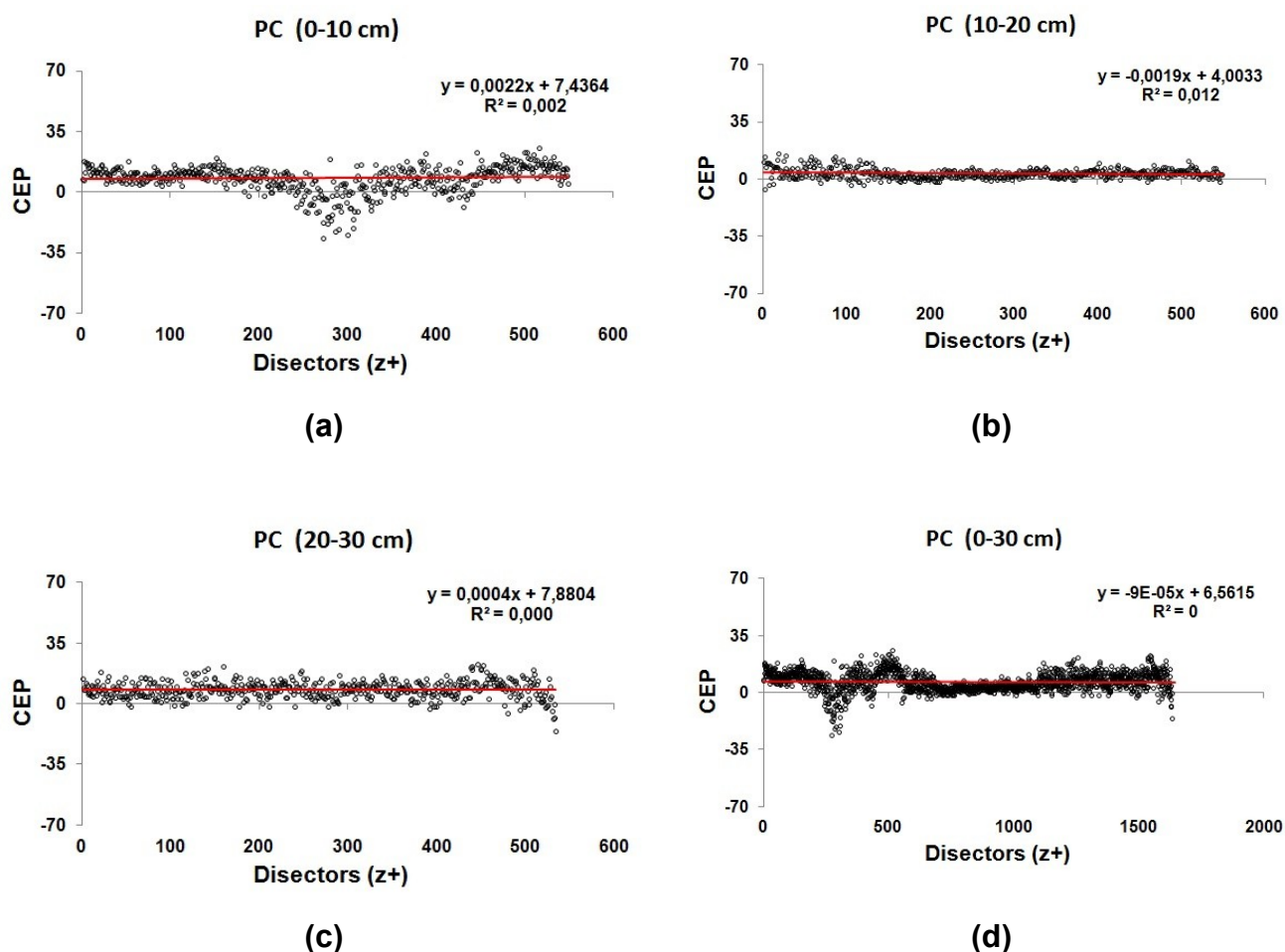
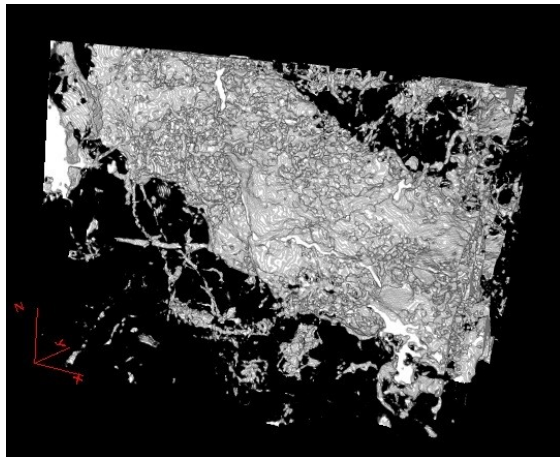
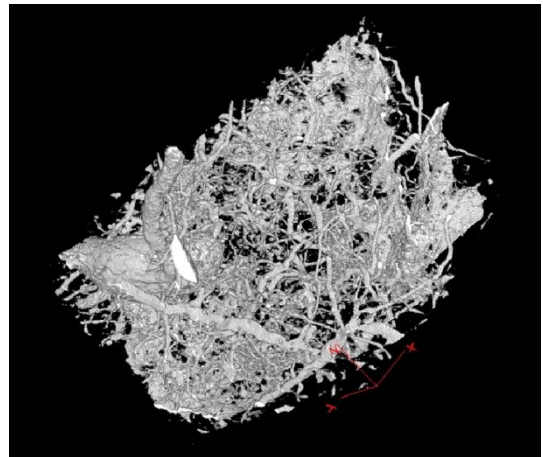


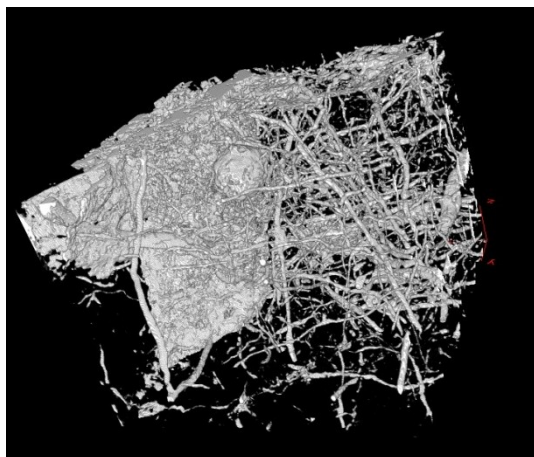
Figura 44 – Imagens microtomográficas 3D onde o sistema poros está representado na cor branca. Para o PD observa-se que em todas as camadas a porosidade é maior comparada ao PC. (a) 0-10 cm (PD); (b) 10-20 cm (PD), (c) 20-30 cm (PD), (d) 0-10 cm (PC); (e) 10-20 cm (PC) e (f) 20-30 cm (PC).



