

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FÍSICA

JOSÉ VALDIRINO GASPARETO

MICROTOMOGRAFIA NA CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA POROSO DO SOLO
SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

PONTA GROSSA

2024

JOSÉ VALDIRINO GASPARETO

MICROTOMOGRÁFIA NA CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA POROSO DO SOLO
SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa, no Programa de Pós-Graduação em Ciências, área de concentração: Física.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

PONTA GROSSA

2024

G249 Gaspareto, José Valdirino
Microtomografia na caracterização do sistema poroso do solo sob
integração lavoura-pecuária / José Valdirino Gaspareto. Ponta Grossa, 2024.
113 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Área de Concentração: Física),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires.

1. Micromorfologia - solo. 2. Microtomografia - raios x. 3. Sistemas
integrados - lavoura - pecuária. I. Pires, Luiz Fernando. II. Universidade Estadual
de Ponta Grossa. Física. III.T.

CDD: 530.1

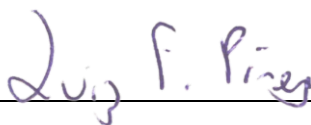
TERMO DE APROVAÇÃO

JOSE VALDIRINO GASPARETO

MICROTOMOGRÁFIA NA CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA POROSO DO SOLO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

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

Orientador _____



Dr. Luiz Fernando Pires – UEPG – Presidente



Dr. Sergio da Costa Saab – UEPG - Titular

Documento assinado digitalmente



ROBSON ANDRE ARMINDO

Data: 11/04/2024 08:42:29-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Robson André Armindo – UFLA – Titular

Ponta Grossa, 15 de março de 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente aos meus pais, José Florisnar Gaspareto e Maria Aparecida de Oliveira Pinheiro Gaspareto, por serem minha fonte constante de apoio e inspiração ao longo de minha jornada na vida acadêmica. Suas palavras encorajadoras e amor incondicional foram a força motriz que impulsionou cada passo dessa caminhada.

Expresso minha mais sincera gratidão ao meu orientador, o Prof. Dr. Luiz Fernando Pires, cuja sabedoria, paciência e orientações foram fundamentais para o sucesso deste trabalho. Suas contribuições foram cruciais não apenas para o desenvolvimento acadêmico, mas também para meu crescimento como profissional e indivíduo.

Não posso deixar de reconhecer os Prof. Dr. André Mauricio Brinatti e Prof. Dr. Sérgio da Costa Saab. Cujo comprometimento em compartilhar conhecimento e oferecer suporte durante minha graduação e pós-graduação foi essencial para minha formação integral.

Aos dedicados colegas, em especial, Jocenei Antonio Teodoro de Oliveira, Mario Augusto Camargo, Everton de Andrade, Victor Akio Yanaguisawa, Alessandro Mello, Milena Colaço, e demais membros do grupo FASCA, agradeço pela colaboração, amizade e troca constante de ideias que enriqueceram este trabalho.

Meu sincero reconhecimento à CNEN pelo apoio financeiro generoso, que viabilizou o desenvolvimento deste projeto. Sua contribuição foi crucial para a realização desta pesquisa e para o avanço do conhecimento na área.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para minha jornada acadêmica, meu profundo agradecimento. Este trabalho não seria possível sem a presença e o suporte de cada um de vocês.

RESUMO

A análise por microtomografia de raios X (MICRO-TC) tem se mostrado uma ferramenta poderosa no estudo de sistemas porosos nas últimas décadas. Existem inúmeros estudos usando a MICRO-TC que analisam as propriedades dos poros do solo sob diferentes usos. Porém, ainda são escassos os estudos que analisam na escala micrométrica o efeito de sistemas integrados. O presente estudo propõe analisar os efeitos de diferentes sistemas de manejo do solo em um Latossolo Bruno argiloso sob integração lavoura-pecuária (ILP). As amostras foram coletadas na camada superficial do solo (0-0,20 m). Os tratamentos investigados foram: sistema de plantio convencional (SC), sistema de cultivo mínimo (SCM), sistema de plantio direto (SPD) e sistema de plantio direto com subsolagem (SPD+S). Adicionalmente aos sistemas de manejo, foram analisados diferentes usos da cultura do azevém como planta de cobertura (C), pastejo (P) e silagem (S). As amostras de solo foram escaneadas em um sistema de MICRO-TC com um tamanho de voxel de 50 μm . Após o escaneamento, as imagens foram reconstruídas em três-dimensões (3D) para três planos distintos: coronal, sagital e axial. As propriedades analisadas pela MICRO-TC foram a porosidade, a dimensão fractal, o grau de anisotropia, a conectividade dos poros, a tortuosidade e o formato dos poros. Esse estudo está baseado nas seguintes hipóteses: (i) os sistemas de manejo sob ILP afetam as propriedades micromorfológicas do solo; (ii) a utilização de cobertura vegetal melhora as propriedades do sistema poroso do solo; (iii) os diferentes planos de reconstrução imageados não afetam os resultados das propriedades analisadas. Os sistemas de preparo do solo apresentaram diferenças significativas nas propriedades morfológicas do solo. O SCM(C) apresentou os maiores valores de porosidade imageada, conectividade, volume e número de poros em forma de haste, indicando uma estrutura porosa mais favorável aos processos de infiltração e redistribuição de água. Por outro lado, o SC(S) apresentou a maior dimensão fractal, o maior número de poros de formato elipsoidal e uma menor presença de poros esferoidais e de formato de disco, indicando um sistema poroso mais complexo. O SPD(S) apresentou maior tortuosidade e menor conectividade dos poros, indicando que a prática de silagem pode influenciar negativamente a aeração e o transporte de água pelo solo. O grau de anisotropia e número de poros esferoidais e discos exibiram maiores valores para os sistemas SPD e SPD+S, independentemente do uso do azevém. Porém, no geral, a anisotropia foi baixa, sugerindo que os sistemas são isotrópicos. Não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos nos formatos esferoidais e discos em termos do volume de poros, indicando maior resiliência a mudanças nesses formatos. Com relação aos planos de reconstrução (coronal, sagital e axial) das imagens, não foram observadas diferenças estatísticas em relação aos planos estudados. No entanto, uma sugestão é que seja utilizado o plano que possibilita analisar o maior volume de solo. Este estudo fornece uma compreensão das implicações micromorfológicas associadas a diferentes práticas de manejo do solo, enfatizando que o SCM(C) mostra-se como o sistema poroso mais adequado.

Palavras-chave: micromorfologia do solo; microtomografia de raios X; sistemas integrados lavoura-pecuária.

ABSTRACT

X-ray microtomography (MICRO-CT) analysis has proven to be a powerful tool in the study of porous systems in recent decades. There are numerous studies using MICRO-CT that analyze the properties of soil pores under different land uses. However, studies analyzing the effects of integrated systems at the micrometer scale are still scarce. The present study aims to analyze the effects of different soil management systems in a clayey Oxisol under integrated crop-livestock (ICL) integration. Samples were collected from the soil surface layer (0-0.20 m). The investigated treatments were: conventional tillage system (CT), minimum tillage system (MT), no-tillage system (NT), and no-tillage system with subsoiling (NT+S). In addition to the management systems, different uses of ryegrass were analyzed as cover crop (C), grazing (G), and silage (S). Soil samples were scanned using a MICRO-CT system with a voxel size of 50 μm . After scanning, the images were reconstructed in three dimensions (3D) for three distinct planes: coronal, sagittal, and axial. The properties analyzed by MICRO-CT were porosity, fractal dimension, degree of anisotropy, pore connectivity, tortuosity, and pore shape. This study is based on the following hypotheses: (i) ICL management systems affect the micromorphological properties of the soil; (ii) the use of vegetation cover improves soil porous system properties; (iii) different reconstruction planes do not affect the results of the analyzed properties. Soil tillage systems showed significant differences in soil morphological properties. MT(C) presented the highest values of assessed porosity, connectivity, volume, and number of rod-shaped pores, indicating a more favorable porous structure for water infiltration and redistribution processes. On the other hand, CT(S) presented the highest fractal dimension, the highest number of ellipsoidal-shaped pores, and a lower presence of spheroidal and disk-shaped pores, indicating a more complex porous system. NT(S) showed higher tortuosity and lower pore connectivity, indicating that the silage practice may negatively influence soil aeration and water transport. The degree of anisotropy and number of spheroidal and disk-shaped pores exhibited higher values for NT and NT+S systems, regardless of ryegrass use. However, overall, anisotropy was low, suggesting isotropic systems. No statistical differences were observed between treatments in terms of spheroidal and disk-shaped pore volumes, indicating greater resilience to changes in these shapes. Regarding the reconstruction planes (coronal, sagittal, and axial) of the images, no statistical differences were observed regarding the studied planes. However, it is suggested to use the plane that allows analyzing the largest volume of soil. This study provides an understanding of the micromorphological implications associated with different soil management practices, emphasizing that MT(C) appears to be the most suitable porous system.

Key words: soil micromorphology, x-ray microtomography, integrated crop-livestock systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Localização amostral: a) Mapa do Brasil; b) Mapa do Estado do Paraná; c) Mapa da cidade de Castro; d) Área de coleta das amostras em 2013.	27
Figura 2.2 – Exemplo de sistema convencional (SC) de preparo do solo: a) o arado realiza a inversão ou revolvimento das camadas superficiais do solo, deixando a superfície irregular e com torrões; b) a grade niveladora destorroa e deixa a superfície regular após a passagem do arado.....	29
Figura 2.3 – Exemplo de sistema de cultivo mínimo (SCM) - Solo coberto por <i>Crotalaria spectabilis</i> com sulcagens para posterior plantio de cana de açúcar.	30
Figura 2.4 – Exemplo de sistema de plantio direto (SPD) - Solo com restos culturais de palhada de braquiária em algodão.	30
Figura 2.5 – Exemplo de subsolador com sistema de desarme automático de hastes.	31
Figura 2.6 – Exemplo de uso da cultura do azevém como cobertura vegetal na lavoura.	32
Figura 2.7 – Exemplo de uso da cultura do azevém como pastagem.	32
Figura 2.8 – Exemplo de uso da cultura do azevém como silagem. Azevém pré-secado sendo recolhido pela ensiladeira.	32
Figura 2.9 – Confeção, embalagem e etiquetagem das amostras para posterior análise microtomográfica.....	34
Figura 2.10 – Porta-amostra confeccionado com o propósito de escanear as amostras de solo.	34
Figura 2.11 – Detecção de raios X: a) primeira imagem radiográfica da história (mão da esposa de Rontgen); b) Wilhelm Rontgen.....	35
Figura 2.12 – Componentes de um sistema de raios X de gabinete.	36
Figura 2.13 – Detalhes de processos físicos na geração de raios X.....	36
Figura 2.14 – Processo operacional de funcionamento do tubo de raios X de equipamento tomográfico.	38
Figura 2.15 – Processo de geração de raios X por meio de elétron bombardeando o alvo metálico.	38

Figura 2.16 – Distribuição de frequência do espectro de raios X gerado por radiação de freamento e pela expulsão de elétrons das camadas eletrônicas.	39
Figura 2.17 – Exemplos de processos de geração de raios X: a) emissão de raios X de baixa energia; b) emissão de raios X de alta energia.....	39
Figura 2.18 – Desenho esquemático mostrando o processo de emissão característica de raios X.	40
Figura 2.19 – Representação da distribuição de energia relacionada a tensão de aceleração do feixe de elétrons e energia do feixe de raios X gerado. ...	41
Figura 2.20 – Funcionamento dos cintiladores e diodos na produção de radiografias.	41
Figura 2.21 – Quantidade de Bits e seus respectivos níveis de cinza.....	42
Figura 2.22 – Principais maneiras de interação dos fótons de raios X com os átomos.	43
Figura 2.23 – Processo de atenuação de raios X em materiais de densidades diferentes.....	43
Figura 2.24 – Curva de atenuação de raios X para diferentes espessuras do material atenuador. (tensão de 225 kV e energia de 170 keV).	44
Figura 2.25 – Curvas de atenuação para diferentes materiais: a) tensão de 130 kV e energia de 74 keV; b) tensão de 225 kV e energia de 170 keV.	45
Figura 2.26 – Microtomógrafo da marca Nikon, modelo XT V 130C.	45
Figura 2.27 – Configuração do tomógrafo, ilustrando a posição do braço do equipamento (superior, intermediária ou inferior) em relação ao tamanho da amostra.	46
Figura 2.28 – Diferentes montagens da amostra: a) configuração inicial apresenta desvantagens; b) segunda configuração busca melhorar, mas ainda enfrenta artefatos de feixe cônico; c) configuração otimizada, reduzindo artefatos e melhorando a qualidade da imagem radiográfica.....	47
Figura 2.29 – Demonstração da técnica de ampliação geométrica ao mover a amostra em direção à fonte de raios X. Esse ajuste espacial resulta em um aumento na ampliação geométrica, enquanto simultaneamente diminui o tamanho efetivo do pixel, proporcionando maior resolução na imagem adquirida.....	47

Figura 2.30 – Representação esquemática do cálculo da ampliação geométrica, considerando as distâncias entre o gerador de imagens <i>GI</i> , a posição do objeto <i>PO</i> e a fonte de radiação.	48
Figura 2.31 – Relação entre o tamanho efetivo do pixel (<i>TEP</i>), onde o tamanho do pixel do detector (<i>TPD</i>) é dividido pela ampliação geométrica (<i>AG</i>).	48
Figura 2.32 – Representação das duas situações possíveis no cálculo do campo de visão (<i>CV</i>), onde a varredura da região de interesse (ROI) pode limitar a visualização da amostra, ou a amostra inteira é mantida à vista no campo de visão radiográfico.....	49
Figura 2.33 – A figura ilustra um exemplo prático de um filtro adicionado à fonte de raios X.	49
Figura 2.34 – Os efeitos do filtro de cobre (Cu) e estanho (Sn) no espectro de energia dos raios X. Demonstra-se claramente que o aumento na espessura do filtro resulta em uma diminuição proporcional no fluxo de raios X e uma variação na energia dos fótons.	50
Figura 2.35 – Comparação dos efeitos da adição de um filtro de cobre de 0,5 mm nas características radiográficas: a) representa a configuração sem filtro; b) mostra a mesma configuração com a introdução do filtro de cobre de 0,5 mm.	51
Figura 2.36 – Reconstrução tridimensional dos planos tomográficos em escala de cinza para uma das amostras analisadas: a) coronal; b) sagital; c) axial.	51
Figura 2.37 – Exemplo de seleção da região de interesse (ROI): a) seleção da região no interior do agregado escaneado; b) região de interesse oriunda do procedimento de recorte.	52
Figura 2.38 – Exemplo de processo de filtragem das imagens para uma das imagens 2D: a) imagens convertidas em 8 bits; b) passagem do filtro <i>Median 3D</i> ; c) passagem do filtro <i>Unsharp Mask</i>	53
Figura 2.39 – Histograma com 256 tons de cinza. Neste caso específico, o limiar ideal foi definido com $t = 41$	54
Figura 2.40 – Processo de segmentação: a) imagem filtrada e convertida em 8 bits; b) imagem binarizada pelo método de Otsu; c) imagem após a remoção de ruídos.	55

Figura 2.41 – Reconstrução tridimensional: a) estrutura do solo em escala de cinza; b) estrutura do espaço poroso do solo contendo os poros mais volumosos e conectados.....	55
Figura 2.42 – Cálculo da porosidade imageada: a) imagem binarizada (preto = 255); b) contagem de <i>voxels</i>	56
Figura 2.43 – As figuras de (a-d) ilustram como o número de caixas <i>n</i> varia com o inverso do comprimento lateral $1/R$	57
Figura 2.44 – Série de vetores interceptando os poros (preto = 255) no processo de cálculo do grau de anisotropia (<i>GA</i>) dos poros.	58
Figura 2.45 – Rede de nós e ramificações: a) ramificação simplesmente conectada (apenas um caminho do ponto G ao ponto H); b) ramificação multiplamente conectada (dois caminhos do ponto G ao ponto H).	59
Figura 2.46 – Utilização do filtro Purify: a) imagens binarizadas; b) remoção das cavidades isoladas com o uso do filtro Purify.....	59
Figura 2.47 – Comprimento geodésico L_g e comprimento euclidiano L_e , entre dois planos, e direção da varredura em um eixo de referência qualquer.....	61
Figura 2.48 – Formatos dos poros: esferoidal (equant), haste (prolate), disco (oblate) e elipsoidal (triaxial).....	62
Figura 2.49 – Fluxograma contendo as principais etapas realizadas no estudo para medidas das propriedades morfológicas e geométricas dos poros do solo.....	63
Figura 3.1 – Porosidade imageada (φ) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.....	65
Figura 3.2 – Dimensão Fractal (DF) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b)	

Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.69

Figura 3.3 – Grau de Anisotropia (GA) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.....74

Figura 3.4 – Conectividade dos poros (C) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.....77

Figura 3.5 – Tortuosidade (τ_x) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.81

Figura 3.6 – Tortuosidade (τ_y) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio

direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.82

Figura 3.7 – Tortuosidade (T_z) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem). a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.84

Figura 3.8 – Tortuosidade (T) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem). a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.85

Figura 3.9 – Contribuição do volume de poros (VP) em relação ao volume total para os diferentes formatos de poros (esferoidal, haste, disco e elipsoidal) para os seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano

($p < 0,05$). Não ocorreram diferenças entre os tratamentos considerando os diferentes planos de análise.89

Figura 3.10 – Número de poros (NP) em relação aos diferentes formatos de poros (esferoidal, haste, disco e elipsoidal) para os seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Não ocorreram diferenças entre os tratamentos considerando os diferentes planos de análise.92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definição do formato dos poros do solo com base na razão entre os eixos principais dos elipsoides: <i>EI</i> : eixo intermediário; <i>EM</i> : eixo maior; <i>EC</i> : eixo curto (menor).....	62
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas-dimensões ou bidimensional
3D	Três-dimensões ou tridimensional
ANOVA	Análise de variância
C	Cobertura vegetal de azevém
CFB	Clima temperado
C-LABMU	Complexo de laboratórios multiusuários
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
G, H	Pontos de nós entre uma ramificação ou ramificações
IAPAR	Instituto Agronômico do Paraná
ILP	Sistemas Integrados de Lavoura-Pecuária
MICRO-TC	Microtomografia computadorizada de raios X
P	Pastejo de azevém
PAST	<i>PAleontological STatistics</i>
RG	Reconstrução geodésica
ROI	Região de interesse
S	Silagem de azevém
SC	Sistema convencional
SCM	Sistema de cultivo mínimo
SPD	Sistema de plantio direto
SPD+S	Sistema de plantio direto mais subsolagem
TIFF	<i>Tagged Image File Format</i>
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
VOI	Volume de interesse
VOIs	Volumes de interesse
AG	Ampliação geométrica
GI	Distância entre o gerador de imagem e a fonte de raios X
PO	Distância entre a posição do objeto e a fonte de raios X
TEP	Tamanho efetivo do pixel
TPD	Tamanho do pixel do detector
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Bit	<i>Binary Digit</i> (0 ou 1)
cm	Centímetro
<i>C</i>	Conectividade dos poros
<i>DF</i>	Dimensão fractal
<i>EC</i>	Eixo curto (menor) do elipsoide
<i>EI</i>	Eixo intermediário do elipsoide
<i>EM</i>	Eixo maior do elipsoide
<i>GA</i>	Grau de anisotropia
g kg^{-1}	Grama por quilograma
<i>H</i>	Número de cavidades completamente fechadas
<i>i</i>	Valor digital
I_0	Intensidade incidente do feixe de raios X
<i>I</i>	Intensidade transmitida do feixe de raios X
<i>IC</i>	Comprimento médio dos vetores de interceptação curtos
<i>IL</i>	Comprimento médio dos vetores de interceptação longos
keV	Quilo elétron-volt
kV	Quilovolt
<i>l</i>	Espessura
L_e	Comprimento euclidiano
L_g	Comprimento geodésico
m	Metro
m^2	Metro quadrado
mm	Milímetro
ms	Milisegundo
<i>n</i>	Número de caixas
<i>N</i>	Número total de pixels
<i>NE</i>	Número de Euler
<i>NP</i>	Número de poros
N_{ob}	Número de objetos isolados
n_{fat}	Número de fatias referentes à reconstrução geodésica

n_g	Número de reconstruções geodésicas
n_i	Frequência de um valor digital
p_i	Probabilidade de um valor digital
p	Coeficiente de variação pelo teste de Tukey Nível de significância estatística
pH	Potencial hidrogeniônico
r	Coeficiente de correlação de Pearson
R	Comprimento lateral de uma caixa
t	Limiar no histograma
$V_{amostra}$	Volume total da amostra
V_{poros}	Volume de poros total
VP	Volume de poros
$\pm x$	Direções de varredura positiva e negativa no eixo x
$\pm y$	Direções de varredura positiva e negativa no eixo y
$\pm z$	Direções de varredura positiva e negativa no eixo z
%	Porcentagem
σ_1	Varição da classe de pixel 1
σ_2	Varição da classe de pixel 2
σ_ω	Variância entre duas classes de pixels
$\omega_1(t)$	Probabilidade da classe 1
$\omega_2(t)$	Probabilidade da classe 2
μA	Microampére
μm	Micrometro Micrômetro ou micron
$^\circ C$	Graus Celsius
τ	Tortuosidade
α	Densidade de um material
η	Direções de vetores
φ	Porosidade imageada

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL	18
2.	MATERIAL E MÉTODOS	27
2.1.	CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DO ESTUDO.....	27
2.2.	COLETA DAS AMOSTRAS.....	33
2.3.	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISE POR MICROTOMOGRÁFIA COMPUTADORIZADA.....	33
2.4.	ANÁLISE POR MICROTOMOGRÁFIA COMPUTADORIZADA.....	35
2.5.	SEGMENTAÇÃO DAS IMAGENS.....	52
2.6.	POROSIDADE IMAGEADA (φ).....	56
2.7.	DIMENSÃO FRACTAL (DF).....	56
2.8.	GRAU DE ANISOTROPIA (GA).....	57
2.9.	CONECTIVIDADE DOS POROS (C).....	58
2.10.	TORTUOSIDADE (τ).....	60
2.11.	VOLUME DE POROS (VP) E NÚMERO DE POROS (NP).....	61
2.12.	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	63
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.	CONCLUSÃO	95
	REFERÊNCIAS	98

1. INTRODUÇÃO GERAL

A crescente expansão demográfica, ocorrida principalmente no último século, e as mudanças climáticas, acentuadas nas últimas décadas, têm gerado pressões em relação à produção de alimentos e, por conseguinte, ao uso da terra (Kumar *et al.*, 2022). A ocorrência de eventos extremos, envolvendo secas, inundações, incêndios florestais, etc. têm causado impacto no desenvolvimento das culturas agrícolas (Dai *et al.*, 2022). A partir desses fenômenos, a tendência é a busca de novas fronteiras agrícolas (cerrado, caatinga, florestas tropicais) gerando pressões em áreas de preservação ambiental e florestas, cujos biomas são importantes para manter o equilíbrio do clima no país e também ao redor do mundo (Redo; Aide; Clark, 2013; Santos *et al.*, 2014). Porém, a fim de evitar que novas fronteiras agrícolas sejam criadas a partir da destruição de biomas naturais, algumas estratégias podem ser pensadas com base nas áreas agrícolas existentes. Para isto faz-se necessário investimentos em um uso mais racional e eficiente dos recursos naturais, especialmente com relação ao solo e a água. É válido mencionar que quando submetido a cultivo intensivo, sem diversidade de culturas, o solo tende a sofrer efeitos deletérios que afetam principalmente a sua estrutura (Freitas *et al.*, 2017; Lal, 2015; Neves *et al.*, 2009; Reichert *et al.*, 2009).

Mudanças consideradas negativas na estrutura do solo tendem a afetar propriedades relacionadas principalmente com a retenção e movimento de água, transporte de gases, retenção de impurezas e capacidade do solo em manter um ambiente saudável para o desenvolvimento da biota do solo. Quando ocorrem aumentos expressivos na permeabilidade em função de manejos inadequados, muitas vezes isto faz com que o solo não consiga manter uma proporção adequada de poros de retenção de água, os quais são fundamentais para o bom desenvolvimento das culturas agrícolas. Por outro lado, se a permeabilidade do solo é reduzida drasticamente, a água pode não infiltrar adequadamente, ocorrendo o aparecimento de processos erosivos devido à existência de camadas seladas ou regiões adensadas (Beutler *et al.*, 2001; Gonçalves; Vieira, 2013). Tendo em vista a complexidade da estrutura do solo, torna-se necessária a busca por sistemas de uso do solo que sejam considerados ambientalmente mais ecológicos. Alguns estudos veem destacando a importância dos sistemas integrados de produção como

alternativas para um melhor uso do solo em face dos desafios gerados pelas mudanças climáticas (Assad, 2021; Fernandes; Finco, 2014). De acordo com McBratney, Field e Koch (2014), a intensificação da agricultura é necessária para atender a demanda global de alimentos, mas essa intensificação precisa ser sustentável, respeitando os limites do meio ambiente. Nesse sentido, os sistemas integrados de produção se mostram como alternativas promissoras para atender a essa necessidade.

O manejo do solo visa garantir a produtividade e a sustentabilidade da agropecuária (Lal, 2015). Trata-se de um conjunto de técnicas e estratégias a fim de manter a fertilidade e a qualidade do solo, reduzindo processos deletérios como a erosão e a contaminação do meio ambiente por agroquímicos (Tôsto *et al.*, 2007). Essas práticas incluem o uso adequado de fertilizantes, a rotação de culturas, o controle de pragas e doenças, a conservação do solo e a adoção de sistemas de manejo de plantas de cobertura (Sainju; Singh; Whitehead, 2002). O manejo adequado do solo pode melhorar a produtividade das culturas, reduzir os custos de produção e aumentar a resiliência dos sistemas agrícolas a mudanças consideradas negativas do ponto de vista ambiental (Chivenge *et al.*, 2015). As práticas de cultivo são importantes ferramentas utilizadas na agricultura para melhorar a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Entre as práticas mais comuns no Brasil, existem o sistema de cultivo convencional, o sistema de plantio direto, o sistema de cultivo mínimo e o sistema de plantio direto com subsolagem (Abreu; Reichert; Reinert, 2004; Bavoso *et al.*, 2010; Auler *et al.*, 2014; Seki; Benez; Da Silva, 2012).

O sistema de cultivo convencional é caracterizado pelo revolvimento das camadas superficiais do solo pelos processos de aração e gradagem. Esses processos visam incorporar os restos culturais nas camadas superficiais do solo e controlar as plantas invasoras. No entanto, essa prática pode levar à compactação do solo nas camadas mais profundas em função da gradagem e à perda de material orgânico, resultando em baixa produtividade e degradação do solo (Pinto Filho; Dantas; Pereira, 2009). O fato de o solo ficar sem a cobertura vegetal no cultivo convencional pode facilitar o transporte de sedimentos em virtude de chuvas intensas, o que tem sido cada vez mais comum devido às mudanças climáticas (Maruffi *et al.*, 2002).

Por outro lado, o sistema de plantio direto é considerado uma prática conservacionista, na qual os restos culturais são mantidos na superfície do solo, protegendo-o de processos erosivos e aumentando o aporte de material orgânico nas camadas superficiais do solo (Lal, 2004). Além disso, a redução do revolvimento do solo ainda promove a preservação de sua estrutura, resultando em melhorias na capacidade de retenção de água e nutrientes. O sistema de plantio direto também pode atuar na retenção de carbono, em função da manutenção dos restos culturais, o que é fundamental devido à importância do carbono para o efeito estufa (Corbeels *et al.*, 2016; Yang; Drury; Wander, 2013). O maior conteúdo de material orgânico nas camadas superficiais também possibilita uma fauna do solo mais diversificada, sendo fundamental para manter uma adequada geometria dos poros (Rizk; Mikhail, 1999).

O sistema de cultivo mínimo pode ser considerado como um meio-termo entre o sistema convencional e o sistema de plantio direto. Nesse sistema, a quantidade de revolvimento do solo é reduzida, mas não eliminada completamente (Li *et al.*, 2020). Essa prática pode contribuir para a preservação da estrutura do solo e aumento da produtividade agrícola devido ao menor revolvimento do solo e pelos processos de preparo serem menos invasivos do que no sistema convencional (Pagliai; Vignozzi; Pellegrini, 2004; Rodrigues *et al.*, 2018).

Já o sistema de plantio direto mais subsolagem é uma variação do sistema de plantio direto, no qual são realizadas subsolagens visando descompactar as camadas mais superficiais do solo (Camargo; Alleoni, 1997). Essa prática tem sido utilizada com sucesso em solos mais compactados, promovendo a melhoria da infiltração de água e a redução de camadas adensadas. O processo de subsolagem é recomendado quando a camada compactada está em profundidades não atingidas pelos escarificadores.

Contudo, como já descrito, a busca por práticas de manejo agrícola sustentáveis tem se tornado uma prioridade na agricultura moderna, visando um uso mais racional dos recursos naturais, a preservação do meio ambiente e a obtenção de colheitas com certificação de produção ecologicamente adequada. Diante disso, na crescente busca por práticas agrícolas sustentáveis, o azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) destaca-se como uma cultura versátil, conforme evidenciado por

Bavoso *et al.* (2010) e Correia *et al.* (2013). Essa gramínea oferece diversas opções de cultivo, incluindo o uso como pastagem, planta de cobertura do solo e silagem.

O azevém é uma gramínea forrageira amplamente cultivada em regiões de clima temperado, com capacidade de crescimento vigoroso e rápido, além de seu alto valor nutricional, tornando-se uma escolha popular para a produção de forragem destinada ao pastejo animal (Nunes; Mittelman, 2009). Além disso, seu sistema radicular denso contribui para a melhoria da estrutura do solo, promovendo a redução da erosão, aumento da permeabilidade do solo e incremento de material orgânico nas camadas superficiais do solo (Ramos *et al.*, 2014). No entanto, o uso inadequado do pastejo ou a falta de rotação de pastagens, pode levar à degradação do solo, com consequências negativas para a produção agrícola e para o meio ambiente (Macedo *et al.*, 2009).

Existem técnicas de manejo do pastejo que visam aperfeiçoar a produção animal e promover a sustentabilidade do sistema produtivo. Entre essas técnicas, destacam-se a rotação de pastagens, o controle de lotação animal e o uso de adubação orgânica. Essas práticas podem promover a recuperação de áreas degradadas restaurando os estoques de carbono em pastagens e aumentando a eficiência da produção animal (Taboada; Rubio; Chaneton, 2011). Em geral, o uso do pastejo animal no manejo do solo apresenta vantagens e desafios, que precisam ser avaliados e gerenciados para se obter resultados positivos e sustentáveis.

No entanto, o azevém também pode desempenhar um papel fundamental como planta de cobertura, proporcionando uma série de benefícios ao solo e ao sistema agrícola como um todo. O uso do azevém como planta de cobertura visa principalmente à proteção do solo contra a erosão, a supressão de plantas daninhas e a melhoria da retenção de água e nutrientes, contribuindo para a sustentabilidade do sistema de produção (Moraes *et al.*, 2009).

Outra aplicação relevante da cultura do azevém é na produção de silagem. Nesse cenário, a cultura é colhida em diferentes estágios de desenvolvimento e armazenada para uso posterior como alimento para o gado (Pereira *et al.*, 2003). O processo de ensilagem do azevém é uma estratégia eficaz desde que aplicada corretamente para garantir a disponibilidade de alimento de qualidade ao longo do ano, independentemente das flutuações sazonais (Martins *et al.*, 2006). No entanto, embora essas diferentes estratégias de uso da cultura do azevém tenham ganhado

destaque na agricultura, é importante compreender os impactos específicos de cada sistema nas propriedades físicas e químicas do solo. A escolha do sistema de manejo e do uso da cultura do azevém pode influenciar a estrutura do solo, a sua capacidade de retenção de água, a ciclagem de nutrientes e, conseqüentemente, a produtividade das culturas agrícolas (Niero *et al.*, 2010).

Tendo isso em vista, os sistemas integrados de lavoura-pecuária (ILP) são uma estratégia cada vez mais utilizada na agricultura para aumentar a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Lemaire *et al.*, 2014). Esses sistemas combinam a produção de grãos e a criação de animais em uma mesma área, integrando diferentes atividades em um mesmo espaço. Dessa forma, é possível melhorar a eficiência no uso dos recursos relacionados à água e ao solo, reduzir os impactos ambientais e aumentar a rentabilidade da produção agrícola. As vantagens do ILP incluem a conservação do solo, a melhoria da qualidade da pastagem e a diminuição da pressão por novas áreas de produção (Silva *et al.*, 2021).

