UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS/FÍSICA

JOCENEI ANTONIO TEODORO DE OLIVEIRA

IMAGENS MICROTOMOGRÁFICAS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NA ANÁLISE DO SISTEMA POROSO DO SOLO

PONTA GROSSA
2021

JOCENEI ANTONIO TEODORO DE OLIVEIRA

IMAGENS MICROTOMOGRÁFICAS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NA ANÁLISE DO SISTEMA POROSO DO SOLO

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor na Universidade Estadual de Ponta Grossa, no Programa de Pós-Graduação em Ciências/Física.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

PONTA GROSSA

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Jocenei Antonio Teodoro de
O48 Imagens microtomográficas e simulação computacional na análise do sistema poroso do solo / Jocenei Antonio Teodoro de Oliveira. Ponta Grossa, 2021
.
115 f.

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires.

1. Sistema poroso do solo. 2. Simulação computacional em imagens µTC. 3. Propriedades físicas do solo. 4. Geometria fractal e multifractal 3D. 5. Retenção de água no solo. I. Pires, Luiz Fernando. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Física. III.T.

CDD: 530.1

Ficha catalográfica elaborada por Maria Luzia Fernandes Bertholino dos Santos- CRB9/986

TERMO DE APROVAÇÃO

Jocenei Antonio Teodoro de Oliveira

"Imagens microtomográficas e simulação computacional na análise do sistema poroso do solo"

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

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Fernando Pires – UEPG – Presidente

_____

Dr. Fabiano Gilberto Wolf - UFSC – Titular

_____

Profª. Drª. Vladia Correchel - UFG – Titular

_____

Prof. Dr. Giuliano Gadioli La Guardia - UEPG – Titular

_____

Profª. Drª. Maria Ligia Cassol Pinto - UEPG – Titular

Ponta Grossa, 5 de fevereiro de 2021.

AGRADECIMENTOS

À Deus que é Pai, Filho e Espírito Santo por ter me sustentado e amparado em todos os momentos difíceis e crucias da minha existência. Ao Senhor Jesus Cristo por derramar seu preciosíssimo e sagrado sangue em prol da remissão dos pecados e salvação da humanidade.

Aos meus pais, Joaquim T. de Oliveira e Maria Urçulina A. de Oliveira pelo dom da vida e criação. À minha irmã Alessandra Apª. T. de Oliveira, ao meu cunhado e melhor amigo Adenilson L. Biesek, e meu sobrinho Lucas O. L. Biesek e a minha tia Maria Aurora Antunes por serem meu porto seguro de compreensão, apoio de todas as horas, carinhos e amor incondicional para comigo.

A todos os familiares (tios, tias, primos e primas) que contribuíram de alguma forma com momentos de doces, animadas conversas e risadas ao longo do percurso.

Ao professor Dr. Luiz Fernando Pires (orientador), que se dispôs corajosamente a me orientar nesse processo de doutoramento. Agradeço-o profundamente pela oportunidade de trabalho, pela sua experiência e compartilhamento de conhecimento para comigo, e por me moldar a possíveis voos solos, mais altos e audaciosos. Gratidão!

Ao professor Dr. Fabio Augusto Meira Cássaro (coorientador), primeiramente pela sua amizade iniciada desde a orientação de processo de mestrado, segundamente por nunca e sequer negar ajuda e auxílio em explicações, discussões, interpretações e aprimoramentos de análises de resultados. Finalmente agradeço a você, pelas longas conversas, cafés e risadas aos longos desses anos.

Ao pesquisador Dr. Adolfo Nicolas Posadas Durand, inicialmente pela disponibilização do software para obtenções dos resultados multifractais, segundamente pela ajuda nas interpretações desses resultados devido sua vasta experiência na área, e por fim, o mais importante, me inserir numa nova área do conhecimento científico. Agradeço também ao Me. André Luiz Ferraz Lourenço pelo aperfeiçoamento essencial do programa utilizado nas aquisições dos resultados de lacunaridades.

Aos colegas e amigos do grupo de pesquisa FASCA, em especial aos que conviveram comigo na mesma época do mestrado, Me. Fabiano M. M. Luz, Dr. Luis Valério Prandel, Me. Wellington Luis Almeida, Dr. Wellington Claiton Leite, Ma. Sabrina Passoni, Dra. Talita Rosas Ferreira e a Dra. Jaqueline Aparecida Ribaski Borges, pela amizade, ajuda e companheirismo de todas as horas.

Ao José Valdirino Gaspareto, físico graduado em licenciatura, pela aquisição acurada e disponibilização de resultados de parâmetros geométricos dos sistemas porosos utilizados aqui nesta tese, o agradeço profundamente por tal feito.

Aos inúmeros amigos e colegas de pós-graduação e de corredores, em especial Dr. Maike Antonio Faustino dos Santos, Dr. Moisés Souza Santos, Dr. Maurício Ap. Ribeiro, Dr. Rafael Borges, Dr. Paulo Ricardo Protachevicz, Me. Derisnei Mendes Reis, Me. Gustavo Mehanna Uhdre, Dra. Iolanda Justus Dechandt e outros tantos, os quais agradeço pelas conversas, desabafos, incentivos, risadas, críticas construtivas e batalhas.

À Dra. Aline M. H. dos Reis que na etapa final do doutorado não mediu e nem negou ajuda em discussões, esclarecimentos, leituras, apontamentos e correções, a minha sincera gratidão do fundo do meu coração. Tu és uma pessoa ímpar e excepcional. Muito obrigado!

A equipe de técnicos de laboratórios didáticos de ensino do Dept. de Física, Allan Leandro Monteiro, Maria Beatriz Fabri Alves (Bia), Maria da Ap^{a}. Rocha (Cida) e Luiz Roberto Canteri, pelas suas incontáveis assistências de todas as horas, conversas, cafés, risadas, conselhos, incentivos e dentre outras coisas, a minha eterna gratidão e obrigado de coração.

Ao PPG em Ciências-Física e à CAPES/Fundação Araucária pelo auxílio financeiro em diversas ocasiões e bolsa de fomento para realização deste doutorado.

Finalmente, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho de tese e para minha formação quanto pessoa e futuro pesquisador, muito obrigado.

“Não há vitória alguma sem o máximo de esforço, persistência e dedicação.”

O autor.

RESUMO

Solos representam sistemas complexos e dinâmicos em seu estado natural ou de não perturbação, como aqueles encontrados em áreas de mata nativa ou floresta secundária. Ao serem destinados para fins agrícolas, os solos passam por práticas de preparo intensivas e não intensivas, além de estarem sujeitos a processos climáticos e irrigações contínuas, os quais causam ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Os diferentes sistemas de preparo e aplicação de ciclos de U-S ocasionam modificações principalmente na escala micrométrica, e, assim, abordagens fractais e multifractais podem ser usadas no entendimento e compreensão de sistemas complexos. Inicialmente neste estudo usou-se um algoritmo computacional baseado na técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) para obtenção de curvas de distribuição de tamanho de poros (CDP) via análise de imagens microtomográficas (μTC) de um Latossolo Vermelho Distrófico submetido a diferentes práticas de preparo (plantio convencional - PC, plantio cultivo mínimo - PM e plantio direto - PD) e área sob floresta secundária (F) como referência. As CDPs também foram comparadas e complementadas com as obtidas pelo método tradicional baseada na curva de retenção de água (CR) por meio da primeira derivada do modelo matemático de interpolação da CR. O mesmo algoritmo foi ainda usado no processo inverso como metodologia alternativa na aquisição das CRs. Os resultados mostraram que PC e PM apresentaram alterações significativas nas CDPs perante a F e PD, e em ambos os métodos as porosidades de PC e PD foram as que mais sofreram modificações, principalmente pelo aumento de poros de transmissão (<500 μm). As CRs determinadas pelo método tradicional e aquelas baseadas no algoritmo computacional mostraram-se concordantes, revelando que o último pode ser usado para medidas representativas baseadas em imagens de propriedades de retenção de água por sistemas porosos. Os resultados das análises dos efeitos dos ciclos U-S nas CDPs, também obtidas pelo algoritmo baseado na PIM, revelaram que tais ciclos alteraram as porosidades e funcionalidades dos poros por distribuição de seus tamanhos para todos os preparos. O PM foi o preparo que mais sofreu mudanças significativas nas funcionalidades de seus poros, onde uma grande porção dos poros de transmissão foram convertidos em fissuras. O principal resultado obtido na comparação dos preparos indica que conforme o preparo adotado, o solo irá reagir de maneira distinta aos ciclos U-S. Finalizando, as abordagens fractais e multifractais como as de lacunaridades, dimensões fractais generalizadas (Dqs), espectros multifractais e entropias em três dimensões (3D) em conjunto com os parâmetros geométricos de conectividade e tortuosidade dos poros, permitiram mostrar que as práticas de preparo se separaram em dois grupos, os quais apresentaram grande auto similaridade ou proximidade em suas características porosas (F com PD e PM com PC). Altas relações lineares foram constatadas entre as lacunaridades 3D, Dqs e entropias com as porosidades. Variabilidades espaciais das distribuições de tamanhos de poros dos preparos e F foram confirmadas pelas lacunaridades 3D, Dqs e graus de assimetrias advindos dos espectros multifractais. Deste modo, evidenciou-se a potencialidade e sensibilidade da abordagem multifractal 3D para caracterização e diferenciação de espaços porosos dinâmicos e complexos, como é o caso do solo.

Palavras-chave: Sistema poroso do solo; Simulação computacional em imagens μTC; Propriedades físicas do solo; Geometria fractal e multifractal 3D; Retenção de água no solo.

ABSTRACT

Soils represent complex and dynamic systems in their natural or undisturbed state, such as those found in areas of native forest or secondary forest. When destined for agricultural purposes, soils undergo intensive and non-intensive preparation practices, in addition to being subject to climatic processes and continuous irrigation, which cause wetting and drying cycles (W-D). The different preparation systems and application of W-D cycles cause changes mainly in the micrometric scale, and thus fractal and multifractal approaches can be used to understand complex systems. Initially, this study used a computational algorithm based on the mercury intrusion porosimetry (MIP) technique to obtain pore size distribution curves (PSD) by microtomographic image analysis (μCT) of a Dystrophic Red Latosol submitted to different preparation practices (conventional preparation - CT, minimum preparation - MT and no-preparation - NT) and area under secondary forest (F) as reference. The PSDs were also compared and complemented with those obtained by the traditional method based on the water retention curve (RC) using the first derivative of the mathematical model of RC interpolation. The same algorithm was also used in the reverse process as an alternative methodology for RCs acquisition. The results showed that CT and MT presented significant changes in PSDs compared to F and NT, and in both methods the CT and NT porosities suffered the most changes, mainly by the increase in transmission pores (<500 μm). The RCs determined by the traditional method and those based on the computational algorithm were concordant, revealing that the latter can be used for representative measurements based on images of water retention properties by porous systems. The results of the analysis of the effects of W-D cycles on the PSDs, also obtained by the MIP-based algorithm, revealed that such cycles altered the porosity and functionality of the pores by distributing their sizes for all preparations. MT was the preparation that suffered the most significant changes in the functionality of its pores, in which a large portion of the transmission pores became fissures. The main result obtained in the comparison of preparation indicates that according to the preparation adopted, the soil will react differently to the W-D cycles. Finally, fractal and multifractal approaches such as lacunarities, generalized fractal dimensions (Dqs), multifractal spectra, and entropy in three dimensions (3D) together with the geometric parameters of pore connectivity and tortuosity, allowed to show that the preparation practices were divided into two groups, which showed great self-similarity or proximity in their porous characteristics (F with NT and MT with CT). High linear relationships were found between 3D lacunarities, Dqs, and entropies with the porosities. The 3D lacunarities, Dqs and degrees of asymmetries arising from the multifractal spectra confirmed spatial variabilities of the pore size distributions of the preparation and F. In this way, the potential and sensitivity of the 3D multifractal approach for the characterization and differentiation of dynamic and complex porous spaces, such as the soil, became evident.

Keywords: Porous soil system; Computer simulation in μCT images; Physical properties of the soil; 3D fractal and multifractal geometry; Soil water retention.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Áreas de coleta das amostras (IAPAR - Ponta Grossa, Brasil). Plantio Direto:PD,Plantio Convencional: PC, Plantio Cultivo Mínimo:PM e F: Floresta Secundária.....28

Figura 2.2 Esquematização das etapas do processo de intrusão por mercúrio no interior de um poro com estreitamente. 30

Figura 2.3 Função de Capacidade de Água ajustado por um modelo analítico de log normal. 34

Figura 2.4 (a, d, g, j) Imagens de microtomografia de raios X das amostras de solo reconstruídas tridimensionalmente, (b, e, h, k) da rede de poros das amostras de solo e (c, f, i, l) dos esqueletos da rede de poros das amostras de solo para os sistemas de preparo (PC, PM e PD) estudados e área sob F..... 36

Figura 2.5 Curvas de retenções de água (CRs) das amostras submetidas a diferentes preparos de solos. (F: Floresta Secundária, PC: Plantio Convencional, PM: Plantio Cultivo Mínimo e PD: Plantio Direto) – Símbolos referem-se aos dados experimentais e linhas contínuas à interpolação desses dados pelo modelo VG.....38

Figura 2.6 (a) Distribuição acumulativa de tamanhos de poros via CDPs. (b) CDPs obtidas por análise de imagens μTC 3D mediante método baseado no PIM. (c) Porosidades advindas das CDPs divididos em classes de tamanhos de diâmetros característicos para os diferentes preparos (PC, PM e PD) e solo sob floresta secundária (F). d <500 μm - poros de transmissão e d >500 μm - poros de fissuras (GREENLAND, 1981).....40

Figura 2.7 (a) CDPs obtidas via função capacidade de água (FCA). (b) Distribuição acumulativa de tamanhos de poros via FCA. (c) Intervalos de tamanho de poros advindos da FCA divididos em classes de diâmetros característicos para os diferentes preparos (PC, PM e PD) e solo sob floresta secundária (F). d <500 μm - poros de transmissão e d >500 μm - poros de fissuras (GREENLAND, 1981). 43

Figura 2.8 Distribuição do tamanho dos poros obtida a partir da análise 3D μTC com base no método PIM (Yang – linha contínua) e na função de capacidade de água (FCA - linha tracejada).....45

Figura 2.9 (a) Curvas de retenções obtidas na mesa de tensão (CR_{Exp}) e (b) pelas imagens μTC 3D (CR_{PSD}) ambas interpoladas pelo modelo matemático de VG para área de floresta (F) e preparos (PC, PM e PD). Símbolos referem-se aos dados adquiridos e linhas contínuas à interpolação desses dados pelo modelo VG. 47

Figura 3.1 Amostras de solo acondicionadas na mesa de tensão para aplicação dos ciclos de umedecimento e secamento (U-S) (Laboratório FASCA-UEPG).....58

Figura 3.2 CDPs obtidas pela análise de imagens de μTC 3D mediante o método de simulação baseado na PIM. As amostras foram submetidas a 0 e 12 ciclos U-S. (a) Floresta Secundária-F. (b) Plantio Convencional-PC. (c) Plantio Cultivo Mínimo-PM. (d) Plantio Direto-PD. 61

Figura 3.3 Porosidades acessadas por imagem obtidas via simulação baseada no PIM em imagens μTC 3D divididas em classes de tamanhos de diâmetros característicos. As amostras foram submetidas a 0 e 12 ciclos U-S. Floresta Secundária-F. Plantio Convencional-PC. Plantio Cultivo Mínimo-PM. Plantio Direto-PD. 63

Figura 3.4 Porosidades acessadas pela imagem obtidas via simulação baseada na simulação pelo PIM em imagens de μTC 3D. As amostras foram submetidas a 0 e 12 ciclos U-S. Floresta Secundária-F. Plantio Convencional-PC. Plantio Cultivo Mínimo-PM. Plantio Direto-PD. 66

Figura 3.5 Porosidades acessadas pela imagem baseada na funcionalidade dos poros (GREENLAND, 1981). As amostras foram submetidas a 0 e 12 de ciclos U-S. Floresta Secundária-F. Plantio Convencional-PC. Plantio Cultivo Mínimo-PM. PD-Plantio Direto.....67

Figura 4.1 Exemplo de duas amostras de um mesmo solo com modificações distintas na estrutura após processos que afetam a estrutura do solo. 79

Figura 4.2 Curva de lacunaridade para duas amostras de solo com características distintas. Menor lacunaridade (Linha cheia – imagem da Figura 4.1a) e maior lacunaridade (Linha tracejada – imagem da Figura 4.1b) 80

Figura 4.3 Curva de primeira derivada da lacunaridade para duas amostras de solo com características distintas. Linha cheia – imagem da Figura 4.1a e linha tracejada – imagem da Figura 4.1b.....80

Figura 4.4 (a) Espectro multifractal assimétrico (linha cheia – imagem da Figura 4.1a) e simétrico (linha tracejada– imagem da Figura 4.1b) para duas amostras de solo. (b) Parâmetros multifractais extraídos dos espectros multifractais.....82

Figura 4.5 Curva de entropia de Shannon normalizada para uma amostra de solo. Maior entropia (linha cheia – imagem da Figura 4.1a) e menor entropia (linha tracejada – imagem da Figura 4.1b). 85

Figura 4.6 (a) Lacunaridades 3D e (b) sua primeira derivada para área sob floresta secundária (F) e para os três sistemas de preparo do solo (plantio convencional – PC, plantio cultivo mínimo – PM e plantio direto – PD). (c) Relação entre lacunaridade 3D e porosidade. As divisões em três partes são devidos aos melhores ajustes lineares para cada parte e evidenciação deste comportamento linear, e nos casos das derivadas, para melhores visualizações dos pontos de inflexão.....88

Figura 4.7 Espectros multifractais 3D para área sob floresta secundária (F) e para os três sistemas de preparo do solo (plantio convencional – PC, plantio cultivo mínimo