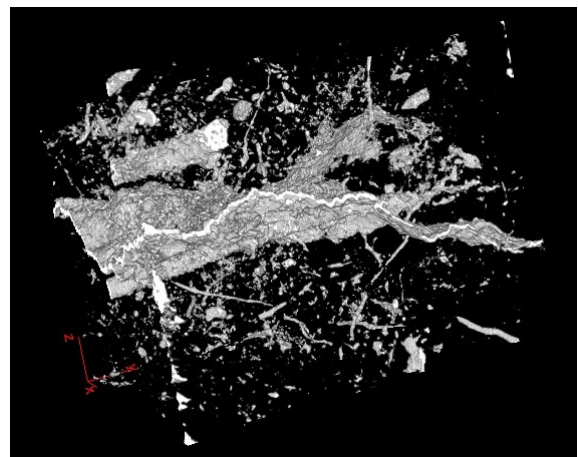
(a)



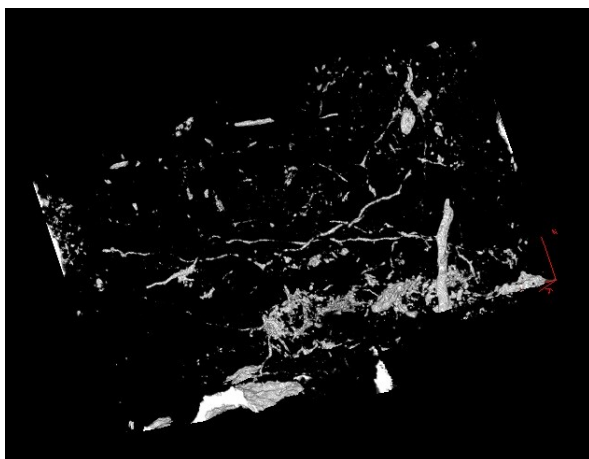
(b)



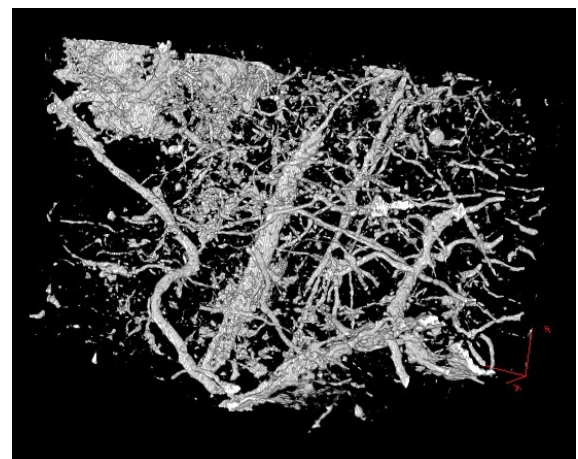
(c)



(d)



(e)



(f)

#### 5.14. Tortuosidade do Sistema Poroso do Solo

Na Tabela 6 são apresentados os valores da tortuosidade ( $\tau$ ), a qual indica o quão sinuoso são os poros nas amostras de solo, nas direções x+, x-, y+, y-, z+ e z-; para os diferentes sistemas de manejo.

Tabela 6 – Valores da tortuosidade  $\tau$  nas seis direções (x+, x-, y+, y-, z+ e z-); para os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC), nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm.

Amostra	$\tau_{x+}$	$\tau_{x-}$	$\tau_{y+}$	$\tau_{y-}$	$\tau_{z+}$	$\tau_{z-}$
PD (0-10 cm)	1,6496	1,4976	1,5457	1,7238	2,6345	2,4121
PD (10-20 cm)	2,2860	2,1073	1,4468	2,3118	1,5503	2,2183
PD (20-30 cm)	1,9715	2,4213	1,3559	1,3470	1,1746	1,5103
PC (0-10 cm)	1,3238	1,3276	1,3514	1,2811	1,4583	2,1021
PC (10-20 cm)	1,3466	1,9377	2,1550	1,1179	1,4157	1,7535
PC (20-30 cm)	2,6751	1,9000	1,0911	2,2541	3,1972	2,3628

Observa-se na Tabela 6 que os valores de tortuosidade são diferentes, mesmo sendo observados em uma mesma direção (e em sentidos diferentes), para uma mesma amostra. Sendo que isso ocorreu em todas as amostras. Isto é detectado pelo processo de reconstrução geodésica (RG), pois o algoritmo reconstrói alguns poros em cada um dos sentidos, os quais dependem que a conectividade ocorra da primeira até a última fatia. A estrutura do sistema poroso do solo também pode influenciar nos diferentes valores de tortuosidade, pois podem apresentar maior ou menor número de discos ou filamentos na direção de propagação do plano varredor.

Em geral, quanto menor os valores de tortuosidade em uma dada direção, melhor será a conectividade. No entanto, a conectividade foi obtida apenas na direção z+ (em camada 0-30 cm) ao longo de toda a amostra (e para todas as amostras). Como não se tinham os valores da tortuosidade para a camada de 0-30 cm para ambos os sistemas de manejo; realizou-se a média dos valores de tortuosidades das três camadas na direção z+ onde se obtém um valor de tortuosidade também nesta direção e na camada correspondente. Sendo assim, para o sistema de manejo PD ( $\tau_{z+}=1,7864$ ) e para o PC ( $\tau_{z+}=2,0237$ ). Sendo assim,

como o valor da tortuosidade para o PD é menor que para o PC, o sistema poroso do solo sob manejo PD é possui melhor conectividade que o manejo PC.

Tabela 7– Valores dos Desvios de Tortuosidade Direcional (DTD) nas três direções x, y e z; para os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC), nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm.

<b>Amostra</b>	<b>DTD (x)</b>	<b>DTD (y)</b>	<b>DTD (z)</b>
PD (0-10 cm)	0,152	0,178	0,222
PD (10-20 cm)	0,179	0,865	0,668
PD (20-30 cm)	0,449	0,009	0,336
PC (0-10 cm)	0,004	0,070	0,644
PC (10-20 cm)	0,591	1,037	0,338
PC (20-30 cm)	0,775	1,163	0,834

Os diferentes valores dos DTDs (Tabela 7) em todas as direções, para todas as amostras, indicam uma distribuição dos poros no solo do tipo anisotrópica, isto significa que a rede de poros está distribuída de forma não homogênea nas três direções: transversalmente (x, y) e em profundidade (z).