Para maximizar o uso do solo na agricultura e na recuperação de pastagens, é essencial encontrar a combinação ideal entre o manejo do solo e as práticas voltadas para a pecuária. É importante garantir que a produção de grãos não seja afetada negativamente pela criação de animais, assim como a produção pecuária não seja prejudicada no processo do desenvolvimento da cultura agrícola (Marchão *et al.*, 2009). É válido ressaltar que as atividades relacionadas à pecuária geralmente causam grande impacto ambiental e requerem normalmente grandes áreas, o que contribui para manter vastas regiões de terra ociosas por longos períodos de tempo (Silva Freitas; Prudencio; Soares Filho, 2022). Neste sentido, a adoção da ILP pode ser uma alternativa interessante em tornar essas áreas ociosas em locais de produção agrícola.

Os diferentes usos e manejos do solo tendem a afetar principalmente a sua estrutura, a qual está relacionada com a forma, o tamanho, o arranjo espacial das partículas e agregados do solo (Hillel, 2003). As partículas sólidas que compõem o solo podem ter diferentes tamanhos e formas, variando desde os menores tamanhos referentes à fração argila, até as maiores partículas de areia e pedregulhos (Brady; Weil, 2009). Essas partículas podem se organizar em agregados, que são estruturas maiores compostas por inúmeras partículas, mantidas unidas por processos físicos, químicos e biológicos (Tisdall; Oades, 1982). Tal arranjo forma uma estrutura

tridimensional (esqueleto) composta de três fases: sólida, líquida e gasosa. Portanto, mudanças na estrutura do solo irão afetar diretamente o seu sistema poroso, uma vez que existem espaços entre os agregados (poros inter-agregados) e dentro dos agregados (poros intra-agregados) (Schimiguel *et al.*, 2014). Desta forma, a adoção de técnicas de manejo que visem preservar ou aprimorar a estrutura do solo, é essencial para promover a eficiência da produção agrícola e reduzir danos ambientais (Dexter, 2003). A análise da estrutura do solo é fundamental para compreender a dinâmica da água e nutrientes, além de fornecer informações sobre como o sistema radicular das plantas se desenvolve (Manhaes; Francelino, 2013).

Nas últimas décadas, análises detalhadas da estrutura do solo têm sido realizadas por técnicas de análise de imagens como a microtomografia computadorizada de raios X (MICRO-TC). A MICRO-TC é uma técnica não destrutiva que permite a aquisição de imagens tridimensionais de alta resolução de materiais porosos. Por meio da MICRO-TC é possível obter informações sobre o sistema poroso do solo, permitindo estudar inúmeras de suas propriedades morfológicas e geométricas tais como: a permeabilidade intrínseca, a distribuição do formato e tamanho dos poros, a porosidade, a conectividade dos poros, a tortuosidade, etc. (Helliwell *et al.*, 2013; Ketcham; Carlson, 2001; Luo; Lin; Halleck, 2008).

Tendo isso em mente, a MICRO-TC tem se destacado como uma ferramenta versátil para a análise de parâmetros físicos como a porosidade do solo na microescala, conforme destacado por Beckers *et al.* (2014). Esses autores enfatizam que essa técnica possibilita a quantificação da estrutura do solo, proporcionando uma compreensão detalhada de suas características físicas, além de possibilitar a criação de novos métodos para sua quantificação. Os resultados obtidos pelo método de visualização da parte visível da porosidade desenvolvida por esses autores, com base na lei de Laplace-Jurin, foram testados em solos sob sistema convencional e reduzido, e encontraram boa concordância com a literatura.

Outros destaques dessa técnica são reportados por Dhaliwal e Kumar (2022), que empregaram a MICRO-TC para avaliar as propriedades físicas estruturais dos poros do solo sob diferentes usos, como pastagem nativa, culturas de cobertura e áreas de cultivo. De acordo com esses autores, a visualização tridimensional (3D) do sistema poroso do solo permitiu a análise de parâmetros tais

como a porosidade, a dimensão fractal, o grau de anisotropia, a tortuosidade e o número de poros. Além disso, esse estudo enfatiza que o uso de ILP tem implicações interessantes e positivas nas propriedades físicas do solo, quando sua adoção é em longo prazo.

Passoni *et al.* (2015) ressaltaram a capacidade da MICRO-TC em realizar uma análise rápida e detalhada do sistema de macroporos do solo. Nesse contexto, os autores avaliaram o número total e a forma dos macroporos em 3D de maneira não destrutiva. Os resultados obtidos por esses autores indicaram que a classificação de poros não identificados pode resultar em maior conectividade e macroporosidade. Outro exemplo da análise dos mesoporos e macroporos do solo foi conduzido por Galdos *et al.* (2019). Nesse estudo, os autores utilizaram a MICRO-TC para analisar e quantificar a conectividade, o formato e a distribuição de tamanhos de poros em amostras não deformadas de solos sob sistema de plantio direto e sistema de plantio convencional. Os autores concluíram, é que a adoção de sistemas conservacionistas como o plantio direto, acarreta em resultados positivos para estrutura do solo, como menor tortuosidade e maior conectividade e macroporosidade.

Outras pesquisas relevantes sobre a análise detalhada da estrutura do solo são descritas por De Faria Borges *et al.* (2019) e Tseng, Alves e Crestana (2018). Os primeiros autores empregaram a MICRO-TC para avaliar a estrutura do solo, incluindo simulações 3D de processos envolvendo o movimento de água. Ainda nesse estudo, os autores concluíram que o grau de anisotropia é um importante indicador do alinhamento espacial dos poros, enquanto que o número de Euler-Poincaré forneceu informações relevantes sobre a conectividade dos poros. Os últimos autores apresentaram um estudo abrangente, utilizando diversos algoritmos de processamento de imagens, para avaliar um material arenoso com base em MICRO-TC. O estudo destes autores permitiu a avaliação de propriedades do sistema poroso analisado, tais como a dimensão fractal, a distribuição granulométrica, a esfericidade, a tortuosidade e o índice de vazios. De acordo com os resultados desse estudo, os algoritmos de análise de imagem vêm como complemento para as mesmas análises efetuadas em laboratório, e se obtém as mesmas propriedades, coeficientes e curvas, porém, com maior praticidade.

No estudo de Sleutel *et al.* (2008), foram escaneadas diferentes configurações de MICRO-TC com resolução de 2,5 μm , para investigar a microestrutura porosa do solo, analisando parâmetros como o volume de poros, a dimensão fractal e a porosidade. De acordo com esses autores, resoluções mais altas possibilitam uma visualização de ramificações de conectividade e porosidade mais detalhada, e que estes parâmetros são localmente autocorrelacionados. Recentemente, Schlüter *et al.* (2016), realizaram uma análise detalhada com MICRO-TC por meio de correlação digital de volumes de espaço poroso, revelando que fissuras podem gerar um aumento na macroporosidade.

Além disso, Lekhov, Pozdniakov e Nešetřil (2021), há pouco tempo apresentaram um método para determinar relações entre a tortuosidade de difusão e a porosidade do solo, baseado na análise de dados de microestruturas tridimensionais obtidas por MICRO-TC. Plotando um gráfico de tortuosidade versus porosidade, os resultados obtidos por esses autores, através de simulações, mostram uma diminuição da porosidade com uma diminuição não linear da tortuosidade.

Diante disso, como demonstrado na literatura, torna-se essencial à aplicação de técnicas de observação micromorfológica e análise de imagens para a compreensão de como as diferentes propriedades físicas do solo são afetadas pelos diferentes usos do solo na escala de micrômetros. Essas abordagens fornecem informações valiosas sobre a estrutura do sistema poroso do solo em diversas escalas, permitindo uma investigação detalhada das alterações que ocorrem em resposta a diferentes práticas de manejo (Costanza-Robinson; Estabrook; Fouhey, 2011; Gaspareto *et al.*, 2023). Essas técnicas são ferramentas essenciais para auxiliar na tomada de decisões relacionadas à gestão e conservação do solo, contribuindo para o uso mais eficiente e sustentável desse recurso vital.

No desenvolvimento deste estudo serão avaliadas as seguintes hipóteses:

- a) sistemas de manejo sob integração lavoura-pecuária afetam as propriedades micromorfológicas do solo de maneiras distintas;
- b) a utilização de cobertura vegetal melhora as propriedades morfológicas e geométricas do sistema poroso do solo;
- c) os diferentes planos de reconstrução das imagens não afetam os resultados das propriedades micromorfológicas analisadas.

Com as hipóteses definidas, os objetivos neste estudo foram estabelecidos da seguinte maneira:

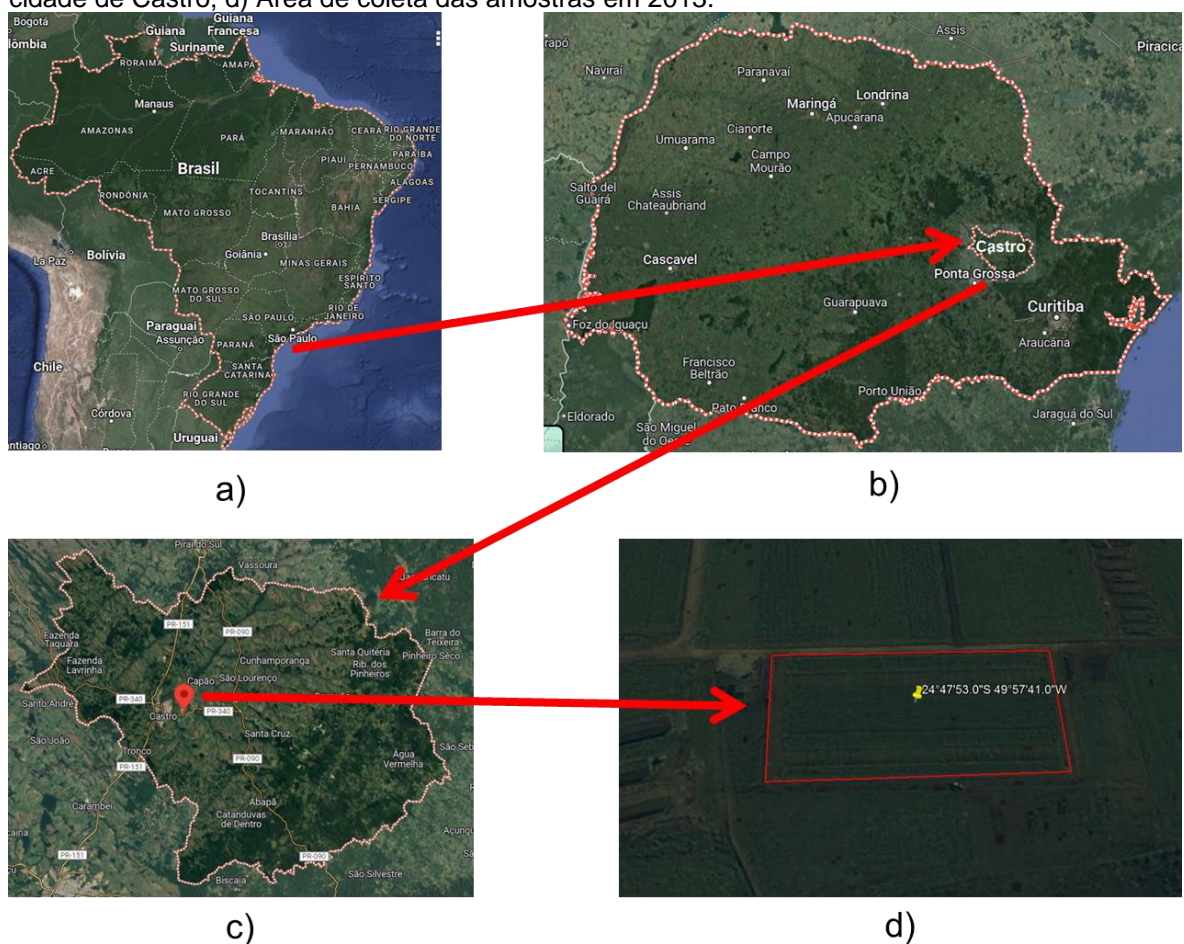
- a) caracterizar o sistema poroso do solo de um Latossolo Bruno Argiloso, submetido a diferentes sistemas de manejo (Sistema Convencional, Sistema de Cultivo Mínimo, Sistema de Plantio Direto e Sistema de Plantio Direto mais Subsolagem) sob distintos usos da cultura do azevém (Cobertura, Pastejo e Silagem);
- b) identificar, comparar e interpretar as alterações micromorfológicas ocorridas na geometria dos poros do solo;
- c) verificar o procedimento mais adequado para a segmentação das imagens microtomográficas;
- d) analisar as propriedades morfológicas e geométricas dos poros com base em medidas da porosidade, dimensão fractal, grau de anisotropia, conectividade dos poros, tortuosidade, volume e número de poros.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DO ESTUDO

As amostras desse estudo foram coletadas em uma área experimental localizada próximo a cidade de Castro, no estado do Paraná, Brasil (latitude: $24^{\circ}47'53''\text{S}$, longitude: $49^{\circ}57'41''\text{O}$) (Figura 2.1). A região apresenta uma altitude média de aproximadamente 997 metros possuindo um clima classificado como CFB, de acordo com a classificação de Köppen (Caviglione *et al.*, 2000).

Figura 2.1 – Localização amostral: a) Mapa do Brasil; b) Mapa do Estado do Paraná; c) Mapa da cidade de Castro; d) Área de coleta das amostras em 2013.



Fonte: Adaptado de: GOOGLE earth. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@0,-2.95019995,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r/data=OgMKATA>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

O clima é considerado mesotérmico com verões frescos e sem uma estação seca definida. A temperatura média anual é de $16,8^{\circ}\text{C}$ com ocorrência frequente de geadas nos meses mais frios (junho e julho). A precipitação média anual na região

varia entre 1.600 e 1.800 mm, conforme informações do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR, 2000).

Referente à geologia da região, conforme as observações de Fasolo *et al.* (2002), a cidade de Castro, localizada no primeiro planalto do Paraná, caracteriza-se pela prevalência de diferentes tipos de rochas, incluindo rochas graníticas porfíricas, granitos alaskitos, migmatitos, granitos de anatexia, granitos subalcalinos e alcalinos. Adicionalmente, identifica-se a presença de rochas de diferentes litologias, pertencentes ao Grupo Castro, que engloba três unidades discrepantes: 1) sequência sedimentar; 2) sequência vulcânica ácida; e 3) sequência vulcânica. Os solos predominantes na região são majoritariamente argilosos, encontrados em terrenos acidentados, exibindo coloração brunada ou avermelhada, profundidade considerável, acidez evidente e textura com variação limitada. Tais solos, sob floresta nativa ou com cobertura vegetal, apresentam elevados teores de matéria orgânica. Destaca-se que a textura dos arenitos é variável, com características conglomeráticas; e nas rochas da Formação Furnas, a textura é em geral média com intercalações de clásticos síltico-argilosos.

O solo utilizado no experimento é classificado como um Latossolo Bruno proeminente textura argilosa fase campo subtropical com relevo suave ondulado, de acordo com a classificação da Embrapa (2018). A composição granulométrica do solo é constituída de 354 g kg⁻¹ de areia, 211 g kg⁻¹ de silte e 435 g kg⁻¹ de argila. Com base nos dados da análise granulométrica para o sistema de classificação do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), o solo possui textura argilosa sendo bastante comum na região. O experimento foi implantado no ano agrícola de 2004/2005, com sucessão anual de milho e azevém. A área de estudo foi dividida em blocos, onde cada bloco continha parcelas com dimensões de 1200 m² (120×10m) e subparcelas de 100 m² (10×10m). Cada parcela continha quatro sistemas de manejo do solo, enquanto as subparcelas foram designadas para avaliar três diferentes usos da cultura do azevém (*Lolium multiflorum* Lam.). Todas as parcelas experimentais foram submetidas aos mesmos procedimentos de correção do pH e adubação química (Auler *et al.*, 2014). É válido ainda mencionar que as parcelas e subparcelas foram dispostas de forma a minimizar quaisquer efeitos de variabilidade espacial.

Os seguintes sistemas de manejo foram estudados: (1) sistema convencional (SC) (Figura 2.2) – nesse preparo o solo foi submetido à passagem de arado de discos a 0,20 m de profundidade, seguido de duas gradagens com grade niveladora; (2) sistema de cultivo mínimo (SCM) (Figura 2.3) – nesse preparo foi realizada apenas uma passagem de grade a 0,10 m de profundidade, utilizando grade niveladora; (3) sistema de plantio direto (SPD) (Figura 2.4) – nesse preparo foi empregado somente à semeadora para o plantio, procedimento realizado duas vezes ao ano, abrangendo os períodos de verão e inverno. Não ocorreu qualquer tipo de revolvimento do solo com os restos vegetais sendo mantidos na superfície do solo; e (4) sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S) – nesse preparo o solo foi submetido ao processo de escarificação a 0,25 m de profundidade, executada com um arado escarificador tipo asa plana, com hastes espaçadas de 0,60 m. Posteriormente, foram realizadas duas gradagens para nivelar o solo. Um exemplo de subsolador escarificador é apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.2 – Exemplo de sistema convencional (SC) de preparo do solo: a) o arado realiza a inversão ou revolvimento das camadas superficiais do solo, deixando a superfície irregular e com torrões; b) a grade niveladora destorroa e deixa a superfície regular após a passagem do arado.



a)



b)

Fonte: PORTAL EMBRAPA. **Sistema convencional** - Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/pimenta/producao/sistema-de-cultivo/sistema-convencional>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

Figura 2.3 – Exemplo de sistema de cultivo mínimo (SCM) - Solo coberto por *Crotalaria spectabilis* com sulcagens para posterior plantio de cana de açúcar.



Fonte: DE OLIVEIRA, Mauro Wagner *et al.* **Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30-43, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Sulcagem-para-plantio-da-cana-cultivo-minimo-em-solo-coberto-por-Crotalaria_fig2_348885212>. Acesso em: 12 nov. 2023.

Figura 2.4 – Exemplo de sistema de plantio direto (SPD) - Solo com restos culturais de palhada de braquiária em algodão.



Fonte: CAMPO, J. D. DE. **Sistema Plantio Direto**. Disponível em: <<http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=20779&secao=Colunas%20e%20Artigos>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

Figura 2.5 – Exemplo de subsolador com sistema de desarme automático de hastes.



Fonte: CULTIVAR, R. **Quando utilizar subsolador e escarificador**. Disponível em: <<https://revistacultivar.com.br/artigos/quando-utilizar-subsolador-e-escarificador>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

Com relação ao manejo da cultura do azevém, os seguintes tratamentos foram estudados: (1) planta de cobertura (C) – nesse manejo, o azevém foi utilizado como cobertura do solo, permanecendo durante todo o inverno até a dessecação da área, iniciada em outubro de 2012 (Figura 2.6); (2) pastejo (P) – nesse manejo, o azevém foi destinado à alimentação animal, com a presença de aproximadamente três novilhas, unidades animal (UA), que permaneceram na área até que a altura do azevém atingisse entre 0,20 e 0,25 m (Figura 2.7); e (3) silagem (S) – nesse manejo, o azevém foi direcionado para a produção de silagem pré-secada (Figura 2.8). Foram realizados três cortes da cultura, mantendo a altura de corte entre 0,20 a 0,25 m.

Figura 2.6 – Exemplo de uso da cultura do azevém como cobertura vegetal na lavoura.



Fonte: BRANDING, A. D.; AGROPRECISION. **Manejo do azevém durante o inverno**. Disponível em: <<https://www.agroprecision.com.br/manejo-do-azevem-durante-o-inverno/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

Figura 2.7 – Exemplo de uso da cultura do azevém como pastagem.



Fonte: EPAGRI. **Epagri e Cravil lançam cultivar de pastagem no dia 15**. Disponível em: <<https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2020/10/13/epagri-e-cravil-lancam-cultivar-de-pastagem-no-dia-15/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

Figura 2.8 – Exemplo de uso da cultura do azevém como silagem. Azevém pré-secado sendo recolhido pela ensiladeira.



Fonte: SÍTIO DO CEDRO. **Silagem pré-secada de cultura de inverno**. Disponível em: <<https://www.sitiodocedro.com.br/silagem-pre-secada-de-cultura-de-inverno/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

2.2. COLETA DAS AMOSTRAS

Após a dessecação da cultura do azevém, a coleta das amostras de solo foi realizada na camada de 0 a 0,20 m de profundidade no ano de 2012. O processo de coleta foi conduzido com a utilização de espátulas, enxadão e pás, destinados especificamente para esse fim. A coleta envolveu a obtenção de torrões indeformados de solo de formato irregular, com volumes maiores do que mil centímetros cúbicos a fim de garantir a representatividade das amostras. Foram coletados de 4 a 6 torrões por tratamento estudado. A coleta foi feita mantendo uma distância de um metro da bordadura de cada lado das subparcelas. Para evitar a desestruturação do solo e a perda de umidade durante o transporte até o laboratório, as amostras foram envolvidas em plástico filme, acondicionadas cuidadosamente uma ao lado da outra e transportadas em caixas plásticas.

2.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISE POR MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Antes do preparo das amostras para as análises de tomografia, as mesmas foram secadas ao ar livre por várias semanas. Após as amostras atingirem uma massa constante, foi realizada uma nova amostragem em cada um dos torrões previamente coletados. Essa nova amostragem envolveu a produção manual de blocos com formatos mais regulares do que os torrões. Os blocos foram cuidadosamente confeccionados utilizando serras apropriadas de aço. Na sequência, cada bloco foi cuidadosamente envolvido em plástico filme, após o preparo, para evitar a absorção de umidade (Figura 2.9). A dimensão de cada bloco produzido foi ajustada de acordo com as dimensões do porta-amostra (Figura 2.10), o qual foi confeccionado utilizando impressora 3D. Dois porta-amostras foram impressos possuindo formato cilíndrico e vazado, o primeiro com diâmetro interno de aproximadamente 3,0 cm e o segundo com diâmetro interno de aproximadamente 5,0 cm. As amostras foram cuidadosamente inseridas dentro de cada porta amostra antes do escaneamento. Para as amostras com diâmetros menores do que o diâmetro do porta-amostra, foram utilizadas espumas para fixar as amostras no

interior do porta-amostra. Esse procedimento foi realizado para evitar o movimento da amostra durante o escaneamento, o que gera artefato nas imagens.

Figura 2.9 – Confeção, embalagem e etiquetagem das amostras para posterior análise microtomográfica.



Fonte: O autor.

Figura 2.10 – Porta-amostra confeccionado com o propósito de escanear as amostras de solo.

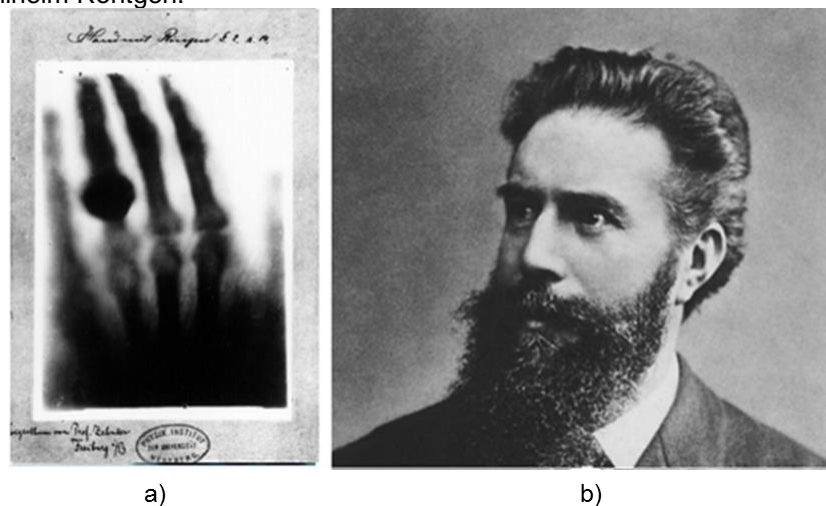


Fonte: O autor.

2.4. ANÁLISE POR MICROTOMOGRÁFIA COMPUTADORIZADA

A detecção pioneira dos raios X, realizada por Wilhelm Conrad Röntgen em 1895 (Figura 2.11), representou um avanço notável na compreensão científica da dos processos que ocorrem na escala atômica na época. A escolha do termo "raios X" refletiu a perplexidade que envolvia a comunidade científica diante da natureza ainda desconhecida dessa forma de radiação. Röntgen fez essa descoberta enquanto explorava a luminescência gerada por raios catódicos em um tubo de Crookes.

Figura 2.11 – Detecção de raios X: a) primeira imagem radiográfica da história (mão da esposa de Röntgen); b) Wilhelm Röntgen.



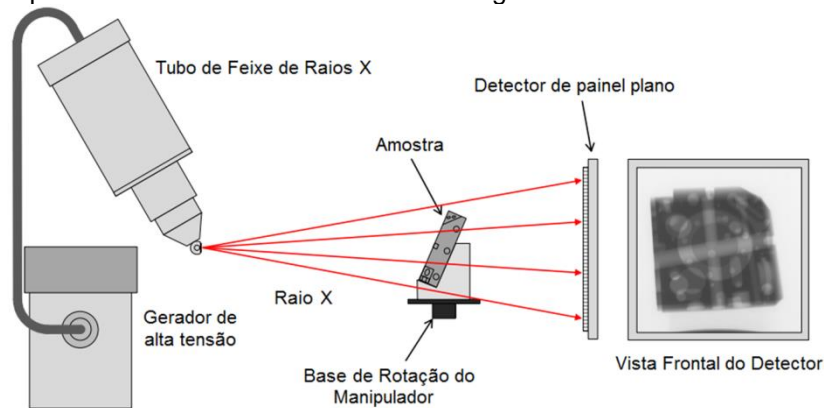
Fonte: Adaptado de: CAPA, NOSSA. Wilhelm Röntgen e a criação dos raios X. **J Bras Patol Med Lab**, 2009, 45.1.

Os raios X, caracterizados como ondas eletromagnéticas de alta energia, comparadas as demais ondas eletromagnéticas do espectro com exceção dos raios gama e cósmicos, possuem um comprimento de onda curto, apresentando propriedades únicas. Apesar de viajarem em linha reta na velocidade da luz, têm a capacidade de serem dispersos. É interessante observar que os caminhos dos raios X não são suscetíveis a alterações por campos elétricos ou magnéticos. No entanto, tecnologias avançadas de óptica, como as empregadas em síncrotrons, possibilitam sua manipulação para aplicações diversas.

Como ilustrado na Figura 2.12, os sistemas de raios X de equipamentos como os tomógrafos de bancada e industriais incluem componentes essenciais, como um tubo de raios X (também conhecido como fonte de raios X), um gerador de

alta tensão, um manipulador de amostras e um detector de tela plana. Durante o processo, os raios X são transmitidos pela amostra, resultando na formação de uma imagem sombreada que é capturada pelo detector de tela plana.

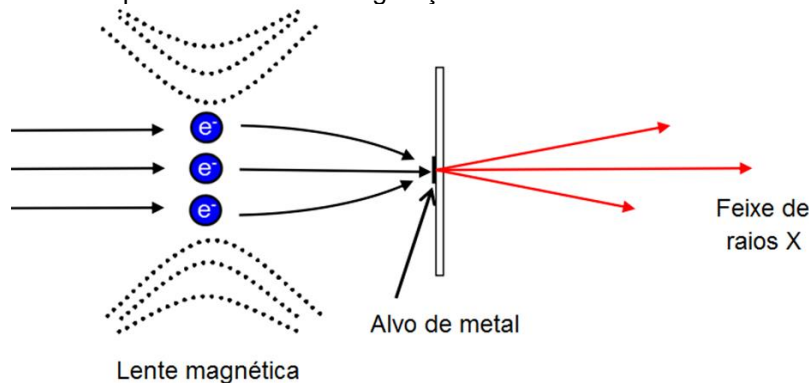
Figura 2.12 – Componentes de um sistema de raios X de gabinete.



Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

A geração de raios X (Figura 2.13) é realizada mediante a interação de elétrons em alta velocidade contra um alvo de metal. A emissão desses elétrons tem origem em um filamento aquecido, assemelhando-se a uma lâmpada. Posteriormente, são acelerados por meio de uma alta tensão em um tubo de feixe, alcançando velocidades de até 80% da velocidade da luz. Uma lente magnética focaliza esses elétrons em um diminuto ponto (fonte pontual), variando de 0,5 a 80 μm , localizado no alvo metálico. A notável desaceleração dos elétrons ao atingir o alvo resulta na geração de calor liberando aproximadamente 99,3% da energia como energia térmica, enquanto apenas 0,7% correspondem à produção de raios X.

Figura 2.13 – Detalhes de processos físicos na geração de raios X.

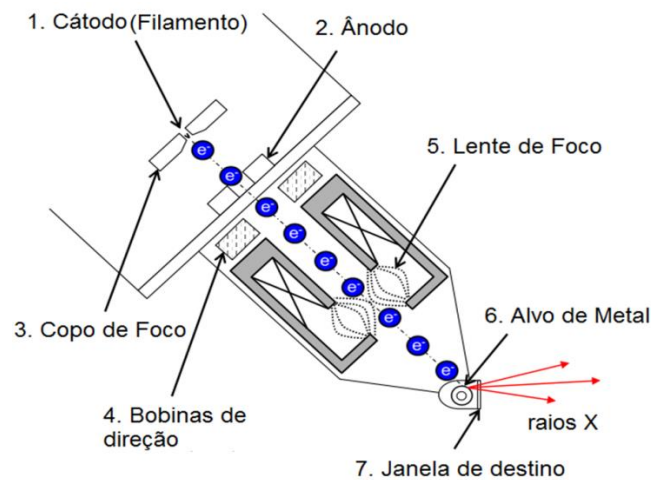


Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

O processo operacional (Figura 2.14) do sistema de geração de raios X segue os seguintes passos:

- a) cátodo (filamento): A passagem de corrente por um fio de tungstênio tem como objetivo aquecê-lo intensamente, levando à emissão de elétrons (efeito termiônico). A temperatura do filamento é regulada por controle de tensão;
- b) ânodo: Uma tensão entre o ânodo e o cátodo acelera os elétrons emitidos, direcionando-os em sentido ao ânodo através de um orifício central;
- c) copo de foco: A variação da tensão de polarização do copo de foco em relação ao cátodo exerce controle sobre o fluxo de elétrons em direção ao ânodo;
- d) bobinas de direção: Estas bobinas guiam o feixe de elétrons, passando pelo centro do tubo do feixe, através do centro da lente e em direção ao alvo;
- e) lente de foco: A lente magnética assume o controle sobre as dimensões do ponto do feixe de elétrons, ajustando-o para um tamanho pequeno para obter imagens nítidas e maiores para prevenir danos ao alvo;
- f) alvo de metal: O impacto dos elétrons no alvo de metal resulta na geração de raios X, sendo que o calor gerado é dissipado pelo líquido refrigerante que flui através do alvo;
- g) janela de destino: Utilizando uma "janela" feita de berílio ou alumínio, mantém-se o vácuo no tubo do feixe, minimizando a absorção de raios X.

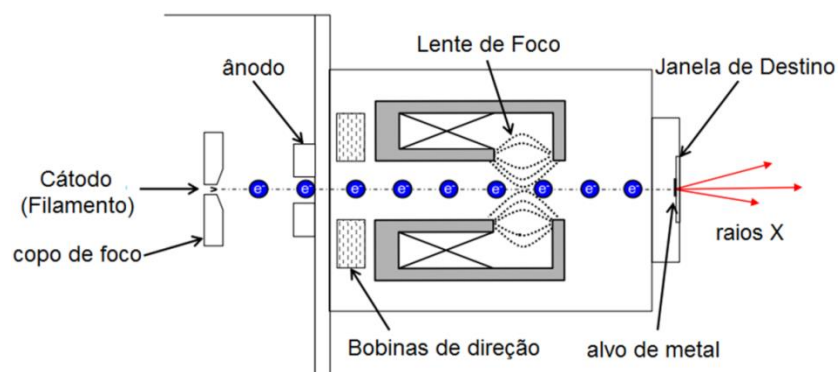
Figura 2.14 – Processo operacional de funcionamento do tubo de raios X de equipamento tomográfico.



Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

Quanto às fontes de raios X, destacam-se as categorias de sistemas que adotam alvo de transmissão (Figura 2.15). Esses sistemas se caracterizam por apresentar um tamanho de ponto focal reduzido, de aproximadamente 1 μm , permitindo uma ampliação significativamente maior do objeto sendo escaneado. Essa característica é vantajosa devido à capacidade de posicionar as amostras em proximidade mais imediata ao alvo, contribuindo para a obtenção de imagens de melhor resolução e qualidade.