–PM e plantio direto – PD).....91

Figura 4.8 Esqueletos da rede de poros das amostras de solo para os sistemas de preparo (PC, PM e PD) estudados e área sob floresta (F). 93

Figura 4.9 Relação entre dimensão fractal generalizada e porosidade para área sob floresta secundária (F) e para os três sistemas de preparo do solo (plantio convencional – PC, plantio cultivo mínimo – PM e plantio direto – PD). 94

Figura 4.10 (a) Entropia de Shannon Normalizada 3D para área sob floresta secundária (F) e para os três diferentes sistemas de preparo do solo (plantio convencional – PC, plantio cultivo mínimo – PM e plantio direto). (b) Relação entropia de Shannon normalizada máxima 3D e porosidade. (c) Relação entropia global ou de Boltzmann e porosidade.....96

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 Valores dos parâmetros ajustados pelo modelo VG (equação 2.6) para a área sob floresta secundária (F) e os preparos investigados (PC: Plantio Convencional, PM: Plantio Cultivo Mínimo e PD: Plantio Direto.....33

Tabela 2.2 Valores dos parâmetros ajustados pelo modelo VG (equação 2.6) para F e preparos investigados para as CRs experimentais (mesa de tensão) e CRs advindas das CDPs via equação 2.5.....48

Tabela 4.1 Parâmetros fractais calculados a partir das curvas de espectros multifractais 3D para área sob floresta secundária (F) e para os três sistemas de preparo do solo (plantio convencional – PC, plantio cultivo mínimo – PM e plantio direto – PD).....92

Tabela 4.2 Parâmetros geométricos 3D do sistema poroso para área sob floresta secundária (F) e para os três sistemas de preparo do solo (plantio convencional – PC, plantio ou cultivo mínimo – PM e plantio direto – PD)..... 98

Tabela 4.3 Matriz de correlação linear entre os parâmetros multifractais e morfométricos 3D para área sob floresta secundária (F) e os diferentes preparos (plantio convencional – PC, plantio cultivo mínimo – PM e plantio direto - PD). 101

LISTAS DE SIGLAS

F	Floresta Secundária
PC	Plantio Convencional
PM	Plantio Cultivo Mínimo
PD	Plantio Direto
TC	Tomografia Computada ou Computadorizada
μTC	Microtomografia por raios X
CR	Curva de Retenção de Água
VG	modelo de van Genuchten (1980)
PIM	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
FCA	Função Capacidade de Água
CDP	Curva de Distribuição de Tamanhos de Poros

LISTAS DE SÍMBOLOS

ϕ Porosidade Acessada ou Porosidade Acessada pela Imagem

θ Umidade Volumétrica ($m^3.m^{-3}$)

θ_r Umidade Residual ($m^3.m^{-3}$)

θ_s Umidade de Saturação ($m^3.m^{-3}$)

r^2 Coeficiente de Determinação

$f(\alpha(q))$ Espectro de Singularidade (ponto de vista matemático); Entropia Global ou de Boltzmann (ponto de vista físico)

$\alpha(q)$ Expoente de Lipschitz-Holder (ponto de vista matemático); Energia Interna (ponto de vista físico)

D_q Dimensão Fractal Generalizada

D_0 Dimensão Fractal de Capacidade ou de Contagem de Caixas

D_1 Dimensão Fractal de Informação ou de Entropia de Shannon

D_2 Dimensão Fractal de Correlação

Δ Grau de Multifractalidade

A Grau de Assimetria

C Conectividade

τ Tortuosidade

GA Grau de Anisotropia

$H^*(\varepsilon)$ Entropia de Shannon Normalizada 3D

$H^*(\varepsilon)_{máx}$ Entropia de Shannon Normalizada Máxima 3D

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL……16
1.1 HIPÓTESES.....19
1.2 OBJETIVOS GERAIS.....19
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....20
REFERÊNCIAS……20
2 ESTUDO DE MUDANÇAS NO SISTEMA POROSO DO SOLO DEVIDO A DIFERENTES PREPAROS USANDO SIMULAÇÃO BASEADA NA ANÁLISE DE IMAGENS MICROTOMOGRÁFICAS3D……...23
2.1 INTRODUÇÃO.....24
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....27
2.2.1 Amostras de Solo.....27
2.2.2 Aquisição e Segmentação das Imagens de μTC.....29
2.2.3 Simulação para Aquisição das CDPs.....30
2.2.4 Curva de Retenção de Água..... 32
2.2.5 Análises Estatísticas.....34
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....34
CONCLUSÕES……....49
REFERÊNCIAS……49
3 ANÁLISE DE ALTERAÇÕES NA ESTRUTURA POROSA DO SOLO POR CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO USANDO SIMULAÇÃO BASEADA EM IMAGENS DE MICROTOMOGRAFIA……...54
3.1 INTRODUÇÃO.....55
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....56
3.2.1 Amostras de Solo.....56
3.2.2 Ciclos de Umedecimento e Secamento.....57
3.2.3 Aquisição e Segmentação das Imagens de μTC.....58
3.2.4 Simulação via Imagens Microtomográficas 3D para Aquisição das CDPs.....59
3.2.5 Análises Estatísticas.....60
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 60
CONCLUSÕES……....69
REFERÊNCIAS……70
4 ABORDAGEM MULTIFRACTAL E MICROMORFOLÓGICA 3D

NA CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA POROSO DE UM SOLO SUBMETIDO A DIFERENTES PREPAROS……...74
4.1 INTRODUÇÃO.....75
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....77
4.2.1 Local e Coleta das Amostras 77
4.2.2 Aquisição e Processamento das Imagens 77
4.2.3 Lacunaridade 3D.....78
4.2.4 Análise Multifractal 3D 81
4.2.4.1 Parâmetros multifractais 3D 83
4.2.4.2 Dimensão fractal generalizada (D_{qs}).....84
4.2.5 Entropia de Shannon Normalizada 3D 84
4.2.6 Parâmetros Geométricos 3D 86
4.2.6.1 Conectividade (C).....86
4.2.6.2 Tortuosidade (τ).....87
4.2.6.3 Grau de anisotropia (GA) 87
4.2.7 Análises Estatísticas 88
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 88
4.3.1 Lacunaridades 3D 88
4.3.2 Espectros Multifractais 3D, Parâmetros Multifractais e Dimensões Fractais Generalizadas.....90
4.3.3 Entropia de Shannon Normalizada 96
4.3.4 Parâmetros Geométricos 3D 97
4.3.5 Correlações de Pearson entre os Parâmetros e Propriedades Quantificadas 99
CONCLUSÕES……..102
REFERÊNCIAS……..103
CONSIDERAÇÕES FINAIS……...109
POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS……...110
APÊNDICE A – PROGRAMA LAC3D.M PARA OBTENÇÕES DAS LACUNARIDADES 3D…….....111
APÊNDICE B - ARTIGOS PUBLICADOS ORIGINÁRIOS DESTA PESQUISA…….115

1 INTRODUÇÃO GERAL

Solos em condições naturais ou que não sofreram qualquer tipo de perturbação, como aqueles encontrados em áreas sob mata nativa ou florestas secundárias, representam sistemas dinâmicos e complexos. Estes sistemas porosos são caracterizados por possuírem arranjo de poros bastante diversificado, principalmente nas camadas superficiais em que existe maior ação dos organismos.

Todavia, quando o solo é destinado a práticas que envolvem seu manejo mediante a utilização de diferentes formas de preparo, este tende a apresentar modificações expressivas em seu espaço poroso devido à ação de implementos utilizados no seu preparo (PAGLIAI et al., 2004; PIRES et al., 2017; BOYLE; POWERS, 2013; BODNER; SCHOLL; KAUL, 2013a; BODNER et al., 2013b). No Brasil, as principais e mais difundidas técnicas de preparo do solo são o sistema de plantio direto (PD), o qual teve seu pioneirismo no estado do Paraná, o sistema de cultivo ou plantio cultivo mínimo (PM) e o mais comum dentre todos os preparos, o sistema de plantio convencional (PC) (SILVA et al., 2011; BORGES et al., 2019; PIRES et al., 2019).

Do ponto de vista ambiental os diferentes preparos citados acima são importantes porque podem causar modificações distintas no sistema poroso do solo. Em países de clima tropical, como o Brasil, a adoção de sistemas não considerados conservacionistas (PC principalmente) podem acarretar sérios danos ambientais, devido, por exemplo, à perda expressiva das camadas mais superficiais do solo devido a processos erosivos. Essas camadas geralmente são ricas em material orgânico e foram formadas durante longo período de tempo (séculos, milênios). Quando os processos de degradação do solo ocorrem em áreas com declividade forte (>12º), os processos de transporte de sedimento causam a destruição de leitos de água, ocasionando sérios impactos não somente ambientais, mas também sociais (PAGLIAI et al., 1998; TORMENA et al., 2004; DE MORAES SA et al., 2009; SHI et al., 2012).

Devido a este motivo a adoção de práticas mais conservacionistas de preparo do solo é importante para o uso mais eficiente e racional deste importante recurso natural sem ocasionar ou minimizando danos ambientais. Nesse sentido, estudos de física aplicada ao solo visando um melhor entendimento do funcionamento desse sistema poroso, quando submetido a diferentes preparos, ainda se fazem necessários, principalmente trabalhos que envolvam a caracterização da rede de poros na escala micrométrica.

Além dos diferentes preparos do solo, ciclos de umedecimento e secamento (U-S) representam um importante processo de alteração da estrutura deste sistema poroso e, consequentemente, da arquitetura de seus poros. Diversas propriedades físicas, tais como,

densidade do solo, porosidade, macroporosidade, distribuição de tamanho e formato dos poros, são afetadas pelos ciclos de U-S, quando ocorrem naturalmente ou são induzidos pelo homem (PIRES et al., 2008, 2009; BODNER; SCHOLL; KAUL, 2013a; YIPING et al., 2016; DIEL et al., 2019). Medidas de retenção de água podem ainda envolver a aplicação de vários ciclos de U-S nas amostras de solo durante todo o procedimento experimental (BACCHI et al., 1998; JAYANTH, IYER; SINGH, 2012).

A retenção de água pelo solo pode ser estudada por meio de uma importante propriedade físico-hidráulica deste sistema poroso, a chamada curva de retenção ou curva característica (CR). A CR expressa a relação existente entre o potencial matricial, a energia com que a água se encontra retida no solo devido às forças capilares e de adsorção, e a umidade do solo, à base de massa ou volume. Modelos matemáticos usados no ajuste da CR permitem, de maneira indireta, uma estimativa da curva de distribuição de tamanho de poros (CDP) desse meio poroso. A CDP é obtida pela derivação da equação do modelo matemático utilizado no ajuste da CR, fornecendo assim a chamada Função Capacidade de Água (FCA) (LIBARDI, 2005; PIRES et al., 2008; CÁSSARO et al., 2011).

Os procedimentos experimentais para o levantamento de uma CR completa geralmente são demorados (meses), trabalhosos e sujeitos a vários tipos de problemas e limitações experimentais (PIRES; BACCHI; REICHARDT, 2005). Dessa forma, é desejável buscar alternativas para se obter a CR e, subsequentemente, a CDP de forma mais rápida e menos trabalhosa. Nesse sentido, técnicas que utilizam a análise de imagens merecem destaque, uma vez que o acesso a computadores pessoais cada vez mais potentes e programas dedicados exclusivamente a análise de imagens de meios porosos têm permitido medidas de propriedades físico-hidráulicas do solo em menor período, reprodutíveis e representativas (BORGES; PIRES, 2012; BORGES et al., 2019; PIRES et al., 2017, 2019).

A técnica de tomografia computada (TC) possibilita a obtenção de imagens tridimensionais (3D) com resolução de nanômetros a micrômetros. Desta forma, esta técnica permite a modelagem detalhada do espaço poroso do solo e, consequentemente, a obtenção de suas características físicas e hidráulicas. É válido mencionar que até alguns anos atrás as técnicas empregadas na caracterização micromorfológica de sistemas porosos envolviam métodos trabalhosos, demorados e que geravam grande quantidade de rejeitos químicos. Esses métodos também permitiam na maioria das vezes somente a análise de imagens bidimensionais (2D). Portanto, o uso de imagens tomográficas associado a métodos de análise de imagens tem permitido a proposição de modelos para o estudo da distribuição e morfologia dos poros, movimento e retenção de fluidos (líquido/gás) no interior do solo, complexidade do sistema

poroso (tortuosidade e conectividade), dentre outras possibilidades (YANG et al., 2009; YANG et al., 2014; CÁSSARO et al., 2017; PIRES et al., 2017, 2019).

Assim, aquisições de imagens tomográficas possibilitam a utilização de vários métodos de simulações baseados em imagens 2D e 3D. Tais métodos estendem-se desde simulações numéricas com dados obtidos a partir das próprias matrizes das imagens ou até mesmos simulados randomicamente, bem como outros baseados em redes neurais e aqueles com expansões de bacias de crescimentos em imagens (YANG et al., 2009; YANG et al., 2014; CÁSSARO et al., 2017).

Do ponto de vista da ciência básica, envolvendo a área de física aplicada a solos, ainda é bastante incipiente o número de trabalhos abordando a análise de sistemas porosos em 3D e suas respectivas relações com as propriedades de retenção de água pelo solo. Devido a este motivo trabalhos que utilizem imagens para a obtenção de propriedades hidráulicas do solo podem ser uma alternativa interessante para o levantamento de propriedades que são difíceis de serem medidas, principalmente devido à complexidades experimentais e pelo tempo gasto em todo o processo de mensuração. Por outro lado, a simulação dessas propriedades também pode ser interessante para melhor entendimento dos processos de retenção e movimento de água em sistemas porosos complexos (BACCHI et al., 1998; PIRES et al., 2009; CÁSSARO et al., 2017).

Outra possibilidade com a aquisição de imagens 3D diz respeito ao uso de ferramentas que envolvem a análise de fractais e multifractais. Essas ferramentas matemáticas podem ser utilizadas na quantificação de grandezas como lacunaridade, espectro multifractal e entropia do arranjo dos poros de sistemas porosos complexos e dinâmicos. A associação de dados dos parâmetros da análise fractal e multifractal com os parâmetros geométricos de sistemas porosos como a conectividade (C), tortuosidade (τ) dos poros e heterogeneidade do meio poroso por meio da anisotropia pode gerar resultados importantes para o entendimento de como sistemas de preparo ou aplicação de ciclos de U-S induzem mudanças que podem afetar a dinâmica da água (POSADAS et al., 2003, 2005; ROQUE et al., 2009, 2012; MARTÍNEZ et al., 2010, 2017; TORRE et al., 2018; BORGES et al., 2019; PIRES et al., 2019).

Visando analisar detalhadamente os problemas abordados nos parágrafos anteriores, este trabalho de tese está dividido em capítulos que foram estruturados no formato de artigos. Uma descrição resumida de cada um dos capítulos será apresentada nos próximos parágrafos.

No primeiro capítulo estudou-se o efeito de diferentes sistemas de preparo, mediante o levantamento de CDPs baseadas em imagens microtomográficas 3D, no sistema poroso do solo. Um algoritmo computacional baseado na porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM),

usado na obtenção de informações do sistema poroso do solo, foi complementado com informações da CR e FCA neste primeiro capítulo. O uso do algoritmo baseado na PIM foi também empregado na determinação da CR de forma indireta e por meio de imagens 3D.

No segundo capítulo o algoritmo baseado no PIM foi usado para verificar as modificações no sistema poroso do solo devido às aplicações de ciclos de umedecimento e secamento. Os mesmos preparos do Capítulo 1 foram estudados.

No terceiro capítulo a abordagem multifractal 3D conjuntamente com outros parâmetros geométricos do solo foi utilizada para uma melhor caracterização das mudanças ocorridas no sistema poroso do solo devido ao uso dos diferentes sistemas de preparo. Em tal capítulo, ferramentas matemáticas foram empregadas visando gerar novos parâmetros que possam facilitar o entendimento de como sistemas de preparo podem afetar a arquitetura do sistema poroso do solo.

Este trabalho de tese baseou-se nas seguintes hipóteses, objetivos gerais e específicos.

1.1 HIPÓTESES

a) Propriedades micromorfológicas são afetadas de forma distinta pelo uso de diferentes sistemas de preparo.
b) Algoritmos computacionais baseados em imagens microtomográficas 3D são sensíveis para quantificações de mudanças no sistema poroso do solo.
c) Algoritmos computacionais de TC baseados em imagens microtomográficas são uma alternativa confiável na obtenção de curvas parciais de retenção.
d) Ferramentas matemáticas como multifractal podem ser uma alternativa na caracterização de mudanças na arquitetura dos poros de sistemas porosos como o solo.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

a) Analisar do ponto de vista micromorfológico como sistemas de preparo distintos e ciclos de umedecimento e secamento afetam o sistema poroso do solo utilizando ferramentas baseadas na análise de imagens microtomográficas.
b) Compreender melhor o processo de retenção da água junto à matriz do solo, analisando indiretamente curvas de retenção oriundas de curvas de distribuição de tamanho de poros adquiridas por meio de imagens microtomográficas 3D.

   Verificar a potencialidade da abordagem multifractal 3D na caracterização de sistemas porosos submetidos a diferentes preparos do solo.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Obter curvas de distribuição de tamanho de poros e curvas de retenção para amostras de solo submetidas a diferentes tipos de preparo.
b) Obter curvas de distribuição de tamanho de poros e curvas de retenção para amostras de solo submetidas a distintos ciclos de umedecimentos e secamento.
c) Verificar a viabilidade e sensibilidade de algoritmo baseado na porosimetria por intrusão de mercúrio no levantamento da curva de retenção via imagens de microtomografia 3D.
d) Caracterizar e identificar as alterações no sistema poroso de amostras de solo investigadas por meio da curva de distribuição de tamanho de poros e curva de retenção.
e) Determinar e quantificar propriedades multifractais 3D e parâmetros geométricos para as amostras de solos submetidas aos diferentes tipos de preparos.
f) Demonstrar a potencialidade e eficácia da técnica multifractal 3D na análise de sistemas porosos complexos.