No entanto, menores valores de DTD indicam que o sistema tende a se alinhar em uma direção preferencial. Sendo assim, observou-se que para o PD nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, os poros tendem a se alinhar na direção x; e para a camada de 20-30 cm, os poros tendem a se alinhar na direção y (menor valor de DTD = 0,009 entre todas as amostras), ou seja, tendem a se alinhar apenas na direção transversal do volume amostral.

Para o sistema de PC nas camadas de 0-10 cm e 20-30 cm, a tendência de alinhamento dos poros é na direção x, ao contrário da camada 10-20 cm na qual os poros tendem a se alinhar na direção z.

No geral, para ambos os sistemas de manejo (exceto a camada de 10-20 cm para o PC), devido às direções preferenciais serem transversais, podemos inferir que durante a infiltração de água no solo deverá ocorrer um escoamento mais uniforme lateralmente do que em profundidade ao longo do perfil de solo analisado.

Contudo, uma maior anisotropia na direção de profundidade permite um maior espalhamento de fluidos, sem que estes permaneçam totalmente concentrados a poros tubulares (gargantas), como é o caso da camada 10-20 cm para o sistema de manejo PC.

Valores baixos de DTDs nas amostras sob o sistema de manejo PD inferem boa conectividade, isso pode ser observado comparando com os resultados de conectividade obtidos para o PD. Por outro lado, valores elevados de DTDs para o sistema de manejo PC, indicam pouca conectividade, que corrobora com os valores encontrados de DTDs e CEPs em função dos *disectors*. A baixa conectividade ocorre devido às grandes distâncias geodésicas oriundas da existência de grande quantidade da fase sólida entre os poros.

## CAPÍTULO 6

### 6. CONCLUSÕES

- 1) A técnica de microtomografia de raios X permitiu a caracterização micromorfológica do sistema poroso de um Latossolo Vermelho distrófico, submetido aos manejos de Plantio Direto e Plantio Convencional.
- 2) Por meio de análises de imagens microtomográficas foram identificadas e as mudanças microestruturais decorrentes do tipo de manejo adotado em algumas classes de poros, tanto em forma quanto em tamanho.
- 3) Os algoritmos desenvolvidos especificamente para análise de porosidade e tortuosidade permitiu uma boa estimativa das propriedades inerentes do sistema poroso do solo como: conectividade e tortuosidade.
- 4) Por meio da metodologia adotada no processo de tratamento e segmentação das imagens microtomográficas foi possível caracterizar o sistema poroso do solo, o qual mostrou-se eficaz para a caracterização micromorfológicas que definem a estrutura do solo. Esta metodologia permitiu a obtenção do melhor valor para o *threshold*, tanto para os poros quanto para a fase sólida, de modo que, representou a micromorfologia dos poros o mais próximo do real possível.



## CAPÍTULO 7

### 7. SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

- 1) Verificar se diferentes métodos de coleta de amostra de solo, para análise microtomográfica, causam modificações significativas na estrutura do solo;
- 2) Analisar a viabilidade de análise multifractal para caracterização da distribuição de poros do solo via análise microtomográfica;
- 3) Criação de um banco de dados para análise de propriedades micromorfológicas de diferentes solos da região dos Campos Gerias via análise microtomográfica.
- 4) Verificação de novos parâmetros baseados em resultados de saída do programa *ImageJ* para caracterização da estrutura do solo;
- 5) Caracterização da estrutura do solo usando índices de conectividade e tortuosidade;
- 6) Comparar resultados de micromorfologia do sistema poroso em diferentes resoluções.

## REFERÊNCIAS

- AHUJA, L. R.; NANEY, J. W.; GREEN, R. E. e NIELSEN, D. R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Science Society of America Journal*, v.48, p.699-702, 1984.
- ALLETTO, L. e COQUET, Y. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. *Geoderma*, Amsterdam, v.152, p.85-94, 2009.
- ALBUQUERQUE, M. P., e ALBUQUERQUE, M. P. Processamento de imagens: métodos e análises. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas MCT, 2000.
- ALLAIRE-LEUNG, S. E.; GUPTA, S. C. e MONCREIF, J. F. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: I. Macropore continuity. *Journal of Contaminant Hydrology*, v.41, p.283-301, 2000.
- AL-RAOUSH, R. I. e WILLSON, C. S. Extraction of physically realistic pore network properties from three-dimensional synchrotron X-ray microtomography images of unconsolidated porous media systems. *Journal of Hydrology*, v.300, p.44-64, 2005.
- ALVES, H. D. L. Análise de porosidade de sedimentos geológicos usando a técnica de microtomografia computadorizada. 2012. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear - COOPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ANDERSON, J. L. e BOUMA, J. Relationships between saturated hydraulic conductivity and morphometric data of an argillic horizon. *Soil Science Society American Proceedings*, v.37, p.408-413, 1973.
- ARAÚJO, A. Tomografia Computadorizada – Princípios e Físicos e Aplicações, Corpus, 2006.
- ASSIS, R. L. e LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distrófico sob sistema de plantio direto, preparo convencional e mata nativa. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v.29, p.515-522, 2005.
- BAMBERG, A. L.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S., TIMM, L. C., PINTO, L. F. S; LIMA, A. C. R. e SILVA, T. R. Densidade de um planossolo sob sistemas de manejo

avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.33, p.1079-1086, 2009.

BAVEYE, P.; ROGASKI, H.; WENDROTH, O.; ONASCH, I. e CRAWFORD, J. W. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: Simulation with x-ray tomography data. Measurement Science and Technology, Bristol, v.13, p.775-78, 2002.

BERING, S. B. e dos SANTOS, H. G. Mapa de solos do Estado do Paraná: *legenda atualizada*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Colombo: Embrapa Florestas; Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 2008, p.74.

BERTOL, I.; COGO, N.P. e LEVIEN, R. Cobertura morta e métodos de preparo do solo na erosão hídrica em solo com crosta superficial. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.13, p.373-9, 1989.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D. e BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetado pelo tipo de manejo do solo. Scientia Agrícola, v.58, p.555-560, 2001.

BORGES, F. S.; PIRES, L. F e PASSONI, S. Comparação da porosidade de amostras de solo usando análise de imagens por *softwares* livre e comercial. Anais do Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação (CICPG), Florianópolis, 2010.

BORGES, J. R. e PIRES, L.F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. Soil & Tillage Research, v.123, p.43-49, 2012.

BORKOWSKI, A. K. Análise de curvas de retenção e de distribuição de poros de um Latossolo Vermelho distrófico submetidos aos sistemas de plantio convencional e direto. 2009. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciências/ Física), Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná.

BOUMA, J.; JONGERIUS, A.; BOERSMA, O.H.; JAGER, A. e SCHOONDERBEEK, D. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. Soil Science Society of America Journal, v.41, p.945-950, 1977.