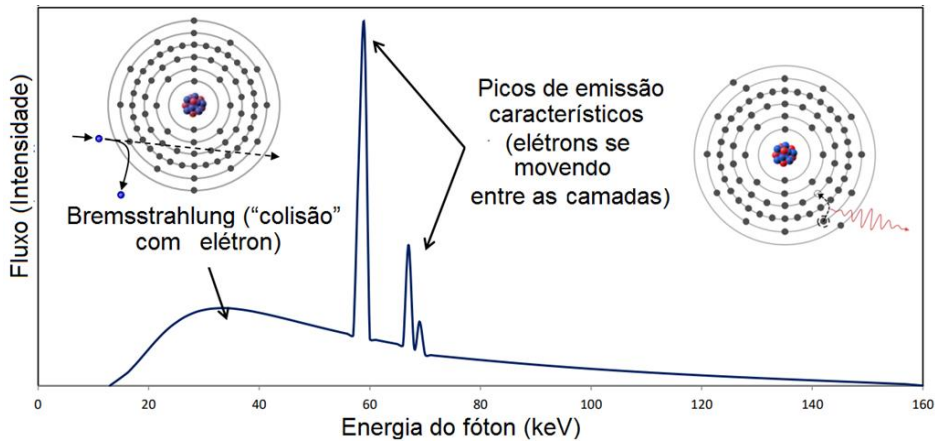
Figura 2.15 – Processo de geração de raios X por meio de elétron bombardeando o alvo metálico.



Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

No que tange à distribuição de frequência do espectro de raios X, é fundamental reconhecer a existência de dois mecanismos distintos de produção: radiação de freamento (*Bremsstrahlung*) e a radiação de emissão característica (Figura 2.16).

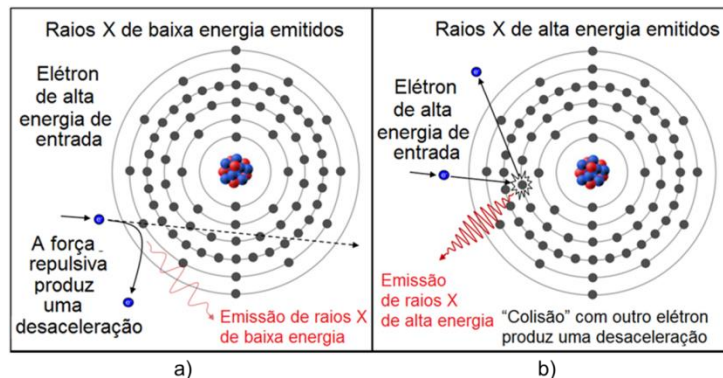
Figura 2.16 – Distribuição de frequência do espectro de raios X gerado por radiação de freamento e pela expulsão de elétrons das camadas eletrônicas.



Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

A geração da radiação de freamento (Figura 2.17), também conhecida como *bremsstrahlung*, ocorre quando um elétron de alta energia penetra no material alvo, interagindo com os demais elétrons presentes em um átomo. A energia dos raios X resultantes abrange uma ampla faixa, desde valores muito baixos (onde o elétron é minimamente afetado pelo átomo (Figura 2.17 a)) até níveis muito elevados (onde toda a energia do elétron é dissipada em uma única "colisão" (Figura 2.17 b)). No entanto, no caso da radiação de freamento existe uma gama de valores de energia dos raios X que pode ser obtida (Figura 2.16). Desta forma, as variações na energia dos raios X refletem as complexidades envolvidas no processo de interação entre os elétrons e os átomos durante a geração de raios X por meio da radiação de freamento.

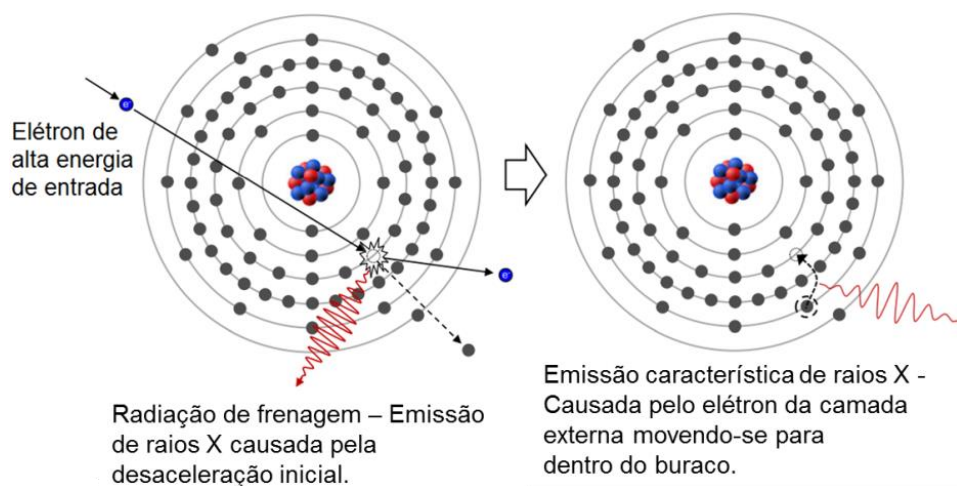
Figura 2.17 – Exemplos de processos de geração de raios X: a) emissão de raios X de baixa energia; b) emissão de raios X de alta energia.



Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

Na produção de radiação de emissão característica (Figura 2.18), um elétron de alta energia expulsa um elétron de uma das camadas internas do átomo, gerando um "buraco" e deixando o átomo instável. A resposta a essa instabilidade ocorre quando um elétron de uma camada externa se desloca para preencher a lacuna deixada pelo elétron expulso. Durante esse processo, ao mover-se entre duas camadas, o átomo libera um excesso de energia equivalente à diferença entre os níveis de energia que caracterizam cada camada, emitindo-a na forma de raios X. Vale ressaltar que tanto os níveis de energia das camadas eletrônicas quanto às dos raios X emitidos são influenciadas pelo material alvo. Esse fenômeno ilustra a complexidade do processo de emissão característica e sua dependência das propriedades do material utilizado como alvo.

Figura 2.18 – Desenho esquemático mostrando o processo de emissão característica de raios X.

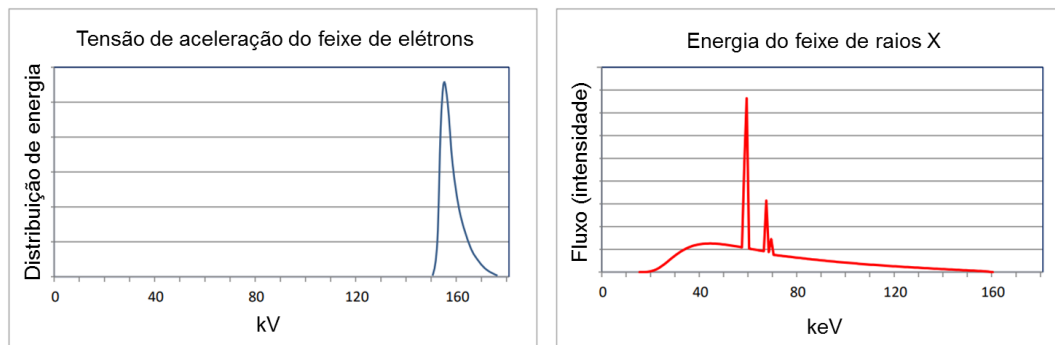


Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

A distinção entre as unidades kV (quilovolt) e keV (quilo elétron-volt) (Figura 2.19) é relevante para evitar confusões:

- a) kV refere-se à tensão de aceleração do feixe de elétrons, representando a diferença de energia potencial aplicada no tubo de raios X entre o cátodo e o ânodo;
- b) keV diz respeito à energia dos fótons de raios X efetivamente produzidos após o processo de desaceleração dos elétrons.

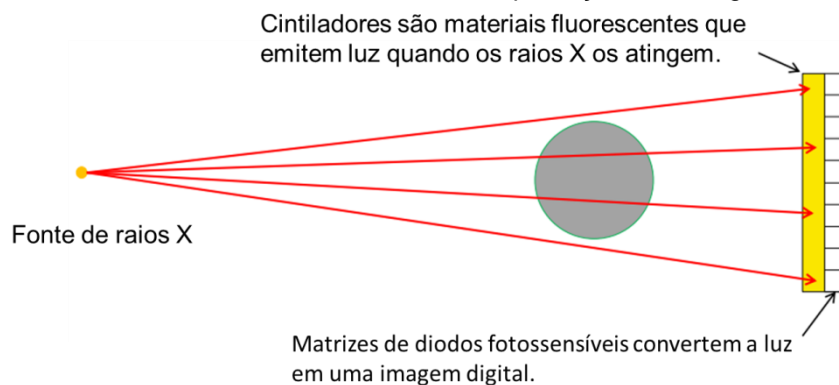
Figura 2.19 – Representação da distribuição de energia relacionada a tensão de aceleração do feixe de elétrons e energia do feixe de raios X gerado.



Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

A detecção de raios X envolve o uso de detectores (Figura 2.20), sendo alguns deles baseados no processo de cintilação. Estes dispositivos têm por objetivo quantificar os fótons de raios X transmitidos, representando a quantidade de fótons de raios X que incidem sobre uma determinada área por unidade de tempo. Importante notar que um maior número de fótons de raios X detectados irá resultar em uma imagem mais brilhante. É relevante destacar que os detectores não fazem distinção entre os raios X de baixa e alta energia. Desta forma, a variação na intensidade da imagem pode ser atribuída tanto a um aumento no número de raios X de baixa energia quanto a uma diminuição no número de raios X de alta energia. No processo de detecção, os cintiladores desempenham um papel crucial, emitindo luz em resposta à incidência dos raios X. Posteriormente, essa luz é captada por diodos, que convertem o sinal em uma representação digital, formando assim a imagem radiográfica.

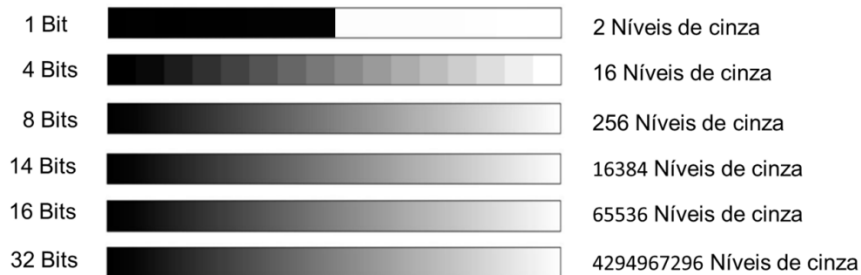
Figura 2.20 – Funcionamento dos cintiladores e diodos na produção de radiografias.



Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

A Figura 2.21 ilustra a correlação existente entre a quantidade de Bits e os níveis de cinza em imagens de raios X. Ao aumentar a profundidade de Bits, observa-se uma ampliação na variedade de tons de cinza disponíveis para representar a intensidade da radiação detectada. Essa expansão aprimora significativamente a capacidade de discernir entre diferentes materiais de densidade, resultando em uma discriminação mais eficaz. Além disso, a maior profundidade de Bits permite um refinamento no posicionamento das superfícies dentro de um voxel durante a avaliação da geometria. Esse aprimoramento contribui de maneira significativa para a precisão nas medições volumétricas, proporcionando uma representação mais detalhada e precisa das estruturas radiografadas.

Figura 2.21 – Quantidade de Bits e seus respectivos níveis de cinza.



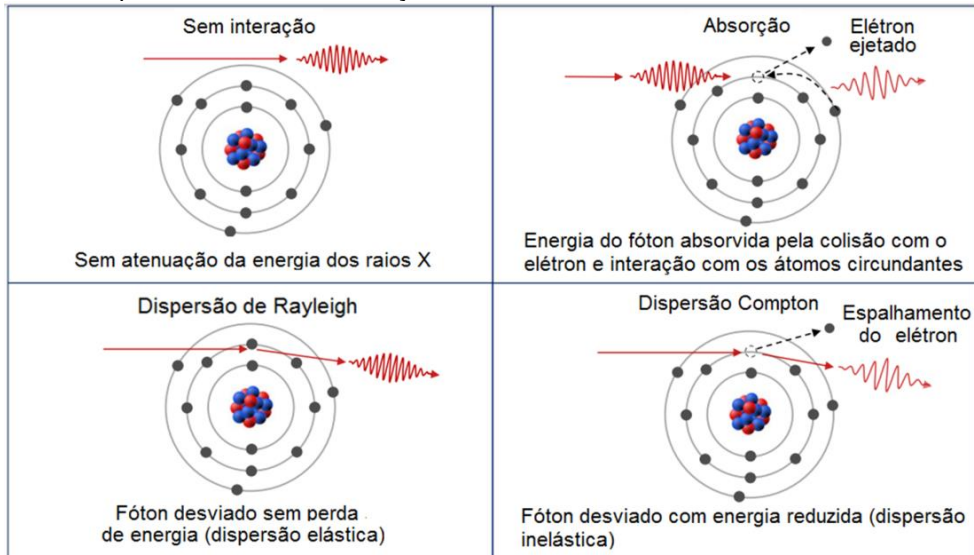
Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

Na interação dos raios X com os átomos, é importante destacar que os raios X não possuem energia suficiente para interagir diretamente com os núcleos atômicos. Em vez disso, eles passam através do material da amostra, podendo se espalhar ou serem absorvidos pelos elétrons presentes. As interações podem ocorrer de várias maneiras (Figura 2.22), sendo as principais:

- a) sem interação: Nesse caso, os fótons de raios X atravessam o material da amostra sem sofrer desvios ou absorção;
- b) absorção: Parte ou todos os fótons de raios X são absorvidos pelos elétrons do material, resultando em redução na intensidade do feixe transmitido;
- c) dispersão Rayleigh: Refere-se ao espalhamento coerente dos fótons de raios X pelos elétrons do material, sem alteração na energia dos fótons;

- d) dispersão Compton: Envolve o espalhamento incoerente dos fótons de raios X pelos elétrons, resultando em uma mudança na direção e na energia desses fótons.

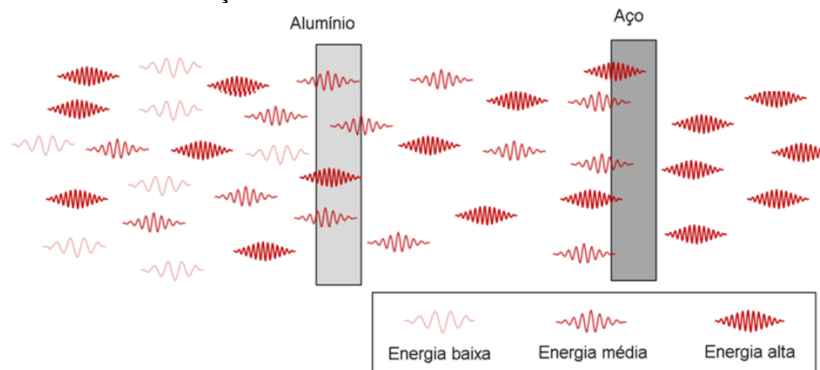
Figura 2.22 – Principais maneiras de interação dos fótons de raios X com os átomos.



Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

Na atenuação de raios X, ao atravessar materiais diversos, observa-se que apenas os raios X de maior energia conseguem atravessar materiais mais densos. Conforme ilustrado na Figura 2.23, raios X de média e alta energia conseguem penetrar no alumínio, enquanto somente os raios X de alta energia conseguem penetrar no aço.

Figura 2.23 – Processo de atenuação de raios X em materiais de densidades diferentes.



Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

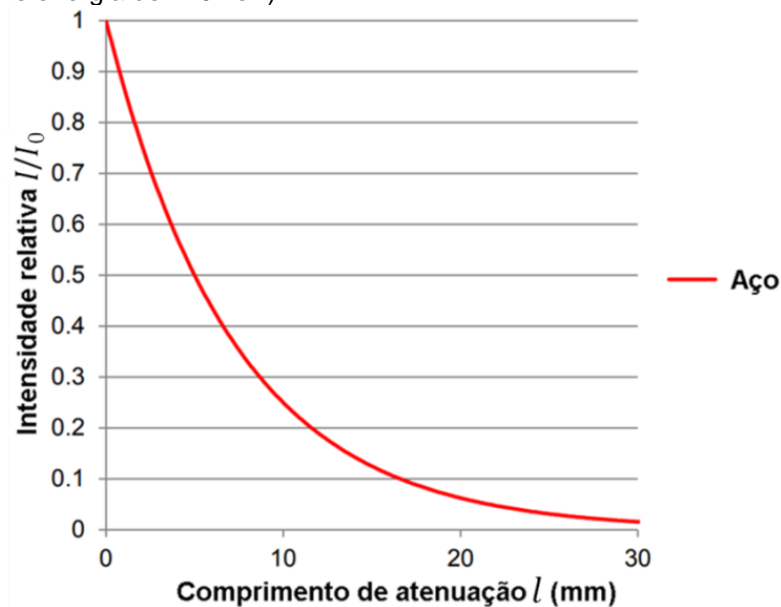
A diminuição na intensidade do feixe de raios X ocorre quando interagem com diferentes materiais ou quando diferentes espessuras de um mesmo material

são consideradas. O gráfico representado na Figura 2.24 segue uma curva de decaimento exponencial. A equação (equação de Beer-Lambert) que descreve esse fenômeno é dada por:

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad (1)$$

onde, I representa a intensidade do feixe transmitido por material de espessura l com coeficiente de atenuação linear α . O termo I_0 é a intensidade incidente do feixe de raios X.

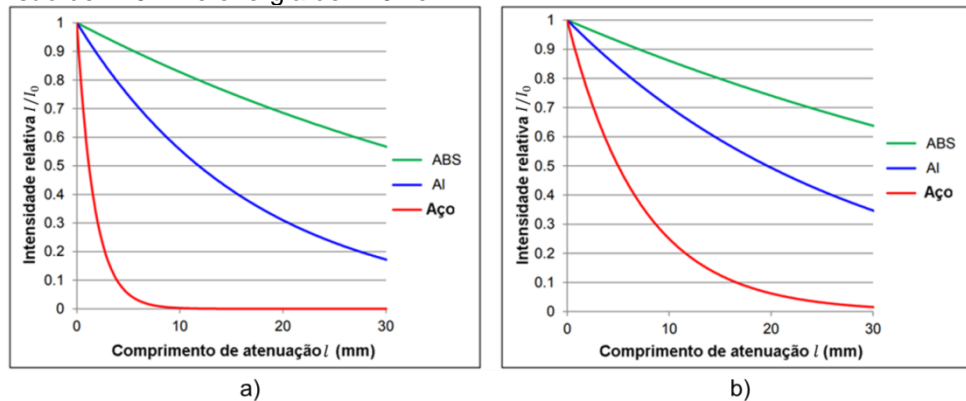
Figura 2.24 – Curva de atenuação de raios X para diferentes espessuras do material atenuador. (tensão de 225 kV e energia de 170 keV).



Fonte: X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

Na Figura 2.25, as inclinações das curvas de atenuação são influenciadas tanto pelo material quanto pela energia dos fótons de raios X. Curvas de atenuação representam a diminuição da intensidade do feixe de raios X ao passar por uma determinada espessura de materiais homogêneos, como plástico (ABS), alumínio (Al) e aço. Esse comportamento distintivo nas curvas reflete as características únicas da atenuação dos diferentes materiais e também a influência da energia dos fótons na atenuação.

Figura 2.25 – Curvas de atenuação para diferentes materiais: a) tensão de 130 kV e energia de 74 keV; b) tensão de 225 kV e energia de 170 keV.



Fonte: **X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

As amostras preparadas foram analisadas no laboratório de análise por tomografia de raios X do C-LABMU (UEPG, Ponta Grossa), onde ocorreu o escaneamento dos blocos de solo. O microtomógrafo de raios X utilizado é da marca Nikon, modelo XT V 130C (Figura 2.26). Para as medidas, o equipamento foi ajustado para operar sob as seguintes configurações: tensão de 125 kV, corrente de 140 μ A, tempo de aquisição para cada imagem de 250 ms e 8 frames. Para minimizar o endurecimento do feixe foi colocado um filtro de cobre de 0,25 mm de espessura próximo a saída da fonte de raios X. Para cada imagem gerada foram produzidas 1583 projeções.

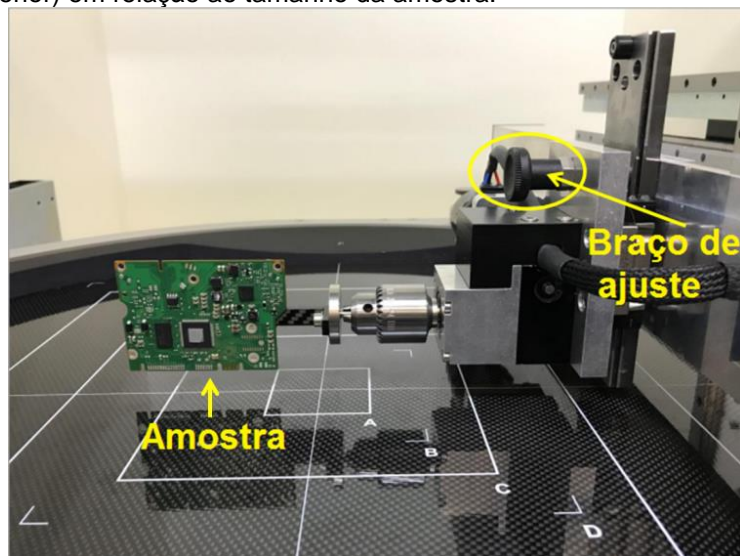
Figura 2.26 – Microtomógrafo da marca Nikon, modelo XT V 130C.



Fonte: C-LABMU. **Estrutura – Complexo de Laboratórios Multiusuários**. Disponível em: <<https://www2.uepg.br/propesp-clabmu/estrutura/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

No tomógrafo, a centralização ideal da amostra é crucial para permitir a ampliação máxima. O braço do equipamento, conforme ilustrado na Figura 2.27, pode ser posicionado na parte superior, intermediária ou inferior, dependendo do tamanho da amostra. Essa prática visa otimizar a qualidade da imagem tomográfica e garantir uma representação mais precisa da estrutura interna da amostra durante o procedimento.

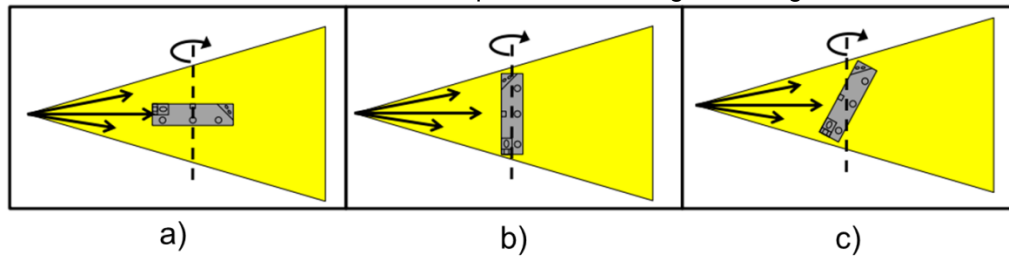
Figura 2.27 – Configuração do tomógrafo, ilustrando a posição do braço do equipamento (superior, intermediária ou inferior) em relação ao tamanho da amostra.



Fonte: **Inspect-X / CT Pro X-ray / CT Basic Training**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

A Figura 2.28 ilustra a montagem mais adequada da amostra para otimizar a aquisição de imagens por raios X. No primeiro cenário (Figura 2.28a), a amostra está disposta de maneira desvantajosa, resultando em um aumento da energia e potência necessárias para que os raios X penetrem no caminho mais longo da amostra. No segundo cenário (Figura 2.28b), embora haja uma distância mais curta para a penetração dos raios X, as superfícies superior e inferior permanecem paralelas a eles, causando perda de detalhes devido a artefatos de feixe cônico. Na configuração otimizada (Figura 2.28c), foi reduzida a distância para os raios X, e as superfícies superior e inferior foram inclinadas em relação a eles. Essa modificação visa minimizar artefatos de feixe cônico, proporcionando uma imagem mais nítida e detalhada.

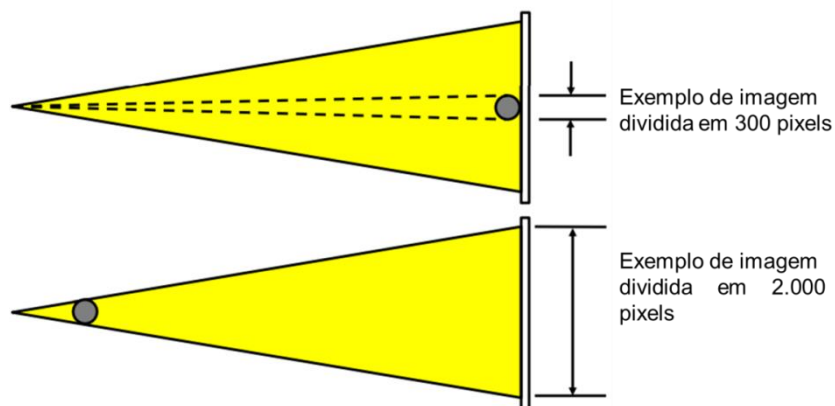
Figura 2.28 – Diferentes montagens da amostra: a) configuração inicial apresenta desvantagens; b) segunda configuração busca melhorar, mas ainda enfrenta artefatos de feixe cônico; c) configuração otimizada, reduzindo artefatos e melhorando a qualidade da imagem radiográfica.



Fonte: **Inspect-X / CT Pro X-ray / CT Basic Training**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

Além disso, a Figura 2.29 evidencia que, ao deslocar a amostra em direção à fonte de raios X, ocorre um aumento na ampliação geométrica. Simultaneamente, essa abordagem resulta na redução do tamanho efetivo do pixel, proporcionando uma maior resolução na imagem obtida. Essa técnica de ajuste espacial é essencial para otimizar a visualização e a precisão na captura de detalhes durante procedimentos que envolvem raios X.

Figura 2.29 – Demonstração da técnica de ampliação geométrica ao mover a amostra em direção à fonte de raios X. Esse ajuste espacial resulta em um aumento na ampliação geométrica, enquanto simultaneamente diminui o tamanho efetivo do pixel, proporcionando maior resolução na imagem adquirida.

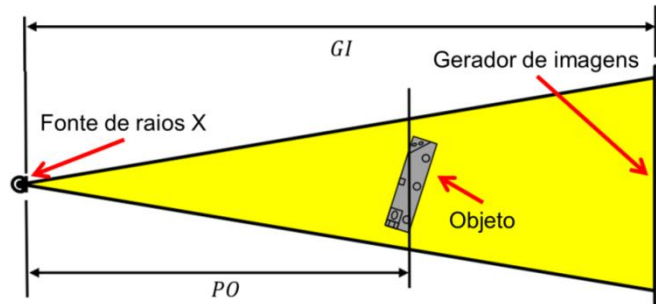


Fonte: **Inspect-X / CT Pro X-ray / CT Basic Training**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

A Figura 2.30 ilustra o cálculo da ampliação geométrica (AG), uma medida que leva em consideração as distâncias entre o gerador de imagens (GI), a posição objeto (PO) e a fonte de radiação. Essa relação é expressa por:

$$AG = \frac{GI}{PO} \quad (2)$$

Figura 2.30 – Representação esquemática do cálculo da ampliação geométrica, considerando as distâncias entre o gerador de imagens GI , a posição do objeto PO e a fonte de radiação.

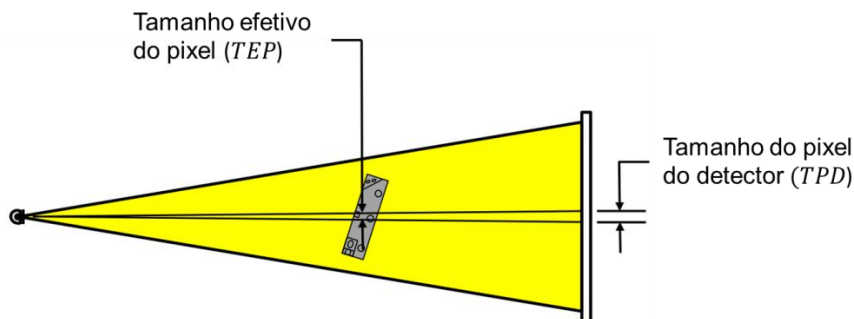


Fonte: **Inspect-X / CT Pro X-ray / CT Basic Training**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

Outro dado geométrico importante é o tamanho efetivo do pixel (TEP) evidenciado na Figura 2.31. O cálculo é realizado dividindo o tamanho do pixel do detector (TPD) pela ampliação geométrica (AG), como descrita a seguir:

$$TEP = \frac{TPD}{AG} \quad (3)$$

Figura 2.31 – Relação entre o tamanho efetivo do pixel (TEP), onde o tamanho do pixel do detector (TPD) é dividido pela ampliação geométrica (AG).



Fonte: **Inspect-X / CT Pro X-ray / CT Basic Training**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

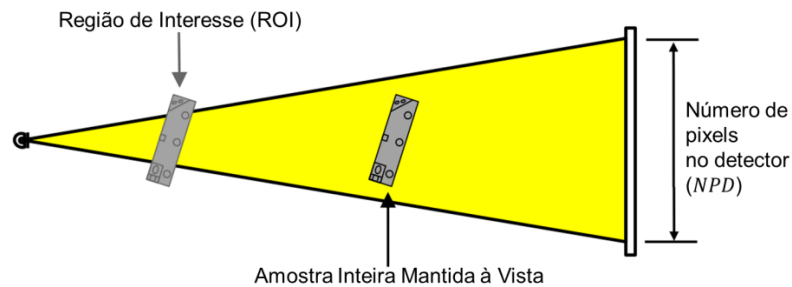
Também é relevante observar, como ilustrado na Figura 2.32, como é obtido campo de visão (CV). O cálculo é realizado multiplicando o tamanho efetivo do pixel (TEP) pelo número de pixels no detector (NPD), ou seja:

$$CV = TEP \times NPD \quad (4)$$

Este processo da Equação 4 pode resultar em duas situações distintas: 1) Varredura da região de interesse (ROI), onde nem toda a amostra pode ser mantida à vista no campo de visão, sendo necessário focalizar a análise em uma região

específica de interesse; 2) Amostra inteira mantida à vista, onde nessa segunda situação refere-se à manutenção completa da amostra dentro do campo de visão, permitindo a visualização integral da mesma.

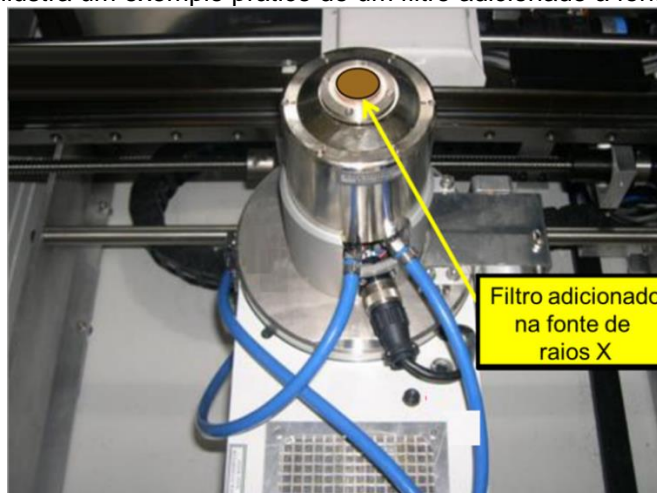
Figura 2.32 – Representação das duas situações possíveis no cálculo do campo de visão (*CV*), onde a varredura da região de interesse (*ROI*) pode limitar a visualização da amostra, ou a amostra inteira é mantida à vista no campo de visão radiográfico.



Fonte: **Inspect-X / CT Pro X-ray / CT Basic Training**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

Outro ponto importante é destacado na Figura 2.33, onde observamos um exemplo de filtro incorporado à fonte de raios X. A adição de material filtrante nesse contexto é uma prática comumente empregada, motivada por dois objetivos principais: 1) Otimização dos níveis de cinza: A presença do filtro tem a finalidade de permitir uma otimização mais eficaz dos níveis de cinza na imagem resultante. 2) redução do endurecimento do feixe no volume da tomografia. Portanto, a introdução do filtro tem como efeito tornar os materiais de densidade mais leve menos visíveis na imagem, proporcionando uma imagem radiográfica mais refinada e adaptada às necessidades específicas do procedimento.