REFERÊNCIAS

BACCHI, O. O. S. et al. Gamma-ray beam attenuation as an auxiliary technique for the evaluation of the soil water retention curve. **Scientia Agricola**, v. 55, n. 3, p. 498-502, 1998.

BODNER, G. et al. Environmental and management influences on temporal variability of near saturated soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 204-205, p. 120-129, 2013.

BODNER, G.; SCHOLL, P.; KAULH, P. Field quantification of wetting–drying cycles to predict temporal changes of soil pore size distribution. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 1-9, 2013.

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

BORGES, J. A. R. et al. X-ray computed tomography for assessing the effect of tillage systems on topsoil morphological attributes. **Soil and Tillage Research**, v. 189, p. 25-35, 2019.

BOYLE, J. R.; POWERS, R. F. Forest soils. *In*: BINKLEY, D.; FISHER, R. F. **Ecology and management of forest soils**. Oxford: Wiley-Blackwell, 2013. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. Elsevier, p. 1-11, 2013.

CÁSSARO, F. A. M. et al. Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no- tillage tillage practices using pore size distribution analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 111, n. 2, p. 175-179, 2011.

CÁSSARO, F. A. M. et al. Pore-size distributions of soils derived using a geometrical approach and multiple resolution microCT images. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 3, p. 468-476, 2017.

DE MORAES SA, J. C. et al. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 104, n. 1, p. 56-64, 2009.

DIEL, J.; VOGEL, H. J.; SCHLÜTER, S. Impact of wetting and drying cycles on soil structure dynamics. **Geoderma**, v. 345, p. 63-71, 2019.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. Vol. 61. Edusp, 2005. 323 p.

JAYANTH, S.; IYER, K.; SINGH, D. N. Influence of drying and wetting cycles on SWCCs of fine-grained soils. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 40, n. 3, p. 376-386, 2012.

MARTÍNEZ, F. S. J. et al. Multifractal analysis of discretized X-ray TC images for the characterization of soil macropore structures. **Geoderma**, v. 156, n. 1-2, p. 32-42, 2010.

MARTÍNEZ, F. S. J. et al. Lacunarity of soil macropore space arrangement of TC images: effect of soil preparation and depth. **Geoderma**, v. 287, p. 80-89, 2017.

NIMMO, J. R. Porosity and Pore Size Distribution. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**, Elsevier, 2013.

PAGLIAI, M. et al. Tillage impact on soil quality. I. Soil porosity and related physical properties. **Italian Journal Agronomy,** v. 2, p. 11-20, 1998.

PIRES, L. F; BACCHI, O. S.; REICHARDT, K. Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation. **Soil and Tillage Research**, v. 82, p. 89-97, 2005.

PIRES, L. F. et al. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. **Soil and Tillage Research**, v. 100, n. 1-2, p. 72-77, 2008.

PIRES, L. F. et al. Pore system changes of damaged Brazilian oxisols and nitosols induced by wet-dry cycles as seen in 2-D micromorphologic image analysis. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 81, n. 1, p. 151-161, 2009.

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

PIRES, L. F. et al. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 197-206, 2019.

POSADAS, A. N. D. et al. Multifractal Characterization of Soil Pore Systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 5, p. 1361, 2003.

POSADAS, A. N. D. et al. Multifractal characterization of the spatial distribution of ulexite in a Bolivian salt flat. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 3, p. 615-627, 2005.

ROQUE, W. L. et al. Tortuosidade e conectividade da rede trabecular do rádio distal a partir de imagens microtomográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, v. 28, n. 2, p. 116-123, 2012.

SHI, Z. H. et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. **Journal of Hydrology**, v. 454, p. 123-130, 2012.

SILVA, G. L. et al. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, v. 167, p. 61-70, 2011.

TORMENA, C. A. et al. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 1023-1031, 2004.

TORRE, I. G. et al. Multifractal analysis of 3D images of tillage soil. **Geoderma**, v. 311, p. 167-174, 2018.

YANG, B. H. et al. 3D characterization and analysis of pore structure of packed ore particle beds based on computed tomography images. **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, v. 24, n. 3, p. 833-838, 2014.

YANG, Z. et al. An Image-Based Method for Obtaining Pore-Size Distribution of Porous Media. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 9, p. 3248-3253, 2009.

YIPING, W. et al. Effect of Cyclic Wetting and Drying on the Microstructure of Slip Zone Soils in Huangtupo Landslide. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, v. 9, n. 4, p. 209-216, 2016.

2 ESTUDO DE MUDANÇAS NO SISTEMA POROSO DO SOLO DEVIDO A DIFERENTES PREPAROS USANDO SIMULAÇÃO BASEADA NA ANÁLISE DE IMAGENS MICROTOMOGRÁFICAS 3D

RESUMO

Solos quando submetidos a diferentes sistemas de preparo são extremamente susceptíveis a modificações em suas propriedades físicas macroscópicas e microscópicas. Os sistemas de preparo largamente utilizados no Brasil são o plantio convencional (PC), plantio cultivo mínimo (PM) e plantio direto (PD). Analisar como essas práticas perturbam a estrutura do solo na escala micrométrica constitui ainda um grande desafio para os cientistas do solo. A microtomografia por raios X (µTC), devido ao potencial de obter imagens com alta resolução espacial, tem sido utilizada frequentemente como uma técnica para caracterizar tridimensionalmente (3D) a rede de poros de sistemas complexos como o solo. Neste estudo, o uso de imagens µTC associadas a um algoritmo computacional baseado na porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) foi utilizado para quantificar modificações no sistema poroso do solo induzidas pelos diferentes sistemas de preparo (PC, PM e PD). Uma área sob floresta (F) secundária foi empregada como referência. Análises 3D do sistema poroso foram realizadas e complementadas com informações da curva de retenção de água (CR) no solo e da primeira derivada do modelo matemático de ajuste da CR, a qual foi utilizada na obtenção da função de capacidade de água (FCA). O mesmo algoritmo foi ainda utilizado como metodologia alternativa na obtenção da CR. Os resultados obtidos mostraram que o solo sob PC e PM apresentou alterações significativas nas distribuições de tamanhos dos poros quando comparados aos poros de F e PD. Em ambos os métodos os resultados revelaram que PC e PD foram os preparos que sofreram mudanças mais significativas na porosidade do solo, principalmente pelo aumento da porcentagem de poros de transmissão (<500 µm). Os resultados obtidos também sugerem que o algoritmo computacional baseado no PIM foi sensível para quantificar a distribuição do tamanho de poros para sistemas complexos como o solo. Observou-se uma boa concordância para o levantamento das CRs entre método tradicional e aquele baseado na simulação computacional, mostrando que a última pode ser usada na obtenção de propriedades de retenção de água de sistemas porosos de forma mais rápida e representativa, mesmo considerando que nem todos os tamanhos de poros são acessados pela microtomografia.

ABSTRACT

Soils when subjected to different preparation systems are extremely susceptible to changes in their macroscopic and microscopic physical properties. The preparation systems widely used in Brazil are conventional preparation (CT), minimum preparation planting (MT) and no-preparation (NT). Analyze how these practices disturb the soil structure on the micrometric scale is still a major challenge for scientists in the ground. X-ray microtomography (µCT), due to the potential to obtain images with high spatial resolution, has often been used as a technique to characterize three-dimensionally (3D) the pore network of complex systems such as soil. In this study, the use of µCT images associated with a computational algorithm based on mercury intrusion porosimetry (MIP) was used to quantify changes in the soil porous system induced by different preparation systems (CT, MT and NT). An area under secondary forest (F) was used as a reference. 3D analyzes of the porous system were performed and complemented with information from the water retention curve (SWRC) in the soil and the first derivative of the

mathematical model of SWRC adjustment, which was used to obtain the water capacity function (WCF). The same algorithm was also used as an alternative methodology to obtain the SWRC. The obtained results showed that the soil under CT and MT presented significant changes in the pore size distributions when compared to the pores of F and NT. In both methods, the results revealed that CT and NT were the preparations that underwent the most significant changes in soil porosity, mainly due to the increase in the percentage of transmission pores (<500 μm). The obtained results also suggest that the computational algorithm based on MIP was sensitive to quantify the pore size distribution for complex systems such as soil. It was observed a good agreement was observed for the survey of SWRCs between the traditional method and the one based on computer simulation, showing that the latter can be used in obtaining water retention properties of porous systems in a faster and more representative way, even considering that neither all pore sizes are accessed by microtomography.

2.1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que as práticas de preparo agrícola efetuadas no solo podem modificar significativamente suas características e propriedades físicas, principalmente nas camadas superficiais. Propriedades físicas como a porosidade, a densidade do solo, a distribuição de tamanho dos poros, a retenção, a infiltração e a redistribuição de água entre outras são exemplos de parâmetros que podem ser afetados pelos diferentes sistemas de preparo (PAGLIAI; VIGNOZZI; PELLEGRINI, 2004; SILVA et al., 2011; PIRES et al., 2017). Consequentemente, a complexidade e a continuidade dos poros também tendem a ser fortemente influenciadas pelas alterações proporcionadas pelas às ações de manuseio do solo, uma vez que são dependentes das características do sistema poroso do solo.

No Brasil, um dos maiores produtores de grãos do mundo, os principais tipos ou formas de preparo do solo são: o plantio convencional (PC), plantio cultivo mínimo (PM) e o plantio direto (PD). O PC é caracterizado pelo revolvimento das camadas superficiais do solo por meio do emprego de arados e grades (GABRIEL FILHO et al., 2000; CARVALHO FILHO et al., 2007; SILVA et al. 2011). O arado tem a função de cortar, elevar e inverter as camadas superficiais do solo e a grade atua no destorroamento do solo revolvido (GABRIEL FILHO et al., 2000; CARVALHO FILHO et al., 2007). A adoção contínua deste tipo de preparo por muitas vezes conduz a mudanças negativas na estrutura do solo, as quais, em solos tropicais, favorecem processos erosivos, compactação e migração de partículas mais finas para as camadas mais profundas (GABRIEL FILHO et al., 2000; FILHO et al., 2007; SILVA et al., 2011).

No caso do PD não há o revolvimento do solo, contrário ao que ocorre para o PC, e assim uma perturbação mínima é ocasionada na estrutura do solo. Resíduos de plantas mantidos na camada superficial auxiliam na manutenção das condições mais naturais da estrutura do solo,

reduzindo problemas de erosão e formação de selamentos superficiais (CAMARA; KLEIN, 2005; SILVA et al., 2011; GALDOS et al., 2019). Contudo, solos sob esse tipo de preparo também podem estar sujeitos a efeitos negativos no sistema poroso como adensamentos em suas camadas superficiais devido ao constante tráfego de máquinas e implementos agrícolas (CAMARA; KLEIN, 2005; HOORMAN; SÁ; REEDER, 2011).

O PM, assim como o PD, também pode ser considerado um sistema de preparo conservacionista. O preparo excessivo do solo, induzido nas operações de gradagem e aração, é minimizado no PM, e, portanto, a manutenção dos resíduos das culturas na camada superficial do solo é mantida, incrementando-se a atividade biológica e também a resistência do solo ao adensamento (CAMARA; KLEIN, 2005; CARVALHO FILHO et al., 2007; ROSSETTO; SANTIAGO, 2007; SILVA et al., 2011).

Ao serem submetidos a diferentes tipos de preparo, os solos sofrem alterações que afetam sua estrutura e, consequentemente, a funcionalidade de seus poros que está relacionada com a forma com que os poros estão arranjados e distribuídos (FERREIRA et al., 2019). Neste sentido, a distribuição de tamanho dos poros pode ser fortemente influenciada pelas modificações em propriedades físicas como a continuidade e a tortuosidade dos poros (PAGLIAI; VIGNOZZI; PELLEGRINI, 2004). O sistema poroso do solo é diretamente influenciado pela estabilidade de sua matriz, a qual pode manter condições favoráveis para os processos de infiltração e redistribuição de água e também preservar condições adequadas para os processos biológicos que ocorrem em seu interior (LAL; SHUKLA, 2004).

Modificações causadas por distintas práticas de preparo no sistema poroso do solo são obtidas muitas vezes por intermédio da curva de retenção de água (CR). Esta propriedade física do solo está diretamente relacionada às características estruturais e texturais do solo, daí o interesse em utilizá-la na caracterização de sistemas porosos. A CR relaciona a energia com que a água se encontra retida no solo (potencial matricial) e a quantidade de água presente neste sistema poroso, expressa, em geral, em termos da umidade gravimétrica ou volumétrica (LIBARDI, 2005; SEKI, 2007; PIRES et al., 2008). As CRs são interessantes porque após o seu ajuste por meio de algum modelo matemático, podem ser empregadas na obtenção de uma estimativa indireta da distribuição de tamanhos de poros do solo por meio da função capacidade de água (FCA). A primeira derivada da equação de ajuste da CR permite a obtenção da FCA (LIBARDI, 2005; PIRES et al., 2008; CÁSSARO et al., 2011).

Além das CRs para o estudo indireto de sistemas porosos, há outros métodos que têm sido utilizados na caracterização e quantificação de propriedades físicas do solo em diferentes escalas. Atualmente os cientistas do solo têm aumentado o interesse no estudo de propriedades

morfológicas 3D da arquitetura deste sistema poroso. Nesse sentido, apesar do alto custo dos equipamentos e das análises experimentais, a microtomografia por raios X (μTC) tem se tornado uma das técnicas mais promissoras na caracterização detalhada de meios porosos (BORGES et al., 2019; PIRES et al., 2019).

As principais vantagens da técnica de μTC estão relacionadas ao fato de permitir análise 3D em escala micrométrica e de ser não destrutiva e não invasiva, o que permite a preservação da integridade da amostra sob investigação para futuras análises por outras técnicas. Aquisições de imagens de μTC possibilitam simulações de diversos processos do sistema poroso do solo, além de permitir estabelecer conexões com as propriedades micromorfológicas de seus poros (YANG et al., 2009; CÁSSARO et al., 2017; PIRES et al., 2017, 2019). Parâmetros micromorfológicos como comprimento, perímetro, forma, circularidade e distribuição de tamanho dos poros podem ser obtidas diretamente por meio da análise de imagens microtomográficas (BORGES et al., 2019).

A porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) é outra técnica que permite a análise e a investigação do sistema poroso do solo na escala de nano e microporos. Contudo, o emprego desse método é invasivo e demasiadamente trabalhoso devido ao processo de intrusão do mercúrio. Essa técnica também gera resíduos, pois nem sempre é possível extrair todo o mercúrio das amostras de solo antes do descarte do agregado. Além disso, se o equipamento não estiver em local adequado os operadores podem ficar susceptíveis aos vapores de mercúrio. Nos últimos anos, alguns pesquisadores desenvolveram metodologias que simulam o processo do PIM em sistemas porosos artificiais e naturais utilizando imagens 3D (YANG et al., 2009; DONG et al., 2018; LI; SHAO, 2020). Cássaro et al. (2017) demonstraram a possibilidade de uso desse tipo de metodologia na obtenção de curvas de distribuição de tamanhos de poros (CDPs) para amostras de diferentes tipos de solos. No trabalho de tais autores, informações de imagens μTC 3D com quatro resoluções espaciais distintas foram combinadas na geração das CDPs, as quais foram relacionadas com as características de retenção de água dos solos estudados.

O estudo aqui apresentado teve por objetivo principal a avaliação dos efeitos de diferentes sistemas de preparo (PC, PM e PD) nas propriedades físicas e morfológicas de um Latossolo Vermelho Distrófico. Um algoritmo baseado na técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio utilizando imagens de μTC 3D foi usado na medida da porosidade e distribuição de tamanho dos poros do solo (YANG et al., 2009; CÁSSARO et al., 2017). O método

tradicional para estimação da CDP pela função capacidade de água também foi empregado na comparação e complementação dos resultados da μTC 3D.