BOUMA, J.; JONGERIUS, A. e SCHOONDERBEEK, D. Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay soils using micromorphometric data. *Soil Science Society of America Journal*, v.43, p.261-264, 1979.

BRANDÃO, V. S.; SILVA da D. D.; RUIZ, H. A.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. C. E. R.; MARTINEZ, M. A. e SILVA, E. O. Perdas de solo e caracterização física e micromorfológica de crostas formadas em solos sob chuva simulada. *Engenharia Agrícola*, v.27, p.129-138, 2007.

BRAZ, D.; BARROSO, R. C.; LOPES, R. T.; ANJOS, M. J. e JESUS, E. F. O. Evaluation of scatter-to-primary ratio in soil CT-imaging. *Radiation Physics and Chemistry*, v.61, p.747-751, 2001.

BREWER, R. Fabric and mineral analysis of soils. New York, Robert E. Krieger Publishing Company, 1976.

BRITO, A. S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar em função dos conteúdos de água e ar no solo. 2010. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BUI, N. E. e MERMUT, A. R. Orientation of Planar Voids in Vertisols and Soils with Vertic Properties. *Soil Science Society of America Journal*, v.52, p.171-178, 1989.

BULLOCK, P. e THOMASSON, A. J. Rothamsted studies of soil structure. II. Measurement and characterization of macroporosity by image analysis and comparison with data from water retention measurements. *Journal of Soil Science, Oxford*, v.30, p.391-413, 1979.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, J.; STOOPS, G. e TURSINA, T. Handbook for soil thin section description. Wolverhampton, Waine Research Publisher, 1985.

BUZUG, T. M. Computed tomography: From photon statistics to modern cone-beam CT. New York, Springer, 2008.

CAMARGO de, O. A. e ALLEIONI, L. R. F. Efeitos da compactação em atributos do solo. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível

em: <<http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C4/Comp4.htm>>. Acesso em: 05/06/2012.

CARLOS, M. T. Tomografia Computadorizada: Formação da imagem e radioproteção, CNEN, 2002.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARDOSO, F. B. F.; MARTINS, E. S.; JUNQUEIRA, F. F.; CARVALHO, A. P. F.; REATTO A, e GUIMARÃES, R. F. Quantificação do índice de vazios do solo utilizando técnicas de processamento de imagens digitais. Embrapa Cerrados, 2002.

CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; SANTOS, R.A.; GIMÉNEZ, D. e REICHARDT, K. Funil de Haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.2555-2562, 2008.

CASTRO, S. S. de; COOPER, M.; SANTOS, M. C. e VIDAL-TORRADO, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. Tópicos em ciência do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.107-164, 2003.

CASTRO, S. S. Micromorfologia de Solos: base para descrição de lâminas, Unicamp/ UFG. Campinas/Goiânia, 2008.

CAVALCANTI, M. G. P.; RUPRECHT, A. e VANNIER, M. W. Evaluation of an ossifying fibroma using three-dimensional computed tomography. Dentomaxillofac Radiol, Houndsmills, v.30, p.342-345, 2001.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R. e HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. Soil and Tillage Research, v.103, p.158-164, 2009.

CHARAMBA, L. G. R. Reconstrução de Imagens Tomográficas com uso de GPU. 2013. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Graduação em engenharia da Computação), Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

CLENELL, M.B. Tortuosity: a guide through the maze. In: Lovell MA, Harvey PK, editors. *Developments in Petrophysics Geological Society Special Publication*. Geological Society, v.122, p.299-344, 1997.

CNUUDE, V. Exploring the potential of X-ray tomography as a new non-destructive research tool in conservation studies of natural building stones. 2005. PhD thesis, Ghent University.

CNUUDE, V.; CWIRZEN, A.; MASSCHAELE, B. e JACOBS, P. J. S. Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes. *Engineering Geology*. v.103, p.76–83, 2009.

COOPER, M. e VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.581-595, 2005.

COSTA, J. C.; BORGES, J. A. R; PASSONI, S. e PIRES, L. F. Effect of collimator size and absorber thickness on soil bulk density evaluation by gamma ray attenuation. *Anais do Simpósio Internacional de Física das Radiações*, Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, J. C.; BORGES, J. A. R. e PIRES L. F. Soil bulk density evaluated by gamma-ray attenuation: Analysis of system geometry. *Soil & Tillage Research*, v.129, p. 23-31, 2013.

COSTA, F. S; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V. e WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.527-535, 2003.

CREMON, C.; ROSA JÚNIOR, E. J.; SERAFIM, M. E. e ONO, F. B. Análise micromorfológica de agregados de um Latossolo Vermelho distroférrico em diferentes sistemas de manejo. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.31, p.139-146, 2009.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. e POZZI-MUCELLI, R. S. Static And Dynamic 3 Dimensional Studies Of Water In Soil Using Computed Tomographic Scanning. *Soil Science Society of America Journal*, v.14, p.326-332, 1985.

CRESTANA, S. e VAZ, C. M. P. Non-invasive instrumentation opportunities for characterizing soil porous systems. *Soil & Tillage Research*, v.47, p.19-26, 1998.

CRUVINEL, P. E. Minitomógrafo de Raio-X e Raio-Gama Computadorizado para Aplicações Multidisciplinares. 1987. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CRUVINEL, P. E. et al. X-ray and gamma-ray computerized minitomograph scanner for soil science. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.39, p.745-750, 1990.

CRUVINEL, P. E. e BALOGUN, F. A. Minitomography scanner for agricultural based on dual-energy Compton scattering, in: *Proceedings XIII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*, IEEE Computer Society, p.193-199, 2000.

CRUVINEL, P. E. e BALOGUN, F. A. Compton scattering tomography for agricultural measurements. *Engenharia Agrícola*, v.26, p.151-160, 2006.

CURI, N. Vocabulário da ciência do solo. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p.89 1993.

DAL FERRO, N., DELMAS, P.; DUWING, C. SIMONETTI, G. e MORANI, F. Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilization treatments. *Soil & Tillage Research*, v.119, p.13-21, 2012.

DEMATTE, J. L. I.; WILDING, L. P. e HOLOWAYCHUK, N. Solos da região de São Pedro, Estado de São Paulo. III. Micromorfologia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.1, p.104-107, 1977.

DEURER, M.; GRINEV, D.; YOUNG, I.; CLOTHIER, B. E. e MÜLLER, K. The impact of soil carbon management on soil macropore structure: a comparison of two appleorchard systems in New Zealand. *European Journal Soil Scienc*, v.60, p.945-955, 2009.

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. In: *Tópicos em Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.55-94, 2000.