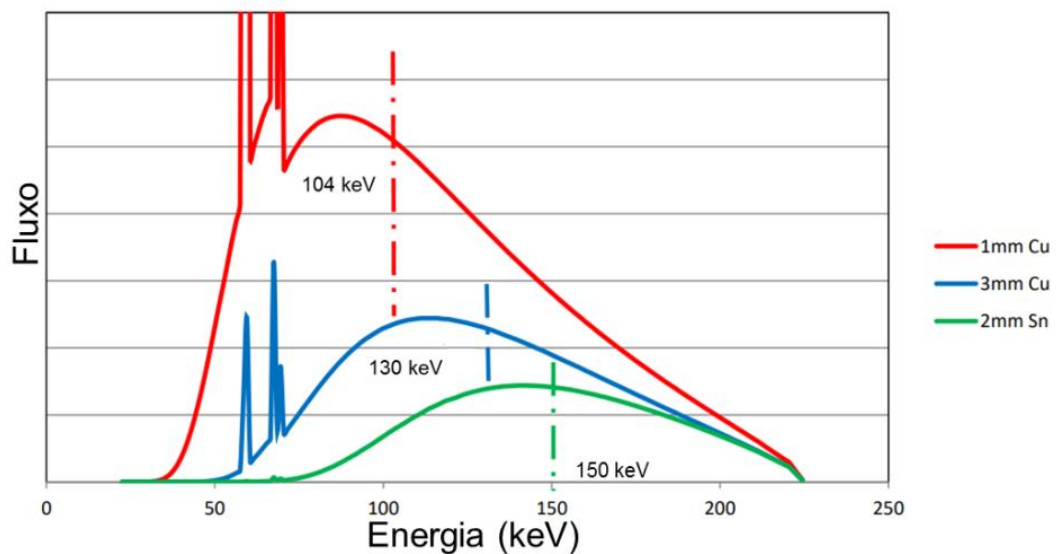
Figura 2.33 – A figura ilustra um exemplo prático de um filtro adicionado à fonte de raios X.



Fonte: **Inspect-X / CT Pro X-ray / CT Basic Training**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

A aplicação de filtros tem como propósito elevar a energia média do feixe de raios X e eliminar os raios X de baixa energia. Essa filtragem é essencial para retirar os raios X que contribuem para a saturação do fundo da imagem, carecendo da energia necessária para penetrar na amostra. Conforme ilustrado no gráfico da Figura 2.34, observa-se que o aumento da espessura do filtro está diretamente associado à redução do fluxo (número de fótons) de raios X.

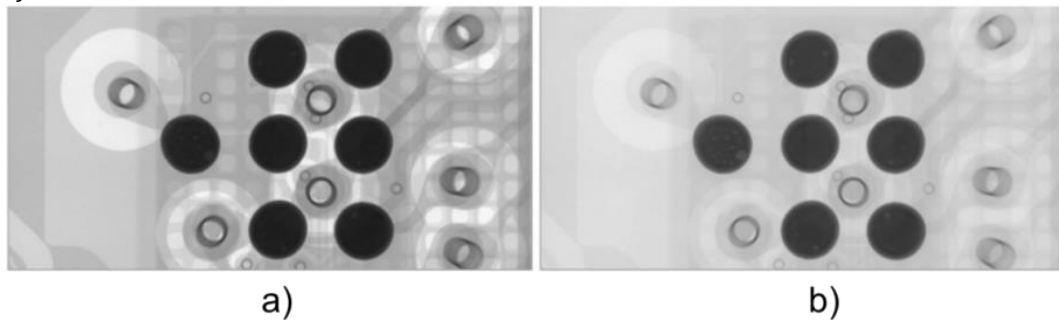
Figura 2.34 – Os efeitos do filtro de cobre (Cu) e estanho (Sn) no espectro de energia dos raios X. Demonstra-se claramente que o aumento na espessura do filtro resulta em uma diminuição proporcional no fluxo de raios X e uma variação na energia dos fótons.



Fonte: **Inspect-X / CT Pro X-ray / CT Basic Training**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

Conforme ilustrado na Figura 2.35, a introdução de um filtro de cobre de 0,5 mm apresenta impactos significativos nos parâmetros radiográficos. Na configuração da Figura 2.35a, com uma tensão de 160 kV, potência de 1,0 W, tempo de exposição de 2 s e ausência de filtro, enquanto na Figura 2.35b, sob a mesma tensão de 160 kV, potência de 2,4 W e tempo de exposição de 2 s, é introduzido um filtro de cobre (Cu) de 0,5 mm. Notavelmente, a adição desse filtro resulta em um aumento no valor mínimo de cinza, levando à eliminação de materiais mais leves da imagem. Simultaneamente, ocorre uma diminuição na profundidade de bits. No entanto, essa modificação proporciona uma melhoria na penetração para materiais mais densos.

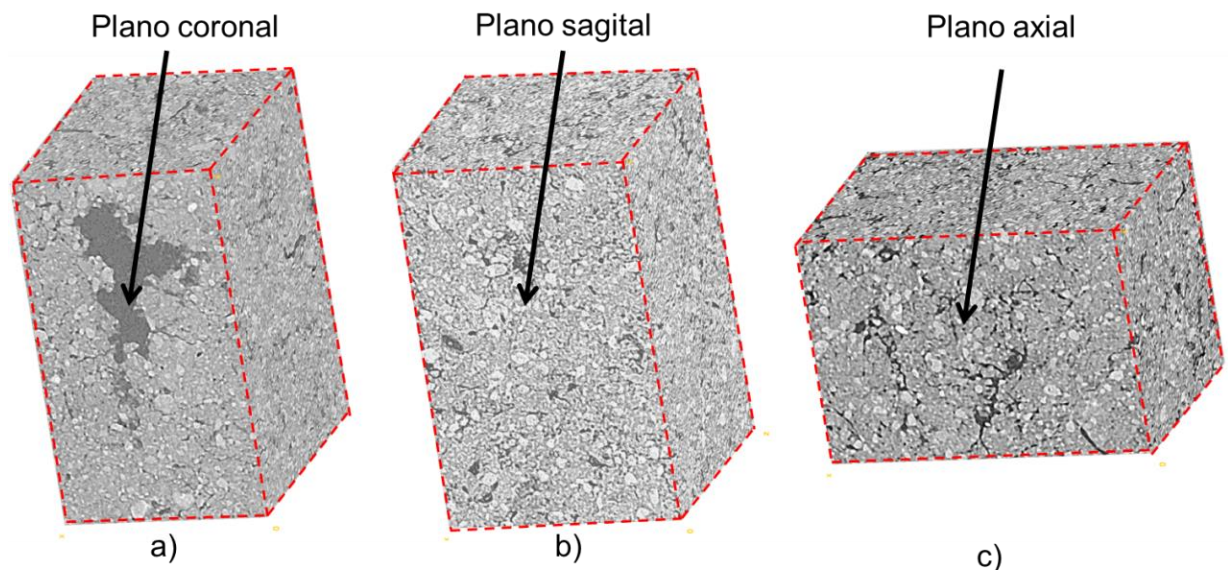
Figura 2.35 – Comparação dos efeitos da adição de um filtro de cobre de 0,5 mm nas características radiográficas: a) representa a configuração sem filtro; b) mostra a mesma configuração com a introdução do filtro de cobre de 0,5 mm.



Fonte: **Inspect-X / CT Pro X-ray / CT Basic Training**. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

O tamanho de *pixel* para captura de cada imagem foi ajustado em 50 μm . Essa dimensão foi selecionada durante o procedimento de escaneamento das amostras com base no volume da maior amostra produzida no processo de preparo. Após a etapa de aquisição das imagens, no processo de reconstrução foram geradas 1008 imagens bidimensionais (2D) para cada amostra. O procedimento de empilhamento das amostras possibilitou a produção de uma imagem 3D com dimensões de 1008x1008x1008 *voxels*. Todas as imagens 2D geradas foram salvas em 16-bits, no formato TIFF, para posterior processamento. A reconstrução tridimensional (3D) das imagens foi realizada para três planos distintos: coronal, sagital e axial (Figura 2.36).

Figura 2.36 – Reconstrução tridimensional dos planos tomográficos em escala de cinza para uma das amostras analisadas: a) coronal; b) sagital; c) axial.



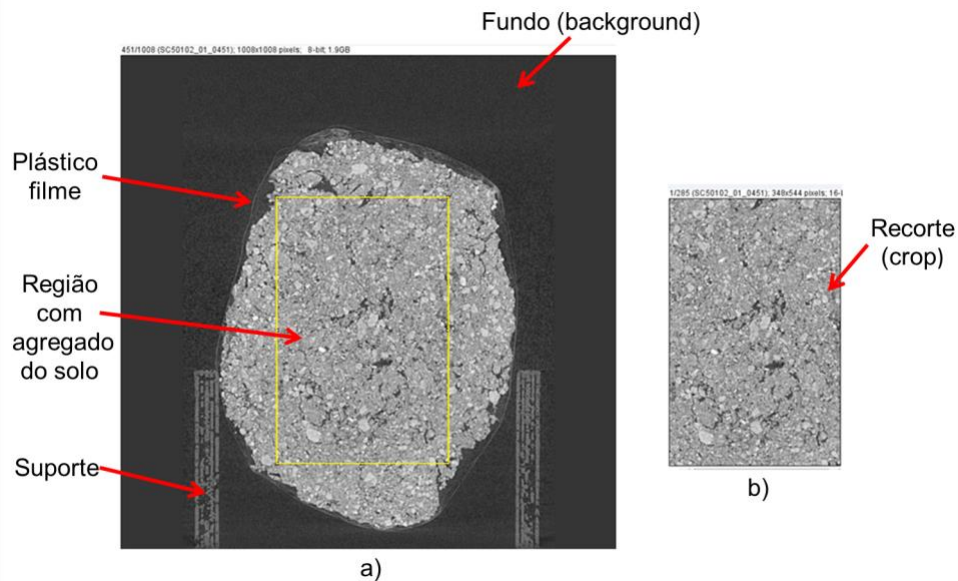
Fonte: O autor.

2.5. SEGMENTAÇÃO DAS IMAGENS

Após a aquisição das imagens 2D, o próximo passo envolveu a seleção e recorte de subvolumes cúbicos a partir das imagens 3D. Esse processo foi realizado com o auxílio do software ImageJ (Schneider; Rasband; Eliceiri, 2012) e visou focar apenas na região contendo o agregado de solo escaneado, de modo que o suporte da amostra, o plástico filme que envolvia as amostras e o fundo (*background*) foram excluídos (Figura 2.37a).

Para a seleção do volume de interesse (VOI) foi utilizada a ferramenta *crop* no ImageJ (Figura 2.37b). Como resultado da seleção dos VOIs, foram obtidos recortes de volumes variados para cada amostra, em virtude do formato e dimensões de cada uma delas. Conseqüentemente, todos os VOIs selecionados possuíam dimensões menores que o volume total de 1008^3 *voxels* gerado na etapa de reconstrução.

Figura 2.37 – Exemplo de seleção da região de interesse (ROI): a) seleção da região no interior do agregado escaneado; b) região de interesse oriunda do procedimento de recorte.

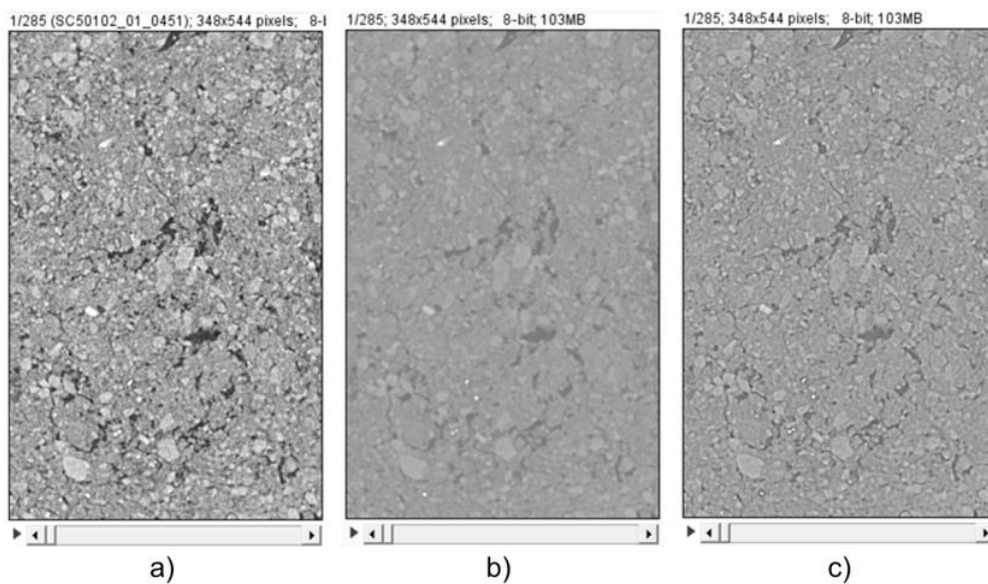


Fonte: O autor.

O processo de segmentação das imagens foi realizado por meio do software ImageJ e envolveu várias etapas antes da binarização. Inicialmente, as imagens recortadas foram convertidas para o formato de 8 bits (256 tons de cinza) (Figura 2.38a). Esse procedimento foi realizado para facilitar a escolha dos picos referentes à contribuição do ar e dos sólidos nos agregados. Em seguida, foram aplicados

filtros com o intuito de reduzir ruídos e aprimorar a separação entre as fases (ar e sólido). O primeiro procedimento realizado em todas as imagens foi a passagem de um filtro do tipo *Median 3D* (Figura 2.38b), configurado com os parâmetros: $x = 2,0$, $y = 2,0$ e $z = 2,0$, seguido do filtro *Unsharp Mask* (Figura 2.38c), configurado com parâmetros: *Radius* = 1,0 pixel e *Mask weight* = 0,9.

Figura 2.38 – Exemplo de processo de filtragem das imagens para uma das imagens 2D: a) imagens convertidas em 8 bits; b) passagem do filtro *Median 3D*; c) passagem do filtro *Unsharp Mask*.



Fonte: O autor.

A etapa subsequente envolveu o processo de binarização das imagens com o uso do método de Otsu não parametrizado, onde são definidos valores de *threshold* com base nos tons de cinza das imagens. Neste método, uma representação da frequência em que os valores digitais na imagem ocorrem, utiliza como base o histograma em tons de cinza (Figura 2.39), e pode ser analisado como uma função de densidade de probabilidade. De acordo com Otsu (1979), se a frequência (n_i) de um valor digital qualquer (i) contido na imagem for alto, a probabilidade (p_i) em um número total N de *pixels* será alta, de modo que:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (5)$$

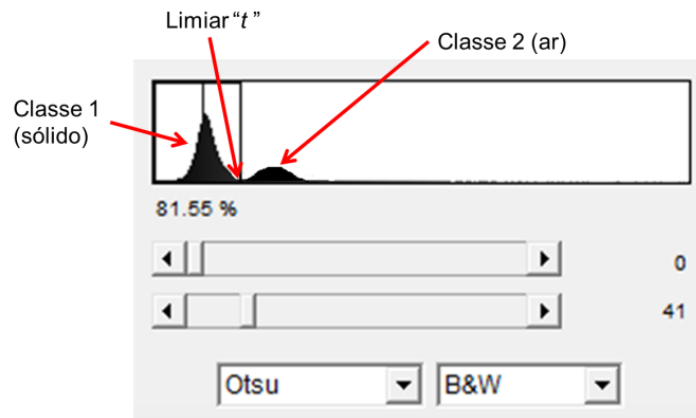
Nisso, se um determinado limiar " t " for escolhido a partir do histograma, os *pixels* são divididos em duas classes: classe 1, tons de cinza $[0, t]$, e classe 2, tons de cinza $[t, 255]$, para uma imagem de 8 bits (Figura 2.39). A classe 1 é formada

pelos *pixels* contendo as partículas (sólido) e a classe 2 é formada pelos *pixels* contendo os poros (ar). Como as classes não são perfeitamente uniformes, a dispersão da média de cada classe pode ser descrita pela sua variância. Portanto, o algoritmo que busca o limiar ideal " t ", que minimiza a variância σ_ω , é definido como uma soma ponderada das variâncias das duas classes.

$$\sigma_\omega^2 = \omega_1(t) \sigma_1^2 + \omega_2(t) \sigma_2^2 \quad (6)$$

De modo que, $\omega_1(t)$ e $\omega_2(t)$ são as probabilidades das duas classes separadas por um limiar t , e σ_1^2 e σ_2^2 são variações dessas duas classes. É importante ressaltar que o limiar ideal " t " foi definido visualmente, comparando o recorte de imagem filtrada (Figura 2.40a) com a imagem binarizada (Figura 2.40b). Nessa etapa de comparação visual foi utilizada a ferramenta de zoom *Synchronize Windows*, e definida a classe 1 como sendo as partículas (branco = 0) e a classe 2 como sendo os poros (preto = 255).

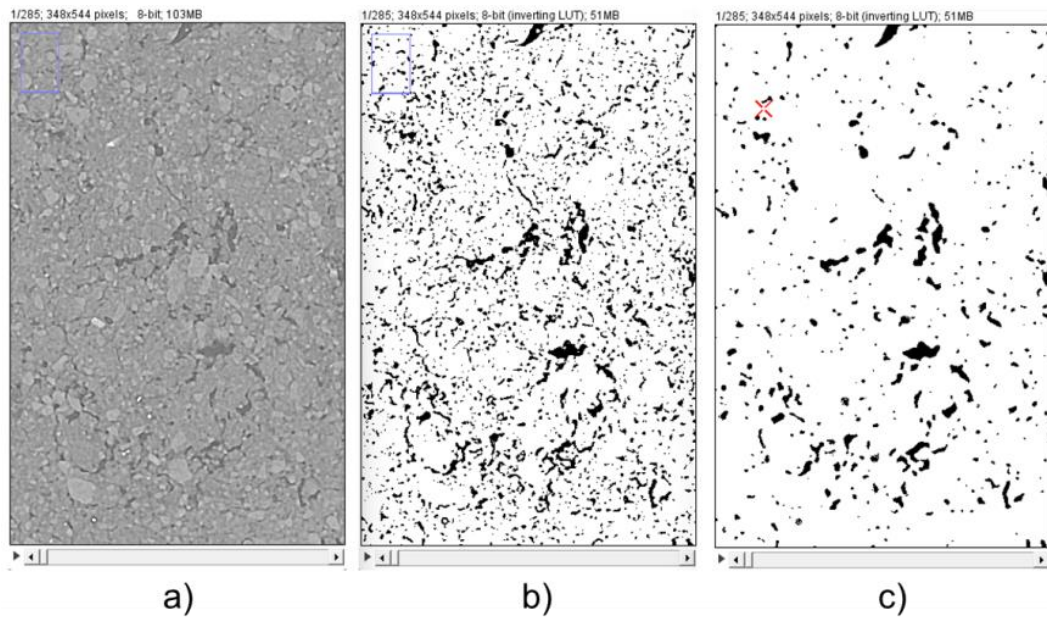
Figura 2.39 – Histograma com 256 tons de cinza. Neste caso específico, o limiar ideal foi definido com $t = 41$.



Fonte: O autor.

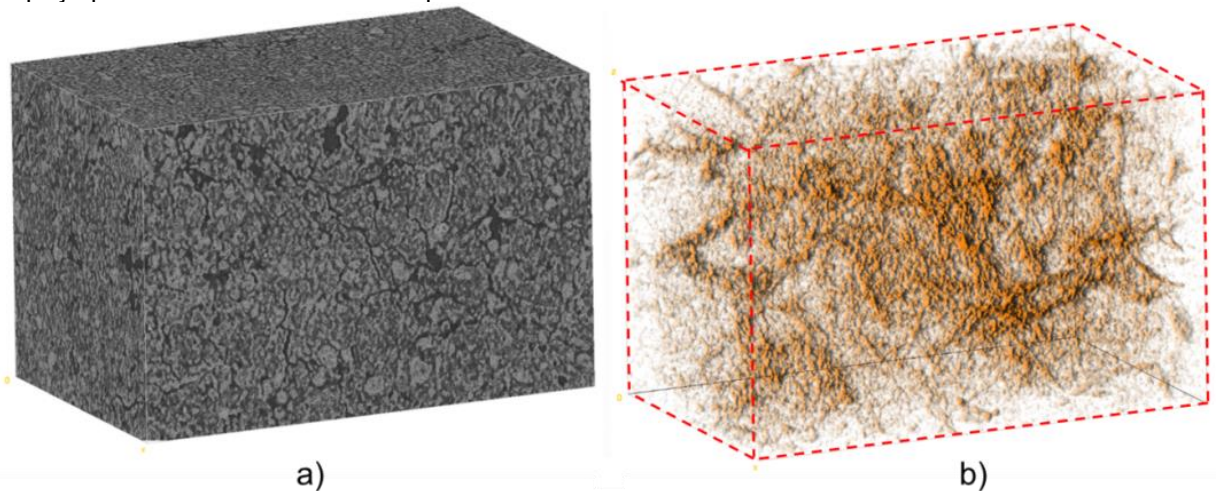
Como última etapa da segmentação, os ruídos das imagens foram removidos com a ferramenta *Remove Outliers* (Figura 2.40c), configurada com valores de brilho (*Bright* = 4.0) para partículas e (*Dark* = 2.0) para poros, respectivamente. Para uma melhor compreensão da diferença entre as partículas e poros do solo, ambas são ilustradas individualmente em uma reconstrução tridimensional na Figura 2.41.

Figura 2.40 – Processo de segmentação: a) imagem filtrada e convertida em 8 bits; b) imagem binarizada pelo método de Otsu; c) imagem após a remoção de ruídos.



Fonte: O autor.

Figura 2.41 – Reconstrução tridimensional: a) estrutura do solo em escala de cinza; b) estrutura do espaço poroso do solo contendo os poros mais volumosos e conectados.



Fonte: O autor.

Na análise das propriedades morfológicas e geométricas do sistema poroso do solo foram quantificados a partir da resolução de 50 μm , sob 256 possibilidades de tons de cinza, diversos parâmetros, incluindo a porosidade imageada (φ), a dimensão fractal (DF), o grau de anisotropia (GA), a conectividade dos poros (C), a tortuosidade (τ), o volume de poros (VP) e o número de poros (NP).

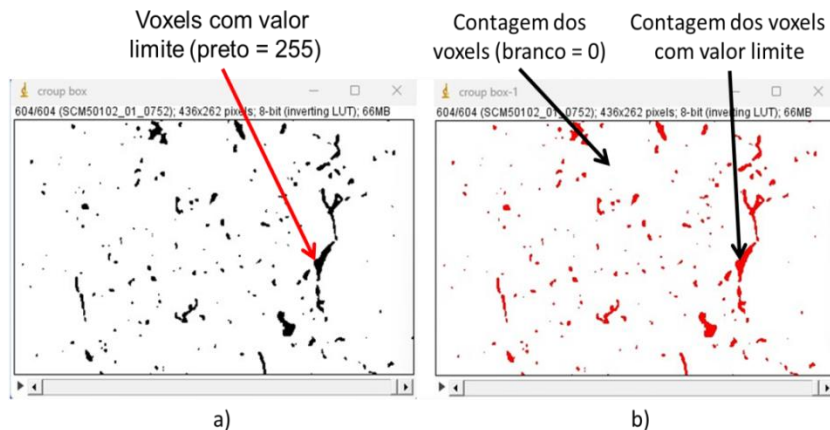
2.6. POROSIDADE IMAGEADA (φ)

A porosidade (φ) é um indicador que descreve a quantidade de espaço vazio presente no solo. Esse parâmetro é calculado dividindo o volume de poros (V_{poros}) pelo volume total da amostra ($V_{amostra}$).

$$\varphi (\%) = \sum \frac{V_{poros}}{V_{amostra}} \times 100 \quad (7)$$

A porosidade imageada foi determinada usando a função *Voxel Counter* no software ImageJ. O *plugin* conta os *voxels* na cor preta com valor limite dentro de uma região de interesse (poros com valor 255) em uma pilha de imagens binarizadas em 8 bits. Com isso, a porosidade imageada ou acessada é calculada como a razão entre os *voxels* com valor limite (255) (Figura 2.42a) e todos os *voxels* na amostra (0 e 255) (Figura 2.42b).

Figura 2.42 – Cálculo da porosidade imageada: a) imagem binarizada (preto = 255); b) contagem de *voxels*.



Fonte: O autor.

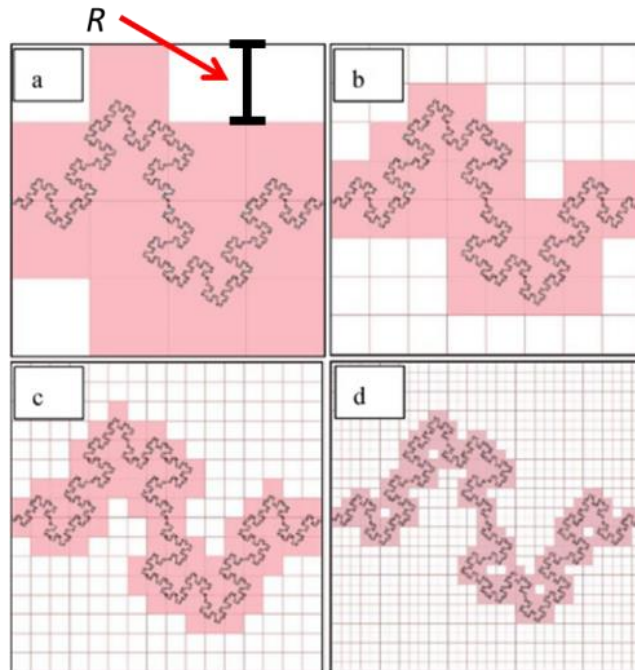
2.7. DIMENSÃO FRACTAL (DF)

A dimensão fractal (DF) é uma propriedade que caracteriza a complexidade e irregularidade de padrões em diferentes escalas. Este parâmetro foi determinado usando o *plugin Fractal Dimension* por meio da técnica de contagem de caixas (*box counting*). A DF é determinada pela inclinação da reta no gráfico $\log n$ versus $\log 1/$

R , onde n representa o número de caixas e R é o comprimento lateral da caixa (Figura 2.43), como demonstrado a seguir (Wu *et al.*, 2020):

$$DF = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{\log n}{\log \frac{1}{R}} \quad (8)$$

Figura 2.43 – As figuras de (a-d) ilustram como o número de caixas n varia com o inverso do comprimento lateral $1/R$.



Fonte: Adaptado de: WU, Jiaxin *et al.* An effective method to compute the box-counting dimension based on the mathematical definition and intervals. **Results in Engineering**, v. 6, p. 100106, 2020.

2.8. GRAU DE ANISOTROPIA (GA)

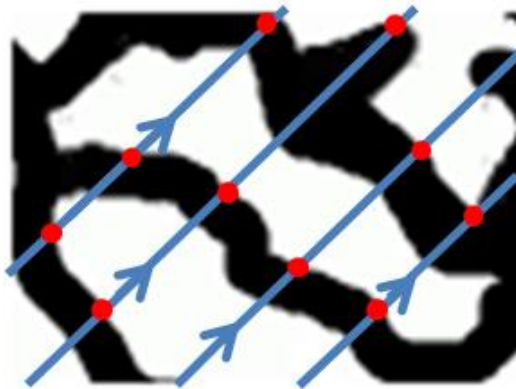
O grau de anisotropia (GA) é um indicador utilizado para medir a direcionalidade ou orientação preferencial de uma determinada propriedade em um sistema. Para o cálculo do GA do sistema poroso do solo foi utilizado o *plugin* BoneJ (Doubé *et al.*, 2010). Neste *plugin* foi escolhida a função *Anisotropy*. O GA baseia-se em uma série de vetores com η direções, originários de posições aleatórias na imagem 3D, que interceptam os poros (preto = 255) (Figura 2.44). Para calcular o GA foi utilizada a seguinte formulação:

$$GA = 1 - \frac{IC}{IL}, \quad (9)$$

de modo que IC representa o comprimento médio dos vetores de interceptação mais curtos e IL o comprimento médio dos vetores de interceptação mais longos.

A aplicação da Equação 9 proporciona uma medida do grau de anisotropia do sistema de poros do solo, em que valores próximos de 0 indicam maior isotropia, enquanto valores mais próximos de 1 indicam maior anisotropia na orientação dos poros. Observe que quando GA é igual a 0, significa que a razão entre IC e IL é igual a 1 ($IC = IL$), ao passo que quando GA é igual a 1, a razão entre IC e IL é igual a 0.

Figura 2.44 – Série de vetores interceptando os poros (preto = 255) no processo de cálculo do grau de anisotropia (GA) dos poros.

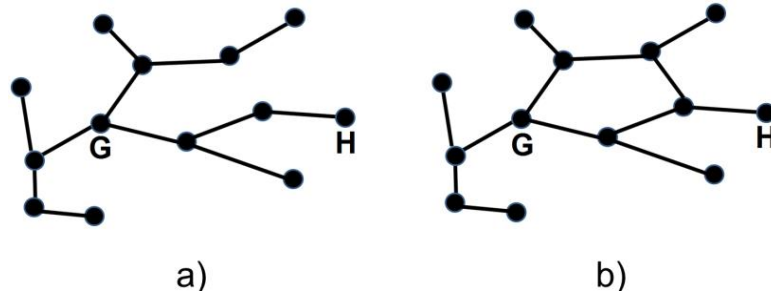


Fonte: Adaptado de: DOUBE, Michael *et al.* BoneJ: free and extensible bone image analysis in ImageJ. **Bone**, v. 47, n. 6, p. 1076-1079, 2010.

2.9. CONECTIVIDADE DOS POROS (C)

A conectividade dos poros (C) é um parâmetro físico de natureza geométrica que tem como finalidade quantificar o número de estruturas conectadas e os caminhos interligados entre dois pontos em uma rede porosa. De acordo com Odgaard e Gundersen (1993), uma estrutura em forma de rede é considerada simplesmente conectada quando há apenas um caminho entre qualquer par de nós (conexões entre pontos), caracterizada por uma conectividade zero (Figura 2.45a). No entanto, ao adicionar uma ramificação extra entre dois nós, alguns pontos ficam conectados por mais de um caminho, transformando a estrutura em uma rede multiplamente conectada (Figura 2.45b). Essa mudança na conectividade reflete a presença de múltiplos percursos entre os nós, modificando a configuração original da ramificação conectada. Portanto, a conectividade mensura o número máximo de ramificações em uma estrutura multiplamente interligada.

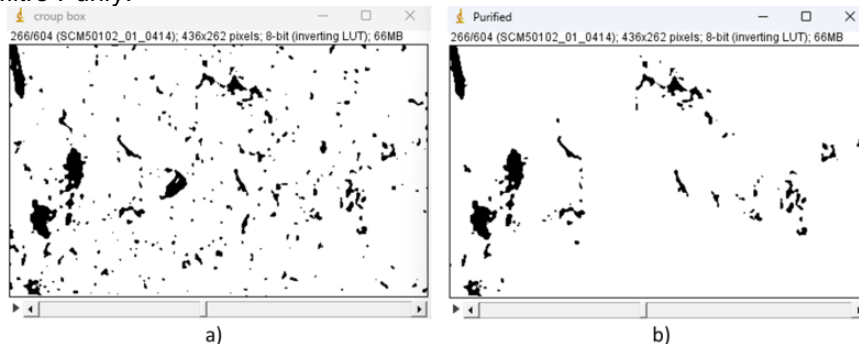
Figura 2.45 – Rede de nós e ramificações: a) ramificação simplesmente conectada (apenas um caminho do ponto G ao ponto H); b) ramificação múltiplamente conectada (dois caminhos do ponto G ao ponto H).



Fonte: Adaptado de: ODGAARD, A.; GUNDERSEN, H. J. G. Quantification of connectivity in cancellous bone, with special emphasis on 3-D reconstructions. **Bone**, v. 14, n. 2, p. 173-182, 1993.

O procedimento adotado para determinar a conectividade envolveu o uso inicial do filtro *Purify* (Figura 2.46), que serve como uma preparação para a quantificação da conectividade a partir das imagens binarizadas (Figura 2.46a). O *Purify* (Figura 2.46b) remove todas as cavidades isoladas (sem ramificações), exceto os objetos maiores (com ramificações).

Figura 2.46 – Utilização do filtro Purify: a) imagens binarizadas; b) remoção das cavidades isoladas com o uso do filtro Purify.



Fonte: O autor.

O próximo passo foi utilizar o *plugin Connectivity* no BoneJ, que analisa os *voxels* vizinhos a fim de calcular o número de Euler do volume estudado e ajusta esse volume para determinar a contribuição para a conectividade. O cálculo da conectividade dos poros é realizado por:

$$NE = N_{ob} - C + H \quad (10)$$

$$C = 1 - NE \quad (11)$$

em que, NE se refere ao número de Euler, N_{ob} denota o número de objetos isolados, C representa a conectividade, H corresponde ao número de cavidades completamente fechadas. A quantidade NE será positiva se o número de poros isolados for maior que o número de conexões entre os poros ($N_{ob} > C$). Em contrapartida, em uma rede de poros totalmente conectada, o valor NE será negativo ($C \gg N_{ob} = 1$). Nesse contexto, o parâmetro NE conta o número de conexões múltiplas e está associado ao número de malhas na rede de poros. É importante ressaltar que, em sistemas porosos, como o solo, a contribuição do parâmetro H costuma ser desprezível.