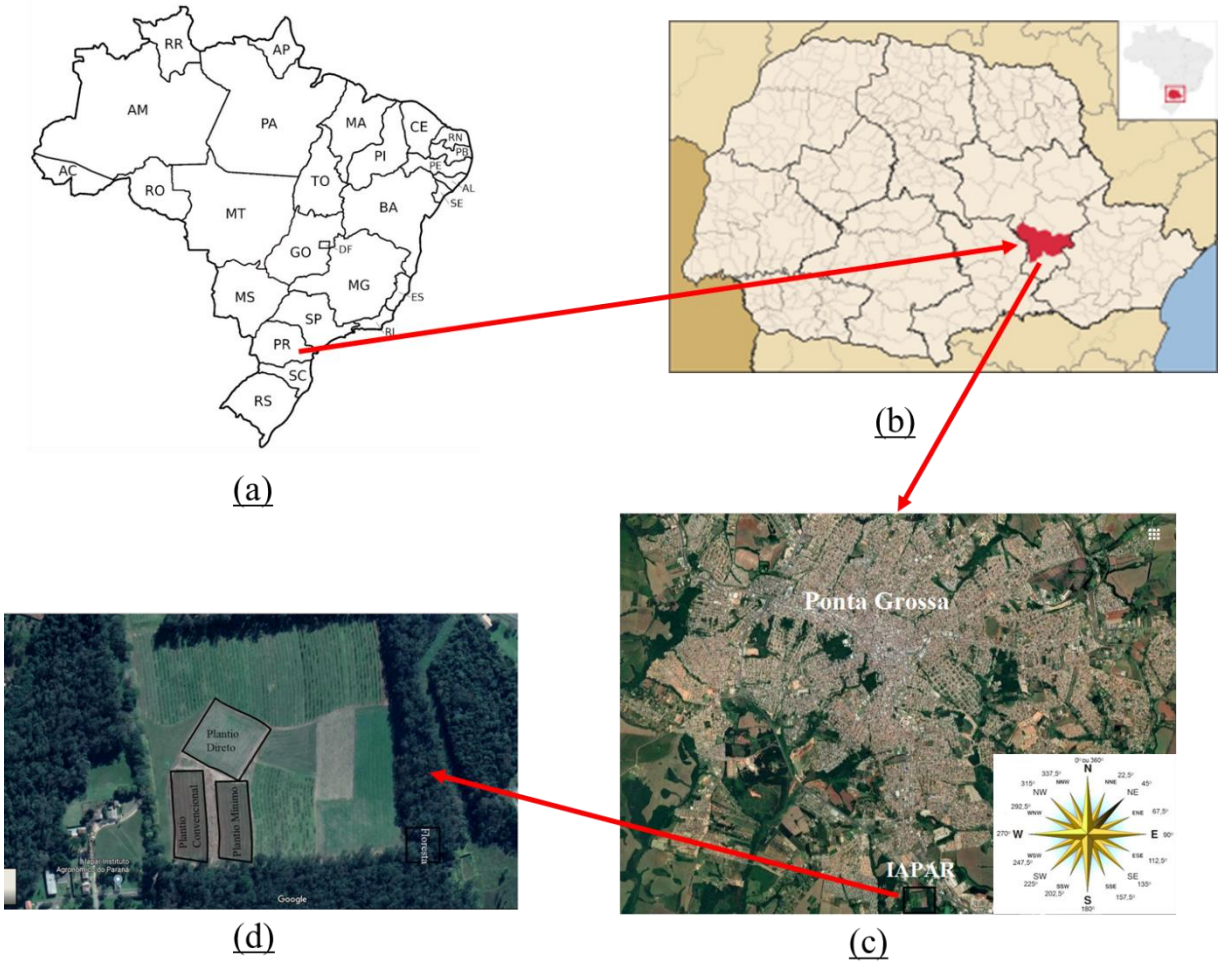
2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Amostras de Solo

Amostras de um Latossolo Vermelho Distrófico (DOS SANTOS et al., 2018) foram coletadas numa fazenda experimental pertencente ao governo do Estado de Paraná, localizada a aproximadamente 14 km a sudoeste do campus de Uvaranas da Universidade Estadual de Ponta Grossa (25° 06’ S, 50° 09’ W; 875 m acima do nível do mar) (Figura 2.1). As precipitações pluviométricas dessa região estão entre 1400 a 1600 mm com temperaturas médias anuais em torno de 17 a 18 ºC, permitindo catalogar o clima da mesma como sendo subtropical úmido (Cfb), segundo classificação de Köppen (NITSCHE et al., 2019). O solo possuía no momento da amostragem a seguinte composição textural: 578 g kg^{-1} de argila, 280 g kg^{-1} de silte e 142 g kg^{-1} de areia. O solo foi classificado como sendo de textura argilosa.

Um total de 7 amostras foram coletadas para cada um dos sistemas de preparo estudados: plantio convencional (PC), plantio cultivo mínimo (PM) e plantio direto (PD). Um total de 7 amostras foram também coletadas em uma área sob floresta secundária com espécies antigas de *Eucalyptus* spp. conjuntamente com outras espécies nativas do processo de regeneração. Todas as amostras foram coletadas na camada superficial (0-10 cm). Essas áreas experimentais têm sido manejadas sob esses sistemas a mais de 35 anos, e as amostragens para este estudo ocorreram nos anos de 2017 e 2018, após a colheita da lavoura do milho (BORGES et al., 2019; PIRES et al., 2019).

Figura 2.1 (a) Mapa do Brasil. (b) Mapa do Estado do Paraná. (c) Mapa da cidade de Ponta Grossa. (d) Áreas de coleta das amostras (IAPAR - Ponta Grossa, Brasil). Plantio Direto: PD, Plantio Convencional: PC, Plantio Cultivo Mínimo: PM e F: Floresta Secundária.



Fonte: O autor.

O PC foi preparado com auxílio de um arado de discos de 25 cm de profundidade seguido de duas gradagens leves com discos niveladores. Esse procedimento foi realizado duas vezes ao ano. A parcela que compreende o PD foi submetida apenas as operações de limpeza e semeadura. O PM foi preparado usando um escarificador com operações de profundidade de 25 cm e discos de corte de 10 cm, visando manter os resíduos da cultura na superfície do solo. A área sob F foi utilizada como condição ideal para avaliar as mudanças induzidas pelos preparos na estrutura do solo. A área de F está localizada próxima (aproximadamente 200 m) às parcelas experimentais.

As amostras do PC foram coletadas cerca de seis meses após a última preparação do solo e antes da realização de novo preparo. Para cada um dos preparos, as amostras de solo foram coletadas usando cilindros de aço possuindo aproximadamente 5 cm de altura e aproximadamente 5 cm de diâmetro. Um trado do tipo Uhland foi utilizado na coleta. As

amostras foram todas coletadas na fase em que o solo possuía a umidade próxima à capacidade de campo, a qual representa um valor ótimo de umidade para evitar danos na estrutura do solo devido aos procedimentos de amostragem.

Para evitar locais que tenham sofrido compactação do solo, as amostras sob os diferentes sistemas de preparo foram coletadas nas linhas em que se efetua o plantio (aproximadamente 10 cm largura × aproximadamente 10 cm profundidade). Isto se faz necessário porque o tráfego agrícola nas áreas experimentais, para controle de pragas e colheita das culturas de inverno e verão (PM e PD) e às demais operações (PC), pode causar o adensamento do solo.

2.2.2 Aquisição e Segmentação das Imagens de μTC

As amostras de solo foram escaneadas usando um microtomógrafo de raios X modelo v|tomex|m (GE Measurement & Control Solutions, Wunstorf, Germany) no laboratório da "Hounsfield Facility", "The University of Nottingham" (Sutton Bonington, Reino Unido), operando com tensão de 180 kV, corrente de 160 μA e tempo de aquisição de cada imagem de 250 ms. Para evitar as sobreposições dos níveis de cinza as imagens foram reconstruídas em 32 bits.

As regiões de interesse foram selecionadas de 0,7 a 1 cm distantes das bordas das imagens para evitar na análise a influência do efeito de possíveis danos na estrutura do solo durante o processo de amostragem. A resolução das imagens foi de 35 μm. Um total de 860 imagens foram utilizadas para gerar um volume de interesse (VOI) de 30×30×30 mm^3 (860×860×860 *voxels*). As imagens foram incialmente processadas utilizando o programa Volumetric Graphics (VG StudioMAX® 2.0).

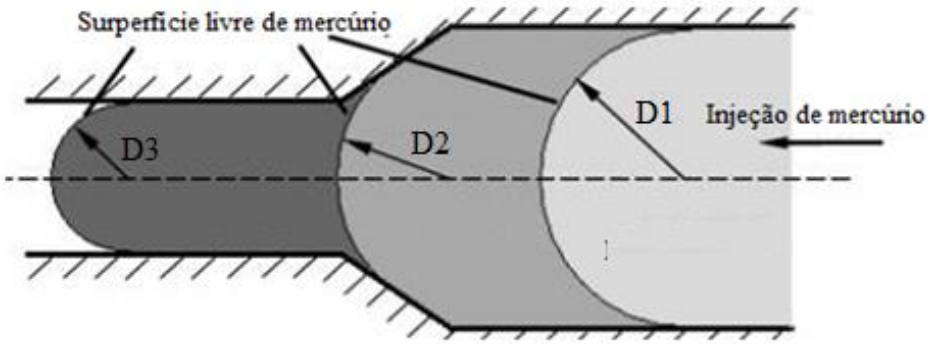
O método de Otsu não parametrizado (ImageJ 1.42) foi empregado no "threshold" e segmentação das imagens 2D. Para aumentar a qualidade da segmentação, as imagens originais (níveis de escala de cinza) foram filtradas visando reduzir possíveis artefatos. O procedimento de máscara de nitidez (desvio padrão de 1 *voxel* e peso 0,8) também foi utilizado neste procedimento. Após o processo de "thresholding", um conjunto de imagens (poros: cor branca – 1; partículas sólidas: cor preta – 0) em formato TIFF foi gerado e utilizado na reconstrução das imagens 3D.

Cada *voxel* analisado nas imagens com formato TIFF possuía um volume de 35^3 μm^3. Dessa forma este foi o volume mínimo de poros identificado nas imagens. Logo, a porosidade acessada pela imagem é essencialmente composta por macroporos (LAL; SHUKLA, 2004).

2.2.3 Simulação para Aquisição das CDPs

A curva de distribuição de tamanho dos poros foi obtida usando o método apresentado em Yang et al. (2009) e Cássaro et al. (2017). O método em questão é baseado no PIM, e segue rigorosamente as seguintes etapas (Figura 2.2): i) na imagem µTC 3D, um poro é preenchido inicialmente por uma semiesfera com diâmetro equivalente D1 (equivalente ao PIM, a semiesfera se assemelha à porção frontal de mercúrio que é introduzida no poro por uma pressão externa adequada). Esse processo continua seção por seção do poro, até que uma região de estreitamento (ou alargamento) seja detectada; ii) existindo um estreitando ou estrangulamento do poro, o diâmetro da semiesfera é reduzido e o contrário é verdadeiro. A identificação dessa transição de calibre dos poros resulta numa modificação no diâmetro da semiesfera para um valor D2; iii) O programa localiza e contabiliza todos *voxels* pertencentes à porção preenchida com cada semiesfera de diâmetro equivalente D encontradas ao longo da amostra.

Figura 2.2 Esquematização das etapas do processo de intrusão por mercúrio no interior de um poro com estreitamento.



Fonte: Adaptado de (YANG et. al., 2009).

As três etapas descritas anteriormente elucidam os passos geométricos que ocorrem durante a técnica do PIM, em que a medida que a pressão do mercúrio aumenta, este é forçado a adentrar e ocupar gradativamente poros cada vez menores. No final do processo, o programa exibe o número de *voxels* relacionados a cada diâmetro equivalente (esfera) encontrado na amostra. Portanto, o programa proposto e desenvolvido por Yang et al. (2009) é sumariamente baseado no método de bola máxima inseridas dentro de um espaço poroso. A CDP (Equação 2.1), será representada pela frequência de poros de diâmetros característicos D detectados durante aplicação do processo sugerido por Yang:

$$\mathrm{CDPs} = \frac{V_D}{V_{Total}} \equiv f(D) \qquad 2.1$$

na qual V_D representa os volumes dos diâmetros característicos detectados e quantificados no volume total (V_{Total}) da amostra selecionada.

O valor mínimo de D contabilizado é limitado pela dimensão do *voxel* (resolução espacial) das imagens. A normalização das CDPs, em termos das suas frequências de diâmetros de poros característicos, foi feita por meio da seguinte equação:

$$\mathrm{CDPs}^{*} = \sum_{i=1}^{N} \frac{f_i(D)}{\sum_{i=1}^{N} f_i(D)} = 1 \qquad 2.2$$

A porosidade acessada entre D1 e D2 (D1>D2) é determinada considerando a área sob a curva da CDP (Equação 2.3):

$$\phi(D_2, D_1) = \left(\sum_{D1}^{D_2} \frac{V_D}{V_{Total}}\right).100 \qquad 2.3$$

Os valores de porosidade acessada ($\phi(D_2, D_1)$) obtida das CDPs foram usados na comparação e complementação das informações adquiridas das CRs. Os resultados desta etapa são apresentados na Tabela 2.1. Para maior detalhamento da análise do sistema poroso (Equação 2.2) foram selecionados cinco intervalos de diâmetros equivalentes de poros, conforme a classificação de meso e macroporos, sendo eles (BREWER, 1964): <100 μm, 100–300 μm, 300–500 μm, 500–1000 μm e 1000–3000 μm.

No caso deste estudo, os poros foram ainda caracterizados de acordo com suas funcionalidades: poros com diâmetros entre 50 e 500 μm foram considerados poros de transmissão ao passo que os poros >500 μm foram classificados como fissuras, segundo o sistema de classificação proposto por Greenland (1981). O cálculo das áreas sob as CDPs foram considerados para o cálculo das porosidades acessadas para os limites de tamanhos de acordo com a funcionalidade dos poros (50–500 μm e >500 μm).

2.2.4 Curva de Retenção de Água

A curva de retenção de água experimental (CR_{Exp}) foi obtida utilizando-se uma mesa de tensão da EijKelkamp® nos potencias matriciais (Ψ) de -1 a -10 kPa, medidos em intervalos de -1 kPa. Os diâmetros de poros equivalentes por este método foram calculados usando a equação de Young-Laplace (equação 2.4):

$$D = \frac{298}{|\Psi|} \qquad 2.4$$

em que D representa o diâmetro equivalente dos poros (μm) (assumindo um tubo capilar cilíndrico) e $|\Psi|$ o valor absoluto do potencial matricial no solo (kPa).

Para obtenção da curva de retenção por meio da CDP (CR_{CDP}) utilizou-se a soma acumulada das frequências de poros de diâmetros característicos das CDPs:

$$CR_{CDP} = \sum_{i=1}^{N}[A_i(N - i + 1) + (\theta_s - A_i)] \qquad 2.5$$

em que N é número total de elementos; A_i é o primeiro elemento e θ_s é a umidade de saturação experimental da amostra.

O modelo de van Genuchten (1980) (VG) com a restrição de Mualem ($m = 1 - \frac{1}{n}$) foi usado no ajuste matemático das CRs (experimental e simulada):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^m} \qquad 2.6$$

em que θ_s e θ_r representam a umidade de saturação e residual, respectivamente; α, n e m são parâmetros de ajustes do modelo VG.

Tabela 2.1 Valores dos parâmetros ajustados pelo modelo VG (equação 2.6) para a área sob floresta secundária (F) e os preparos investigados (PC: Plantio Convencional, PM: Plantio Cultivo Mínimo e PD: Plantio Direto).

Sistemas de preparos	θ_s ($m^3\ m^{-3}$)	θ_r ($m^3\ m^{-3}$)	α (kPa^{-1})	n	m	r^2
F_{VG}	0,58±0,04	0,36±0,02	6,91±7,31	1,26±0,08	0,20±0,05	0,99
PC_{VG}	0,53±0,08	0,34±0,06	1,18±2,00	1,74±0,72	0,43±0,18	0,99
PM_{VG}	0,54±0,04	0,23±0,14	2,29±3,12	1,18±0,28	0,15±0,33	0,99
PD_{VG}	0,57±0,03	0,36±0,06	20,00±9,38	1,23±0,50	0,19±0,19	0,99

Fonte: O autor.
Nota: θ_s e θ_r condizem aos conteúdos volumétricos de água de saturação e residuais, α, n e m são parâmetros de ajustes do modelo VG e r^2 é o coeficiente de determinação. ± indica o desvio padrão da média.

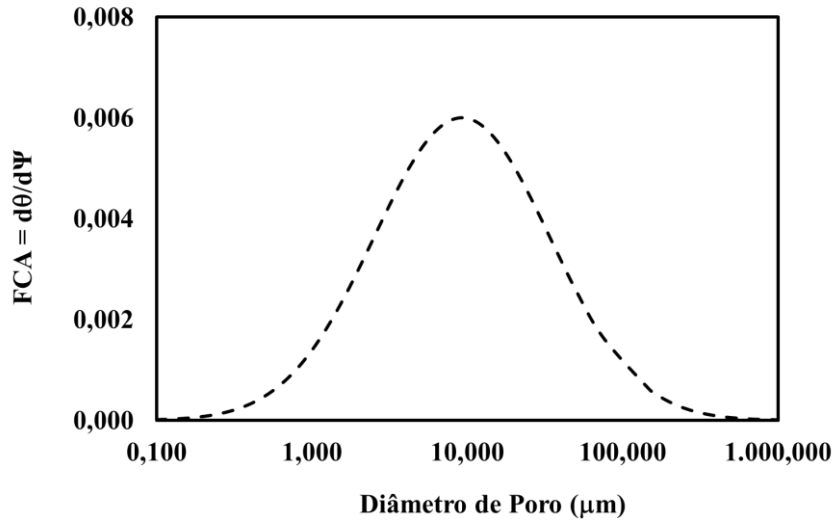
A primeira derivada do modelo matemático de ajuste da CR $\left(\frac{d\theta}{d\Psi}\right)$ representa a função capacidade de água como descrito anteriormente. A FCA foi normalizada (Equação 2.8) seguindo procedimento similar ao apresentado na Equação 2.2:

$$FCA = \frac{d\theta}{d\Psi} = \frac{(\theta_s - \theta_r)mn\alpha(\alpha\Psi)^{n-1}}{[1+(\alpha\Psi)^n]^{m+1}} \quad 2.7$$

$$FCA^* = \sum_{i=1}^{N} \frac{FCA_i}{\sum_i FCA_i} = 1 \quad 2.8$$

Uma FCA típica de pico máximo é apresentada na Figura 2.3, na qual os dados experimentais das CRs foram ajustados pelo modelo matemático log normal, o qual apresenta um comportamento da curva semelhante ao modelo usado neste trabalho.

Figura 2.3 Função de capacidade de água ajustada por um modelo analítico de log normal.



Fonte: O autor.

O software SWRC Fit foi empregado para a realização dos ajustes dos parâmetros para ambas as CRs (SEKI, 2007). Como menciona Seki (2007), o software utiliza o método Levenberg-Marquardt para a estimativa dos mínimos quadrados de parâmetros não lineares. Parâmetros estatísticos como o desvio médio quadrático (σ) e o coeficiente de determinação (r^2) foram utilizados na análise da qualidade matemática do ajuste do modelo de VG.