DIRKSEN, C. H. Unsaturated hydraulic conductivity. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Eds.). Soil analysis: physical methods. New York: M. Dekker, p.209-269, 1991.

DREES, L. R.; KARATHANASIS, A.D.; WILDING, L.P.; BLEVINS, R.L. Micromorphological characteristics of long-term no-till and conventionally tilled soils. Soil Science Society of America Journal, v.58, p.508-517, 1994.

EDUSP, Conversão analógico digital, 2005. Disponível em; <[http://www.pcs.usp.br/~labdig/pdf/files\\_2009/labdig2/pcs2308-p1.pdf](http://www.pcs.usp.br/~labdig/pdf/files_2009/labdig2/pcs2308-p1.pdf)>. Acesso em: 05/03/2012.

ELLIOT, T. R. e HECK, R. J. A comparison of optical and X-ray technique for void analysis in soil thin section. Geoderma, v.141, p.60-70, 2007a.

ELLIOT, T. R. & HECK, R. J. A comparison of 2D vs 3D thresholding of CT imagery. Canadian Journal Soil Scienc., v.87, p.405-412, 2007b.

ELLIOT, T. R.; REYOLDS, W. D. e HECK, R. J. Use of existing pore models and X-ray computed tomography to predict saturated soil hydraulic conductivity. Geoderma, v.156, p.133-142, 2010.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo, Rio de Janeiro, 1997.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Rio de Janeiro, 2006.

FALCI, S. C. e MENDES, A. C. T. Identificação de cutans em perfis de Latossolo roxo e terra roxa estruturada. Anais da ESALQ, v.30, p.49-70, 1973.

FANTE JUNIOR, L.; OLIVEIRA, J. C. M.; BASSOI, L. H.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; CAVALCANTI, A. C. e SILVA, F. H. B. B. Tomografia Computadorizada na avaliação da densidade do solo do semi-árido brasileiro. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v.26, p.835-842, 2002.

FARIA, J.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; RUIZ, H.A. e COSTA, L.M. Effects of weed control on physical and micropedological properties of Brazilian ultisol. Revista Brasileira Ciência do Solo, v.22, p.731-741, 1998.



FELDKAMP, L., DAVIS, L., e KRESS, J. Pratical Cone-beam Algorithm. Journal of the Optical of Society American , v.1, p.612-619, 1984.

FERNANDES, H. C., dos REIS, E. F.; NAIME, J. de M.; MODOLO, A. J. e RINALDI, P. C. Utilização da Tomografia Computadorizada para determinação da densidade do solo na região da semente. Engenharia na Agricultura, v.82 13, 82-94, 2005.

FERNANDES, J. S.; APPOLONI, C. R. e FERNANDES, C. P. Determinação de Parâmetros Microestruturais e Reconstrução de Imagens 3-D de Rochas Reservatório por Microtomografia de Raios X. Revista Ciências Exatas e Naturais, v.11, p.35-47, 2009.

GANTZER, C. J. e ANDERSON, S. H. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. Soil & Tillage Research, v.64, p.101–111, 2002.

GE Healthcare, GEHC MicroView. 2006.

GLAB, T. Application of image analysis for soil macropore characterization according to pore diameter. International Agrophysics, v.21, p.61-66, 2007.

GLENN, W. V.; HARLOW, C. A., DWYER, S. J. I., RHODES, M.L. e PARKER, D. L. Image manipulation and pattern recognition. In: Newton, T.H., Potts, D.G. (Eds.), Technical Aspects of Computed Tomography. Mosby, St. Louis, p.4326–4354, 1988.

GONZALEZ, R. C. e WOODS, R. E., Digital Image Processing, Addison Wesley, 1993.

GREGG, S.J. e Sing, K. S. W. Adsorption, Surface and Porosity. Academic Press, London, 1982.

GREENLAND, D. J. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent. Trans. Roy Soc, London, v.281, p.193–208, 1977.

GUNDERSEN, H. J. G.; BOYCE, R. W.; NYENGAARD, J. R. & ODGAARD, A. The connEulor: unbiased estimation of the connectivity using physical disectors under projection. Bone, v.14, p.217-22, 1993.

GUPTA, S.C. e ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.*, v.6, p.65-100, 1987.

HECK, R. J. X-ray Computed Tomography of Soil. *Tópicos Ciências do Solo*, University of Guelph, Canadian, v.5, p.1-30, 2009.

HOFER, M. Tomografia Computadorizada – Manual de Ensino. Revinter, Rio de Janeiro, 2010.

HOLBERG, C. Cone-beam computed tomography in orthodontics: benefits and limitations. *J Orofac Orthop*, Munchen, v.66, p.434-444, 2005.

JUHÁSZ, C. E. P.; COOPER, M.; CURSI, P. R.; KETZER, O. O. e TOMA, R. S. Micromorfologia de solo sob cerradão em relação à retenção de água. *Scie. Agric.*, v.64, p.344-354, 2007.

JONGERIUS, A.; SCHOONDERBEEK, D. e JAGER, A. The application of the Quantimet 720 in soil micromorphometry. *The Microscope*, v.20, p.243-254, 1972.

JORGE, R. F.; ALMEIDA, C, X.; BORGES, E. N. e PASSOS, R. R. Distribuição de poros e densidade de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo. *Biosci. J.*, Uberlândia, v. 28, Supplement 1, p.159-169, 2012.

KAK, A. C.; SLANEY, M. Principles of computerized tomographic imaging. IEEE Press, New York, 1988.

KALENDER, W. A. Computed tomography: Fundamentals, system technology, image quality, applications, Publicis Corporate Publishing, 2005.

KETCHAM, R.A. e CARLSON, W.D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences. *Comp. Geosci.*, v.27, p.381- 400, 2001.

KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo. 1998. 150f. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba.

KROUSTRUP, J. P. e GUNDERSEN, H. J. G. Estimating the number of complex particles using the conneulor principle. *Microscopy*. v.203, p.314-20, 2001.

KYRIAKOU, Y.; PRELL, D. & KALENDER, W. A. Ring artifact correction for high-resolution micro CT. *Phys. Med. Biol.* v.54, 2009.

KUBIENA, W. L. *Micropedology*, Ame, Collegiate Press, 1938.

LAIA, M. A. M. & CRUVINEL, P. E. Filtragem de projeções tomográficas da ciência do solo utilizando Kalman discreto e redes. *IEEE Latin Amer. Trans.* v.6, p.114-121, 2008.

LAL, R. e SHUKLA, M. K. *Principles of Soil Physics*. New York: CRC Press, 2004, p.528.

LAWRENCE, G. P. Stability of soil pores during mercury intrusion porosimetry. *Journal Soil Scienc.* v.29, p.299–304, 1978.