2.10. TORTUOSIDADE (τ)

A tortuosidade (τ) é uma propriedade física que avalia o grau de sinuosidade de um poro (Roque; Costa, 2020). O cálculo desse parâmetro envolve a relação entre o comprimento geodésico (L_g) e o comprimento euclidiano (L_e), por uma varredura entre dois planos ao longo de um caminho de poros conectados (Figura 2.47), como expresso por:

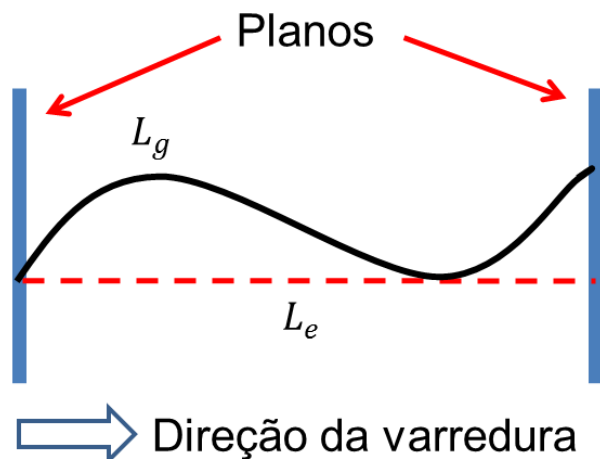
$$\tau = \frac{L_g}{L_e} \quad (12)$$

O cálculo da tortuosidade foi feito utilizando o plugin *Tortuosity* implementado no ImageJ a partir do algoritmo de reconstrução geodésica (RG), desenvolvido por Gommès *et al.* (2009). Nesse algoritmo, para o cálculo da tortuosidade, a estrutura bidimensional ou tridimensional de imagens binarizadas é analisada com base nos *voxels* que representam a rede de poros. Para imagens 3D, o espaço poroso é reconstruído *voxel a voxel*, efetuando uma varredura a partir de um plano normal inicial, com uma direção de referência, que pode ser $+z$, por exemplo. A varredura ocorre da primeira fatia até uma fatia n_{fat} , e o número total de reconstruções geodésicas presente nas n_{fat} –ésimas fatias é denominado n_g . Portanto, o número total de reconstruções geodésicas, que analisam todos os *voxels* contendo poros por fatia, é tal que $n_g \geq n_{fat}$. A partir deste procedimento de varredura, é possível encontrar a distância geodésica L_g de um meio poroso em

todos os planos normais de interesse, nas direções $(\pm x, \pm y e \pm z)$. Para determinar a distância euclidiana L_e , faz-se necessário o número total de fatias n_{fat} , para o volume no qual ocorreu à varredura. Com isso, obtendo os valores de L_g e L_e , é possível construir um gráfico de dispersão a partir da Equação 12, onde a tortuosidade poderá ser estimada a partir da equação que melhor ajuste a inclinação da reta linear. O coeficiente angular da reta de ajuste irá fornecer o valor da tortuosidade.

Para a análise da tortuosidade foram selecionados os elementos da estrutura de *voxel* na cor preta (poros) que corresponde a 255. Os elementos da estrutura foram definidos para seis vizinhos (faces da estrutura), e a análise de varredura foi conduzida para os três eixos $(\pm x, \pm y e \pm z)$.

Figura 2.47 – Comprimento geodésico L_g e comprimento euclidiano L_e , entre dois planos, e direção da varredura em um eixo de referência qualquer.



Fonte: Adaptado de: ROQUE, Waldir L.; COSTA, Richelieu RA. A plugin for computing the pore/grain network tortuosity of a porous medium from 2D/3D MicroCT image. **Applied Computing and Geosciences**, v. 5, p. 100019, 2020.

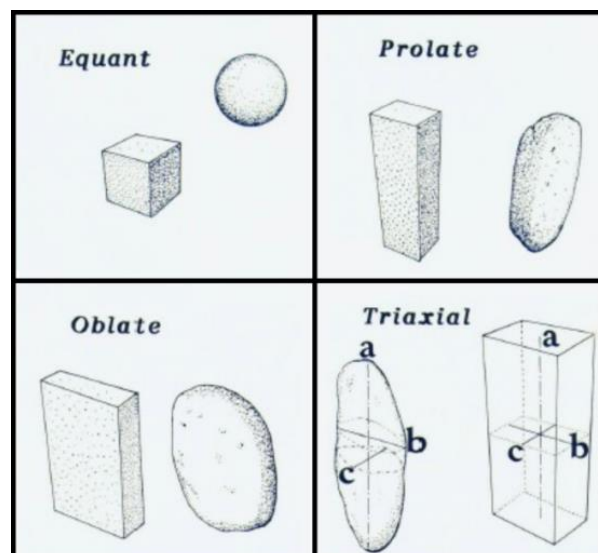
2.11. VOLUME DE POROS (VP) E NÚMERO DE POROS (NP)

O volume de poros (VP) e o número de poros (NP) foram calculados com base na distribuição do formato dos poros, os quais foram determinados considerando os eixos de elipsoides plotados no interior dos poros. Para obter esses parâmetros, utilizou-se o *plugin Particle Analyser* no ImageJ. Os poros do solo foram classificados em diferentes formatos de acordo com o sistema adotado por Bullock *et al.* (1985). Os quatro principais formatos de poros (Figura 2.48) analisados foram:

(1) esferoidal (equant) – poros com formato aproximadamente esférico; (2) haste (prolate) – Poros alongados em uma direção, ou seja, com eixo principal mais longo; (3) disco (oblate) – poros achatados, com um eixo principal menor e dois eixos perpendiculares maiores; e (4) elipsoidal (triaxial) – poros com formato de elipsoide, apresentando três eixos de tamanhos diferentes.

Na Tabela 1 é apresentada a relação entre os eixos dos elipsoides utilizada para classificar os poros em termos de seus formatos. No processo de análise, alguns dos eixos (menor, intermediário e maior) não puderam ser computados devido à complexidade dos poros, de modo que esses poros foram denominados como não classificados.

Figura 2.48 – Formatos dos poros: esferoidal (equant), haste (prolate), disco (oblate) e elipsoidal (triaxial).



Fonte: Adaptado de: BULLOCK, Peter *et al.* Handbook for soil thin section description. **Waine Research**, 1985.

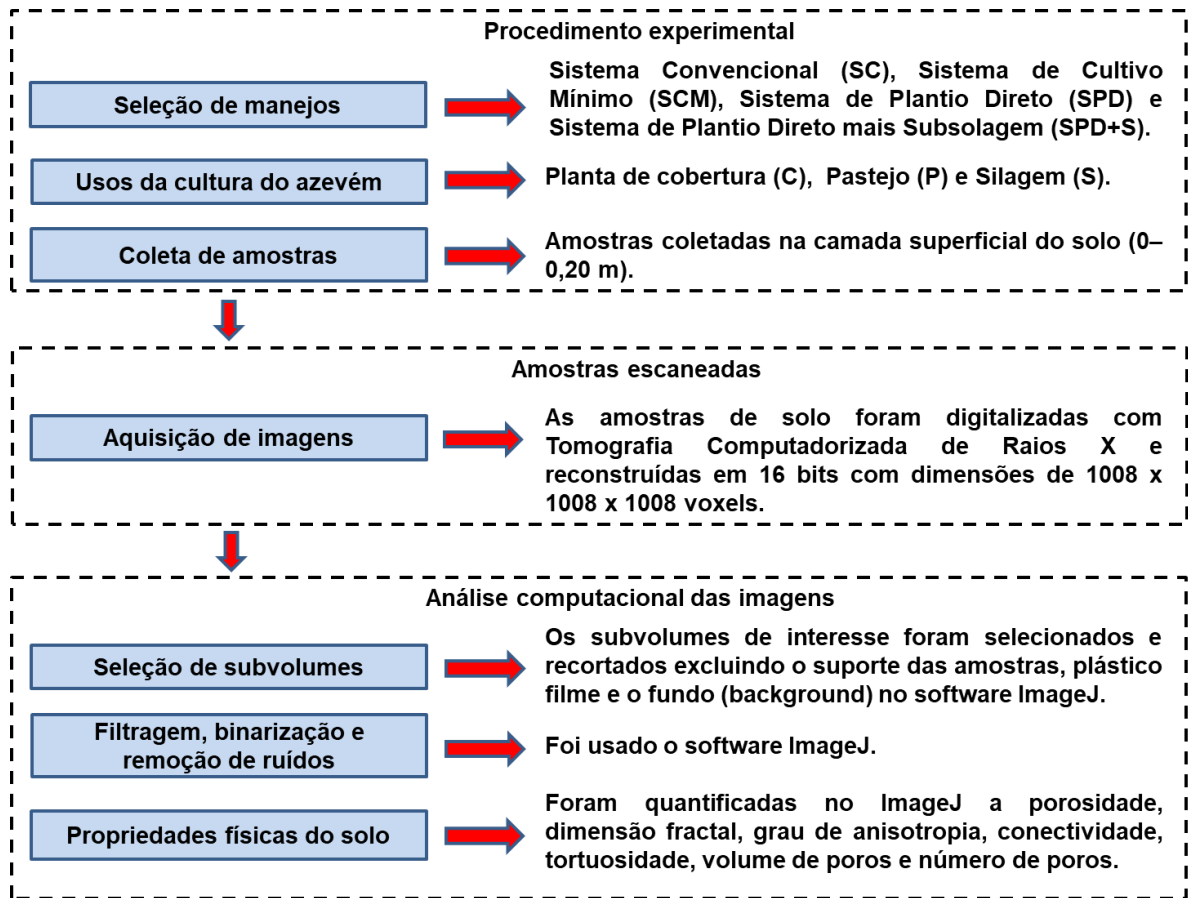
Tabela 1 – Definição do formato dos poros do solo com base na razão entre os eixos principais dos elipsoides: *EI*: eixo intermediário; *EM*: eixo maior; *EC*: eixo curto (menor).

Eixos do elipsoide	Formato			
	Esferoidal	Haste	Disco	Elipsoidal
EI/EM	$\geq 0,65$	$< 0,65$	$\geq 0,65$	$< 0,65$
EC/EI	$\geq 0,65$	$\geq 0,65$	$< 0,65$	$< 0,65$

Fonte: Adaptado de: DHALIWAL, Jashanjeet K.; KUMAR, Sandeep. 3D-visualization and quantification of soil porous structure using X-ray micro-tomography scanning under native pasture and crop-livestock systems. **Soil and Tillage Research**, v. 218, p. 105305, 2022.

A Figura 2.49 apresenta o fluxograma das principais etapas realizadas neste estudo, a fim de facilitar a compreensão dos resultados que serão apresentados na sequência.

Figura 2.49 – Fluxograma contendo as principais etapas realizadas no estudo para medidas das propriedades morfológicas e geométricas dos poros do solo.



Fonte: O autor.

2.12. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados dos parâmetros morfológicos e geométricos dos poros do solo foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade. Os mesmos testes foram empregados na comparação dos parâmetros calculados considerando os diferentes tipos (planos) de reconstrução das imagens. Neste caso foi comparado sempre o mesmo tratamento para os diferentes planos e a média dos planos. Também foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson entre diferentes variáveis dos manejos, usos da cultura do azevém e propriedades morfológicas e geométricas medidas. As análises estatísticas foram realizadas no software PAST (PAleontological STatistics), versão 4.03 (Hammer *et al.*, 2001).

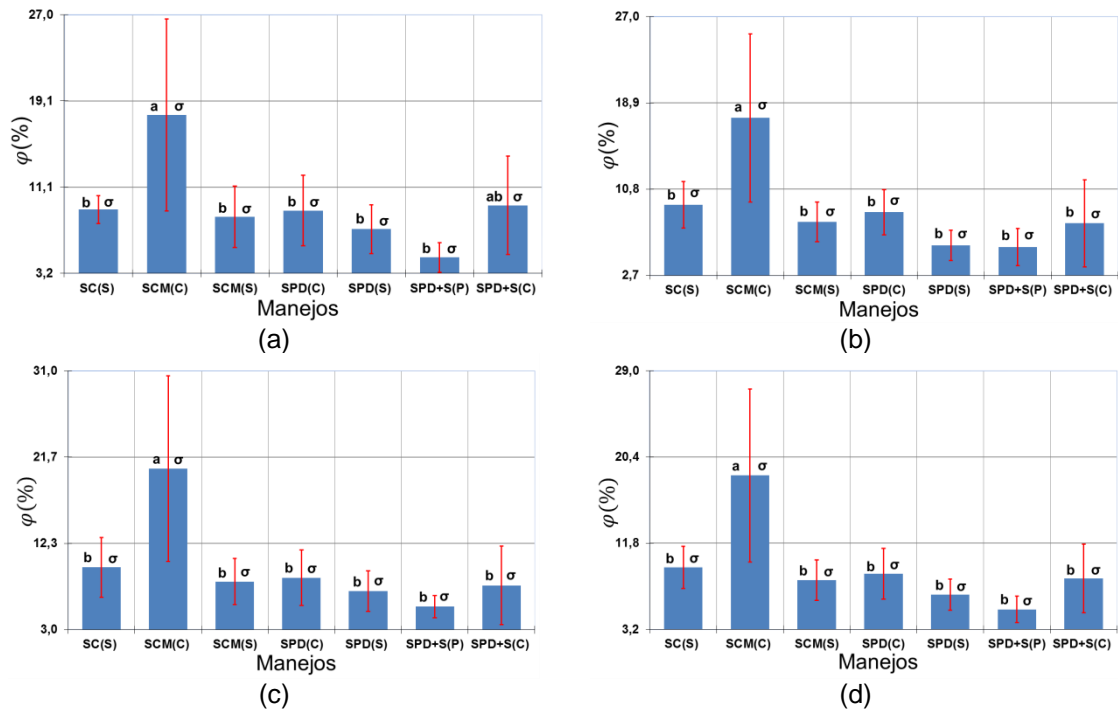
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos parâmetros morfológicos e geométricos do solo são apresentados na sequência considerando três planos tomográficos: coronal, sagital e axial, bem como a média entre esses planos. Conforme descrito anteriormente, foram analisados quatro sistemas de manejo distintos considerando diferentes usos da cultura do azevém.

Na Figura 3.1 são apresentados os resultados para a porosidade do solo (φ) obtida pela análise de imagem de tomografia. É válido mencionar que a porosidade neste caso considera os poros com tamanhos maiores do que a resolução obtida pela tomografia, e por este motivo, será tratada no texto como porosidade imageada. A porosidade trata-se de uma propriedade física que influencia a capacidade de retenção de água, o movimento de ar e a qualidade do ambiente edáfico do solo (Franzluebbers, 2002; Klein *et al.*, 2008).

Os resultados para o plano coronal (Figura 3.1a) revelaram variações na porosidade imageada do solo entre os sistemas de manejo. O sistema SCM(C) apresentou a maior porosidade imageada com diferença significativa aos demais sistemas, exceto para SPD+S(C) ($p < 0,05$). Além disso, o sistema SCM(C) demonstrou uma porosidade imageada superior a SCM(S), sugerindo que a cobertura vegetal tem influência positiva em relação à silagem nessa propriedade, mostrando a importância de práticas conservacionistas combinadas ao uso de cobertura vegetal. No caso do sistema SC(S), a porosidade imageada não apresentou diferenças significativas em relação aos demais manejos e usos, com exceção de SCM(C). Isto demonstra que embora essa prática envolva o revolvimento das camadas superficiais do solo, tal procedimento não causou danos na estrutura do solo quando sob silagem, considerando os sistemas conservacionistas como referência. O sistema SPD+S(P) exibiu a menor porosidade imageada, o que provavelmente está associado à ação do pastejo animal, uma vez que o pisoteio dos animais causa enorme pressão na superfície do solo. Não foram encontradas diferenças significativas entre os demais sistemas, cuja tendência encontrada foi: SCM(C) > SPD+S(C) > SC(S) > SPD(C) > SCM(S) > SPD(S) > SPD+S(P).

Figura 3.1 – Porosidade imageada (ϕ) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.



Fonte: O autor.

Nos planos sagital e axial (Figuras 3.1b e c), os resultados mostraram as mesmas tendências para ambos os casos. Contudo, esses planos continuaram a ressaltar um maior valor de porosidade imageada para o sistema SCM(C), com diferença significativa ($p < 0,05$) em relação aos demais tratamentos. Para os planos sagital e axial foi encontrada a seguinte tendência para a porosidade imageada do solo entre os tratamentos: SCM(C) > SC(S) > SPD(C) > SCM(S) > SPD+S(C) > SPD(S) > SPD+S(P). Estes resultados evidenciam que a escolha do plano de reconstrução da imagem não apresenta influência nos resultados para a porosidade imageada do solo.

Quando é analisada a média da porosidade imageada considerando os três planos (Figura 3.1d), o sistema SCM(C) apresenta o maior valor de porosidade imageada, demonstrando diferença significativa em relação aos demais sistemas ($p < 0,05$). Tal resultado enfatiza o efeito positivo do cultivo mínimo com cobertura na estrutura do solo. Ainda assim, é crucial notar que a porosidade imageada média do sistema SPD+S(P) foi a menor, e o sistema SC(S) apresentou a segunda maior,

sugerindo que a subsolagem combinada com o pastejo pode ter um impacto negativo no sistema poroso do solo e o revolvimento pode ter efeitos positivos, quando associado com a silagem. Além disso, os sistemas com cobertura continuaram a se destacar sobre os demais, quando analisados em relação aos demais usos da cultura do azevém. Quando considerada a média dos planos a seguinte tendência foi verificada: SCM(C) > SC(S) > SPD(C) > SPD+S(C) > SCM(S) > SPD(S) > SPD+S(P).

Com base nos resultados de porosidade imageada (Figura 3.1), nota-se que o SCM(C) apresentou o maior valor em relação aos demais sistemas, para os três planos avaliados e a média entre eles. Os outros sistemas de plantio não mostraram diferenças significativas. No entanto, os valores médios de porosidade imageada se mostraram superiores para os manejos com cobertura em relação à silagem e o pastejo, considerando um mesmo tipo de manejo. Por exemplo, o SPD+S(C) mostrou uma maior porosidade imageada em relação SPD+S(P) com tendência similar observada entre SPD(C) e SPD(S). Embora não tenham sido observadas diferenças significativas entre os diferentes sistemas, com exceção do SCM(C), os resultados indicam que o uso do azevém como cobertura influencia positivamente a porosidade imageada do solo (Assis *et al.*, 2011; Rosado *et al.*, 2012). Outra vantagem da manutenção da cobertura é o aporte de material orgânico nas camadas superficiais do solo podendo ter um papel importante na retenção de carbono (Amado *et al.*, 2001; Otsubo *et al.*, 2008). Outros estudos ainda destacam que a cobertura vegetal atua favorecendo o movimento de água e ar, retenção de água e atuando positivamente contra o impacto das gotas de chuva que podem causar selamento da camada superficial do solo, favorecendo o aparecimento de processos erosivos (Alvarenga *et al.*, 2001; Auler *et al.*, 2014; Salton *et al.*, 1998; Spera *et al.*, 2004).

Os resultados da porosidade imageada para o SPD(S) e SPD+S(P) mostram um efeito mais negativo desses manejos e usos do azevém na estrutura do solo quando comparado aos demais tratamentos. Os sistemas conservacionistas com ou sem subsolagem são geralmente caracterizados por apresentarem sistemas porosos que facilitam a transmissão de água no solo (Abreu; Reichert; Reinert, 2004). Contudo, tal resultado pode ser atribuído à influência do tráfego de máquinas agrícolas no processo de silagem e pisoteio animal no pastejo, o que pode causar o

adensamento do solo principalmente nas camadas superficiais (Albuquerque; Sangoi; Ender, 2001; Conte *et al.*, 2011; Marchão *et al.*, 2009; Spera *et al.*, 2004). Outro resultado interessante se refere ao sistema SC(S), que no geral apresentou valores médios de porosidade imageada maiores do que os demais tratamentos, com exceção do sistema SCM(C). O esperado nesse tipo de estudo seriam maiores porosidades para os sistemas conservacionistas em comparação a sistemas convencionais, pois o plantio direto e sua ausência de revolvimento do solo geralmente contribuem para uma estrutura com maior variedade de tamanhos de poros (Alvarenga *et al.*, 2001; Stone; Silveira, 1999). Uma possível explicação para o resultado obtido para o sistema SC(S) é que o revolvimento do solo quebra os agregados reduzindo a sua densidade, e, conseqüentemente, aumentando a porosidade, principalmente na camada superficial (Carvalho *et al.*, 2004). Tal procedimento pode favorecer a formação de poros maiores devido a quebra dos agregados, que são os poros analisados no caso deste estudo. Como descrito anteriormente, neste trabalho somente os poros com tamanhos de pixels superiores a 50 μm estão sendo acessados. Portanto, neste estudo estão sendo acessados somente os macroporos. De acordo com Brewer e Sleeman (1964) e Pires *et al.* (2017) os macroporos considerados muito finos possuem diâmetros equivalentes superiores a 75 μm .

Em resumo, os resultados obtidos sugerem que o sistema SCM(C) é importante na manutenção da porosidade imageada do solo, enquanto outros sistemas de plantio não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) entre si. A presença de cobertura vegetal parece desempenhar um papel crucial na manutenção da estrutura porosa do solo. Estudos como o de Spera *et al.* (2004) demonstraram maior porosidade total ao comparar um sistema sob floresta com diferentes usos do solo, evidenciando a importância dos resíduos vegetais na manutenção da estrutura do solo. Os resultados aqui obtidos evidenciam que a porosidade imageada do solo é uma complexa propriedade desse sistema poroso influenciada por múltiplos fatores, como tipo de cobertura, práticas de manejo e tráfego de animais (Assis *et al.*, 2011; Rosado *et al.*, 2012).

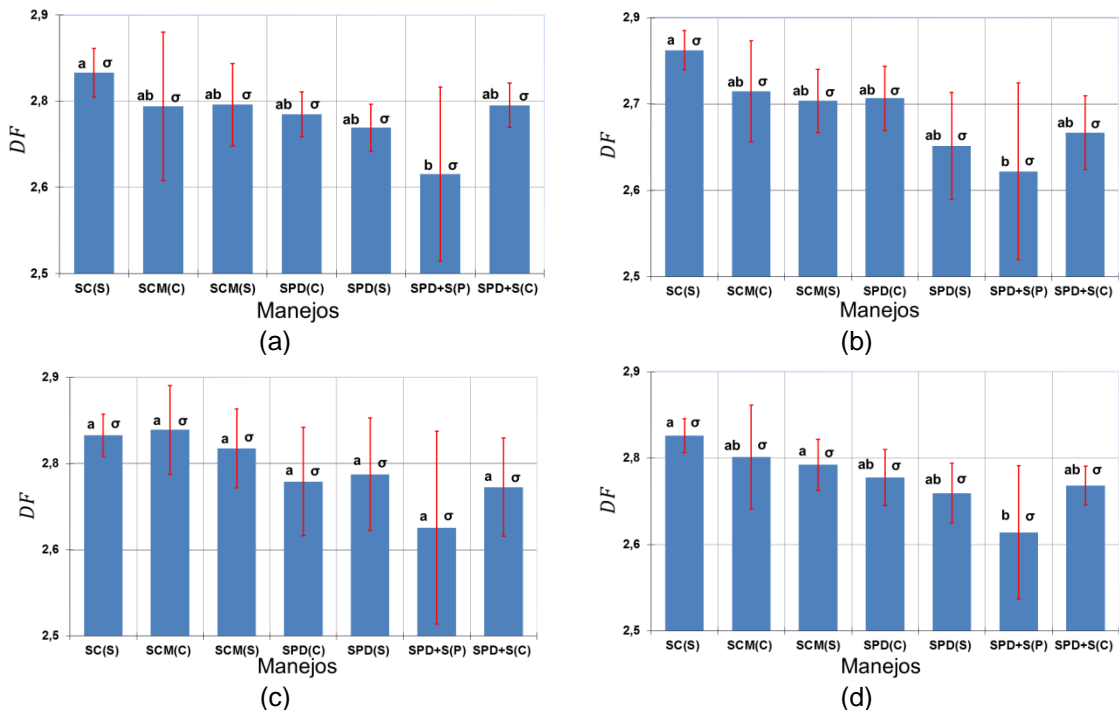
Contudo, os resultados de porosidade imageada do solo obtidos neste estudo se assemelham aos valores relatados por outros pesquisadores na literatura científica. Auler *et al.* (2014) verificaram valores de macroporosidade variando de 7%

a 20% para o solo submetido aos mesmos sistemas de manejo e usos da cultura do azevém. Esses autores conduziram um estudo na mesma área experimental do trabalho aqui apresentado. Eles concluíram que o uso intensivo do azevém sob pastejo ou para produção de silagem, independentemente do sistema de plantio, pode ter impactos negativos no solo quando comparado ao uso de cobertura vegetal. Esses resultados reforçam a relevância dos resultados apresentados no presente estudo. Spera *et al.* (2009), trabalhando em um Latossolo Vermelho, identificaram macroporosidade mais elevada para o sistema de referência de floresta nativa (20%) em comparação a sistemas com pastagem de inverno (13%), culturas de grãos (10%) e forrageiras perenes (14%). No entanto, é importante notar que esses autores enfatizam que essas diferenças na macroporosidade não necessariamente resultam em degradação do solo. Santos *et al.* (2011) encontraram valores de macroporosidade variando entre 8% a 16% em áreas sob integração lavoura-pecuária na camada do solo de 0-0,20 m para diferentes manejos, demonstrando que a pastagem não apresentou efeitos negativos na macroporosidade em relação as áreas na qual ocorre o cultivo de grãos. Já a macroporosidade encontrada por esses autores na área sob plantio convencional foi superior a área sob plantio direto, corroborando em partes com os resultados do presente estudo. No entanto, é válido mencionar que a forma como esses autores calcularam a macroporosidade não foi baseada na análise direta de imagens.

Na Figura 3.2 são apresentados os resultados referentes à análise da dimensão fractal (*DF*) para os diferentes planos (coronal, sagital e axial) e a média entre esses planos. A dimensão fractal fornece uma análise da complexidade e do grau de irregularidade da estrutura dos poros do solo em diferentes escalas (Hott *et al.*, 2005; Vitorio *et al.*, 2020). Quando o solo é submetido a diferentes manejos, cada um deles pode influenciar a complexidade da arquitetura dos poros do solo, principalmente na escala de micrômetros (Andrade *et al.*, 2009; Holden, 1993). Os resultados de dimensão fractal permitem uma compreensão mais profunda das características fractais do sistema poroso do solo em resposta aos diferentes tipos de manejo e usos do azevém. Os resultados obtidos mostram que a dimensão fractal apresenta variações ($p < 0,05$) para alguns dos manejos e usos da cultura do azevém. Somente o plano axial (Figura 3.2c) apresentou resultado discrepante em relação aos demais planos, não sendo observadas diferenças significativas ($p > 0,05$)

entre os tratamentos. Quando é analisado os demais planos e a média entre eles, apenas os sistemas SC(S) e SPD+S(P) demonstram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre si.

Figura 3.2 – Dimensão Fractal (DF) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.



Fonte: O autor.

A análise dos resultados para o plano coronal (Figura 3.2a) mostra que o sistema SC(S) apresentou a maior dimensão fractal, enquanto o sistema SPD+S(P) registrou o menor valor, com diferenças estatísticas ($p > 0,05$) entre esses dois tratamentos. Embora pequenas variações tenham sido observadas na dimensão fractal entre os tratamentos, a cobertura apresentou no geral valores médios maiores de complexidade dos poros dentro de um mesmo manejo. A tendência dos resultados para a dimensão fractal foi a seguinte: SC(S) > SCM(S) > SPD+S(C) > SCM(C) > SPD(C) > SPD(S) > SPD+S(P).

No plano sagital (Figura 3.2b), a variação no valor médio da dimensão fractal entre os sistemas de manejo seguiu tendência similar ao plano coronal. Os sistemas SC(S) e SPD+S(P), respectivamente, exibiram novamente a maior e a menor

dimensão fractal, apresentando diferença significativa entre si ($p > 0,05$). Como observado para o plano coronal, o uso do azevém como cobertura mostrou valores médios maiores de dimensão fractal quando comparados os mesmos manejos, como constatado na porosidade imageada do solo (Figura 3.1). Os resultados de dimensão fractal considerando o plano sagital foram os seguintes: $SC(S) > SCM(C) > SPD(C) > SCM(S) > SPD+S(C) > SPD(S) > SPD+S(P)$.

Os resultados do plano axial (Figura 3.2c) indicam que não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os manejos e usos da cultura do azevém. Tal resultado se deve a alta variabilidade da dimensão fractal do $SPD+S(P)$ neste plano. No geral, os valores médios de dimensão fractal apresentaram variações diferentes em relação aos outros planos. Para o plano axial o maior valor médio de dimensão fractal foi encontrado para o $SCM(C)$. Quando são comparados os usos da cultura do azevém, a cobertura apresentou maiores valores médios de dimensão fractal para o $SCM(C)$ e o $SPD+S(C)$ em relação ao $SCM(S)$ e o $SPD+S(P)$, respectivamente. Os valores médios para o plano axial apresentaram a seguinte tendência: $SCM(C) > SC(S) > SCM(S) > SPD(S) > SPD(C) > SPD+S(C) > SPD+S(P)$.

Quando são considerados os valores da média (Figura 3.2d) da dimensão fractal entre os planos, o sistema $SC(S)$ exibiu o maior valor, ao passo que o $SPD+S(P)$ o menor, com diferenças significativas ($p < 0,05$) entre esses dois tratamentos. Quando é feita a comparação entre os usos do azevém, a cobertura apresenta maior complexidade dos poros em relação à silagem e o pastejo. Para esta situação a seguinte tendência foi observada: $SCM(C) > SCM(S)$, $SPD(C) > SPD(S)$ e $SPD+S(C) > SPD+S(P)$.

A análise dos resultados da dimensão fractal (Figura 3.2) para cada tratamento e plano de reconstrução das imagens mostra algumas tendências. Os sistemas $SC(S)$ e $SPD+S(P)$ foram os únicos a apresentar diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre os diferentes planos estudados, exceto para o plano axial (Figura 3.2c). Os resultados que indicam que o sistema $SC(S)$ do solo apresentou uma maior dimensão fractal em comparação aos demais sistemas podem ser explicados pelo revolvimento do solo comum em sistemas convencionais (Braunack; Dexter, 1989; Gabriel Filho *et al.*, 2000) e tráfego de máquinas para a colheita da silagem (Bavoso *et al.*, 2010). Essas operações resultam na fragmentação da camada

superficial do solo, criando uma estrutura dos poros mais complexa e irregular, podendo contribuir para uma maior dimensão fractal, já que a formação de novos agregados na matriz do solo pode favorecer a criação de poros mais heterogêneos (Zhang *et al.*, 2008). Por outro lado, o sistema SPD+S(P) envolve a manutenção dos restos culturais na superfície do solo, embora no processo de subsolagem o solo sofra intervenção devido ao uso do subsolador de hastes, o qual visa descompactar a estrutura do solo (Camara; Klein, 2005; Kochhann *et al.*, 2000). Alguns autores têm demonstrado que o uso de cobertura vegetal parcial associada ao pastejo pode afetar negativamente a estrutura do solo devido ao pisoteio de animais, contribuindo para uma diminuição da complexidade dos poros (Bavoso *et al.*, 2010; Frozzi *et al.*, 2018; Huntly, 1991). Além disso, autores como Dias-Filho e Ferreira (2009) argumentam que a influência do pastejo animal pode levar a compactação do solo, redução da cobertura vegetal, efeitos negativos na microbiologia do solo e na ciclagem de nutrientes. Esses processos podem resultar em uma estrutura de solo mais compacta, de menor complexidade e homogênea, o que pode ocasionar na diminuição da dimensão fractal pela padronização dos tamanhos de poros (Xu; Li; Zhanbin, 2013).

O fato dos demais tratamentos não apresentarem diferenças significativas ($p > 0,05$) na dimensão fractal entre todos os planos de reconstrução, indica semelhanças na complexidade dos poros. Por outro lado, algumas tendências observadas entre os sistemas de manejo demonstram que quando os diferentes planos de reconstrução (coronal, sagital e axial) são considerados, heterogeneidades na estrutura dos poros do solo podem afetar os resultados obtidos. Porém, os resultados obtidos sugerem no geral que os sistemas SPD, SPD+S e SCM, combinados com a presença de cobertura vegetal permanente ou temporária, podem produzir uma estrutura do solo adequada aos processos dinâmicos que ocorrem no solo em função da complexidade dos poros (Alvarenga *et al.*, 2001). A redução e ausência do revolvimento do solo e a manutenção da cobertura vegetal também podem auxiliar em uma maior estabilidade da estrutura do solo, contribuindo com a existência de poros mais complexos em função da presença de raízes e restos vegetais na superfície do solo (Albuquerque; Sangoi; Ender, 2001; Camara; Klein, 2005; Haque *et al.*, 2016). Portanto, as semelhanças na dimensão fractal entre os sistemas considerados conservacionistas e usos do

azevém podem ser explicadas pela manutenção dos restos culturais na superfície do solo além da proteção oferecida pela cobertura e silagem (Otsubo *et al.*, 2008).