2.2.5 Análises Estatísticas

Todos os dados das propriedades físicas medidas foram analisadas com base nos seus respectivos valores médios. Análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey (p<0.05) foram aplicados na comparação de diferenças entre as médias obtidas. O programa PAST (PAleontological STatistics), versão 3.21, foi usado para efetuar todas as análises estatísticas (HAMMER et al., 2001).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

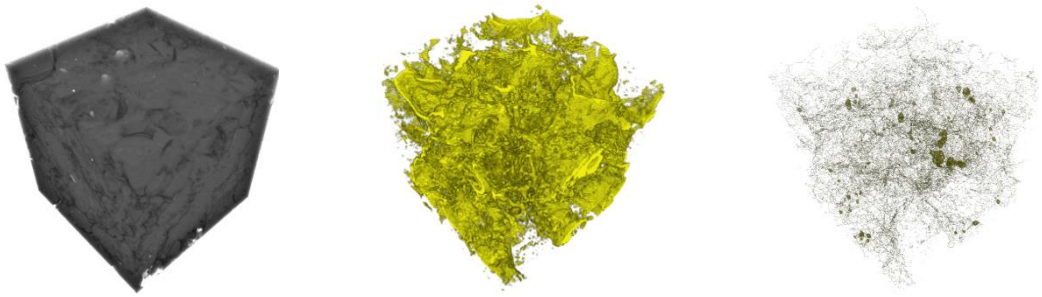
As reconstruções 3D das imagens de microtomografia para amostras referentes a cada preparo e área sob floresta secundária são apresentadas na Figura 2.4. Existe uma grande quantidade de poros principalmente para as amostras sob PC e PM (Figuras 2.4d, g). As amostras submetidas a F e PD, apresentam analisando qualitativamente as imagens, uma menor quantidade de poros (Figuras 2.4a, j). Tais resultados indicam que F e PD talvez apresentem

uma estrutura mais forte quando comparadas ao PC e PM, uma vez que nestes dois últimos preparos os procedimentos de revolvimento do solo induzem uma quebra da estrutura (TAVARES FILHO; TESSIER, 2009). As imagens para o PC, no entanto, mostram que o período de seis meses após o revolvimento das camadas superficiais tendeu a uma reestruturação do solo devido às condições climáticas e possível ação de agentes cimentantes devido as culturas agrícolas (milho e soja) implementadas na área (VEIGA et al., 2009) (Figura 2.4d).

A rede de poros das imagens de μTC corrobora os resultados observados preliminarmente nas imagens reconstruídas. Aparentemente, existe uma grande quantidade de poros que estão conectados nos preparos PC e PM (Figuras 2.4e, h). As amostras sob F e PD, embora com uma menor porosidade aparente, também exibem um sistema poroso bastante conectado (Figuras 2.4b, k). Estes dois últimos preparos apresentam também poros com formatos mais cilíndricos, provavelmente associados à ação da fauna do solo, sendo classificados como bioporos – ação de minhocas e raízes das plantas (CAPOWIEZ; BASTARDIE; COSTAGLIOLA, 2006). Finalmente, as imagens dos esqueletos dos poros certificam uma ideia de sua continuidade em 3D. Aglomerados de poros foram frequentemente observados no PC (Figura 2.4f), seguidos pelos preparos PM, F e PD. Estes aglomerados indicam a presença de poros mais isolados os quais podem estar associados aos procedimentos de revolvimento do solo (PETH et al., 2008) (Figuras 2.4i, c, l).

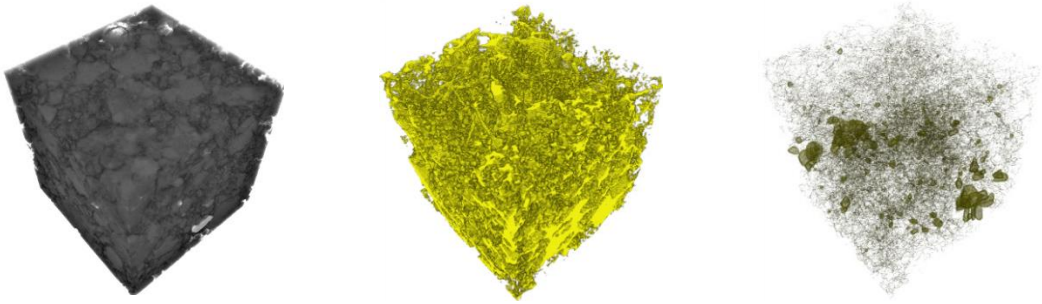
Figura 2.4 (a, d, g, j) Imagens de microtomografia de raios X das amostras de solo reconstruídas tridimensionalmente, (b, e, h, k) da rede de poros das amostras de solo e (c, f, i, l) dos esqueletos da rede de poros das amostras de solo para os sistemas de preparo (PC, PM e PD) estudados e área sob F.

FLORESTA SECUNDÁRIA (F)



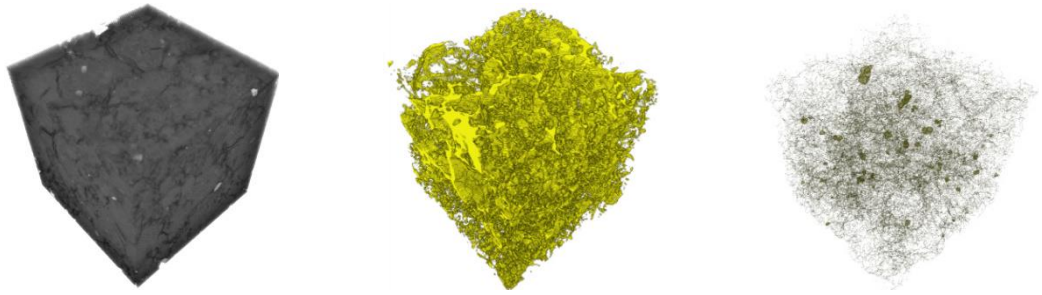
(a) (b) (c)

PLANTIO CONVENCIONAL (PC)



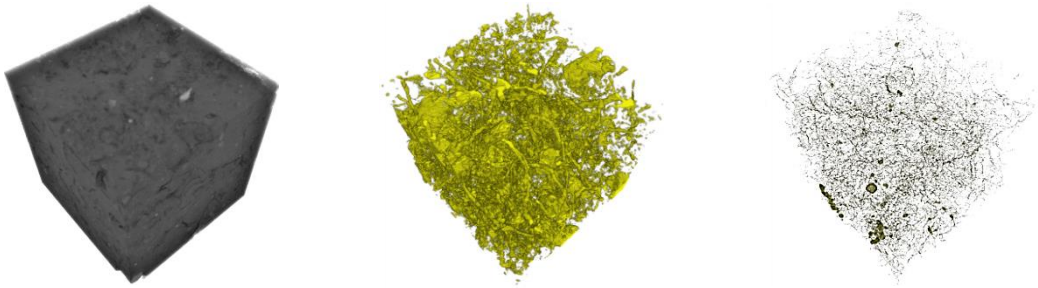
(d) (e) (f)

PLANTIO CULTIVO MÍNIMO (PM)



(g) (h) (i)

PLANTIO DIRETO (PD)

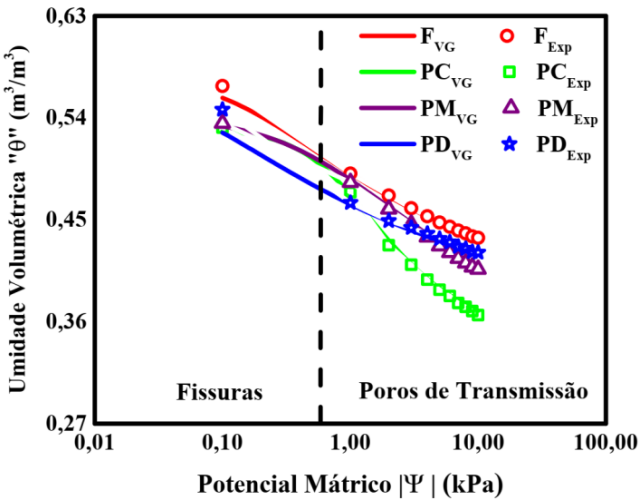


(j) (k) (l)

Fonte: O autor.

Os resultados das CRsExp interpoladas pelo modelo matemático VG são mostradas na Figura 2.5 (VAN GENUCHTEN, 1980). Observa-se que o conteúdo de água próximo à saturação é ligeiramente maior para F e PD em relação a PC e PM (cerca de 10 a 5% maiores, respectivamente) (Tabela 2.1). Esse resultado indica que o solo sob F e PD apresenta porosidades totais maiores comparadas às amostras de PC e PM. Resultados próximos ou iguais aos obtidos foram relatados em Tavares Filho e Tessier (2009), Da Costa et al. (2016) e Borges et al. (2019), e contrários foram encontrados nos trabalhos de Tormena et al. (2002) e Laurindo et al. (2009), nos quais os autores observaram maiores porosidades totais quando o solo foi submetido ao PM e PC, principalmente nas camadas mais superficiais (0-5 cm). Esses autores indicaram que as altas densidades observadas em solos sob PD confrontadas a outros preparos pelo efeito acumulativo do tráfego de máquinas ao longo do tempo foram responsáveis pelos resultados observados.

Figura 2.5 Curvas de retenção de água (CRs) das amostras submetidas a diferentes preparos do solo. (F: Floresta Secundária, PC: Plantio Convencional, PM: Plantio Cultivo Mínimo e PD: Plantio Direto) - Símbolos referem-se aos dados experimentais e linhas contínuas à interpolação desses dados pelo modelo VG.



Fonte: De Oliveira, Cássaro e Pires (2021).
Nota: Barras de erro nas verticais foram omitidas para melhores visualizações gráficas.

Hernández et al. (2019) reportaram que o sistema PD apresentou solo mais compactado quando comparado ao PC e PM nos primeiros 15 cm de camada de solo. No entanto, mesmo sendo solos mais compactados sob F e PD, em geral a estrutura desses sistemas porosos pode apresentar fissuras e bioporos na comparação com o solo quando manejado sob PC (TAVARES FILHO; TESSIER, 2009). Isto indica que mesmo apresentando uma maior densidade, o solo sob PD apresenta uma continuidade positiva dos poros. Solos com maior porosidade total e capacidade de retenção de água na camada superficial (0 - 10 cm) foram observados por Busari et al. (2015) para o PD em relação ao PC. Os autores associaram estes resultados à presença de agregados mais estáveis nos tratamentos sob PD. Todos estes trabalhos indicam que não existe consenso sobre os efeitos dos sistemas de preparo na estrutura do solo para as camadas mais superficiais.

De acordo com os trabalhos de Pagliai; Vignozzi e Pellegrini (2004) e Solgi et al. (2015) todos os preparos estudados e F apresentaram uma estrutura que pode ser considerada extremamente porosa, pois a porosidade total foi superior a 40% que é definido com o valor de referência para este tipo de sistema poroso (Figura 2.5 e Tabela 2.1).

Os poros com tamanhos >500 μm (fissuras) foram os mais abundantes em F (36%) e PD (43%), ao passo que PC e PM exibiram as maiores quantidades de poros <500 μm (poros de transmissão), 49% (PC) e 84% (PM), respectivamente (Figura 2.5). Contudo, como pode ser visto, o PC foi o preparo que apresentou a maior variação no seu conteúdo de água (30% em média) em comparação aos demais tratamentos e F (20% em média) para o intervalo de

potenciais matriciais estudado. Essa variação para a PC ocorreu principalmente pela drenagem de seus poros de transmissão.

De acordo com a equação de Young-Laplace (equação 2.4) os poros menores são sempre mais difíceis de serem esvaziados devido à energia com que a água se encontra retida no solo, porém a quantidade destes poros e também a forma como estão conectados, podem influenciar na drenagem da água. Portanto, além da proporção de poros distribuídos em diferentes tamanhos, outros fatores devem ainda ser considerados quando da análise da dinâmica da água em sistemas porosos complexos.

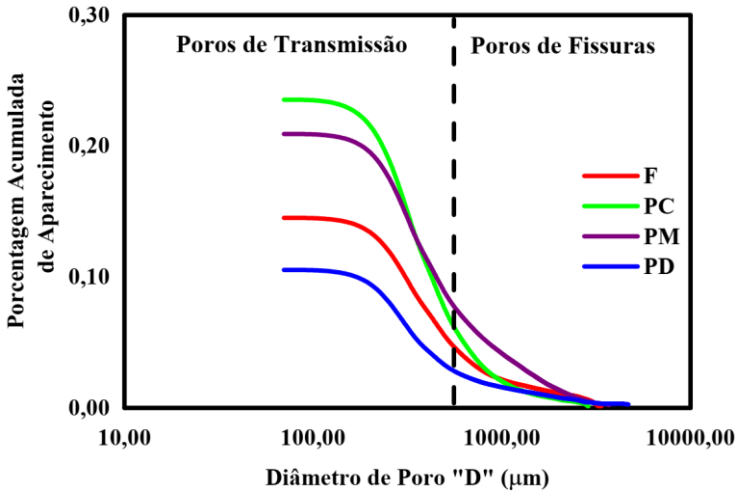
Pires et al. (2019) recentemente observaram que o mesmo tipo de solo estudado aqui pode apresentar diferentes conectividades dos poros devido aos diferentes preparos adotados. Estes autores analisaram a característica de Euler-Poincaré (CEP) e número de Euler (NE) e verificaram que o solo sob PD apresentou uma conectividade menor de seus poros, enquanto que o PC apresentou a maior. O PM apresentou conectividade intermediária. É válido ressaltar que o PM é considerado um sistema intermediário entre o PC e o PD.

Dessa forma, os resultados de conectividade dos poros obtidos por Pires et al. (2019) para o mesmo tipo de solo e área experimental poderia explicar em partes porque o solo sob PC, mesmo com poros com diâmetros característicos menores, foi o tratamento que apresentou maior variação de retenção de água na faixa de potenciais matriciais investigada (até -10 kPa). Esta análise pode ser estendida para o PD, uma vez que foi o preparo que apresentou a menor variação de retenção, mesmo tendo, em média, mais poros com diâmetros característicos maiores.

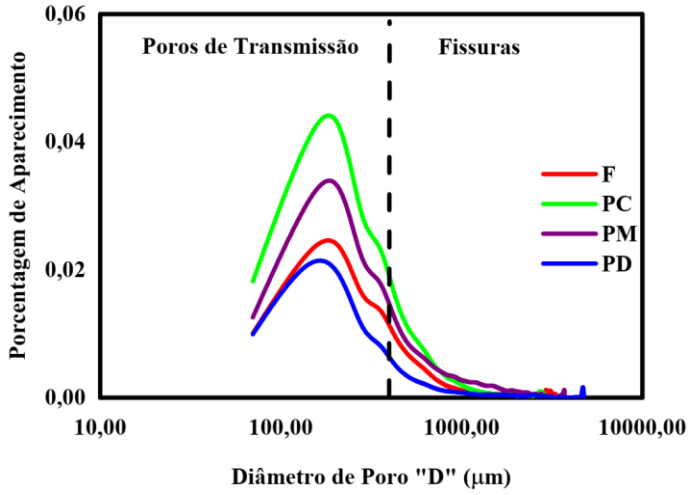
Os resultados do presente estudo indicam que o PC, em menor grau, e o PM promoveram a criação de poros pequenos e mais conectados na matriz do solo comparados com o PD e a F. As semelhanças observadas na distribuição de tamanho de poros nas imagens de μTC para PC e PM corroboram esse resultado (Figuras 2.4f, i). A maior variação de armazenagem de água percebida para o PC também pode ser explicada pelo reconhecimento de que sua porosidade, na faixa de tamanho dos poros investigada, é maior em comparação com os demais preparos (PM e PD) e F (Figura 2.5).

Tendo em vista que as análises das CRs evidenciaram que o solo sob PC, comparado aos demais preparos, foi o que apresentou a drenagem mais expressiva para poros do solo de diâmetros equivalentes <500 μm; para um melhor estudo das características dos poros do solo, aplicou-se o método proposto por Yang et al. (2009) para estudar o solo submetido aos diferentes preparos e área sob F (Figura 2.6).

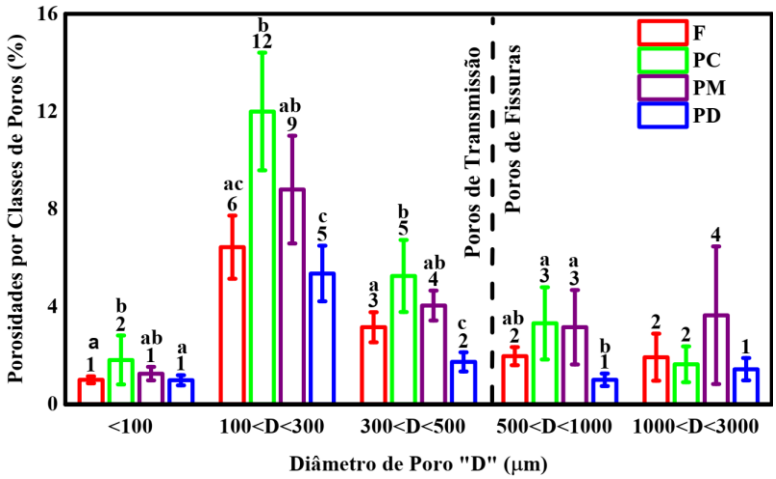
Figura 2.6 (a) Distribuição acumulativa de tamanhos de poros via CDPs. (b) CDPs obtidas por análise de imagens µTC 3D mediante método baseado no PIM. (c) Porosidades advindas das CDPs divididos em classes de tamanhos de diâmetros característicos para os diferentes preparos (PC, PM e PD) e solo sob floresta secundária (F). d <500 µm - poros de transmissão e d >500 µm - poros de fissuras (GREENLAND, 1981).



(a)



(b)



(c)

Fonte: De Oliveira, Cássaro e Pires (2021).
Nota: Barras de erro nas verticais foram omitidas para melhores visualizações gráficas.

O solo sob PC apresentou maior porosidade acessada pela imagem pelo método de Yang, 24% contra 21% do PM, 11% do PD e 14% do F. Comparativamente, PC foi o tratamento que exibiu as maiores quantidades de poros (frequências relativas) para todos os diâmetros equivalentes analisados (Figura 2.6a), especialmente em torno de 190 μm, o qual representa o diâmetro equivalente associado ao pico da CDP (Figura 2.6b).