LEE, S. S.; GANTZER, C. J.; THOMPSON, A. L.; ANDERSON, S. H e KETCHAM, R. A. Using high resolution computed tomography analysis to characterize soil-surface seals. *Soil Scienc Society.* v.72, p 1478-1485, 2008.

LEPRUN, J. C. 1979. Les cuissares ferrugiuneses des pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche - Gènese, transformation, dégradation. Tese de Doutorado, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Strasbourg.

LIPIEC, J.; HAJNOS, M.; SWIEBODA, R. Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. *Geoderma*, v.179, p.20–27, 2012.

LOSEKANN, M. E. Caracterização, classificação e indicadores de qualidade em localidades de agricultura familiar do Estado do Rio Grande do Sul. 2009. 77f. dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LUGATO, E., MORANI, F.; NARDI, S.; BERTI, A. e GIARDINI, L. Relationship between aggregate pore size distribution and organic-humic carbon in contrasting soils. *Soil & Tillage Research*, v.103, 153–157, 2009.

MACEDO, A. et al. X-ray microtomography to characterize the physical properties of soil and particulate systems. *Powder Techn.*, Lausanne, v.101, p.178-182, 1999.

MACHADO, A. C. Estudo de parâmetros microestruturais de rochas-reservatório para diferentes resoluções utilizando microtomografia computadorizada 3D. 2012. 57f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear - COOPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MAHER, Física Básica da Medicina Nuclear, 2006. Disponível em: [http://en.wikibooks.org/wiki/Basic\\_Physics\\_of\\_Nuclear\\_Medicine](http://en.wikibooks.org/wiki/Basic_Physics_of_Nuclear_Medicine). Acesso em: 21/04/2013.

MANUAL LOCUS. GE Medical Systems *explore Locus SP* Micro CT Scanner. 2000.

MARCELINO, V; CNUUDE, V.; VANSTEELANDT, S. e CARO, F. An evaluation of 2D-image analysis techniques for measuring soil microporosity. *European Journal of Soil Science*,v.58, p.133–140, 2007.

MARQUES FILHO, O. e VIEIRA NETO, H. *Processamento Digital de Imagens*, Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

MATTHEWS, G. P.; LAUDONE, G. M., GREGORY, A. S., BIRD, N.R.A.; MATTHEWS, A. G. G. e WHALLEY, W. R. Measurement and simulation of the effect of compaction on the pore structure and saturated hydraulic conductivity of grassland and arable soil. *Water Resour. Res.* 46, 2010.

MEES, F.; SWENNEN, R.; van GEET, M. e JACOBS, P. *Applications of X-ray computed tomography in the geosciences*. Madison, Geological Society, (Special Publications, 215),p.1-6., 2003.

MELO, V. F.; MOURA, R.; TOLEDO, F. H.; LIMA, V. C. e GHIDIN, A. A. Morfologia de agregados de Latossolo Bruno e Vermelho do estado do Paraná, avaliada por imagens obtidas em scanner. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*,v.32, p.85-99, 2008.

MENDES, A. C. T., FALCI, S. C. e DEMATTÉ, J. L. I. Secções delgadas de solos: método de impregnação. *Anais da ESALQ*, v.30, p.35-48, 1973.

MOONEY, S. J.; MORRIS, C. e BERRY, P. M. Visualization and quantification of the effects of cereal root lodging on three-dimensional soil macrostructure using Xray computed tomography. *Soil Scienc.* v.171, p.706–718, 2006.

MOREIRA, A. C.; FERNANDES, J. S.; MARQUES, L. C.; APPOLONI, C. R.; FERNANDES, C. P. e NAGAT, R. Effect of manual threshold setting on image analysis results of a sandstone sample structural characterization by X-ray microtomography. Anais do International Nuclear Atlantic Conference, Rio de Janeiro, 2009.

MOURA FILHO, W. & BUOL, S. W. Studies of a Latosol Roxo (Eutrústox) in Brazil: Micromorphology effect on ion release. *Experientiae*, v.21, p.161-177, 1976.

MOZZO, P. et al. A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results. *Eur. Radiol*, v. 8, p.1558-1564, 1998.

MURPHY, C. P.; BULLOCK, P. e TURNER, R. H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis: Part I: Principles and techniques. *Journal of Soil Science*, v.28, p.498-508, 1977a.

MURPHY, C. P.; BULLOCK, P. e TURNER, R. H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis: Part I: Applications. *Journal of Soil Science*, v.28, p.509-511, 1977b.

MURPHY, C. P. Thin section preparation of soils and sediments. Berkhamsted, A B Academic Publishers, 1986.

NAIME, J. de M. Projeto e construção de um tomógrafo portátil para estudos de ciência do solo e plantas, em campo. 1994, 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo.

NAIME, J. de M. Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não-saturada do solo. 2001, 166f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

NATTERER, F. The mathematics of computerized tomography, volume 32 of *Classics in Applied Mathematics*. (SIAM), Philadelphia, PA, v.32, 2001.

NERISSIAN, D. Y. Determinação das dimensões do ponto focal de tubos de raios X utilizando um sensor CCD e o método das funções de transferência. 2004. 151f.

Tese (Ciências/ Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações), Universidade de São Paulo.

OH, W. e LINQUIST, B. Image thresholding by Indicator Kriging. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intellig., v.21, p.590-602, 1999.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; FERRAZ, F. B. FERREIRA, M. G. V. X. e MERMUT, A. R. Mineralogia, micromorfologia e gênese de solos planossólicos do sertão de Araripe, Estado de Pernambuco. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28, p.665-678, 2004.

OLIVEIRA, J. S. Reconstrução Tridimensional de Imagens obtidas por Tomografia Computadorizada. Montes Claros, 2007.

OLSZEWSKI, N.; COSTA L. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; RUIZ, H. A.; ALVARENGA, R. C. e CRUZ, J. C. Morfologia de agregados do solo avaliada por meio de análise de imagens. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28, p.901-909, 2004.

ORIGINLAB Corporation, 1991–2006. OriginPro 7.5. Northampton, MA.

PAGLIAI, M.; BISSON, E. B.A. E LEDIN, S. Changes in surface structure (crusting) after application of sewage sludges and pig slurry to cultivated agricultural soils in northern Italy. Geoderma, v.30, p.35-53, 1983.

PAPADOPOULOS, A.; BIRD, N. R. A., WHITMORE, A.P. e MOONEY, S.J. Investigating the effects of organic and conventional management on soil aggregate stability using X-ray computed tomography. Eur. J. Soil Sci. v.60, p.360–368, 2009.

PARKS, E. T. Computed tomography applications for dentistry. Dent Clin North Am, Philadelphia, v.44, p.371-394, 2000.