Os menores valores de dimensão fractal encontrados para os sistemas de plantio direto em comparação ao sistema convencional podem estar associados ao adensamento das camadas superficiais do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária, produzindo sistemas porosos mais heterogêneos (Albuquerque; Sangoi; Ender, 2001; Carter; Angers; Topp, 1999; Pietola; Horn; Yli-Halla, 2005; Proffitt *et al.*, 1993). No entanto, quando é analisada a porosidade imageada, não existem diferenças nesta propriedade entre o sistema convencional e os demais. Por exemplo, o sistema SC(S) exibiu a maior dimensão fractal em todos os planos, exceto no axial, mas a maior porosidade imageada média foi observada no sistema SCM(C). Por outro lado, o sistema SPD+S(P) apresentou os menores valores tanto para porosidade imageada quanto para a dimensão fractal. Isso sugere que a relação entre a dimensão fractal e a porosidade é complexa, principalmente quando são considerados os diferentes manejos do solo. Além disso, a análise de correlação se demonstrou positivamente moderada ($r=0,56$, $p<0,05$) entre esses parâmetros quando foram analisados todos os tratamentos em conjunto. Desta forma, pode-se afirmar que quando o sistema poroso apresenta menor porosidade imageada, também possui uma menor complexidade dos poros. Neste sentido, sugere-se a realização de estudos futuros visando compreender melhor a relação entre a complexidade dos poros e a porosidade. No entanto, os resultados obtidos indicam que o uso da cultura do azevém pode ter uma importância fundamental na complexidade dos poros, ao invés de se considerar de forma isolada somente os diferentes tipos de manejo.

É válido mencionar que os valores de dimensão fractal encontrados neste estudo, variando entre 2,50 e 2,90, estão coerentes com outros trabalhos na literatura científica. Dathe *et al.* (2001), Gaspareto *et al.* (2023) e Gimenez *et al.* (1997) encontraram valores de dimensão fractal nessa faixa de valores para estruturas tridimensionais. No entanto, pesquisas recentes, como as de Dhaliwal e Kumar (2022) e Singh *et al.* (2021), encontraram valores ligeiramente menores para a dimensão fractal, variando entre 2,10 e 2,50. Os estudos desses autores concluíram que sistemas de manejo que incorporam culturas de cobertura em sistemas de integração lavoura-pecuária têm o potencial de melhorar a

complexidade do sistema poroso do solo. Neste sentido, os valores mais altos encontrados no presente estudo são uma evidência da análise de poros altamente complexos, independentemente do tratamento analisado.

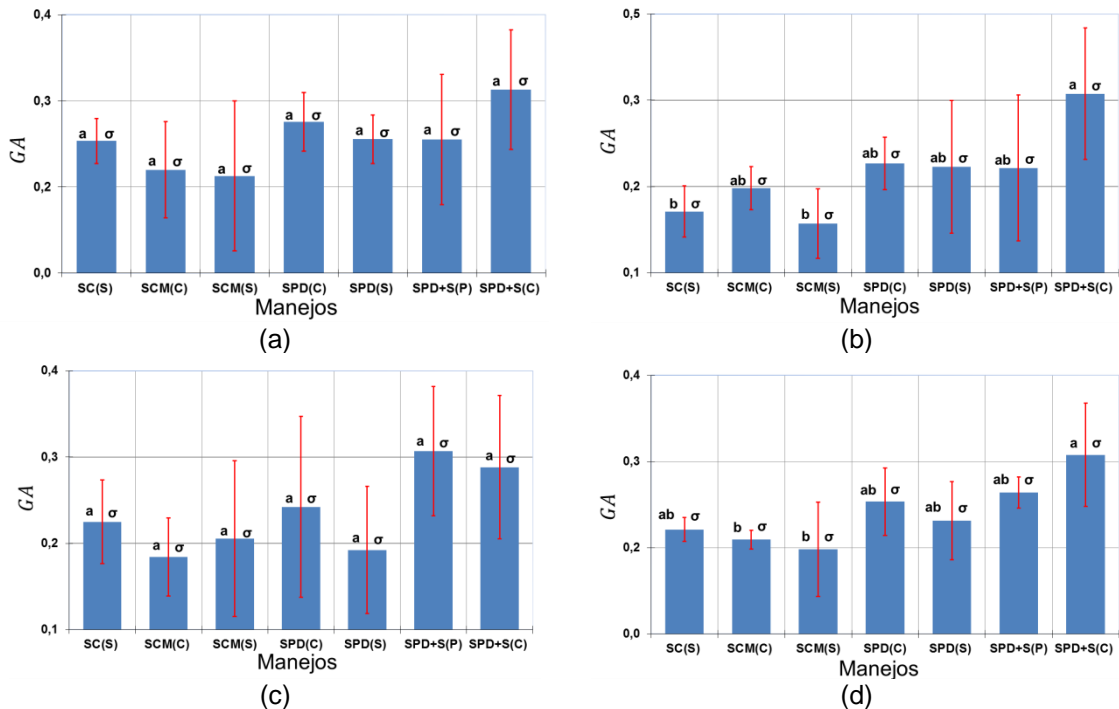
Na Figura 3.3 são apresentados os resultados do grau de anisotropia (GA) para os diferentes planos de reconstrução, sistemas de manejo do solo e usos da cultura do azevém. O grau de anisotropia é um índice que reflete como o sistema poroso do solo está arranjado em relação a diferentes direções. Quando o valor deste parâmetro é igual a 1 indica um sistema poroso completamente anisotrópico, ao passo que valores próximos de 0 representam distribuições de poros mais isotrópicos. Desta forma, o grau da anisotropia fornece informações sobre como os poros estão arranjados no interior do solo, influenciando no comportamento hidráulico e mecânico deste sistema poroso (Hernández Zubeldia *et al.*, 2016; Pozdnyakov *et al.*, 2009; Pulido-Moncada *et al.*, 2021; Tseng; Alves; Crestana, 2018).

A análise dos resultados para o plano coronal (Figura 3.3a) mostra que o grau de anisotropia não apresentou diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os diferentes tratamentos. Contudo, foram observadas algumas tendências interessantes. O sistema SPD+S(C) apresentou o maior valor médio de anisotropia, seguido dos sistemas SPD(C), SPD(S), SPD+S(P) e SC(S), indicando que os sistemas de plantio direto e convencional e os diferentes usos do azevém possuem sistemas porosos levemente mais anisotrópicos neste plano. Por outro lado, os sistemas SCM(C) e SCM(S) apresentaram as menores anisotropias, indicando meios porosos com estruturas mais similares em todas as direções de análise. Com isso, a tendência dos resultados foi a seguinte para o plano coronal: SPD+S(C) > SPD(C) > SPD(S) > SPD+S(P) > SC(S) > SCM(C) > SCM(S).

Quando o plano sagital (Figura 3.3b) é analisado, para alguns tratamentos foram observadas tendências semelhantes ao plano coronal. O sistema SPD+S(C) apresentou novamente o maior valor médio de grau de anisotropia, diferindo significativamente ($p < 0,05$) dos sistemas SC(S) e SCM(S). Os demais tratamentos não apresentaram diferenças significativas entre si. Além disso, os sistemas SC(S) e SCM(S) apresentaram menores valores médios de grau de anisotropia quando comparado ao plano coronal. No entanto, não foram observadas diferenças significativas entre os sistemas entre esses dois planos. Essa variação de resultados

para diferentes planos tomográficos indica que para essa propriedade a escolha do plano de reconstrução pode influenciar nos resultados obtidos, o que se deve provavelmente as diferentes regiões de interesse analisadas em cada um dos planos. Para o plano sagital foi verificada a seguinte tendência entre os tratamentos: SPD+S(C) > SPD(C) > SPD(S) > SPD+S(P) > SCM(C) > SC(S) > SCM(S).

Figura 3.3 – Grau de Anisotropia (GA) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.



Fonte: O autor.

Com relação aos resultados do plano axial (Figura 3.3c), os tratamentos exibiram graus de anisotropia distintos dos demais planos. Entretanto, para esse plano de reconstrução não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os manejos e usos da cultura do azevém. Os sistemas SPD+S(P), SPD+S(C), SPD(C) e SC(S) apresentaram os maiores valores médios de grau de anisotropia. Os sistemas SCM(S) e SCM(C) apresentaram anisotropias mais baixas, indicando meios porosos mais isotrópicos. No entanto, curiosamente, o sistema SPD(S) também apresentou um menor grau de anisotropia, diferindo dos planos anteriores. Uma possível explicação para este fato é novamente a diferença de região de

interesse imageada em cada um dos planos. Os valores médios para o plano axial apresentaram a seguinte tendência: SPD+S(P)> SPD+S(C)> SPD(C)> SC(S)> SCM(S)> SPD(S)> SCM(C).

Quando é analisada a média do grau de anisotropia entre os planos (Figura 3.3d), observou-se diferenças significativas ($p < 0,05$) entre o sistema SPD+S(C) em comparação aos sistemas SCM(C) e SCM(S). Os sistemas de plantio direto são os que apresentam maiores valores médios de grau de anisotropia, com a seguinte tendência: SPD+S(C)> SPD+S(P)> SPD(C)> SPD(S). Por outro lado, os sistemas SC(S), SCM(C) e SCM(S) apresentaram os menores valores médios de grau de anisotropia, mas sem apresentarem diferenças entre si ($p > 0,05$).

Uma análise geral de todos os resultados do grau de anisotropia mostra que os sistemas SPD e SPD+S apresentaram os maiores valores em comparação com os sistemas SC e SCM. No entanto, essas diferenças foram significativas ($p < 0,05$) apenas no plano sagital e na média dos planos, enquanto nos planos coronal e axial, não foram observadas diferenças entre os tratamentos. De acordo com Pozdnyakov *et al.* (2009), plantios que envolvem procedimentos como subsolagem podem favorecer a formação de poros orientados, aumentando o grau de anisotropia do sistema poroso do solo. Sistemas de manejo envolvendo semeadura direta também tendem a apresentar valores mais altos de grau de anisotropia. Garbout, Munkholm e Hansen (2013) enfatizam que o plantio direto tende a promover sistemas de poros mais orientados e conectados quando comparado a solos arados. Isso se deve principalmente a influência da flora e da fauna do solo nas camadas superficiais sob manejos considerados conservacionistas. A ação de insetos, minhocas e das raízes das culturas agrícolas tendem geralmente a aumentar o grau de anisotropia do sistema poroso do solo.

Os resultados obtidos também revelaram diferenças significativas no plano sagital entre o sistema SPD+S(C) em relação aos sistemas SC(S) e SCM(S), e na média dos planos entre o sistema SPD+S(C) comparado com os sistemas SCM(C) e SCM(S). Isso sugere que a presença de cobertura vegetal, especialmente comparado à silagem, tem um impacto importante na anisotropia do solo. Entretanto, essa observação está em desacordo com estudos como o de Polich *et al.* (2022), que mostraram que as práticas de manejo combinadas com as culturas de cobertura de inverno, não apresentam influência na orientação dos poros do solo. Outro ponto

a se destacar, foi à falta de diferenças significativas entre os diferentes tratamentos nos planos coronal e axial. Isto demonstra que a escolha de diferentes planos de reconstrução, pode fornecer resultados distintos. Isto está relacionado com variações no volume de reconstrução, o que irá afetar as propriedades determinadas em função de diferentes poros sendo acessado em cada um dos casos, o que pode ser crítico no caso de medidas como é o caso do grau de anisotropia.

Os valores baixos do grau de anisotropia encontrados no presente estudo, todos inferiores a 0,33, indicam que os sistemas de manejo do solo avaliados favorecem a formação de estruturas de poros mais isotrópicos. Esses resultados encontram respaldo em pesquisas anteriores da área. Garbout, Munkholm e Hansen (2013), Gaspareto *et al.* (2023) e Tseng, Alves e Crestana (2018) também relataram valores de grau de anisotropia compatíveis com os encontrados neste estudo. Valores mais baixos de grau de anisotropia podem ser interpretados como uma indicação de que a rede de poros do solo se estende de forma relativamente homogênea em todas as direções. Isso sugere que a capacidade de transporte de água, aeração e movimentação de nutrientes no solo pode ocorrer de maneira mais uniforme, o que é importante do ponto de vista da percolação e redistribuição de água. A capacidade do solo em conseguir redistribuir a água de forma mais homogênea, também é importante para evitar a contaminação do lençol freático devido a processos de infiltração preferencial (Li *et al.*, 2021).

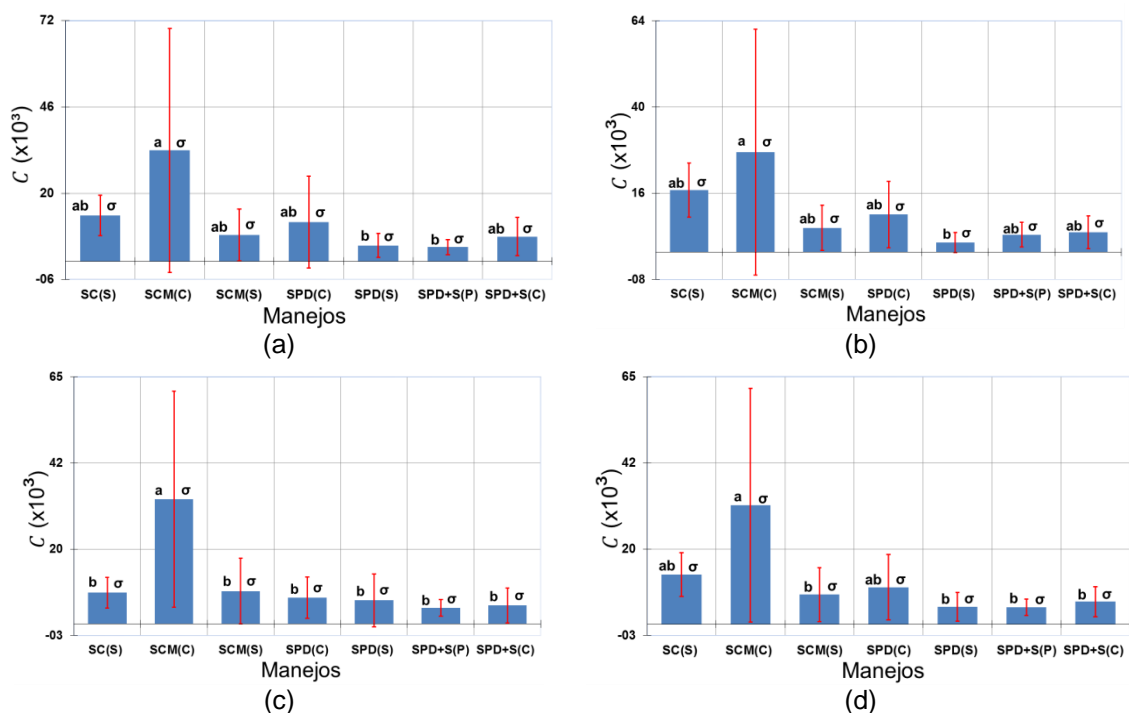
Quando os resultados do grau de anisotropia são relacionados com a porosidade imageada e a dimensão fractal, observa-se que não há uma relação direta entre as grandezas. Os resultados da análise de correlação mostram apenas correlações fracas entre esses parâmetros morfológicos do solo. No entanto, a complexa relação entre anisotropia, porosidade imageada e dimensão fractal demonstra a necessidade de investigações mais aprofundadas para compreender plenamente as interações entre essas propriedades do solo, principalmente quando são analisadas situações complexas que envolvem diferentes formas de manejo associadas a distintos usos de culturas agrícolas.

Os resultados da conectividade dos poros (C) para os diferentes planos de reconstrução, sistemas de manejo e usos da cultura do azevém são apresentados na Figura 3.4. A conectividade está relacionada com a continuidade da rede de poros por meio de conexões entre poros de diferentes calibres. Essa é uma

importante propriedade física do solo que afeta diretamente a dinâmica da água, o movimento de nutrientes e gases no perfil do solo, desempenhando um papel fundamental nas propriedades hidráulicas e no funcionamento geral do sistema poroso do solo (Bernabé; Li; Mainault, 2010; Cunha *et al.*, 2020; Pires *et al.*, 2017).

Os resultados mostram que o sistema SCM(C) exibiu a maior conectividade dos poros no plano coronal (Figura 3.4a). Além disso, foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$) entre esse sistema e os sistemas SPD(S) e SPD+S(P), indicando que o cultivo mínimo com cobertura promoveu uma maior conexão entre os poros. No entanto, os demais sistemas de manejo, com exceção do SCM(C), não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) nesse plano. Quando é analisada a tendência entre os tratamentos, os seguintes resultados foram observados: SCM(C) > SC(S) > SPD(C) > SCM(S) > SPD+S(C) > SPD(S) > SPD+S(P).

Figura 3.4 – Conectividade dos poros (C) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.



Fonte: O autor.

No plano sagital (Figura 3.4b), novamente o sistema SCM(C) apresentou o maior valor médio de conectividade dos poros, com diferença significativa ($p < 0,05$)

apenas em relação ao sistema SPD(S). Isso sugere um efeito positivo do cultivo mínimo com cobertura na conexão dos poros, quando é considerado esse plano de reconstrução. O menor valor de conectividade foi observado para o sistema SPD(S). No plano sagital, foi encontrada a seguinte tendência entre tratamentos: SCM(C)> SC(S)> SPD(C)> SCM(S)> SPD+S(C)> SPD+S(P)> SPD(S).

No plano axial (Figura 3.4c), o sistema SCM(C) apresentou a maior conectividade dos poros similar ao resultado dos outros planos, apresentando diferença significativa ($p < 0,05$) em relação aos demais tratamentos. A seguinte tendência entre tratamentos foi observada neste plano: SCM(C)> SCM(S)> SC(S)> SPD(C)> SPD(S)> SPD+S(C)> SPD+S(P).

Quando é analisada a média da conectividade dos poros considerando os três planos de reconstrução (Figura 3.4d), o sistema SCM(C) apresentou a maior conectividade entre os poros, com diferenças significativas ($p < 0,05$) em relação aos sistemas SCM(S), SPD(S), SPD+S(P) e SPD+S(C). Para a média dos planos, observou-se a seguinte tendência entre tratamentos: SCM(C)> SC(S)> SPD(C)> SCM(S)> SPD+S(C)> SPD(S)> SPD+S(P).

Os resultados obtidos neste estudo mostram que o sistema de manejo SCM(C) apresentou-se bastante conectado, atingindo um valor de 31×10^3 . Por exemplo, Ferreira *et al.* (2018) trabalhando com um solo silto-argiloso sob SPD e sob pastagem, relataram valores de conectividade dos poros variando de 4×10^3 a 18×10^3 . Isto demonstra como o sistema SCM(C) deste estudo se mostra bastante conectado em relação aos valores relatados na literatura. A observação de maior conectividade dos poros no sistema SCM(C) está coerente com outros estudos, e se mostrou mais evidente no plano axial (Figura 3.4c). Calonego e Rosolem (2008), Castro Filho *et al.* (2002) e Dexter (1988), ressaltam que sistemas considerados conservacionistas como o cultivo mínimo, quando combinados com a presença de cobertura vegetal, tendem a produzir solos melhores estruturados com formação de agregados mais estáveis. Quando a estrutura do solo se apresenta estável, no longo prazo isto pode favorecer uma maior conectividade entre os poros (Pires *et al.*, 2017), especialmente quando se consideram os efeitos positivos da matéria orgânica oriunda da cobertura vegetal, a qual tende a favorecer a formação de poros mais alongados e conectados (Papadopoulos *et al.*, 2009).

As diferenças significativas observadas no plano coronal, onde o sistema SCM(C) diferiu dos sistemas SPD(S) e SPD+S(P), e no plano sagital, onde o sistema SCM(C) apresentou diferenças em relação aos sistemas SPD(S), podem ser atribuídas às características específicas de cada um desses manejos. Por exemplo, os sistemas SPD com semeadura direta e SPD+S, que envolve semeadura direta com subsolagem, sob silagem e pastejo, afetam a distribuição de poros e agregados de maneira diferente em comparação ao sistema SCM(C). Bavoso *et al.* (2010) mostraram que o azevém para a produção de silagem induz o solo a uma maior resistência tênsil devido ao tráfego de máquinas, implicando em maior degradação do solo, e conseqüentemente, podendo levar a menor conectividade dos poros. Além disso, autores como Correa e Reichardt (1995) e Tanner e Mamaril (1959), identificaram que o pisoteio animal ocasiona a diminuição do espaço poroso do solo, compactação da camada superficial, aumento da resistência à penetração de raízes em função do pastejo, principalmente em solos argilosos, podendo acarretar em poros menos conectados. É válido mencionar que os macroporos são geralmente os poros mais susceptíveis a mudanças devido ao tráfego de animais ou implementos agrícolas. Processos que envolvem a compactação do solo reduzem significativamente a macroporosidade do solo, afetando principalmente os poros de condução de água (Medeiros; Soares; Guimarães, 2005). Conseqüentemente, os processos de adensamento do solo podem favorecer a fragmentação dos poros maiores, diminuindo a conectividade dos poros.

A média dos planos revelou diferenças significativas entre os sistemas SCM(C) e SCM(S), SPD(S), SPD+S(P) e SPD+S(C), reforçando novamente a importância do cultivo mínimo com cobertura vegetal; pois, diferente do pastejo e da silagem, a cobertura vegetal é mantida durante todo o ciclo de cultivo (Albuquerque; Sango; Ender, 2001). Os menores valores de conectividade dos poros observados para os demais tratamentos com cobertura mostram que o SPD, mesmo sob este tipo de uso da cultura do azevém, pode reduzir a conexão dos poros. Este resultado pode estar associado ao adensamento do solo, o qual pode ocorrer em sistemas de plantio direto, principalmente quando conduzidos por longos períodos de tempo (Abreu; Reichert; Reinert, 2004).

Quando é verificada a existência de possíveis relações entre a conectividade dos poros e as demais propriedades morfológicas do solo analisadas até o

momento, algumas destas propriedades parecem apresentar relações entre si. Por exemplo, o sistema SCM(C) apresentou maiores valores de conectividade dos poros, porosidade imageada e dimensão fractal no plano axial, indicando uma possível relação entre essas propriedades. No entanto, apenas a conectividade e a porosidade imageada apresentaram relação positiva forte ($r=0,8$, $p<0,05$), ao comparar essas duas propriedades no geral, nos manejos SCM e usos do azevém como cobertura. Tal resultado implica que os sistemas mais porosos são aqueles que se apresentam mais conectados. Além disso, a anisotropia do solo parece não seguir uma tendência direta com a conectividade, sendo necessários mais estudos para verificar a relação entre essas duas variáveis.

Nas Figuras 3.5 a 3.8 são apresentados os resultados de tortuosidade para os diferentes planos de reconstrução, manejos e usos da cultura do azevém. A tortuosidade é um parâmetro que descreve o grau de sinuosidade dos poros, afetando diretamente na dinâmica de fluidos e gases no solo, de modo a desempenhar um papel fundamental nos processos de transporte de água, nutrientes, contaminantes e trocas de ar no solo (Bertol *et al.*, 2006; Fetter; Boving; Kreamer, 1999; Ghanbarian *et al.*, 2023; Pagenkemper *et al.*, 2014; Roque; Arcaro; Lanfredi, 2012). No entanto, é válido mencionar que os resultados de tortuosidade não apresentam relação com a direcionalidade dos horizontes do solo, uma vez que foram coletados agregados sem qualquer indicação de direção. Os valores de tortuosidade nas diferentes direções visam somente dar uma ideia da orientação dos poros.

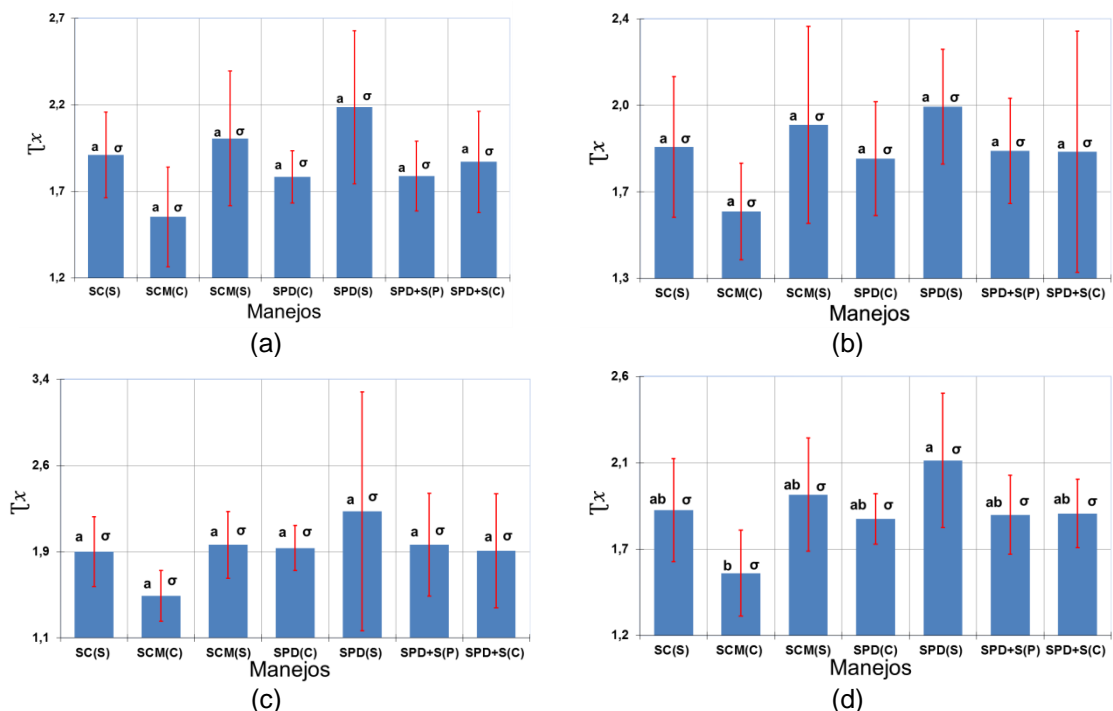
A análise dos valores de tortuosidade do solo referente ao eixo x , (T_x) (Figura 3.5) mostrou que não existem diferenças significativas ($p>0,05$) entre os tratamentos nos diferentes planos de reconstrução (coronal, sagital e axial), embora quando é considerada a média desses planos, foram observadas diferenças ($p<0,05$) entre alguns dos tratamentos.

Em relação aos planos específicos foram observadas tendências similares nos planos coronal e sagital (Figuras 3.5a e b), com o sistema SPD(S) apresentando o maior valor médio de tortuosidade e os sistemas SPD(C) e SCM(C), os menores valores. Além disso, para estes planos, seguido de SPD(S), observou-se que os sistemas SCM(S) e SC(S) foram os que apresentaram os maiores valores médios de tortuosidade, indicando que a silagem influencia na tortuosidade de modo a

aumentar seu valor, independentemente do tipo de manejo. Já os sistemas SPD+S(C) e SPD+S(P) apresentaram valores médios próximos de tortuosidade.

No plano axial (Figura 3.5c), os resultados mostram que o sistema SPD(S) possui o maior valor médio de tortuosidade seguido pelos sistemas SPD+S(P), SCM(S), SPD(C), SPD+S(C) e SC(S). Este plano apresentou tendências diferentes em relação aos outros dois planos de reconstrução, entretanto, SCM(C) novamente apresentou a tortuosidade mais baixa. Quando é analisada a média dos valores de tortuosidade em x (Figura 3.5d), considerando os três planos de reconstrução, o sistema SPD(S) apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) somente em relação ao SCM(C). Os demais tratamentos não apresentaram diferenças entre si.

Figura 3.5 – Tortuosidade (T_x) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.



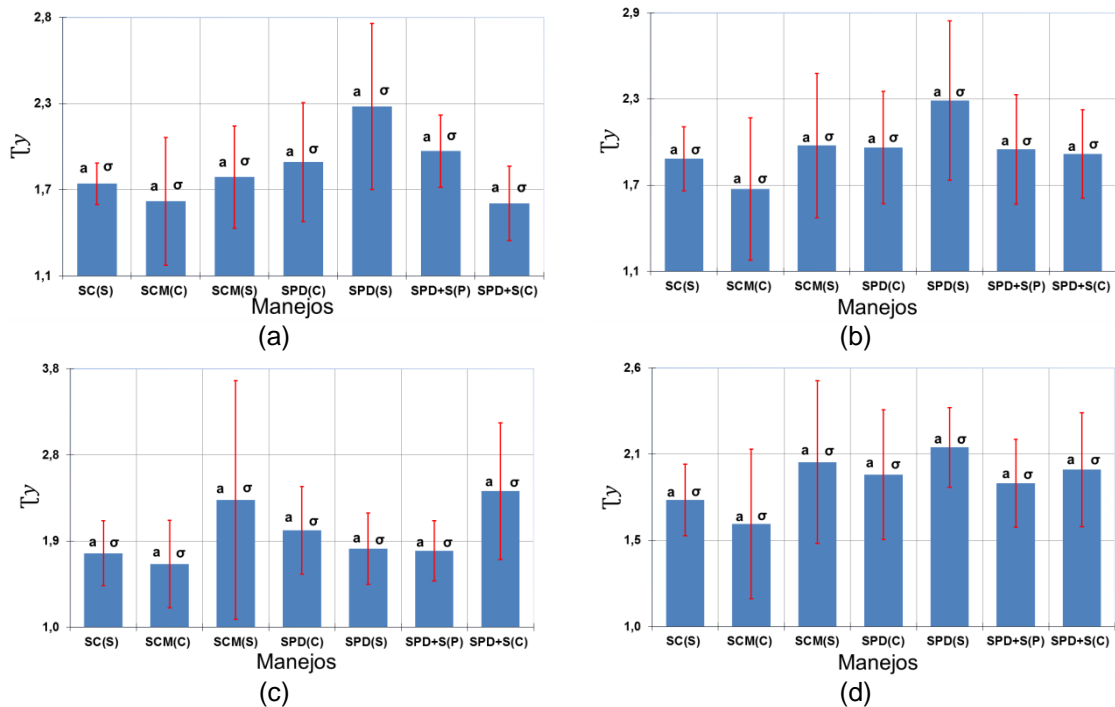
Fonte: O autor.

Os resultados da tortuosidade em y , (T_y) (Figura 3.6) mostram que não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os diferentes tratamentos, embora seja interessante notar que as tendências nas diferentes orientações (coronal, sagital e axial) apresentaram variações. No plano coronal (Figura 3.6a), o

SPD(S) apresentou o maior valor médio de tortuosidade seguido pelos sistemas SPD+S(P), SPD(C), SCM(S) e SC(S). A menor tortuosidade foi observada para o sistema SCM(C) seguido do SPD+S(C).

No plano sagital (Figura 3.6b), o sistema SPD(S) exibiu o maior valor médio de tortuosidade, seguido pelos sistemas SCM(S), SPD(C), SPD+S(P), SPD+S(C) e SC(S). Entretanto, a menor tortuosidade foi referente ao sistema SCM(C), divergindo do resultado para o plano coronal. No plano axial (Figura 3.6c), a maior tortuosidade em y ocorreu para o sistema SPD+S(C), diferindo dos planos anteriores. Na sequência, a tortuosidade apresenta a seguinte tendência em ordem decrescente: SCM(S), SPD(C), SPD(S) e SPD+S(P). Os menores valores de tortuosidade foram observados para o SC(S) e SCM(C), concordando com os resultados do plano sagital.

Figura 3.6 – Tortuosidade (T_y) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.



Fonte: O autor.

A análise da média entre os planos (Figura 3.6d) forneceu uma visão geral das tendências de tortuosidade. O SPD(S) apresentou o maior valor médio de

tortuosidade em y , seguido pelos sistemas SCM(S), SPD+S(C), SPD(C) e SPD+S(P). Os menores valores foram encontrados para os sistemas SC(S) e SCM(C). A avaliação da média entre os planos de reconstrução pode indicar que, embora não existam diferenças significativas em cada plano individual, uma análise conjunta pode revelar padrões gerais de tortuosidade que podem ser influenciados pelas práticas de manejo.