Os poros de transmissão com diâmetros de 100 - 300 μm e 300 - 500 μm foram cerca de 20% mais abundantes no PC quando comparados ao PM, e cerca de 100% se confrontados a F e PD (Figura 2.6c). O fato do PC ser o preparo de maior porosidade acessada pela imagem pode estar principalmente relacionado aos processos agrícolas (semeadura, aração e gradagem) envolvidos neste tipo de tratamento (TORMENA et al., 2004; LIPIEC et al., 2006; CÁSSARO et al., 2011). As análises, portanto, mostraram que este aumento foi provocado pelo aumento de poros de transmissão (poros com diâmetros característicos abaixo de 500 μm). Poros classificados como fissuras foram mais evidentes no PM quando comparado aos outros tratamentos e F (Figura 2.6a, c). É válido lembrar que a porosidade acessada pela imagem equivale aos poros maiores do que o tamanho de *voxel* mínimo obtido pela microtomografia e não cobre toda a faixa de tamanhos de poros, principalmente os microporos.

Conforme a classificação de Greenland (1977), poros com tamanhos <50 μm são considerados poros de armazenamento que contribuem para o fornecimento de água para as plantas (PAGLIAI; VIGNOZZI; PELLEGRINI, 2004; LAL; SHUKLA, 2004). Poros de transmissão com faixa de tamanhos variando de 50 a 500 μm participam do movimento do ar e são importantes nos processos de infiltração e redistribuição de água (BACQ-LABREUIL et al., 2018). Normalmente, poros com estes tamanhos são contínuos e alongados e os danos à estrutura do solo são geralmente condicionados ao decréscimo da quantidade destes tipos de poros. Poros maiores que 500 μm desempenham papel importante no desenvolvimento das raízes e drenagem da água pelo solo. No entanto, uma maior quantidade deste tipo de poros, por exemplo, mais de 70 - 80% da porosidade total, indicam má qualidade da estrutura do solo, pois a água pode infiltrar rapidamente e atingir o lençol freático transportando contaminantes como pesticidas. A maior porcentagem de fissuras no PC e PM tem como desvantagem a promoção de maiores taxas de infiltração de água no solo. Às vezes, isto pode tornar a água indisponível para as plantas (PIRES et al., 2017; LAL; SHUKLA, 2004). A alta presença de poros de transmissão, principalmente associada à redistribuição, condução e armazenagem da água no solo pode, em certa medida, compensar a menor porosidade aferida por meio da imagem para o PD (HERNÁNDEZ et al., 2019; PAGLIAI; VIGNOZZI; PELLEGRINI, 2004). No presente estudo todos os preparos estudados e F foram caracterizados por um volume

expressivo de poros de transmissão, o que é uma indicação de boa qualidade física do solo (Figura 2.6a).

Os resultados adquiridos pela análise de μTC também são uma indicação do maior grau de heterogeneidade do sistema poroso sob PC em comparação aos demais preparos investigados (PD, PM) e F. Por outro lado, PD foi o preparo que exibiu a menor heterogeneidade na distribuição de tamanho de poros (Figura 2.6a), algo também verificado por Nimmo (2013). O adensamento do solo observado sob PD quando manejado por vários anos devido ao tráfego agrícola também podem auxiliar a explicar este resultado (HERNÁNDEZ et al., 2019; PIRES et al., 2019). As curvas com maiores frequências indicam porosidades mais altas acessadas pela análise de imagens de μTC (Figura 2.6b). Assim, o PC, seguido do PM, F e PD, foi o preparo com maior porosidade acessada pela imagem. No entanto, como as imagens de μTC 3D foram limitadas a uma resolução de 35 μm, como indicado anteriormente, a porosidade analisada para todos os tratamentos e F foi restrita a no máximo 40% (PC) da porosidade observada pela análise da CR.

Sessiz et al. (2008) e Pires et al. (2019) mencionam em seus respectivos trabalhos que solos sob o PC apresentam maiores valores de porosidade induzidos pelos processos de revolvimento do solo (Figuras 2.6a, b). Maiores porosidades do solo são benéficas para o desenvolvimento das culturas agrícolas, pois facilitam o desenvolvimento das raízes das plantas, trocas de gases no solo e aumentam a condutividade hidráulica do solo. Porém, é válido mencionar que a distribuição dos poros por tamanho, o formato e a continuidade dos poros são fatores também muito importantes para a dinâmica da água no solo. Porém, altos valores de porosidade induzidos por processos de revolvimento do solo também podem facilitar a sua compactação, aumento de processos erosivos e promoção da lixiviação de nutrientes (TORMENA et al., 2004).

Vários cientistas do solo consideram o PM (Figuras 2.6a, b) como um tratamento intermediário entre o PC e PD, e frequentemente as características dos poros do solo deste preparo estão entre esses dois últimos preparos (TORMENA et al., 2004; CARVALHO FILHO et al., 2007; ROSSETTO; SANTIAGO, 2007; BALAN et al., 2009).

Contrariamente ao que foi encontrado no presente trabalho em termos de distribuição de tamanho de poros com base na distribuição por tamanho, Kumar et al. (2012) observaram que solos sob PC e PM foram caracterizados por menores quantidades de poros de diâmetros entre 60 e 1000 μm na comparação com o PD. No entanto, resultados similares aos observados aqui, foram encontrados por Borges et al. (2019), De Moraes et al. (2016) e Soracco et al.

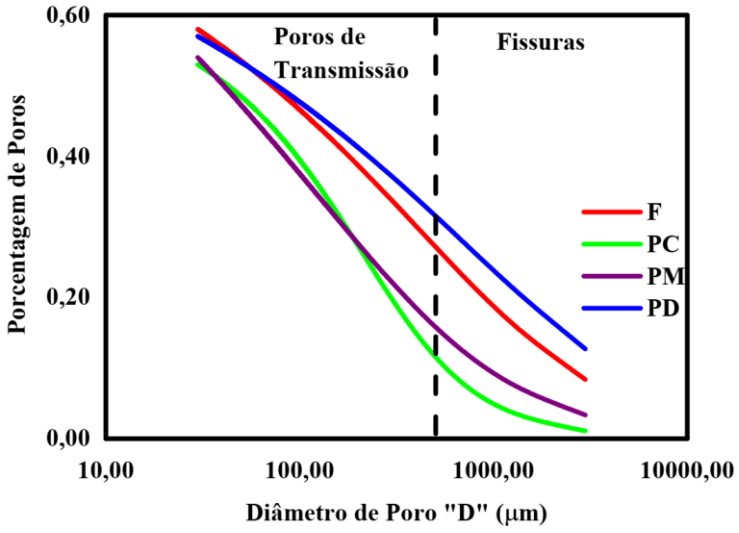
(2012). Todos esses autores verificaram uma maior quantidade de poros no sistema PC quando comparado ao PD, independentemente da distribuição de seus diâmetros característicos.

Camara e Klein (2005) reportaram que o não revolvimento e tráfego de máquinas podem reduzir o número de poros de maiores calibres quando o PD encontra-se sendo manejado desta forma durante vários anos ou décadas, principalmente nas camadas mais superficiais. No caso do estudo aqui apresentado a parcela experimental está sob este sistema de preparo há mais de 35 anos. Eynard et al. (2004) mostraram que os solos sob PD podem ter suas porosidades diminuídas a longo prazo, o que acarreta na redução do número de poros para todos os diâmetros característicos. Este fato pode acarretar na compactação do solo, comprometendo processos de infiltração e redistribuição de água pelo solo, e dificultar o crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas.

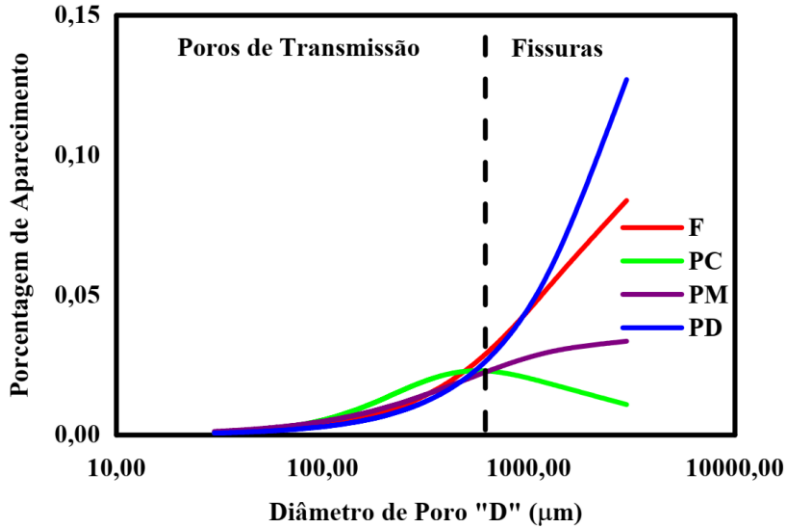
Os resultados das análises das imagens de µTC simuladas pelo método de Yang foram complementados pelas medições das propriedades hidráulicas do solo com base nas CRs (Figura 2.7).

Os resultados que utilizam informações das FCAs mostram que o PC e PM são os sistemas de preparo que, em média, apresentaram maiores quantidades de poros de transmissão (<500 µm), em torno de 78% contra 52% do PD e F, respectivamente. Isso é uma consequência do fato do solo sob PC e PM exibir variações de retenção de água mais pronunciadas para esses tipos de poros, como indicado pelos resultados das CRs (Figura 2.5).

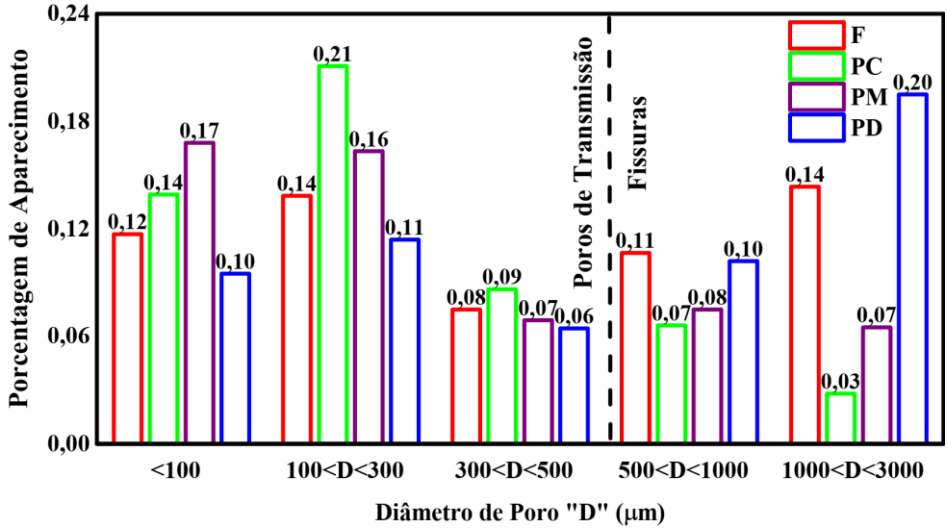
Figura 2.7 (a) Distribuição acumulativa de tamanhos de poros via FCA. (b) CDPs obtidas via função capacidade de água (FCA). (c) Intervalos de tamanho de poros advindos da FCA divididos em classes de diâmetros característicos para os diferentes preparos (PC, PM e PD) e solo sob floresta secundária (F). d <500 µm - poros de transmissão e d >500 µm - poros de fissuras (GREENLAND, 1981).



(a)



(b)



(c)

Fonte: De Oliveira, Cássaro e Pires (2021).
Nota: Barras de erro nas verticais foram omitidas para melhores visualizações gráficas.

O PD e F apresentaram as maiores quantidades de poros com diâmetros característicos entre 500 e 3000 µm (Figuras 2.7b, c). Isto pode ser uma consequência de uma maior presença de bioporos induzidos pela fauna do solo e de canais radiculares normalmente apresentados nesses preparos em comparação com o PC, o qual exibiu a menor quantidade de poros desse tipo (KAY; VANDENBYGAART, 2002; TAVARES FILHO; TESSIER, 2009; KUMAR et al., 2012).

Ferreras et al. (2000), investigando um solo argiloso, mostraram que o PC promoveu um aumento significativo na porcentagem de poros de diâmetros maiores que 20 µm em comparação ao PD. No trabalho aqui apresentado foi observado resultado similar para os poros de transmissão com diâmetros equivalentes entre 100 e 500 µm. No PC, a quantidade de poros

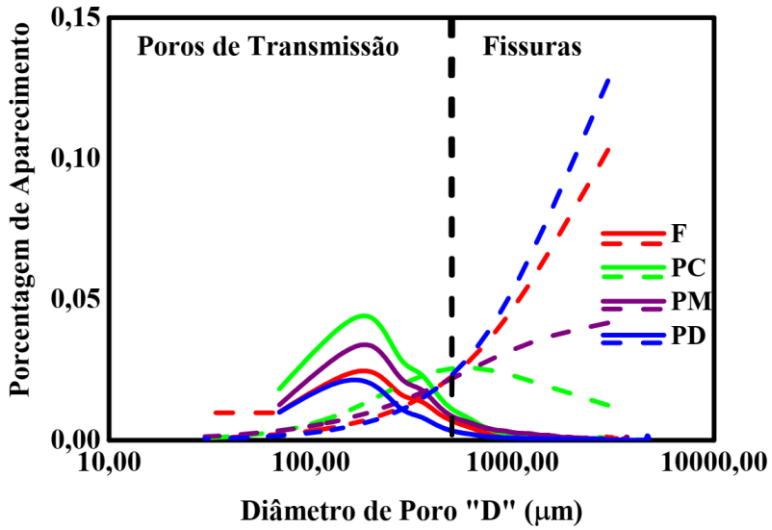
desse tipo representou cerca de 83% da porosidade total, enquanto no PD essa porcentagem foi de 47% (Figura 2.7c).

Calegari et al. (2013), investigando um solo argiloso, mostraram diferenças pequenas na macro e microporosidade do solo quando submetidos a diferentes preparos. Em nosso estudo, diferentemente dos estudos descritos anteriormente, foi observado que 53% da porosidade do PD foi composta de poros com diâmetros maiores que 500 µm (fissuras); no caso do PC a contribuição desses poros foi de apenas 13%.

Quando comparados ambos os métodos de análise (Figuras 2.6b, c e 2.7b, c), há um indicativo de uma prevalência de poros de transmissão no PC em comparação aos demais preparos e F. Isto pode estar associado a processos de compactação do solo frequentemente relacionados a esse tipo de preparo. Em particular, medições usando a porosidade total "ϕ" e a densidade de partículas do solo (ρ_p = 2,41 g.cm^{-3}) indicam que as amostras do solo sob PC apresentaram-se 10% mais densas do que as amostras de F e PD.

Quando combinadas as informações das CDPs usando os métodos de Yang e das FCAs verificou-se que estas são complementares (Figura 2.8).

Figura 2.8 Distribuição do tamanho dos poros obtida a partir da análise 3D µTC com base no método PIM (Yang – linha contínua) e na função de capacidade de água (FCA - linha tracejada).



Fonte: De Oliveira, Cássaro e Pires (2021).
Nota: Barras de erro nas verticais foram omitidas para melhores visualizações gráficas.

Desta forma, o método do Yang foi capaz de complementar as informações obtidas usando a FCA, no sentido de que uma imagem melhor e mais detalhada da estrutura do solo na região de pequenos poros (100 a 500 µm de diâmetro, classificados como poros de transmissão) poderia ser obtida. A porosidade acessada pela imagem para esse preparo (PC) entre os diâmetros característicos de 100 e 500 µm foi cerca de 60% maior que a acessada em F e 14%

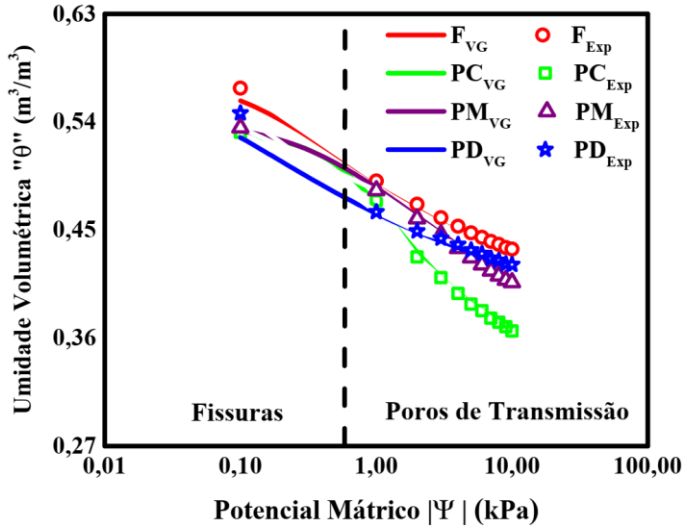
maior que a acessada no PM. O PD apresentou menor quantidade de poros (27%) nessa mesma faixa em comparação a F.

Na abordagem em escala micrométrica, o modelo proposto por Yang mostrou que o solo sob PC e PM apresentou um aumento da quantidade de poros do solo dessa característica em particular, em comparação ao F e PD. Pela análise dos resultados obtidos, ambas as metodologias (CDPs advindas do Yang e das FCAs) indicam que o PD foi o tratamento que apresentou estrutura mais similar ao solo sob F. Em certa medida, não é uma surpresa, uma vez que o PD é caracterizado por ser uma prática considerada conservacionista, e que geralmente não sofre perturbação significativa da estrutura do solo conforme seu arranjo poroso.