PASSONI, S.; BORGES, F. S. e PIRES, L. F. Uso de microscópio óptico digital portátil para análise micromorfológica do solo. Anais do IX Encontro de Pesquisa e III Simpósio de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2010.

PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J. E. e RIEKE, P.E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. Proc. / Soil Sci. Soc. Am., v.46, p.445- 449, 1982.

PIRES, L. F., MACEDO, J. R., SOUZA, M. D., BACCHI, O. O. S. e REICHARDT, K. Gamma-ray computed tomography to characterize soil surface sealing. *Appl. Radiat. Isot.* v.57, p.375–380, 2002.

PIRES, L. F., MACEDO, J. R., SOUZA, M. D., BACCHI, O. O. S. e REICHADT, K. Gamma-ray computed tomography to investigate compaction on sewage-sludge-treated soil. *Appl. Radiat. Isot.* v.59, p.17–25, 2003.

PIRES, L.F., BACCHI, O.O.S., REICHARDT, K. Damage to soil physical properties caused by soil sampler devices assessed by gamma ray computed tomography. *Aust. J. Soil Res.* v.42, p.857–863, 2004.

PIRES, L. F.; COOPER, M.; CÁSSARO, F. A. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. e DIAS, N. M. P. Micromorphological analysis to characterize modifications in the internal structure of soil samples submitted to wetting and drying cycles. *Catena*, v.72, p.297-304, 2008.

PIRES, L. F.; REICHARDT, K.; COOPER, M.; CÁSSARO, F. A. M.; DIAS, N. M. P. e BACCHI, O. O. S. Pore system changes of damaged Brazilian oxisols and nitosols induced by wet-dry cycles as seen in 2-D micromorphologic image analysis. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.81, p.151-161, 2009.

PIRES L. F.; BORGES, J. R.; BACCHI, O. O. S. e REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. *Soil & Tillage Research*, v.110, p.197-210, 2010.

PIRES, L. F. e BACCHI, O. O. S. Mudanças na estrutura do solo avaliada com uso de tomografia computadorizada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, p.391-400, 2010.

PIRES, L. F.; ROSA, Jadir Aparecido; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.33, p.161-170, 2011.

PIRES, L. F.; BORGES, F. S.; PASSONI, S. e PEREIRA, A. B. 2D soil pore characterization using free software and a portable optical microscope *Pedosphere*, v.4, p.503-510, 2013.

PONTES, A. N., Técnicas experimentais; detectores de radiação, 2010. Disponível em:

<http://www.profpc.com.br/Qu%C3%ADmica%20Nuclear%20x%20F%C3%ADsica%20Nuclear/F%C3%ADsica%20Nuclear/detectores%20radiacao.pdf>. Acesso em: 15/03/2013.

PROTZ, R.; SWEENEY, S. J. e FOX, C. A. An application of spectral image analysis to soil micromorphology. 1. Methods of analysis. *Geoderma*, v.53, p.373–385, 1992.

PROTZ, R. e VAN DEN BYGAART, A. J. Towards systematic image analysis in the study of soil micromorphology. *Sciences of Soils*, v.3, p.34–44, 1998.

RASBAND, W.S., 1997–2007. Image J. U.S. National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij>

RASIAH, V. e AYLMORE, L. A. G. Characterizing the changes in soil porosity by computed tomography and fractal dimension. *Soil Sci.* v.163, p.203-211, 1998.

RAGHAVAN, G. S.; MCKYES, V. E. e BEAULIEU, B.. Prediction of clay soil compaction. *J. Terra Mech.* v.4, p.31-38, 1977.

REIS NETO, J. M.; FIORI, A. P.; LOPES, A. P. MARCHESE, C.; PINTO-COELHO, C. V.; VASCONCELLOS, E. M. G.; SILVA, G. F. e SECCHI, R. A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia a no estudo tridimensional de porosidade em rocha. *Revista Brasileira de Geociências*, v.41, p. 498-508, 2011.

RINGROSE-VOASE, A. J. One-dimensional image analysis of soil structure. I. Principles. *Journal of Soil Science, Oxford*, v.41, p.499-512, 1990.

RINGROSE-VOASE, A. J. E NYS, C. One-dimensional image analysis of soil structure. II. Interpretation of parameters with respect to four forest soil profiles. *Journal of Soil Science, Oxford*, v.41, p.513-527, 1990.

RITTER, D. E. Entrevista. *Ver. Dent. Press Ortodon. Ortop. Facial*, 2007.

RODRIGUES, M. G. S.; ALARCÓN, O. M. V.; CARRARO, E.; ROCHA, J. F. e CAPELOZZA, A. L. Tomografia computadorizada por feixe cônico: formação da imagem, indicações e critérios para prescrição, *Odontol. Clín. Cient.*, v.9, p.115-118, 2010.



ROQUE, W. L.; SOUZA, A. C. A. e BARBIERI, D. X. The Euler-Poincaré characteristic applied to identify low bone density from vertebral tomographic images. *Revista Brasileira de Reumatologia*. v.49, p.140-52 2009.

ROQUE, W. L.; ARCARO, K. e FREYTAG, I. Tortuosidade da rede do osso trabecular a partir da reconstrução geodésica de imagens binárias tridimensionais. In: *Anais do 11o Workshop de Informática Médica*, p.19-21, 2011.

ROQUE, W. L. ARCARO, K. e LANFREDI, R. M. Tortuosidade e conectividade da rede trabecular do rádio distal a partir de imagens microtomográficas. *Rev. Bras. Eng. Biom.*, v.28, p.116-123, 2012.

ROQUE W. L., e VALÉRIO, F. Estimando o índice de qualidade do reservatório através de imagens microtomografadas de testemunhos. *Anais do Congresso de Matemática Aplicada e Computacional (CEMAC)*, 2012.

SALDANHA, M. F. S. e FREITAS, C. C. Segmentação de imagens digitais: uma revisão. *Divisão de Processamento de Imagens – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)*, 2005.

SANDER, T.; GERK, H. H. e ROGASIK, H. Assessment of Chinese paddy-soil structure using X-ray computed tomography. *Geoderma*, v.145, p.303–314, 2008.

SANTOS, E. S. e NACIF, M. S. *Manual de técnicas em tomografia computadorizada*. ed. Rubio Ltda, 2009.

SCARFE, W. C.; FARMAN, A. G. e SUKOVIC, P. Clinical applications of cone-beam computed tomography in dental practice. *J Can. Dent Assoc.*, v.72, p.75-80, 2006.

SIDIRAS, N; VIEIRA, S. R. e ROTH, C. H. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo roso distrófico sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.8, p.265-268, 1984.