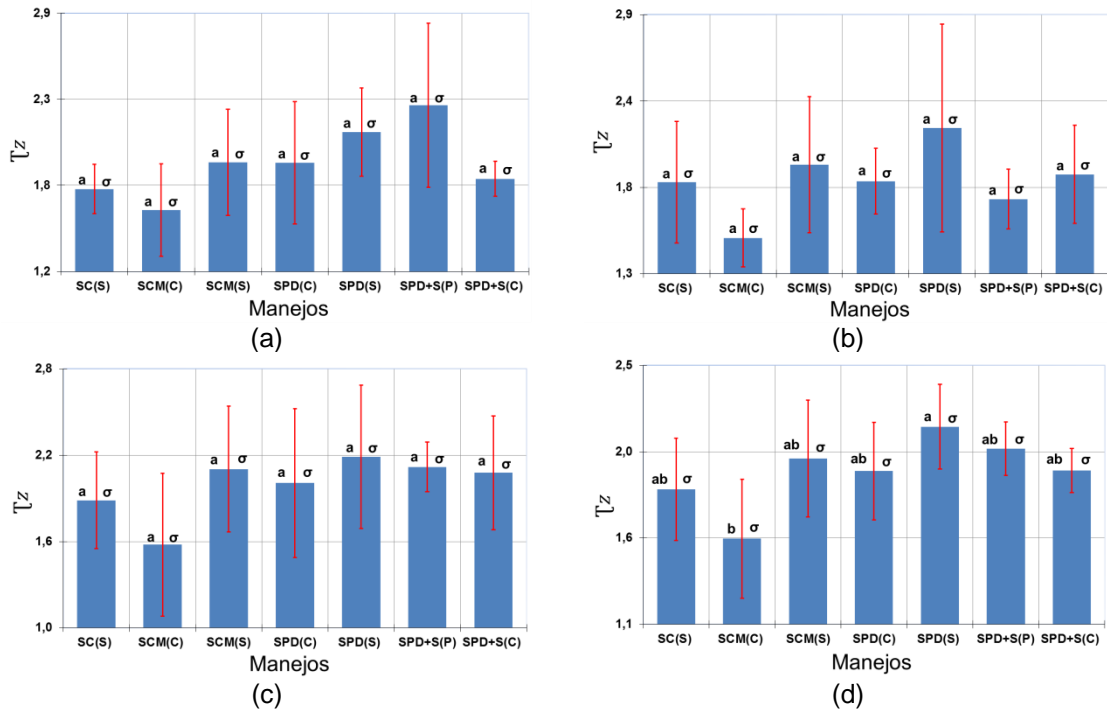
É possível afirmar com base nos resultados obtidos que a tortuosidade no eixo y , para os diferentes tratamentos avaliados, não afetou de maneira significativa a sinuosidade dos poros no solo. Isso pode ser especialmente relevante para avaliar a influência das práticas de manejo na estrutura do solo, mesmo quando as diferenças individuais em cada plano podem não ser tão evidentes. É importante ressaltar que a falta de diferenças significativas não deve ser interpretada como ausência de impacto das práticas de manejo no solo. Ou seja, é fundamental observar que certos sistemas mostraram valores médios distintos de tortuosidade em determinados planos. Por exemplo, o sistema SPD(S) apresentou a maior tortuosidade média no plano sagital, enquanto o sistema SPD+S(C) teve a maior tortuosidade média no plano axial. Essas diferenças, embora não sejam estatisticamente significativas quando comparados os planos, podem indicar tendências que merecem investigação mais aprofundada.

Os resultados da tortuosidade em z , (T_z) (Figura 3.7) não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos quando os planos individuais são analisados. No entanto, quando o valor médio de tortuosidade considerando a média dos planos é analisado, foram verificadas diferenças ($p < 0,05$) em alguns dos tratamentos.

No plano coronal (Figura 3.7a), o sistema SPD+S(P) apresentou a maior tortuosidade, seguido pelo SPD(S), SCM(S), SPD(C) e SPD+S(C). Os menores valores médios de tortuosidade foram verificados para os sistemas SC(S) e SCM(C). No caso do plano sagital (Figura 3.7b), o sistema SPD(S) apresentou a maior tortuosidade, seguido pelos sistemas SCM(S), SPD+S(C), SPD(C) e SC(S). Entretanto, diferindo do plano coronal, os menores valores de tortuosidade foram verificados para os sistemas SPD+S(P) e SCM(C). Para o plano axial (Figura 3.7c), o SPD(S) exibiu a maior tortuosidade, seguido pelos sistemas SPD+S(P), SCM(S), SPD+S(C) e SPD(C). Além disso, as menores tortuosidades foram encontradas nos

sistemas SC(S) e SCM(C). Quando os três planos de reconstrução são considerados, a menor tortuosidade foi obtida para o SCM(C).

Figura 3.7 – Tortuosidade (T_z) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem). a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.



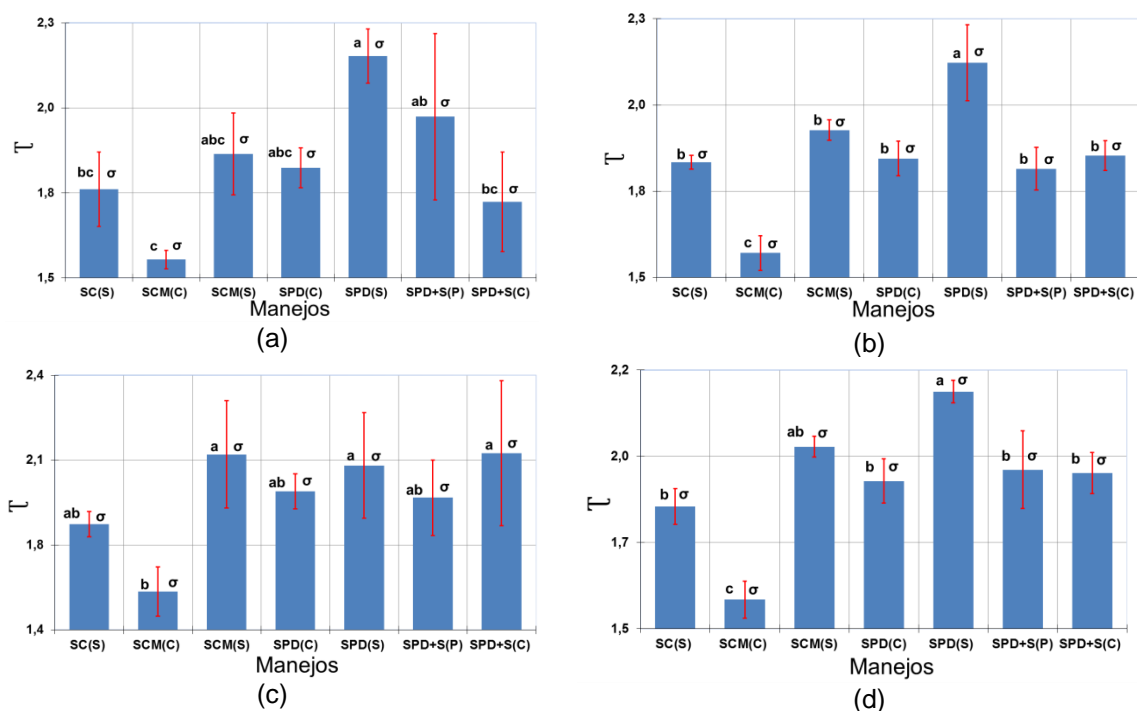
Fonte: O autor.

A análise da média considerando os três planos de reconstrução (Figura 3.7d) indicou a existência de diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os sistemas SPD(S) e SCM(C) para a tortuosidade em z . Isso sugere que, apesar de não haver diferenças significativas em cada plano individualmente, quando é considerada uma visão mais abrangente do sistema poroso para as regiões de interesse analisadas, obtêm-se mais dados (diferentes volumes analisados) de modo a quantificar a arquitetura dos poros mais detalhadamente. Assim, a análise da média entre os planos poderia fornecer uma visão mais geral da tortuosidade dos poros do solo.

Os resultados de tortuosidade dos poros do solo (T) referente à média dos eixos (x , y e z) (Figura 3.8) apresentam informações mais completas da arquitetura dos poros e como é influenciada pelos diferentes tratamentos.

No plano coronal (Figura 3.8a), o sistema SPD(S) apresentou a maior tortuosidade entre todos os tratamentos. Isso sugere que, nesse plano, o solo sob o sistema SPD(S) possui uma estrutura de poros mais complexa e irregular. Por outro lado, o sistema SCM(C) apresentou a menor tortuosidade, indicando poros menos sinuosos que tendem a facilitar a infiltração de água. O SPD(S) diferiu significativamente ($p < 0,05$) de outros tratamentos, incluindo os sistemas SC(S), SCM(C) e SPD+S(C). Além disso, o sistema SPD+S(P) diferiu significativamente ($p < 0,05$) do SCM(C), mostrando que o pastejo induz o aumento da tortuosidade mesmo em um sistema considerado conservacionista.

Figura 3.8 – Tortuosidade (T) em relação aos seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem). a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Letras diferentes no alfabeto grego indicam diferenças para um mesmo sistema considerando os diferentes planos de análise.



Fonte: O autor.

No plano sagital (Figura 3.8b), o sistema SPD(S) apresentou a maior tortuosidade. De forma semelhante ao plano coronal, o sistema SCM(C) caracterizou-se pela menor tortuosidade no plano sagital, indicando poros menos sinuosos. Notavelmente, no plano sagital, foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$) principalmente entre o sistema SPD(S) e os demais tratamentos. A

tortuosidade do sistema SCM(C) também diferiu de todos os demais tratamentos. Os sistemas restantes, incluindo o SC(S), SCM(S), SPD(C), SPD+S(P) e SPD+S(C), não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) nesse plano.

No plano axial (Figura 3.8c), o sistema SCM(C) apresentou a menor tortuosidade, com o maior valor sendo medido para o sistema SPD+S(C). Em termos estatísticos, a análise de tortuosidade revelou diferenças significativas ($p < 0,05$) apenas entre o sistema SCM(C) e os sistemas SCM(S), SPD(S) e SPD+S(C). Os demais sistemas, como o SC(S), o SPD(C) e o SPD+S(P), não demonstraram diferenças significativas ($p > 0,05$) em relação à tortuosidade no plano axial.

A análise da média dos planos de reconstrução (Figura 3.8d) mostra que o sistema SPD(S) apresentou a maior tortuosidade, com diferenças significativas ($p < 0,05$) em relação a todos os demais tratamentos, exceto o sistema SCM(S). O sistema SCM(C) apresentou a menor tortuosidade na média dos planos, diferindo de todos os demais tratamentos. Essas observações sugerem que a complexidade da estrutura dos poros do solo varia dependendo da orientação do plano, e as diferenças entre os sistemas de manejo são mais pronunciadas em alguns planos do que em outros. Estudos anteriores têm relatado as influências das práticas de manejo na estrutura do solo, na rugosidade e na tortuosidade dos poros (Bertol *et al.*, 2006; Elliot; Reynolds; Heck, 2010; Eltz; Norton, 1997). Por este motivo é sempre importante analisar a estrutura do solo tridimensionalmente, a fim de se verificar possíveis diferenças em suas propriedades morfológicas e geométricas (Augusto *et al.*, 2022; Mello; Bueno; Pereira, 2006).

A análise da tortuosidade dos poros nos diferentes eixos e para o valor médio dos eixos (τ_x , τ_y , τ_z e τ) revelou tendências e diferenças importantes entre alguns dos tratamentos analisados. Em algumas situações, a mudança do eixo de reconstrução influenciou nas diferenças observadas entre os tratamentos. Os dados para os planos coronal, sagital e axial, bem como a média dos planos, forneceram valiosos insights sobre como esses sistemas afetam a estrutura do solo. Os resultados indicaram que o sistema SPD(S) apresentou consistentemente os maiores valores de tortuosidade, enquanto o SCM(C) os menores valores em todos os eixos.

No geral, as tendências verificadas indicam que o sistema SPD(S) foi aquele que apresentou o valor médio de tortuosidade mais alto e o SCM(C) o mais baixo,

com os demais tratamentos não diferindo estatisticamente ($p > 0,05$). Os resultados obtidos estão em acordo com Dhaliwal e Kumar (2022) e Peth *et al.* (2008) que identificaram menor tortuosidade com poros bem interligados em sistemas de integração lavoura-pecuária sob cultura de cobertura de milho-soja. Além disso, os resultados revelaram que no geral os tratamentos com poros menos conectados foram os que apresentaram maiores tortuosidades (Galdos *et al.*, 2019; Pires *et al.*, 2020; Roque; Arcaro; Lanfredi, 2012).

O sistema SPD(S) apresentou os maiores valores de tortuosidade, refletindo uma rede de poros mais complexa contendo poros mais sinuosos. Esse sistema foi o que apresentou a menor conectividade dos poros. Desta forma, a maior tortuosidade neste caso representa uma maior dificuldade para a água fluir, a qual estaria associada também a menor conectividade dos poros (Hira; Singh, 1977). Por outro lado, o sistema SCM(C), que apresentou a menor tortuosidade e, simultaneamente, a maior conectividade dos poros, caracteriza-se por uma rede de poros que facilita a dinâmica da água e gases (Hira; Singh, 1977). Esses resultados são consistentes com estudos anteriores que destacam a importância da conectividade dos poros na funcionalidade do solo, incluindo o transporte de água e aeração (Bernabé; Li; Mainault, 2010; Cunha *et al.*, 2020). Assim, os resultados obtidos no presente estudo ressaltam a necessidade de considerar não apenas a tortuosidade, mas também a conectividade dos poros ao se avaliar a eficiência do solo em conduzir água (Ghanbarian *et al.*, 2023; Pires *et al.*, 2020; Udawatta *et al.*, 2008). Em resumo, os resultados obtidos indicam que os sistemas de manejo que promovem uma menor tortuosidade e maior conectividade dos poros, como o SCM(C), podem ser mais eficazes na manutenção de uma adequada funcionalidade do solo. Os resultados da análise de correlação linear, quando consideradas essas duas propriedades no geral, mostrou a existência de uma correlação moderada negativa ($r = -0,57$, $p < 0,05$) entre a conectividade dos poros e a tortuosidade. Desta forma, esse resultado mostra uma tendência de aumento na tortuosidade dos poros quando estes estão menos conectados.

Os resultados deste estudo indicam que os valores médios de tortuosidade encontrados estão consistentes com os valores reportados na literatura científica. Pires *et al.* (2017) trabalhando com um Latossolo Vermelho sob SPD e SC mediram valores de tortuosidade de 1,5 a 1,7. No entanto, em outros estudos, como o

realizado por Ferreira *et al.* (2018), em um solo siltoso-argiloso sob SPD e pastagem, os valores de tortuosidade variaram entre 2,0 a 2,7. Por outro lado, Galdos *et al.* (2019) relataram valores menores de tortuosidade, variando de 1,3 a 1,5, ao estudar um Nitossolo Vermelho Argiloso sob SPD e SC. Essa variação nos valores de tortuosidade pode refletir diferenças nas propriedades do solo, como textura e estrutura, bem como nas práticas de manejo e sistemas de cobertura vegetal. Diferenças nos métodos de medida de tortuosidade também podem afetar nos resultados obtidos (Holzer *et al.*, 2023).

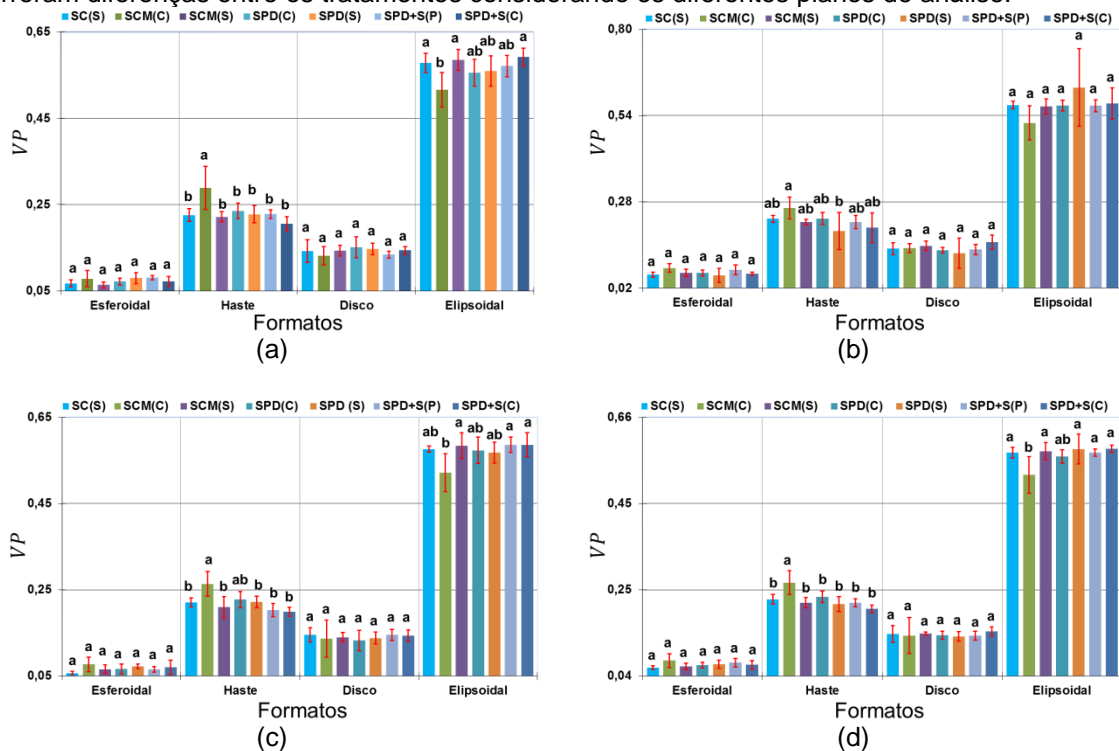
Na Figura 3.9 são apresentados os resultados do efeito dos tratamentos e dos planos de reconstrução na contribuição percentual do volume de poros (*VP*) em função do formato dos poros. O formato dos poros desempenha papel fundamental na capacidade do solo em armazenar e transmitir água, nutrientes e gases (Garbout; Munkholm; Hansen, 2013; Pires *et al.*, 2020). Os gráficos do volume de poros em função de seus formatos não apresentam os poros não classificados, que são aqueles de maior complexidade. Os poros de formato elipsoidal foram os que apresentaram maior contribuição para o volume de poros, considerando os poros classificados, em todos os planos tomográficos (coronal, sagital e axial), bem como para a média desses planos, seguido pelos poros com formato de haste, disco e esferoidal (Figura 3.9).

No plano coronal (Figura 3.9a), observou-se que os poros de formato esferoidal e disco não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos. No entanto, para o formato de poros em haste, notou-se que o sistema SCM(C) apresentou maior contribuição desses poros em relação aos demais tratamentos ($p < 0,05$), indicando maior contribuição de poros mais alongados para este manejo. Para o formato de poros elipsoidal, o sistema SCM(C) apresentou a menor contribuição para o volume de poros, diferindo significativamente ($p < 0,05$) dos sistemas SCM(S), SC(S) e SPD+S(C).

No plano sagital (Figura 3.9b), não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$) na contribuição do volume de poros em relação ao volume total para os formatos esferoidal, disco e elipsoidal. Por outro lado, para o formato de poros em haste, o sistema SCM(C) apresentou maior contribuição em comparação com o SPD(S). Muitos autores têm relatado que uma contribuição mais significativa de poros mais alongados no sistema poroso do solo é fundamental devido à

importância desses poros principalmente para a condução de água (Dhaliwal; Kumar, 2022; Pagliai; Vignozzi; Pellegrini, 2004; Zhao *et al.*, 2017; Zhao; HU; LI, 2020).

Figura 3.9 – Contribuição do volume de poros (*VP*) em relação ao volume total para os diferentes formatos de poros (esferoidal, haste, disco e elipsoidal) para os seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Não ocorreram diferenças entre os tratamentos considerando os diferentes planos de análise.



Fonte: O autor.

No plano axial (Figura 3.9c), os formatos de poros do tipo esferoidal e disco não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos. Entretanto, para os poros em formato de haste, o sistema SCM(C) apresentou maior contribuição para o volume de poros em comparação aos demais tratamentos ($p < 0,05$), exceto para o SPD(C). Isso sugere que o uso do azevém como cobertura favorece a formação de poros mais alongados. Para os poros de formato elipsoidal, o sistema SCM(C) apresentou a menor contribuição para o volume de poros, diferindo estatisticamente ($p < 0,05$) dos sistemas SCM(S), SPD+S(P) e SPD+S(C).

A análise para a média dos planos (Figura 3.9d) mostra que os volumes de poros de formato esferoidal e disco não apresentaram diferenças estatísticas

($p > 0,05$) entre os tratamentos. O SCM(C) apresentou maior contribuição para o volume de poros de formato de haste, diferindo dos demais sistemas ($p > 0,05$). Para os poros de formato elipsoidal, o sistema SCM(C) apresentou a menor contribuição para o volume de poros, diferindo estatisticamente de todos os tratamentos ($p < 0,05$), exceto em relação ao sistema SPD(C). É válido mencionar que os poros de formato elipsoidal são caracterizados por serem mais alongados e menos achatados do que os poros em formato de disco, sendo fundamentais nos processos que envolvem a infiltração de água no solo.

Os resultados apresentados indicam que os sistemas de manejo e usos da cultura do azevém afetam os poros de formato mais alongados. O SCM(C) favoreceu a formação de poros em formato de haste, porém com redução na contribuição dos poros de formato elipsoidal, o que foi confirmado pela correlação negativa forte ($r = -0,88$, $p < 0,05$) entre esses dois formatos, em termos do volume de poros, uso de cobertura e sistema SCM. Os poros de transmissão alongados como àqueles que apresentam formato de haste atuam principalmente nos processos de condução de água no solo (Pagliai; Vignozzi; Pellegrini, 2004), e, no caso do sistema SCM(C), o aparecimento desses poros corrobora a maior conectividade dos poros e menor tortuosidade encontradas para esse tratamento. Já a ausência de diferenças significativas para alguns dos formatos de poros analisados entre tratamentos, indica que esses poros são mais resilientes a mudanças (Dhaliwal; Kumar, 2022). Poros do tipo esferoidal e disco geralmente são mais difíceis de sofrerem alterações por serem poros que estão isolados e que apresentam achatamento.

A predominância dos poros de formato elipsoidal na estrutura do solo também foi observada por outros autores trabalhando com solos argilosos (Dhaliwal; Kumar, 2022; Galdos *et al.*, 2019). Como mencionado anteriormente, esses poros alongados propiciam uma maior capacidade de infiltração, mas também de armazenamento de água e nutrientes no solo, sendo particularmente importantes em condições de estiagem, nas quais o armazenamento de água disponível torna-se crucial para o desenvolvimento das plantas (Cavalcante; Cavallini; Lima, 2009; Santos; Carlesso, 1998). Os formatos de poros em haste, disco e esferoidal, apesar de desempenharem um papel importante na estrutura do solo, demonstraram volumes de poros menores em relação aos poros elipsoidais. Esses tipos de poros, principalmente os que apresentam formato de haste, possuem papel de relevância

na capacidade de armazenamento de água, drenagem, aeração do solo, resistência à erosão e decomposição de matéria orgânica (Dhaliwal; Kumar, 2022; Pires *et al.*, 2017).

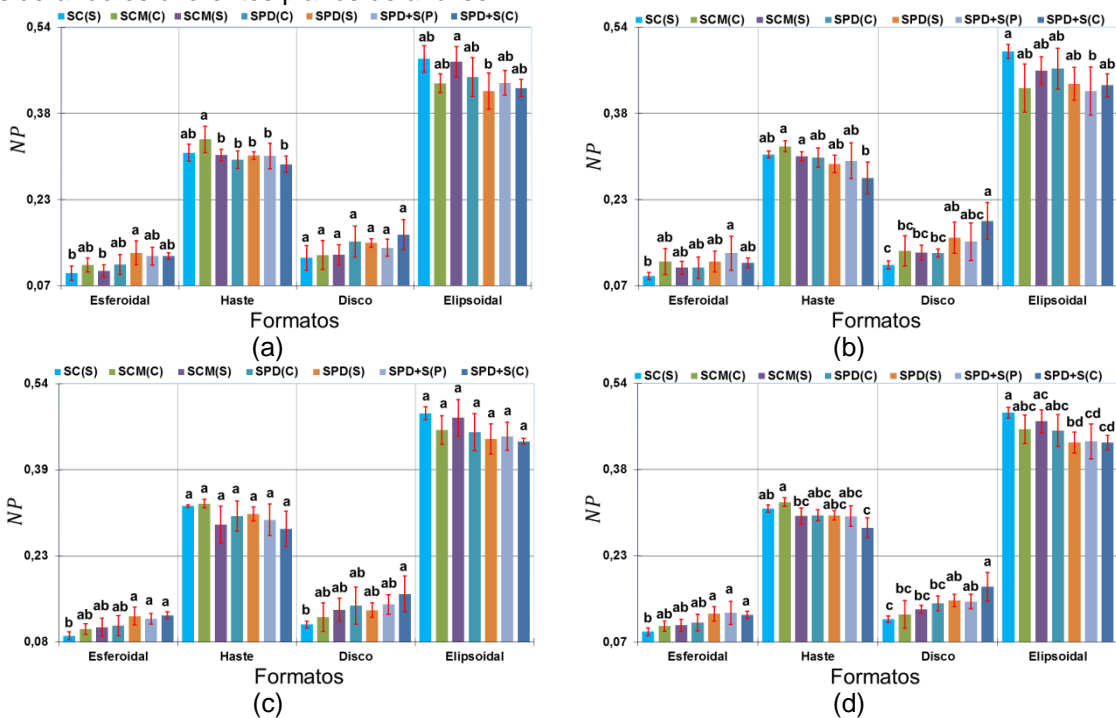
Os resultados para o formato dos poros ressaltam a importância de considerar não apenas o volume total de poros, mas também a distribuição dos poros em termos de formato quando se avalia a qualidade do solo. Por exemplo, os poros de formato esferoidal geralmente estão isolados no sistema poroso do solo e podem ser produzidos pela ação de implementos agrícolas, aprisionamento de ar durante o secamento do solo e ação da fauna do solo. Uma presença significativa desses poros pode ser uma indicação de um solo possuindo uma estrutura degradada (Castilho; Cooper; Silva, 2015; Pagliai; Vignozzi; Pellegrini, 2004). Já os poros alongados, principalmente àqueles com formatos de haste e elipsoidais, são considerados poros de transmissão que estão associados a solos com boa qualidade estrutural. No entanto, é importante que esses poros estejam distribuídos homogeneamente na matriz do solo. Neste sentido, os baixos valores de anisotropia encontrados, é uma indicação de que esses poros podem estar distribuídos mais isotropicamente nas amostras analisadas, contribuindo positivamente para a condução e redistribuição de água no solo.

Na Figura 3.10 é apresentada a contribuição do número de poros (NP) em função de seus formatos em relação ao número de poros total para os diferentes tratamentos e planos de reconstrução das imagens. Nestes gráficos não é apresentada a contribuição dos poros não classificados. O objetivo dessa análise é mostrar como os poros que são classificados em termos de formato podem ser influenciados por diferentes tratamentos.

No plano coronal (Figura 3.10a), considerando a contribuição do número de poros de formato esferoidal, o sistema SPD(S) apresentou o maior valor diferindo significativamente ($p < 0,05$) do SC(S) e do SCM(S). Os demais tratamentos não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$). Para os poros em formato de haste, o sistema SCM(C) apresentou maior contribuição do número de poros, diferindo dos outros tratamentos ($p < 0,05$), exceto para o sistema SC(S). Para os poros com formato de disco, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. Quanto ao formato de poros elipsoidal, apenas os sistemas SCM(S) e

SPD(S) apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$). Os resultados indicam que o sistema SCM(S) favorece a preservação de poros elipsoidais.

Figura 3.10 – Número de poros (*NP*) em relação aos diferentes formatos de poros (esferoidal, haste, disco e elipsoidal) para os seguintes tratamentos: sistema convencional (SC); sistema de cultivo mínimo (SCM); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio direto mais subsolagem (SPD+S); usos do azevém C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); a) Plano Coronal, b) Plano Sagital, c) Plano Axial e d) Média dos planos. Letras diferentes no alfabeto latino indicam diferenças entre os sistemas de manejo do solo em um mesmo plano ($p < 0,05$). Não ocorreram diferenças entre os tratamentos considerando os diferentes planos de análise.



Fonte: O autor.

No plano sagital (Figura 3.10b), o número de poros apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre alguns dos tratamentos para todos os formatos de poros. Para o formato esferoidal, o sistema SPD+S(P) apresentou a maior contribuição do número de poros com diferença significativa em relação ao SC(S). Os demais tratamentos não apresentaram diferenças entre si ($p > 0,05$). Para o formato de poros em haste, o sistema SCM(C) apresentou o maior número de poros diferindo significativamente do SPD+S(C) ($p > 0,05$). Além disso, o sistema SCM(S) também diferiu significativamente do SPD+S(C). No formato de poros do tipo disco, o SPD+S(C) apresentou o maior número de poros diferindo significativamente dos sistemas SC(S), SCM(C), SCM(S) e SPD(C). Além disso, o sistema SPD(S) também diferiu do SC(S) (menor contribuição para o número de poros). Para o formato elipsoidal, o sistema SC(S) apresentou o maior número de poros diferindo

significativamente de SPD+S(P). Os demais tratamentos não apresentaram diferenças entre si ($p > 0,05$).

No plano axial (Figura 3.10c), os poros com formatos de haste e elipsoidal não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos. Para o formato esferoidal, o sistema SC(S) apresentou o menor número de poros, diferindo significativamente ($p < 0,05$) dos sistemas SPD(S), SPD+S(P) e SPD+S(C). Os demais tratamentos não apresentaram diferenças significativas. Para os poros com formato de disco, o maior número de poros ocorreu no sistema SPD+S(C), que diferiu significativamente apenas de SC(S). Para os demais tratamentos não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$).

Na análise da média dos planos (Figura 3.10d), foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$) em todos os formatos de poros para alguns dos tratamentos. Referente ao formato esferoidal, o sistema SC(S) apresentou o menor número de poros diferindo dos sistemas SPD(S), SPD+S(P) e SPD+S(C). Para o formato de poros em haste, o sistema SCM(C) apresentou o maior número de poros diferindo dos sistemas SCM(S) e SPD+S(C). O sistema SC(S) apresentou diferença significativa em relação ao SPD+S(C). Quanto aos poros com formato de disco, o sistema SPD+S(C) apresentou o maior número de poros diferindo significativamente dos sistemas SC(S), SCM(C), SCM(S) e SPD(C). Além disso, os sistemas SPD(S) e SPD+S(P) também diferiram de SC(S). No formato elipsoidal, o sistema SC(S) apresentou o maior número de poros diferindo dos sistemas SPD(S), SPD+S(P) e SPD+S(C). Nota-se ainda que o sistema SCM(S) diferiu de SPD(S).

A análise dos resultados considerando os planos de reconstrução e a média dos planos (Figura 3.10) mostra que no geral, para os poros de formato esferoidal, identificou-se que nos planos em que ocorreram diferenças significativas ($p < 0,05$), os sistemas SPD(S), SPD+S(P) e SPD+S(C) apresentaram os maiores números de poros, diferenciando-se significativamente de SC(S). No que se refere aos poros com formato de disco, o sistema SPD+S(C) apresentou o maior número desses poros, diferindo significativamente do SC(S). Os resultados obtidos mostram que os sistemas SPD e SPD+S promoveram um aumento na quantidade de poros com formatos esferoidais e discos, comparados a SC. Esses tipos de poros, quando em grandes quantidades, indicam danos na estrutura do solo, mas também no caso dos esferoidais, estão associados com a ação da fauna do solo (Castilho; Cooper; Silva,

2015; Pagliai; Vignozzi; Pellegrini, 2004). A presença de raízes e restos vegetais pode induzir o aparecimento de poros mais arredondados na estrutura do solo. Alguns autores como Carter, Angers e Topp (1999), Pietola, Horn e Yli-Halla (2005) e Trein *et al.* (1991) indicam que o tráfego de implementos agrícolas e a pastagem sob uso inadequado pode ocasionar o aparecimento de poros mais isolados e achatados. Para os poros com formato de haste, o sistema SCM(C) apresentou o maior número de poros, seguindo a tendência geral observada para o volume de poros, cuja correlação foi positivamente moderada entre essas duas propriedades em uma visão global, ($r=0,73$, $p<0,05$), e diferenciando-se significativamente do sistema SPD+S(C). Isso sugere que o sistema SCM(C) favorece a formação de poros em haste, ou seja, poros de transmissão alongados que são importantes para a aeração do solo e desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Pagliai; Vignozzi; Pellegrini, 2004). Para os poros de formato elipsoidal, o sistema SC(S) apresentou o maior número de poros, com diferenças significativas em relação aos sistemas SPD(S), SPD+S(P) e SPD+S(C). Esse resultado sugere que o SC(S) tende a favorecer a formação de poros elipsoidais, o que pode estar relacionado com a forma como o solo se reestruturou após a quebra dos agregados no processo de revolvimento (Albuquerque; Sangoi; Ender, 2001; Carter; Angers; Topp, 1999). Este resultado para o sistema SC(S), contendo um grande número de poros de formato elipsoidal, é surpreendente comparado ao baixo número de poros e uso de silagem, observado no formato esferoidal, com uma correlação negativamente forte ($r=-0,94$, $p<0,05$), para uma análise dessa propriedade no geral. Mas também pode ser uma indicação da influência do uso do azevém como silagem na estrutura do solo. Para solos com maior quantidade de poros elipsoidais, pode-se esperar uma maior capacidade de infiltração e redistribuição de água, o que é fundamental para o desenvolvimento das plantas (Dhaliwal; Kumar, 2022; Galdos *et al.*, 2019).