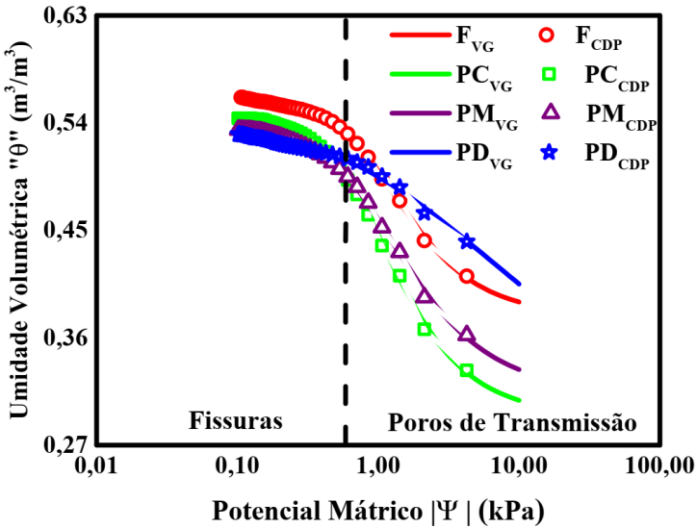
Ressaltamos que, conforme indicado nos resultados obtidos, a ideia deste trabalho não é indicar que a microtomografia é melhor que as metodologias tradicionais, mas sim que essas técnicas podem ser complementares. Por exemplo, o método de Yang possui a vantagem de uma análise direta baseada na estrutura microscópica dos poros, enquanto a abordagem convencional pela FCA permite a obtenção de informações macroscópicas do sistema poroso.

Para finalizar, os resultados referentes às CR_{Exp} e CR_{CDP} (determinadas através da equação 2.5) conjuntamente com os parâmetros de ajustes matemático das CRs pelo modelo matemático de VG são apresentados na Figura 2.9 e Tabela 2.2. Tais resultados têm como finalidade apresentar uma alternativa viável para aquisições de CRs via CDPs oriundas da análise de imagens de μTC 3D pelo procedimento de Yang.

Figura 2.9 (a) Curvas de retenção obtidas na mesa de tensão (CR_{Exp}) e (b) pelas imagens µTC 3D (CR_{CDP}) ambas interpoladas pelo modelo matemático de VG para área de floresta (F) e preparos (PC, PM e PD). Símbolos referem-se aos dados adquiridos e linhas contínuas à interpolação desses dados pelo modelo VG.



(a)



(b)

Fonte: De Oliveira, Cássaro e Pires (2021) e o autor.
Nota: Barras de erro nas verticais foram omitidas para melhores visualizações gráficas.

Tabela 2.2 Valores dos parâmetros ajustados pelo modelo VG (equação 2.6) para F e preparos investigados para as CRs experimentais (mesa de tensão) e CRs advindas das CDPs via equação 2.5.

Sistemas de preparos	θ_s ($m^3\ m^{-3}$)	θ_r ($m^3\ m^{-3}$)	α (kPa^{-1})	n	m	r^2
F_{Exp}	0,58±0,04	0,36±0,02	6,91±7,31	1,26±0,08	0,20±0,05	0,99
F_{CDP}	0,56±0,02	0,38±0,06	1,06±0,40	2,12±0,35	0,53±0,12	0,99
PC_{Exp}	0,53±0,08	0,34±0,06	1,18±2,00	1,74±0,72	0,43±0,18	0,99
PC_{CDP}	0,55±0,03	0,29±0,03	1,23±0,39	2,15±0,26	0,53±0,06	0,99
PM_{Exp}	0,54±0,04	0,23±0,14	2,29±3,12	1,18±0,28	0,15±0,33	0,99
PM_{CDP}	0,54±0,05	0,31±0,10	1,18±1,87	1,93±0,41	0,48±0,12	0,99
PD_{Exp}	0,57±0,03	0,36±0,06	20,00±9,38	1,23±0,50	0,19±0,19	0,99
PD_{CPD}	0,53±0,01	0,00±0,18	1,15±0,31	1,11±0,41	0,10±0,18	0,98

Fonte: O autor.
Nota: θ_s e θ_r condizem aos conteúdos volumétricos de água de saturação e residuais, α, n e m são parâmetros de ajustes do modelo VG e r^2 é o coeficiente de determinação. ± indica o desvio padrão da média.

As CRs derivadas do método tradicional e as obtidas das CDPs simuladas baseadas nas imagens de μTC 3D apresentam boa concordância entre si, como mostrado nas Figuras 2.9a e b (CÁSSARO et al., 2017). Esse fato também é corroborado pelos valores dos parâmetros apresentados na Tabela 2.2, principalmente pelas proximidades das umidades de saturação e residual obtidas entre os métodos. Nessa mesma tabela é possível verificar a ótima qualidade do ajuste do modelo matemático considerando os altos valores dos coeficientes de determinação (r^2).

Para ambas as CRs, para todos os tratamentos e área sob floreta secundária, houve diferenças na região de poros maiores (fissuras), principalmente para PM e PC, o que está provavelmente associado à presença de macroporos mais conectados (PIRES et al., 2019; GALDOS et al., 2019). Os processos de revolvimento do solo afetaram exclusivamente os poros de tamanhos intermediários (poros de transmissão), influenciando principalmente os poros relacionados à redistribuição, condução e armazenagem de água (PIRES et al., 2014). Dessa forma, é importante mencionar que, independentemente do preparo, a abordagem de Yang foi eficiente na modelagem da retenção de água pelo solo.

CONCLUSÕES

O algoritmo baseado no PIM foi apropriado para quantificar a distribuição de tamanhos de poros via análise de imagens de μTC 3D para os diferentes preparos (PC, PM e PD) e área sob floresta secundária (F). Esse procedimento computacional foi ainda capaz de revelar detalhadamente as modificações produzidas pelos diferentes preparos no sistema poroso do solo. Por meio da análise de imagens, verificou-se que o solo sob PC seguido do PM foi o que produziu as alterações mais significativas no sistema poroso do solo. Observou-se que o volume de poros de transmissão (diâmetros entre 100 e 500 μm) aumentou cerca de 60% em relação a F e 14% na comparação com o PM.

Analisando os resultados para ambos os métodos, análise de imagens associadas as CRs, verificou-se que o PD foi o preparo que menos sofreu alterações na estrutura quando comparado à área sob F. Além disso, as CDPs obtidas por ambos os métodos (tradicional e simulação computacional) revelaram que o PM tem um comportamento intermediário entre o PC e PD. A menor porosidade acessada pela imagem foi encontrada para o PD acompanhada pela F, porém sem diferenças estatísticas significativas entre eles.

As CRs medidas direta e indiretamente também foram capazes de identificar diferenças entre os sistemas de preparo estudados. Para os intervalos de potenciais matriciais analisados (-1 a -10 kPa), o solo sob PC apresentou as maiores e mais importantes alterações em termos de retenção de água. As maiores variações foram constatadas principalmente para os poros de transmissão presentes no PC em comparação aos outros tratamentos estudados.

Finalizando, verificou-se que o uso do processo de simulação baseado no PIM foi bastante satisfatório na obtenção das CRs parciais para os solos sob diferentes preparos. Dessa forma, a metodologia possibilita aquisições de dados sobre propriedades físico-hidráulicas do solo mais rapidamente (horas ou dias) que os métodos tradicionais normalmente utilizados.

REFERÊNCIAS

BACQ-LABREUIL, A. et al. Effects of cropping systems upon the three-dimensional architecture of soil systems are modulated by texture. **Geoderma**, v. 332, p. 73-83, 2018.

BORGES, J. A. R. et al. X-ray computed tomography for assessing the effect of preparation systems on topsoil morphological attributes. **Soil and Tillage Research**, v. 189, p. 25-35, 2019.

BREWER, R. **Fabric and Mineral Analysis of Soils**. Wiley, New York, 1964.

BUSARI, M. A. et al. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3, n. 2, p. 119-129, 2015.

CALEGARI, A. et al. Influence of soil management and crop rotation on physical properties in a long-term experiment in Paraná, Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 44, n. 13, p. 2019-2031, 2013.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 789-796, 2005.

CAPOWIEZ, Y.; BASTARDIE, F.; COSTAGLIOLA, G. Sublethal effects of imidacloprid on the burrowing behaviour of two earthworm species: modifications of the 3D burrow systems in artificial cores and consequences on gas diffusion in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 2, p. 285-293, 2006.

CARVALHO FILHO, A. et al. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 229-237, 2007.

CÁSSARO, F. A. M. et al. Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 111, n. 2, p. 175-179, 2011.

CÁSSARO, F. A. M. et al. Pore-size distributions of soils derived using a geometrical approach and multiple resolution microCT images. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 3, p. 468-476, 2017.

DA COSTA, A. B. F. et al. Physical and hydraulic properties of a Latosol influenced by land use and management changes. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 34, p. 3217-3226, 2016.

DE MORAES, M. T. et al. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 351-362, 2016.

DE OLIVEIRA, J. A T.; CÁSSARO, F. A. M.; PIRES, L. F. Quantification of the pore size distribution of a Rhodic Hapludox under different preparation systems with X-ray microtomography and computational simulation. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104941, 2021.

DONG, H. et al. Relationship between the Size of the Samples and the Interpretation of the Mercury Intrusion Results of an Artificial Sandstone. **Materials**, v. 11, n. 2, p. 201, 2018.

DOS SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EYNARD, A. et al. Porosity and pore-size distribution in cultivated Ustolls and Usterts. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1927-1934, 2004.

FERRERAS, L. A. et al. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern “Pampa” of Argentina. **Soil and Tillage Research**, v. 54, n. 1-2, p. 31-39, 2000.

FERREIRA, T. R. et al. Lime application effects on soil aggregate properties: use of the mean weight diameter and synchrotron-based X-ray μCT techniques. **Geoderma**, v. 338, p. 585-596, 2019.

GABRIEL FILHO, A. 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, n. 6, 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.

GREENLAND, D. J. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent? **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences**, v. 281, n. 980, p. 193-208, 1977.

GREENLAND, D. J. Soil management and soil degradation. **Journal of Soil Science**, v. 32, n. 3, p. 301-322, 1981.

HAMMER, Ø. et al. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, p. 9, 2001.

HERNÁNDEZ, T. D. B. et al. Assessment of long-term tillage practices on physical properties of two Ohio soils. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 270-279, 2019.

KAY, B. D.; VANDENBYGAART, A. J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. **Soil and Tillage Research**, v. 66, n. 2, p. 107-118, 2002.

KUMAR, S. et al. Long-term tillage and crop rotations for 47–49 years influences hydrological properties of two soils in Ohio. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 6, p. 2195-2207, 2012.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of Soil Physics**. CRC Press, 2004. 528 p.

LAURINDO, M. C. O. et al. Atributos físicos do solo e teor de carbono orgânico em sistemas de plantio direto e cultivo mínimo. **Engenharia na Agricultura**, v. 17, n. 5, p. 367-374, 2009.

LI, P.; SHAO, S. Can X-ray computed tomography (TC) be used to determine the pore-size distribution of intact loess? **Environmental Earth Sciences**, v. 79, n. 1, p. 1-12, 2020.

LIPIEC, J. et al. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 2, p. 210-220, 2006.

NIMMO, J. R. Porosity and Pore Size Distribution. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**, Elsevier, 2013.

NITSCHE, P. R. et al. **Atlas climático do estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 2019.

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.

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.

PIRES, L. F. et al. Porosity distribution by computed tomography and its importance to characterize soil clod sam ples. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 92, p. 37-45, 2014.

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

PIRES, L. F. et al. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 197-206, 2019.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. Cultivo mínimo. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Brasília**, DF. 2007a

SEKI, K. SWRC fit–a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 4, n. 1, p. 407-437, 2007.

SESSIZ, A. et al. Tillage effects on sunflower (Helianthus Annuus, L.) emergence, yield, quality, and fuel consumption in double cropping system. **Journal of Central European Agriculture**, v. 9, n. 4, p. 697-709, 2008.

SILVA, G. L. et al. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, v. 167, p. 61-70, 2011.

SOLGI, A. et al. Soil compaction and porosity changes caused during the operation of Timberjack 450C skidder in northern Iran. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 36, n. 2, p. 217-225, 2015.

SORACCO, C. G. et al. Contribution of macroporosity to water flux of a soil under different tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1149-1156, 2012.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Characterization of soil structure and porosity under long-term conventional tillage and no-tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1837-1844, 2009.

TORMENA, C. A. et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.

TORMENA, C. A. et al. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e**

Ambiental, v. 8, n. 1, p. 65-71, 2004.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VEIGA, M. da et al. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a southern Brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1437-1446, 2008.

YANG, Z. et al. An image-based method for obtaining pore-size distribution of porous media. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 9, p. 3248-3253, 2009.

YIPING, W. et al. Effect of Cyclic Wetting and Drying on the Microstructure of Slip Zone Soils in Huangtupo Landslide. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, v. 9, n. 4, p. 209-216, 2016.

3 ANÁLISE DE ALTERAÇÕES NA ESTRUTURA POROSA DO SOLO POR CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO USANDO SIMULAÇÃO BASEADA EM IMAGENS DE MICROTOMOGRAFIA

RESUMO

Sistemas porosos como o solo são caracterizados por grande complexidade quando analisados em diferentes escalas, mas principalmente micrométrica. Alterações no sistema poroso do solo podem ser induzidas por ciclos de umedecimento e secamento (U-S) (naturais ou promovidos pelo homem). Técnicas como a microtomografia computada (μTC) são capazes de quantificar de maneira não destrutiva e direta possíveis mudanças no sistema poroso do solo, em escala micrométrica. O objetivo deste trabalho foi utilizar um algoritmo baseado no método de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) para investigar o efeito de ciclos de U-S no sistema poroso do solo submetido a diferentes sistemas de preparo (plantio convencional – PC, plantio cultivo mínimo – PM e plantio direto – PD). Uma área sob floresta secundária (F) foi utilizada como referência. Os ciclos de U-S foram aplicados nas amostras a fim de se verificar possíveis alterações que a estrutura do solo pode sofrer durante procedimentos de medidas de retenção de água. Os resultados das porosidades acessadas, considerando-se a funcionalidade dos poros mostraram que os ciclos de U-S alteraram significativamente a distribuição de tamanho de poros. O PM foi o preparo que apresentou alterações mais significativas em suas propriedades físicas, em que observou-se que os ciclos de U-S converteram poros de transmissão (50 – 500 μm) em fissuras (>500 μm). No PC houve reduções significativas na quantidade de poros de transmissão, produzidos provavelmente pelas operações de aração e gradagem empregadas neste tipo de preparo. Nossos resultados mostram que dependendo da prática de preparo empregada, o solo responde distintamente aos ciclos de U-S.

ABSTRACT

Porous systems such as the soil are characterized by great complexity when analyzed at different scales, mainly micrometric. Changes in the soil porous system can be induced by wetting and drying cycles (W-D) (natural or man promoted). Techniques such as computed microtomography (μCT) are able to directly quantify possible changes in the soil porous system, on a micrometric scale, in a non-destructive way. The objective of this study was to use an algorithm based on the Mercury intrusion porosimetry method (MIP) to investigate the effect of W-D cycles on the porous system of a soil submitted to different preparation practices (conventional preparation – CT, minimum preparation planting – MT, no preparation – NT). An area of secondary forest (F) was used as reference. The W-D cycles were applied to the samples in order to verify possible changes that the soil structure may undergo during water retention measurement procedures. The results of the porosities accessed considering the pore functionality showed that the W-D cycles significantly altered the pore distribution by size. MT was the preparation that showed the most significant changes in its physical properties, where it was observed that W-D cycles converted transmission (50 – 500 μm) pores in fissures (>500 μm). In the CT there were significant reductions in the volume of transmission pores, indicating the effect of ploughing and harrowing operations for this preparation type. Our results show that depending on the preparation practice adopted the soil responds differently to the W-D cycles.

3.1 INTRODUÇÃO

Solos em condições naturais, como os que são encontrados em áreas sob mata nativa ou floresta secundária, geralmente são caracterizados por arranjos de poros complexos, principalmente nas camadas superficiais, em que a flora e a fauna têm uma ação mais intensa na dinâmica dos processos de troca de energia e matéria que ocorrem neste meio poroso. Solos submetidos a diferentes práticas de preparo tendem a apresentar modificações em seus espaços porosos devido às ações dos implementos agrícolas utilizados para prepará-los e devido à introdução das culturas na área (BOYLE: POWERS, 2013; BODNER et al., 2013a, 2013b).

Ciclos de umedecimento e secamento (U-S) representam importantes processos de modificação da estrutura do solo e, consequentemente, do sistema poroso. Esses ciclos podem ser naturais, como nos eventos que envolvem precipitação pluvial, ou artificiais como na agricultura irrigada. Inúmeras propriedades físicas, tais como, densidade, porosidade, macroporosidade, distribuição de tamanho e formato dos poros, são geralmente afetadas por esses ciclos de U-S (PIRES et al., 2008, 2009; BODNER et al., 2013a; YIPING et al., 2016; DIEL et al., 2019).

Dependendo do método escolhido para as medidas experimentais, a determinação da mensuração de retenção de água também poderá envolver a aplicação de vários ciclos de U-S nas amostras de solo (BACCHI et al., 1998; JAYANTH; IYER; SINGH, 2012). Jayanth; Iyer e Singh (2012) e Al-Kayssi (2016) reportam que as curvas de retenção (CR) de água no solo são fortemente influenciadas e até mesmo alteradas pelos processos de umedecimento e secamento. Por essa razão, as amostras podem sofrer alterações em sua estrutura devido a esses ciclos durante o procedimento de levantamento da CR, principalmente em escala micrométrica.

Metodologias que utiliza a análise de imagens, como a microtomografia (μTC), têm sido comumente utilizadas na análise micromorfológica de sistemas porosos complexos e dinâmicos como é o caso do solo (BORGES; PIRES, 2012; DIEL; VOGEL; SCHLÜTER, 2019; GALDOS et al., 2019; PIRES et al., 2017, 2019). Essa técnica tem possibilitado a quantificação e estimativa da porosidade baseada em imagens, a obtenção de curvas de distribuição de tamanho de poros (CDPs) e a caracterização do sistema poroso do solo com base na funcionalidade dos poros (CAPOWIEZ et al., 1998; VOGEL; ROTH, 2001; PETH et al., 2008; BORGES; PIRES; PEREIRA, 2012; FERREIRA et al., 2019).