SILOS, V. R.; POLIVANOV, H.; SANTOS, L. V.; SILVA, A. S.; BARROSO, E. V. ÁLVARO, T. T. e CRUZ, B. L. A. Micromorfologia aplicada a estudos geológico-geotécnicos. *Revista Brasileira de Geociências*, v.41, p.256-262, 2011.

SILVA, A. M. et al. Tomógrafo de resolução micrométrica para estudo de solos. *Boletim de Pesquisa, Campinas, EMBRAPA/CNPDIA*, v.4, 1997.

SILVA, M. O.; BRITO A. S.; CARVALHO, W. D. TEIXEIRA, S. S.; JESUS e M. C. Distribuição do tamanho de poros de um Latossolo e um Planossolo sob diferentes manejos. Anais do VII CONNEPI, 2012.

SORACCO, C. G. et al. Contribution of macroporosity to water flux of a soil under different tillage systems. Rev. Bras. Ciênc. Solo, v.36, p.1149-1156, 2012.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M. e PEREIRA, G. T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.41, p.487-492, 2006.

STONE, L. F. e SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.25, p.395-401, 2001.

STOOPS, G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Madison, Soil Science Society of America, 2003.

TAINA, I. A.; HECK, R. J. e ELLIOT, T. R. Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review. Canadian Journal Soil Scienc, v.88, p.1-20, 2008.

TAINA, I.A.; HECK, R. J.; ELLIOT, T. R. e SACIFF, N.R. Micromorphological and X-ray  $\mu$ CT study of Orthic Humic Gleysols under different management conditions. Geoderma, v.158, p.110-119, 2010.

TARQUIS, A. M.; HECK, R. J.; ANDINA, D.; ALVAREZ, A. e ANTON J. M. Pore network complexity and thresholding of 3D soil images. Ecol. Complex, v.6, p.230-239, 2009.

TARQUIS, A. M.; SANCHEZ, M. E.; ANTÓN, J. M.; JIMENEZ, J.; SAA-REQUEJO, A.; ANDINA, D. e CRAWFORD, J. W. Variation in Spectral and Mass Dimension on Three-Dimensional Soil Image Processing. Soil Science, v.177, p.87-97, 2012.

TERRIBILE, F. e FITZPATRICK, E.A. The application of multilayer digital image processing techniques to the description of soil thin sections. Geoderma, v.55, p.159-174, 1992.

TERRIBILE, F.; WRIGHT, R. e FITZPATRICK, E. A. Image analysis in soil micromorphology: from univariate approach to multivariate solution. In: SOIL

MICROMORPHOLOGY: STUDIES ON SOIL DIVERSITY, DIAGNOSTICS, DYNAMICS. INTERNATIONAL WORKING MEETING ON SOIL MICROMORPHOLOGY, 10., Moscow, 1996. Proceedings. Miedema, p.397-417, 1997.

TIMM, L. C. et al. Soil bulk density evaluation by conventional and nuclear methods. Aust. J. Soil Res., Melbourne, v. 43, p. 97-103, 2005.

TIPPKOETTER, R., EICKHRORST, T. TAUBNER, H.; GREDNER, B. & RADEMAKER, G. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography ( $\mu$ CT). Soil & Tillage Research v.105, p.12–20, 2009.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C. e COSTA, A. C. S. Densidade, porosidade e resistência a penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. Ciencia Agrícola, v.59, p.795-801, 2002.

VAN DEN BYGAART, A. J. e PROTZ, R. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. Geoderma, v.89, p. 333-346, 1999.

VAN GEET, M., SWENNEN, R e WEVERS, M. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerized tomography. Sedimentary Geol. v.132, p.25-36, 2000.

VAN GEET, M.; SWENNEN, R. e DAVID, P. Quantitative coal characterization by means of microfocus X-ray computer tomography, colour image analysis and back scatter scanning electron microscopy. Inter. J. Coal Geol., v.46, p.11-25, 2001.

VAN GEET, M.; LAGROU, D. e SWENNEN, R. Porosity measurements of sedimentary rocks by means of microfocus X-ray computed tomography (mCT). Applications of X-ray computed tomography in the geosciences. Geological Society, Special Publications, v.215. p.51-60, 2003.

VAZ, C. M. P. et al. Using a computed tomography miniscanner for studying tillage induced soil compaction. Soil Tech, v.2, p.313-321, 1989.

VAZ, C. M. P.; IOSSI, M. F.; NAIME, A. M. S. Retenção de Água no Solo Estimada Através da Medida de Distribuição do Tamanho das Partículas do Solo. Embrapa, São Carlos, 2003.

VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E. I. e SCHAEFER, C. E. G. R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de latossolos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28, p.11-19, 2004.

VIANA, J. H. M. Determinação da densidade de solos e de horizontes cascalhentos. Embrapa, Sete Lagoas, MG, 2008.

VOGEL, H. J. e KRETZSCHMAR. Topological characterization of pore space in soil sample preparation and digital image-processing. Geoderma, v.73, p.23-28, 1996..3

XAVES, A. C. C; SENA, L. E. C.; ARAÚJO, L. F. e NASCIMENTO NETO, J. B. S. Aplicações da tomografia computadorizada de feixe cônico na odontologia. Int J of Dentistry, v.4. p.80-124, 2005.

WANG, G e VANNIER, M. W. Longitudinal resolution in volumetric x-ray computerized tomography - Analytical comparison between conventional and helical computerized tomography. Med Phys, v.21, p.429-433, 1994.

WARNER, G. S.; NIEBER, J.L.; MOORE, I.D. & GEISE, R.A. Characterizing macropores in soil by computed tomography. Soil Sci Soc Society American Journal, v.53, p.653-660, 1989.

Wellington, S.L., Vinegar, H.J., 1987. X-ray computerized tomography. Journal of Petroleum Technology 39 (8), 885–898.

WHAITES E. Princípios de Radiologia Odontológica. São Paulo: Ed Artmed, 2003, 444p.

Disponível em:  
<[http://www.walmorgodoi.com/arquivos/Palestra\\_Reconstrucao\\_Imagens.pdf](http://www.walmorgodoi.com/arquivos/Palestra_Reconstrucao_Imagens.pdf)> Acesso em: agosto/ 2011.

Disponível em:<[http://www.portalciep.com.br/index.php?option=com\\_phocadownload&view=cat](http://www.portalciep.com.br/index.php?option=com_phocadownload&view=cat)

egory&download=26:tomografia-computadorizada&id=4:modulo-iii&Itemid=71>

Acesso em: julho/ 2011.

Disponível em: <<http://www.noao.edu/outreach/aop/glossary/binning.html>> Acesso em: julho/ 2011.