Os resultados obtidos reforçam a importância de considerar não apenas os volumes de poros, mas também o número de poros e a sua distribuição em termos de formato ao se avaliar a qualidade da estrutura do solo. A presença predominante de poros elipsoidais e em formato de haste também foram observados por Dhaliwal e Kumar (2022) e Galdos *et al.* (2019). Portanto, esses resultados sugerem uma estrutura do solo que facilita a infiltração e redistribuição de água no solo, influenciando nos processos de aeração e desenvolvimento radicular.

4. CONCLUSÃO

Este estudo abordou a influência de diferentes sistemas de manejo do solo sob integração lavoura-pecuária (ILP) e uso da cultura do azevém nas propriedades micromorfológicas do solo. Adicionalmente, foram analisados como diferentes planos (coronal, sagital e axial) de reconstrução das imagens tomográficas em 3D podem influenciar nos resultados obtidos. Basicamente, o estudo foi fundamentado nas seguintes hipóteses: (i) os sistemas de manejo sob ILP afetam as propriedades micromorfológicas do solo de maneiras distintas; (ii) a utilização de cobertura vegetal melhora as propriedades morfológicas do sistema poroso do solo; (iii) os diferentes planos de reconstrução das imagens não afetam os resultados das propriedades micromorfológicas analisadas.

As propriedades morfológicas e geométricas dos poros do solo não apresentaram diferenças significativas entre os diferentes planos de reconstrução. No entanto, conforme o plano selecionado verificou-se a existência de variações nas tendências observadas entre os diferentes tratamentos. Essas discrepâncias podem ser atribuídas à seleção variada de subvolumes em cada plano, afetando a representatividade dos dados obtidos. Neste sentido, sugere-se que sempre sejam selecionados os planos de reconstrução que possibilitem obter o maior volume (recorte da imagem) de amostra. A escolha de um volume de formato regular para análise das imagens se deve as limitações do programa utilizado. Existem programas pagos que possibilita a seleção de todo o volume da amostra na etapa de processamento das imagens por meio do emprego de máscaras. Quando são efetuados cortes nas imagens para o posterior processamento sempre ocorre perda de informação.

Com relação aos tratamentos, o sistema SCM(C) se mostrou uma prática eficiente do ponto de vista físico do solo, demonstrando melhorias significativas em diversas propriedades micromorfológicas do solo. Esse tratamento caracterizou-se pelos maiores valores de porosidade imageada, conectividade dos poros, volume e número de poros em formato de haste, sugerindo uma estrutura do solo mais favorável à dinâmica de água e gases. O sistema SPD(S) apresentou os maiores valores de tortuosidade e os menores valores de conectividade dos poros, indicando um sistema com potenciais restrições ao transporte e dinâmica da água e gases no

solo, quando essa prática é adotada. Porém, é importante frisar que os resultados apresentados representam comparações apenas entre os manejos. Não foram realizadas análises em uma área de referência (mata), a partir da qual seria possível afirmar se existem danos na estrutura do solo devido aos diferentes tratamentos. De qualquer forma, maiores valores de tortuosidade e menores valores de conectividade dos poros e macroporosidade são indicativos de que o solo irá oferecer maiores dificuldades para a infiltração de água.

O sistema SC(S) apresentou a maior dimensão fractal, um maior número de poros de formato elipsoidal e menor presença de poros esferoidais e de formato de discos em relação aos demais tratamentos. Esse resultado indica uma maior complexidade do sistema poroso do solo sob este manejo e uso da cultura do azevém. Essa complexidade da estrutura do solo pode influenciar positivamente na redistribuição de gases e água no solo, destacando que o revolvimento do solo, mesmo em condições de tráfego de ensiladeira, possibilita manter uma funcionalidade adequada dos poros. Desta forma, a silagem associada ao sistema de preparo convencional auxilia em uma estrutura do solo funcional. No entanto, é importante salientar a necessidade de mais estudos para esse tipo de manejo, principalmente analisando outras propriedades micromorfológicas do solo.

Os resultados do grau de anisotropia e número de poros em formatos esferoidais e discos indicam que os sistemas SPD e SPD+S exibiram maiores valores em comparação aos sistemas SC e o SCM, independentemente do uso da cultura do azevém. No entanto, os valores do grau de anisotropia mostraram-se baixos, indicando a existência de estruturas porosas mais isotrópicas. Este resultado mostra que não existem direções preferenciais no sistema poroso do solo, de modo que a água pode infiltrar e se redistribuir sem a existência de caminhos preferenciais.

Quando o número de poros em função do formato é analisado, observou-se que os sistemas SPD e SPD+S apresentaram as maiores contribuições de poros esferoidais e em formato de disco em relação aos demais tratamentos. Geralmente, a presença desses poros pode estar associada a existência de danos na estrutura do solo. Porém, quando a contribuição desses poros é comparada aos poros mais alongados como haste e elipsoidal, verifica-se uma baixa contribuição em relação ao número total de poros. Com relação ao volume de poros, não foram observadas

diferenças significativas nos formatos esferoidais e discos entre todos os tratamentos. Este resultado evidencia que o sistema poroso do solo se mostra estável e mais resiliente a mudanças com relação a esse formato de poros. É válido ainda ressaltar que o maior volume ocupado pelos poros não foi classificado em termos de formato, de modo que os resultados apresentados para os poros em termos de formato cobrem apenas uma porcentagem menor dos poros quantificados. Os poros não classificados possuem formato extremamente irregular, de modo que se torna impossível classificá-los utilizando modelos geométricos.

Em síntese, os resultados obtidos neste estudo corroboraram em parte as hipóteses propostas, de modo que o SCM se apresentou como o sistema poroso mais adequado para o movimento e redistribuição de solutos, quando associado ao uso da cultura do azevém como cobertura vegetal. Por outro lado, o SPD parece apresentar danos no sistema poroso do solo, quando combinado ao uso da cultura do azevém como silagem. Além disso, este estudo fornece uma compreensão aprofundada das implicações micromorfológicas associadas a diferentes práticas de manejo do solo, enfatizando a importância da escolha estratégica dessas práticas para promover a sustentabilidade e a saúde do solo em sistemas de ILP.

Considerando os resultados deste estudo, várias direções para pesquisas futuras se destacam. Primeiramente, recomenda-se a exploração de uma abordagem mais detalhada, envolvendo a digitalização de amostras menores para obter uma resolução ainda mais refinada. Outro direcionamento, pode ser pela implementação de tomografia 4D, que oferece uma perspectiva promissora para estudar processos dinâmicos no solo ao longo do tempo. Outro aspecto relevante para estudos futuros é a análise da conectividade para diferentes faixas de tamanhos de poros. Compreender como a conectividade varia em função do tamanho dos poros pode oferecer insights sobre a eficiência dos processos de transporte de solutos no solo. Investigar essa relação em contextos específicos de manejos e usos da terra pode ser crucial para otimizar estratégias agrícolas e práticas conservacionistas.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 519-531, 2004.
- ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 717-723, 2001.
- ALVARENGA, Ramon Costa *et al.* Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe agropecuário**, v. 22, n. 208, p. 25-36, 2001.
- AMADO, Telmo Jorge Carneiro *et al.* Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 25, p. 189-197, 2001.
- ANDRADE, Antônio RS *et al.* Estimativa da água disponível do solo por meio da teoria fractal. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 1, n. 1, 2009.
- ASSAD, Eduardo Delgado. Sistemas agrícolas adaptados às mudanças climáticas. **Ciência e Cultura**, v. 73, n. 1, p. 35-40, 2021.
- ASSIS, Renato *et al.* AVALIAÇÃO DA COBERTURA DO SOLO E DA DECOMPOSIÇÃO DE PALHADAS DE MILHETO E HÍBRIDOS DE *Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA**, v. 7, n. 13, 2011.
- AUGUSTO, Marcus Vinicius Sauer *et al.* Preservação de recursos naturais através de práticas de manejo e seus impactos na qualidade física do solo. **UNICIÊNCIAS**, v. 26, n. 2, p. 108-119, 2022.
- AULER, André Carlos *et al.* Soil physico-hydrical properties resulting from the management in Integrated Production Systems. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, p. 976-989, 2014.

BAVOSO, Marina Araújo *et al.* Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 227-234, 2010.

BECKERS, Eléonore *et al.* X-ray microtomography: a porosity-based thresholding method to improve soil pore network characterization?. **Geoderma**, v. 219, p. 145-154, 2014.

BERNABÉ, Yves; LI, Min; MAINEULT, A. Permeability and pore connectivity: a new model based on network simulations. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 115, n. B10, 2010.

BERTOL, Ildegardis *et al.* Relações da rugosidade superficial do solo com o volume de chuva e com a estabilidade de agregados em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 543-553, 2006.

BEUTLER, A. N. *et al.* Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 167-177, 2001.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. **Bookman Editora**, 2009.

BRANDING, A. D.; AGROPRECISION. **Manejo do azevém durante o inverno**. Disponível em: <<https://www.agroprecision.com.br/manejo-do-azevem-durante-o-inverno/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

BRAUNACK, M. V.; DEXTER, A. R. Soil aggregation in the seedbed: a review. I. Properties of aggregates and beds of aggregates. **Soil and Tillage Research**, v. 14, n. 3, p. 259-279, 1989.

BREWER, R.; SLEEMAN, J. R. Glaebules: their definition, classification and interpretation. **Journal of Soil Science**, v. 15, n. 1, p. 66-78, 1964.

BULLOCK, Peter *et al.* Handbook for soil thin section description. **Waine Research**, 1985.

CALONEGO, Juliano Carlos; ROSOLEM, Ciro Antonio. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1399-1407, 2008.

CAMARA, Rodrigo Kurylo; KLEIN, Vilson Antonio. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 789-796, 2005.

CAMARGO, OA de; ALLEONI, Luís Reynaldo Ferracciu. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. 1997.

CAMPO, J. D. DE. **Sistema Plantio Direto**. Disponível em: <<http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=20779&secao=Colunas%20e%20Artigos>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

CAPA, NOSSA. Wilhelm Röntgen e a criação dos raios X. **J Bras Patol Med Lab**, 2009, 45.1.

CARTER, M. R.; ANGERS, D. A.; TOPP, G. C. Characterizing equilibrium physical condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid climate. **Soil science**, v. 164, n. 2, p. 101-110, 1999.

CARVALHO, Marco Antonio Camillo de *et al.* Soja em sucessão a adubos verdes no sistema de plantio direto e convencional em solo de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 1141-1148, 2004.

CASTILHO, Selene Cristina de Pierri; COOPER, Miguel; SILVA, Laura Fernandes Simões da. Micromorphometric analysis of porosity changes in the surface crusts of three soils in the Piracicaba region, São Paulo State, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 37, p. 385-395, 2015.

CASTRO FILHO, C. de *et al.* Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 65, n. 1, p. 45-51, 2002.

CAVALCANTE, Ana Clara Rodrigues; CAVALLINI, Maria Cec2lia; LIMA, NRC de B. **Estresse por déficit hídrico em plantas forrageiras**. 2009.

CAVIGLIONE, João Henrique *et al.* Cartas climáticas do Estado do Paraná. **Londrina: Iapar**, v. 1, 2000.

CHIVENGE, Pauline *et al.* The potential role of neglected and underutilised crop species as future crops under water scarce conditions in Sub-Saharan Africa. **International journal of environmental research and public health**, v. 12, n. 6, p. 5685-5711, 2015.

C-LABMU. **Estrutura – Complexo de Laboratórios Multiusuários**. Disponível em: <<https://www2.uepg.br/propesp-clabmu/estrutura/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

CONTE, Osmar *et al.* Densidade, agregação e frações de carbono de um Argissolo sob pastagem natural submetida a níveis de ofertas de forragem por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 579-587, 2011.

CORBEELS, Marc *et al.* Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 21450, 2016.

CORREA, José Carlos; REICHARDT, Klaus. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um Latossolo Amarelo da Amazônia Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 1, p. 107-114, 1995.

CORREIA, Silmara da Luz *et al.* Estratégias de manejo da palha de azevém para cultivo do arroz irrigado em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 512-520, 2013.

COSTANZA-ROBINSON, Molly S.; ESTABROOK, Benjamin D.; FOUHEY, David F. Representative elementary volume estimation for porosity, moisture saturation, and air-water interfacial areas in unsaturated porous media: Data quality implications. **Water Resources Research**, v. 47, n. 7, 2011.

CULTIVAR, R. **Quando utilizar subsolador e escarificador**. Disponível em: <<https://revistacultivar.com.br/artigos/quando-utilizar-subsolador-e-escarificador>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

CUNHA, André Rafael *et al.* A phenomenological connectivity measure for the pore space of rocks. **arXiv preprint arXiv:2012.00835**, 2020.

DAI, Hui *et al.* Role of energy mix in determining climate change vulnerability in G7 countries. **Sustainability**, v. 14, n. 4, p. 2161, 2022.

DATHE, A. *et al.* The surface fractal dimension of the soil–pore interface as measured by image analysis. **Geoderma**, v. 103, n. 1-2, p. 203-229, 2001.

DE FARIA BORGES, Lucas Parreira *et al.* Geometric features and fractal nature of soil analyzed by X-ray microtomography image processing. **International Journal of Geomechanics**, v. 19, n. 8, p. 04019088, 2019.

DE OLIVEIRA, Mauro Wagner *et al.* **Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30-43, 2007.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004. HILLEL, Daniel. Introduction to environmental soil physics. **Elsevier**, 2003.

DEXTER, Anthony Roger. Advances in characterization of soil structure. **Soil and tillage research**, v. 11, n. 3-4, p. 199-238, 1988.

DHALIWAL, Jashanjeet K.; KUMAR, Sandeep. 3D-visualization and quantification of soil porous structure using X-ray micro-tomography scanning under native pasture and crop-livestock systems. **Soil and Tillage Research**, v. 218, p. 105305, 2022.

DIAS-FILHO, M. B.; FERREIRA, J. N. O pastejo e a biodiversidade da pastagem. 2009.

DOUBE, Michael *et al.* BoneJ: free and extensible bone image analysis in ImageJ. **Bone**, v. 47, n. 6, p. 1076-1079, 2010.

ELLIOT, T. R.; REYNOLDS, W. D.; HECK, R. J. Use of existing pore models and X-ray computed tomography to predict saturated soil hydraulic conductivity. **Geoderma**, v. 156, n. 3-4, p. 133-142, 2010.

ELTZ, Flavio Luiz Foletto; NORTON, L. Darrell. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage, and canopy cover. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 6, p. 1746-1755, 1997.

EPAGRI. **Epagri e Cravil lançam cultivar de pastagem no dia 15**. Disponível em: <<https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2020/10/13/epagri-e-cravil-lancam-cultivar-de-pastagem-no-dia-15/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

FASOLO, Pedro J. *et al.* Caracterização dos solos do Município de Castro, PR. 2002.

FERNANDES, Marcos da Silva; FINCO, Marcus Vinicius Alves. Sistemas de integração lavoura-pecuária e políticas de mudanças climáticas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, p. 182-190, 2014.

FERREIRA, Talita R. *et al.* X-ray microtomography analysis of lime application effects on soil porous system. **Geoderma**, v. 324, p. 119-130, 2018.

FETTER, Charles Willard; BOVING, Thomas B.; KREAMER, David K. **Contaminant hydrogeology**. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, 1999.

FRANZLUEBBERS, Alan J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. **Soil and Tillage research**, v. 66, n. 2, p. 197-205, 2002.

FREITAS, Ludmila *et al.* Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Unimar Ciências**, v. 26, n. 1-2, 2017.

FROZZI, José Cezar *et al.* Atributos do solo e dimensão fractal em ambientes naturais e transformados na região amazônica. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 2, p. 231-243, 2018.

GABRIEL FILHO, Antonio *et al.* Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. **Ciência Rural**, v. 30, p. 953-957, 2000.

GALDOS, M. V. *et al.* Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. **Geoderma**, v. 337, p. 1126-1135, 2019.

GARBOUT, A.; MUNKHOLM, L. J.; HANSEN, S. B. Tillage effects on topsoil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation. **Soil and Tillage Research**, v. 128, p. 104-109, 2013.

GASPARETO, José V. *et al.* Representative Elementary Volume as a Function of Land Uses and Soil Processes Based on 3D Pore System Analysis. **Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 736, 2023.

GHANBARIAN, Behzad; LIN, Qingyang; PIRES, Luiz F. Scale dependence of tortuosity in soils under contrasting cultivation conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 233, p. 105788, 2023.

GIMENEZ, D. *et al.* Fractal models for predicting soil hydraulic properties: a review. **Engineering Geology**, v. 48, n. 3-4, p. 161-183, 1997.

GOOGLE earth. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@0,-2.95019995,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r/data=OgMKATA>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

GOMMES, Cedric J. *et al.* Practical methods for measuring the tortuosity of porous materials from binary or gray-tone tomographic reconstructions. **AIChE Journal**, v. 55, n. 8, p. 2000-2012, 2009.

GONÇALVES, António Bento; VIEIRA, António. Grandes incêndios florestais, erosão, degradação e medidas de recuperação dos solos. 2013.

HAMMER, Øyvind; HARPER, David AT. Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia electronica**, v. 4, n. 1, p. 1, 2001.

HAQUE, M. E. *et al.* Minimum tillage unpuddled transplanting: An alternative crop establishment strategy for rice in conservation agriculture cropping systems. **Field crops research**, v. 185, p. 31-39, 2016.

HELLIWELL, Jonathan R. *et al.* Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: a review. **European Journal of Soil Science**, v. 64, n. 3, p. 279-297, 2013.

HERNÁNDEZ ZUBELDIA, Elizabeth *et al.* Cellular automata and X-ray microcomputed tomography images for generating artificial porous media. **International Journal of Geomechanics**, v. 16, n. 2, p. 04015057, 2016.

HILLEL, Daniel. Introduction to environmental soil physics. **Elsevier**, 2003.

HIRA, G. S.; SINGH, N. T. Observed and predicted rates of phosphorus diffusion in soils of varying bulk density and water content. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, n. 3, p. 537-540, 1977.

HOLDEN, N. M. A two-dimensional quantification of soil ped shape. **Journal of Soil Science**, v. 44, n. 2, p. 209-219, 1993.

HOLZER, Lorenz *et al.* Tortuosity and microstructure effects in porous media: classical theories, empirical data and modern methods. 2023.

HOTT, Marcos Cicarini *et al.* Análise fractal de textura usando um operador de Hurst em uma imagem TM/Landsat-5. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 12, p. 4.089-4.093, 2005.

HUNTLY, Nancy. Herbivores and the dynamics of communities and ecosystems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 22, n. 1, p. 477-503, 1991.

Inspect-X / CT Pro X-ray / CT Basic Training. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

KETCHAM, Richard A.; CARLSON, William D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. **Computers & Geosciences**, v. 27, n. 4, p. 381-400, 2001.

KLEIN, Vilson Antonio *et al.* Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v. 38, p. 365-371, 2008.

KOCHHANN, Rainoldo Alberto *et al.* Implantação e manejo do sistema plantio direto. **Embrapa Trigo**, 2000.

KUMAR, Lalit *et al.* Climate change and future of agri-food production. In: **Future Foods**. Academic Press, 2022. p. 49-79.

LAL, Rattan. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, 2015.

LAL, Rattan. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.

LEKHOV, Vladimir A.; POZDNIAKOV, Sergey P.; NEŠETŘIL, Kamil. Lab-scale and pore-scale study of low-permeability soil diffusional tortuosity. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 242, p. 103858, 2021.

LEMAIRE, Gilles *et al.* Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 4-8, 2014.

LI, Mingfeng *et al.* Effects of infiltration amounts on preferential flow characteristics and solute transport in the protection forest soil of southwestern China. **Water**, v. 13, n. 9, p. 1301, 2021.

LI, Yuan *et al.* Residue retention promotes soil carbon accumulation in minimum tillage systems: Implications for conservation agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 740, p. 140147, 2020.

LUO, Lifang; LIN, Henry; HALLECK, Phil. Quantifying soil structure and preferential flow in intact soil using X-ray computed tomography. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 4, p. 1058-1069, 2008.

MACEDO, Manuel Claudio Motta. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 133-146, 2009.

MANHAES, Carmen Maria Coimbra; FRANCELINO, Francisco Mauricio Alves. BIOTA DO SOLO E SUAS RELAÇÕES ECOLÓGICAS COM O SISTEMA RADICULAR. **Nucleus (16786602)**, v. 10, n. 2, 2013.

MARCHÃO, Robélio Leandro *et al.* Impacto do pisoteio animal na compactação do solo sob integração lavoura-pecuária no Oeste Baiano. 2009.

MARTINS, Paulo Ricardo Garcia *et al.* Produção e qualidade do leite na bacia leiteira de Pelotas-RS em diferentes meses do ano. **Ciência Rural**, v. 36, p. 209-214, 2006.

MARUFFI, L. *et al.* Soil erosion and sediment transport under climate change for Mera River, in Italian Alps of Valchiavenna. **Science of the Total Environment**, v. 806, p. 150651, 2022.

MCBRATNEY, Alex; FIELD, Damien J.; KOCH, Andrea. The dimensions of soil security. **Geoderma**, v. 213, p. 203-213, 2014.

MEDEIROS, Roberto Dantas de; SOARES, Antônio Alves; GUIMARÃES, Renato Mendes. Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, p. 940-947, 2005.

MELLO, Gláucia de; BUENO, Célia RP; PEREIRA, Gener T. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 294-305, 2006.

MORAES, P. V. D. *et al.* Manejo de plantas de cobertura no controle de plantas daninhas na cultura do milho. **Planta Daninha**, v. 27, p. 289-296, 2009.

NEVES, Cláudia Milene Nascente *et al.* Indicadores biológicos da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no noroeste do estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 105-112, 2009.

NIERO, Luiz Augusto Cardoso *et al.* Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo Vermelho distroférico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1271-1282, 2010.

NUNES, Cley Donizeti Martins; MITTELMANN, Andréa. Doenças do azevém. 2009.

ODGAARD, A.; GUNDERSEN, H. J. G. Quantification of connectivity in cancellous bone, with special emphasis on 3-D reconstructions. **Bone**, v. 14, n. 2, p. 173-182, 1993.

OTSU, Nobuyuki. A threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics**, v. 9, n. 1, p. 62-66, 1979.

OTSUBO, Auro Akio *et al.* Sistemas de preparo do solo, plantas de cobertura e produtividade da cultura da mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 327-332, 2008.

PAGENKEMPER, Sebastian K. *et al.* Investigation of time dependent development of soil structure and formation of macropore networks as affected by various precrop species. **International soil and water conservation research**, v. 2, n. 2, p. 51-66, 2014.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and tillage research**, v. 79, n. 2, p. 131-143, 2004.

PAPADOPOULOS, A. *et al.* Investigating the effects of organic and conventional management on soil aggregate stability using X-ray computed tomography. **European Journal of Soil Science**, v. 60, n. 3, p. 360-368, 2009.

PASSONI, Sabrina *et al.* Three dimensional characterization of soil macroporosity by X-ray microtomography. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 448-457, 2015.

PEREIRA, Elzânia Sales *et al.* Efeito de diferentes volumosos conservados na forma de silagem sobre a ingestão de alimentos e produção de leite de vacas em lactação. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 24, n. 1, p. 103-112, 2003.

PETH, S. *et al.* Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 4, p. 897-907, 2008.

PIETOLA, Liisa; HORN, Rainer; YLI-HALLA, Markku. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. **Soil and tillage research**, v. 82, n. 1, p. 99-108, 2005.

PINTO FILHO, Jorge Luis; DANTAS, Valter Bezerra; PEREIRA, Joaquim Odilon. Suscetibilidade de compactação do solo em diferentes teores de umidade e matéria orgânica. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 4, n. 2, p. 14, 2009.

PIRES, Luiz F. *et al.* Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 165, p. 66-79, 2017.

PIRES, Luiz F. *et al.* X-ray microtomography analysis of soil pore structure dynamics under wetting and drying cycles. **Geoderma**, v. 362, p. 114103, 2020.

POLICH, Nicolás Guillermo *et al.* Effect of cover crops on hysteresis and anisotropy of soil hydraulic properties. **Geoderma Regional**, v. 31, p. e00586, 2022.

PORTAL EMBRAPA. **Sistema convencional** - Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/pimenta/producao/sistema-de-cultivo/sistema-convencional>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

POZDNYAKOV, A. I. *et al.* Anisotropy of the properties of some anthropogenically transformed soils of podzolic type. **Eurasian Soil Science**, v. 42, p. 1218-1228, 2009.

PROFFITT, A. P. B. *et al.* The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a red-brown earth. **Australian journal of agricultural research**, v. 44, n. 2, p. 317-331, 1993.

PULIDO-MONCADA, Mansonia *et al.* Anisotropy of subsoil pore characteristics and hydraulic conductivity as affected by compaction and cover crop treatments. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 1, p. 28-39, 2021.

RAMOS, Júlio César *et al.* Influência das condições de superfície e do cultivo do solo na erosão hídrica em um Cambissolo Húmico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1587-1600, 2014.

REDO, Daniel; AIDE, T. Mitchell; CLARK, Matthew L. Vegetation change in Brazil's dryland ecoregions and the relationship to crop production and environmental factors: Cerrado, Caatinga, and Mato Grosso, 2001–2009. **Journal of Land Use Science**, v. 8, n. 2, p. 123-153, 2013.

REICHERT, José Miguel *et al.* Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 310-319, 2009.

RIZK, Marguerite A.; MIKHAIL, Wafai ZA. Impact of no-tillage agriculture on soil fauna diversity. **Zoology in the Middle East**, v. 18, n. 1, p. 113-120, 1999.

RODRIGUES, Marcos *et al.* Cultivo mínimo é o sistema recomendado para introdução da *Brachiaria brizantha* em Latossolo na Amazônia. **Revista de Ciências Agrárias-Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 61, 2018.

ROQUE, Waldir L.; COSTA, Richelieu RA. A plugin for computing the pore/grain network tortuosity of a porous medium from 2D/3D MicroCT image. **Applied Computing and Geosciences**, v. 5, p. 100019, 2020.

ROQUE, Waldir Leite; ARCARO, Katia; LANFREDI, Ricardo Bigolin. Tortuosidade e conectividade da rede trabecular do rádio distal a partir de imagens microtomográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, v. 28, p. 116-123, 2012.

ROSADO, Thiago *et al.* Efeito da cobertura vegetal nos atributos físicos de um Latossolo Amarelo cultivado com banana. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, 2012.

SAINJU, U. M.; SINGH, B. P.; WHITEHEAD, W. F. Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in Georgia, USA. **Soil and Tillage Research**, v. 63, n. 3-4, p. 167-179, 2002.

SALTON, Júlio César; HERNANI, Luis Carlos; FONTES, Clarice Zanoni. **Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1998., 1998.

SANTOS, Glenio Guimarães *et al.* Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1339-1348, 2011.

SANTOS, Mauro G. *et al.* Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes?. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 83-99, 2014.

SANTOS, Reginaldo Ferreira; CARLESSO, Reimar. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 287-294, 1998.

SCHIMIGUEL, Rafael *et al.* Estabilidade de agregados do solo devido a sistemas de cultivo. **Synergismus scyentifica UTFPR**, v. 9, n. 1, 2014.

SCHLÜTER, Steffen *et al.* X-ray microtomography analysis of soil structure deformation caused by centrifugation. **Solid Earth**, v. 7, n. 1, p. 129-140, 2016.

SCHNEIDER, Caroline A.; RASBAND, Wayne S.; ELICEIRI, Kevin W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature methods**, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012.

SEKI, André Satoski; BENEZ, Sérgio Hugo; DA SILVA, Paulo Roberto Arbex. Desempenho operacional de semeadora e produtividade do milho em plantio direto e cultivo mínimo. **Energia na Agricultura**, v. 27, n. 1, p. 01-18, 2012.

SILVA FREITAS, Gabriela; PRUDENCIO, Marcelo Falaci; SOARES FILHO, Cecílio Viegá. O uso de tecnologias para reduzir impactos ambientais na intensificação da pecuária de corte. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, p. e17611830416-e17611830416, 2022.

SILVA, Pedro Luan Ferreira da *et al.* Sistemas integrados de produção agropecuária: efeitos sobre a qualidade física de um planossolo no semiárido brasileiro. **Ciencia del suelo**, v. 39, n. 2, p. 106-121, 2021.

SINGH, Navdeep *et al.* Grassland conversion to croplands impacted soil pore parameters measured via X-ray computed tomography. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 1, p. 73-84, 2021.

Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>>.

SÍTIO DO CEDRO. **Silagem pré-secada de cultura de inverno.** Disponível em: <<https://www.sitiodocedro.com.br/silagem-pre-secada-de-cultura-de-inverno/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

SLEUTEL, Steven *et al.* Comparison of different nano-and micro-focus X-ray computed tomography set-ups for the visualization of the soil microstructure and soil organic matter. **Computers & Geosciences**, v. 34, n. 8, p. 931-938, 2008.

SPERA, Silvio Tulio *et al.* Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 533-542, 2004.

SPERA, Silvio Tulio *et al.* Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 129-136, 2009.

STONE, Luis Fernando; SILVEIRA, Pedro Marques da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 83-91, 1999.

TABOADA, Miguel A.; RUBIO, Gerardo; CHANETON, Enrique J. Grazing impacts on soil physical, chemical, and ecological properties in forage production systems. **Soil management: building a stable base for agriculture**, p. 301-320, 2011.

TANNER, C. B.; MAMARIL, C. P. Pasture Soil Compaction by Animal Traffic
1. **Agronomy Journal**, v. 51, n. 6, p. 329-331, 1959.

TISDALL, Judith M.; OADES, Jennifer Malcolm. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of soil science**, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TÔSTO, Sérgio Gomes *et al.* Valoração da erosão do solo e a sustentabilidade ambiental no espaço rural do município de Araras, SP. **Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa**, p. 309-321, 2007.

TREIN, Carlos Roberto; COGO, Neroli Pedro; LEVIEN, Renato. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia+ trevo/milho, após pastejo intensivo. **Bras. Ci. Solo**, v. 15, n. 19, p. 105-111, 1991.

TSENG, Chien Ling; ALVES, Marlene Cristina; CRESTANA, Silvio. Quantifying physical and structural soil properties using X-ray microtomography. **Geoderma**, v. 318, p. 78-87, 2018.

UDAWATTA, Ranjith P. *et al.* Agroforestry and grass buffer effects on pore characteristics measured by high-resolution x-ray computed tomography. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 2, p. 295-304, 2008.

USDA. **USDA**. Disponível em: <<https://www.usda.gov/>>.

VITORIO, Jeferson Feitoza *et al.* GEOMETRIA DOS FRACTAIS E SUA INSERÇÃO NOS MEIOS FÍSICOS NATURAIS. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE**, v. 6, n. 2, p. 88-88, 2020.

WU, Jiaxin *et al.* An effective method to compute the box-counting dimension based on the mathematical definition and intervals. **Results in Engineering**, v. 6, p. 100106, 2020.

X-ray / CT Basic Training Introduction and X-ray Basics. [s.l.] Nikon Metrology, 2010.

XU, Guoce; LI, Zhanbin; LI, Peng. Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China. **Catena**, v. 101, p. 17-23, 2013.

YANG, Xueming; DRURY, Craig F.; WANDER, Michelle M. A wide view of no-tillage practices and soil organic carbon sequestration. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science**, v. 63, n. 6, p. 523-530, 2013.

ZHANG, Zhen *et al.* Effects of land use patterns on soil aggregate stability in Sichuan Basin, China. **Particuology**, v. 6, n. 3, p. 157-166, 2008.

ZHAO, Dong *et al.* Effect of vegetation type on microstructure of soil aggregates on the Loess Plateau, China. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 242, p. 1-8, 2017.

ZHAO, Yunduo; HU, Xia; LI, Xiaoyan. Analysis of the intra-aggregate pore structures in three soil types using X-ray computed tomography. **Catena**, v. 193, p. 104622, 2020.