Os métodos de análise de imagens baseados em dados de imagens de μTC em três dimensões (3D) possibilitam ainda a proposição de modelos para o estudo da distribuição, da morfologia dos poros, do movimento e da retenção de fluidos (líquido/gás) no interior dos

poros, da complexidade do sistema poroso (tortuosidade e conectividade), entre outros tipos de estudos que necessitam caracterizações 3D em escala micrométrica (YANG et al., 2009; PIRES et al., 2013; YANG et al., 2014; CALISTRU; JITĂREANU, 2015; DIEL; VOGEL; SCHLÜTER, 2019).

Inúmeros pesquisadores têm concentrado esforços na realização de simulações computacionais baseadas em imagens de μTC visando a quantificação das propriedades físicas de sistemas porosos (GARBOCZI; BENTZ, 1990; KHAN et al., 2012; YANG et al., 2014). Geralmente, os algoritmos utilizados nessas simulações são baseados em técnicas experimentais como, por exemplo, a porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) (GARBOCZI; BENTZ, 1990; YANG et al., 2009; DO; BISHNOI; SCRIVENER, 2013; DONG et al., 2018). Uma das vantagens dessas simulações é a preservação da estrutura das amostras estudadas, possibilitando a obtenção de propriedades morfológicas importantes para caracterização de meios porosos (PETH et al., 2008; YANG et al., 2009; KHAN et al., 2012 CALISTRU; JITĂREANU, 2015; DONG et al., 2018).

O trabalho aqui apresentado constitui uma inovação uma vez que o número de trabalhos que analisam mudanças na estrutura do solo em escala micrométrica e em três dimensões é ainda bastante escasso. Além disso, a análise aqui apresentada leva em consideração que esses ciclos de U-S, realizados para a determinação da CR, podem ter efeitos distintos quando o solo é submetido a diferentes tipos de preparo. O objetivo deste trabalho foi quantificar possíveis mudanças que podem ocorrer no sistema poroso do solo submetido a diferentes sistemas de preparo sob à aplicação de ciclos de U-S baseando-se em imagens de μTC.

O programa computacional desenvolvido por Yang et al. (2009) foi utilizado na obtenção das curvas de distribuição de tamanho de poros com base nos tamanhos de poros. Os poros do solo também foram analisados com base em suas funcionalidades.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Amostras de Solo

As amostras do solo foram coletadas em áreas submetidas a diferentes sistemas de preparo localizadas em uma estação experimental do “Instituto Agronômico do Paraná”, localizado na região sul do Brasil, estado do Paraná na cidade de Ponta Grossa (25° 06’ S, 50° 09’ W; 875 m). O solo é classificado como um Latossolo Vermelho Distrófico de acordo com

Dos Santos et al. (2018). O clima para a localidade é considerado como subtropical úmido (Cfb), conforme a especificação de Köppen com precipitações e temperaturas médias de 1550 mm e 18,5 ºC anuais, respectivamente (NITSCHE et al., 2019).

Os preparos estudados foram plantio convencional (PC), plantio cultivo mínimo (PM) e plantio direto (PD). Uma área sob floresta secundária foi utilizada como referência. Um total de noventa e seis subvolumes 3D foram analisados neste estudo. Doze subvolumes foram estudados para cada sistema de preparo e floresta e outros doze para analisar diferentes quantidades de ciclos de U-S (3 preparos + floresta, 2 ciclos de U-S e 12 subvolumes). Para a coleta das amostras foi utilizado um trado do tipo Uhland sendo a coleta realizada com o solo em sua capacidade de campo e nas entrelinhas após a colheita da cultura do milho nos anos de 2017 e 2018.

3.2.2 Ciclos de Umedecimento e Secamento

Após a coleta, as amostras foram embrulhadas em papel filme, colocadas em porta amostra de plástico cilíndrico, a fim de manterem sua estrutura durante o transporte para o laboratório. O umedecimento das amostras, para a realização do ciclo de umedecimento, foi feito por meio do processo de ascensão capilar com o seguinte procedimento: 1) inicialmente a base das amostras de solo foi imersa em uma lâmina de água de alguns milímetros (5-10 mm); 2) na sequência, adicionou-se novos volumes de água (5 ml) a cada uma hora até a quantidade próximo da altura máxima do cilindro de aço (porta amostras); e 3) finalmente, esperou-se um período de aproximadamente 48 h para que as amostras atingissem a saturação.

Após a etapa de saturação, as amostras foram acondicionadas em uma mesa de tensão da marca EijKelkamp (model 08.01 SanBox) e submetidas ao potencial matricial de -6 kPa até que o equilíbrio termodinâmico fosse atingido (Figura 3.1). Um período de aproximadamente 3 dias foi necessário até que as amostras atingissem o equilíbrio (cessão do gotejamento). Após o equilíbrio termodinâmico, as amostras foram submetidas a uma nova saturação de modo que todo o processo descrito anteriormente foi repetido. As amostras foram submetidas a um total de 12 ciclos de U-S. As amostras consideradas referência (metade dos subvolumes analisados) não foram submetidas a qualquer ciclo de U-S.

Figura 3.1 Amostras de solo acondicionadas na mesa de tensão para aplicação dos ciclos de umedecimento e secamento (U-S) (Laboratório FASCA-UEPG).

Fonte: O autor.

3.2.3 Aquisição e Segmentação das Imagens de μTC

As amostras foram retiradas dos porta amostras, impermeabilizadas com parafina e analisadas usando-se um tomógrafo da marca GE, modelo v|tomex|m (GE Sensing and Inspection Technologies, Wunstorf, Germany) operando com tensão de 180 kV e 160 μA, tempo de aquisição de cada imagem de 250 ms e filtro de Cu de espessura de 0,1 mm para minimizações do efeito de endurecimento do feixe. As imagens foram reconstruídas em 32 bit e as regiões de interesse foram selecionadas entre 7 e 10 mm distantes da borda, para se evitar possíveis efeitos de borda produzidos no processo de coleta das amostras e também na varredura das amostras durante a tomografia.

Na reconstrução 3D do sistema poroso foram utilizadas um total de 1100 fatias 2D por amostra de solo. O tamanho máximo de pixel obtido foi de 35 μm e a região de interesse selecionada foi de 15.1×15.1×38.5 mm^3 (430×430×1100 *voxels*). As amostras em tons de cinza foram analisadas no programa ImageJ 1.42 (RASBAND, 2007). Antes do procedimento de segmentação as imagens foram convertidas em imagens de 8 bits para facilitar esse processo.

A segmentação das imagens foi realizada por meio do método de Otsu não parametrizado. Nessa etapa, as imagens originais (em tons de cinzas) foram submetidas a um filtro do tipo Median 3D com raio de 2,0 pixels visando diminuir possíveis ruídos das imagens. Uma máscara de nitidez com desvio padrão de 1 pixel e peso de 0,8 foi também utilizada para discriminar melhor os poros da fase sólida das amostras. Após a realização destes procedimentos as amostras foram binarizadas com os poros apresentando valor 1. Para finalizar este processo o comando Remove Outliers, foi aplicado visando eliminar possíveis ruídos ainda presentes nas imagens (OTSU, 1979; ALBREGTSEN, 1993).

3.2.4 Simulação via Imagens Microtomográficas 3D para Aquisição das CDPs

As distribuições de poros foram simuladas nas amostras binarizadas utilizando uma adaptação do programa computacional apresentado em Yang et al. (2009).

A lógica de operação do algoritmo é a seguinte: i) identifica-se um poro de diâmetro equivalente inicial D1, o qual é preenchido até que algum estrangulamento do poro ocorra; ii) identificado o estrangulamento, o diâmetro da semiesfera muda, e o programa atribui aos *voxels* dessa nova porção o valor de diâmetro característico D2; e iii) encontrando-se um novo estrangulamento, o diâmetro da semiesfera varia para D3 e assim sucessivamente ao longo do volume do poro. A sequência descrita acima é então baseada na inserção de bolas máximas dentro de um determinado espaço poroso.

A CDP é expressa em termos de volume de *voxels* com um certo diâmetro equivalente característico (V_D) pelo volume total investigado (V_{Total}).

$$\mathrm{CDPs} = \frac{V_D}{V_{Total}} \equiv f(D) \tag{3.1}$$

Como mencionado anteriormente, a área abaixo da CDP, calculada entre o mínimo (D1) e máximo (D2) diâmetro característico identificados, fornece a porosidade acessada no volume total investigado.

$$\phi(D_2, D_1) = \left(\sum_{D1}^{D_2} \frac{V_D}{V_{Total}}\right).100 \tag{3.2}$$

Para melhor análise das modificações causadas pelos ciclos U-S nas CDPs, as porosidades acessadas encontradas foram divididas em cinco intervalos de diâmetros de poros equivalentes segundo a classificação de divisão de meso e macroporos de Brewer (1964): <100 µm, 100 – 300 µm, 300 – 500 µm, 500 – 1000 µm e 1000 – 3000 µm.

As análises baseadas na funcionalidade dos poros foram feitas usando a divisão de poros por tamanho apresentada em Greenland (1981). Em tal classificação, os poros com diâmetros >500 µm são classificados como fissuras ou rachaduras e aqueles com diâmetros entre 50 e 500 µm são caracterizados como sendo poros de transmissão ou condução.

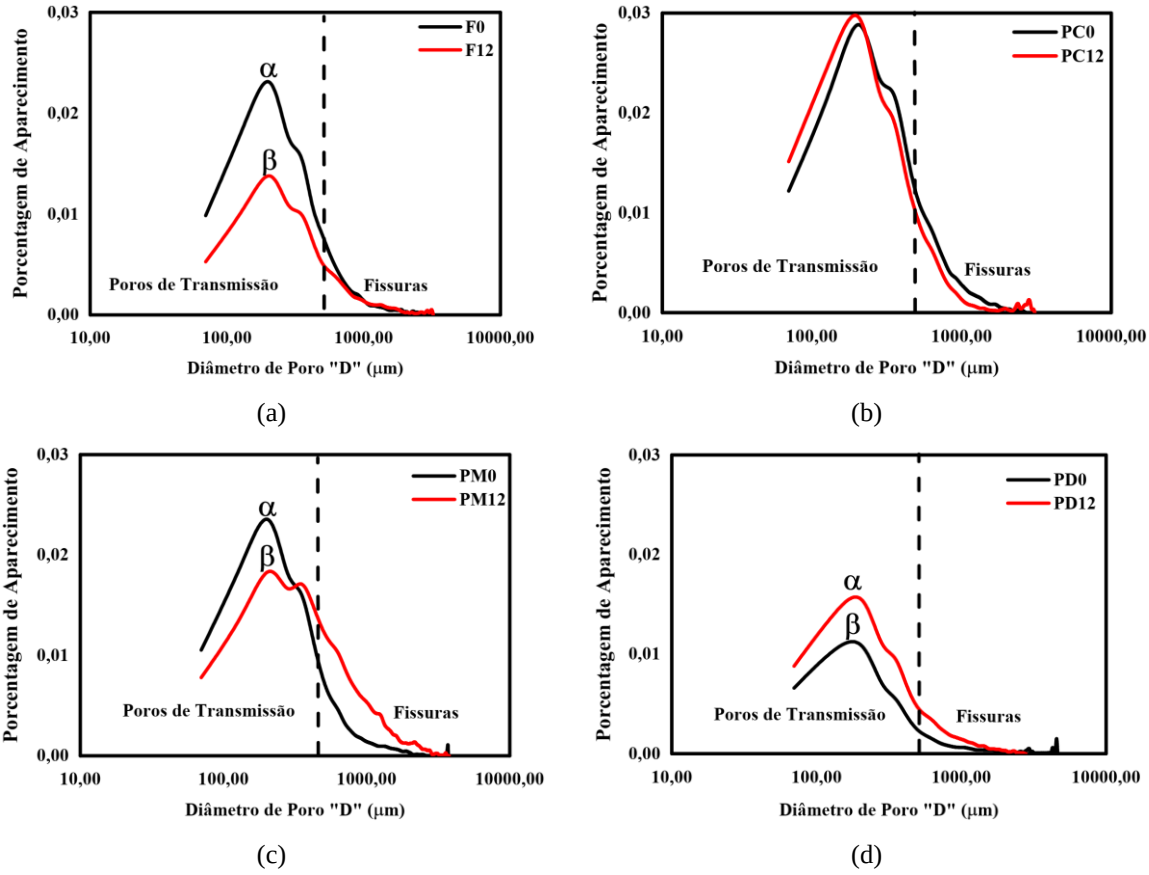
3.2.5 Análises Estatísticas

Análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey ($p<0.05$) foram aplicados aos resultados obtidos para verificar diferenças significativas entre as propriedades físicas investigadas. O programa PAST (PAleontological STatistics), versão 3.21, foi usado para efetuar todas as análises estatísticas (HAMMER et al., 2001). Letras arábicas minúsculas e maiúsculas, e combinações delas, foram usadas para verificação das diferenças estatísticas entre os preparos para cada intervalo de diâmetro de poro sem e com a aplicação de ciclos de U-S, e letras gregas para evidenciação dessas diferenças dentro de cada preparo devido os ciclos de U-S em cada um dos intervalos de diâmetros de poros característicos.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As CDPs das amostras submetidas aos diferentes sistemas de preparo e para a área sob floresta secundária, antes e após a aplicação dos ciclos de U-S, são apresentadas na Figura 3.2.

Figura 3.2 CDPs obtidas pela análise de imagens de μTC 3D mediante o método de simulação baseado na PIM. As amostras foram submetidas a 0 e 12 ciclos U-S. (a) Floresta Secundária-F. (b) Plantio Convencional-PC. (c) Plantio Cultivo Mínimo-PM. (d) Plantio Direto-PD.



Fonte: De Oliveira, Cássaro e Pires (2021).
Nota: Resultados seguidos por letras gregas iguais não diferem estatisticamente entre si nos ciclos aplicados (Teste de Tukey p <0,05). Barras de erro nas verticais foram omitidas para melhores visualizações gráficas.

A aplicação dos ciclos de U-S causou modificações distintas tanto nas amplitudes quanto nos diâmetros característicos das CDPs para os diferentes sistemas de preparo estudados. Para F e PM, os 12 ciclos de U-S produziram diminuições das amplitudes associadas aos poros de diâmetros característicos ao redor de 200 μm, sendo essa redução mais pronunciada para F. No PM, a aplicação dos ciclos contribuiu também para o aparecimento de poros situados na faixa de 350 a 2800 μm, e possivelmente contribuiu para o aumento na porosidade acessada, como será discutido posteriormente (Figuras 3.2a, c). Esses resultados das CDPs para o solo sob F e PM sugerem que o sistema poroso para esses dois tratamentos foi menos estável a mudanças oriundas da aplicação dos ciclos de U-S, principalmente na área sob F (PENG; HORN; SMUCKER, 2007; YU et al., 2015; CHANDRASEKHAR et al., 2019).

No PC (Figura 3.2b), não ocorreram mudanças significativas na estrutura do solo em função dos ciclos de U-S, em contraste com os resultados obtidos para F e PM. Para o PD (Figura 3.2d), os ciclos de U-S ocasionaram aumentos na frequência dos poros desde os

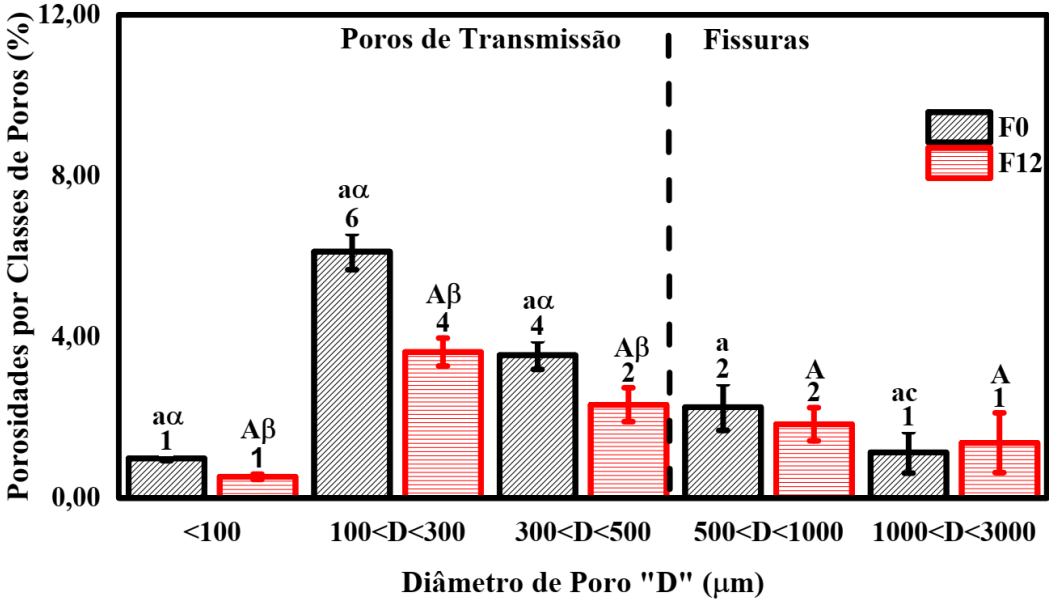
menores até os maiores diâmetros equivalentes (cerca de 1500 μm), influenciando, portanto, no aumento da porosidade acessada pela imagem para as amostras sob este preparo.

Pires et al. (2009), numa análise bidimensional, mostraram que 9 ciclos de U-S aplicados em solos de diferentes texturas promoveram alterações significativas em seus sistemas porosos, o que foi observado nas curvas de distribuição de tamanho de poros analisadas por esses autores. Segundo esses pesquisadores, sucessivos ciclos de U-S promovem a reestruturação dos agregados no solo, modificando, portanto, a distribuição de tamanho de poros no interior da estrutura porosa em amostras coletadas em cilindros.

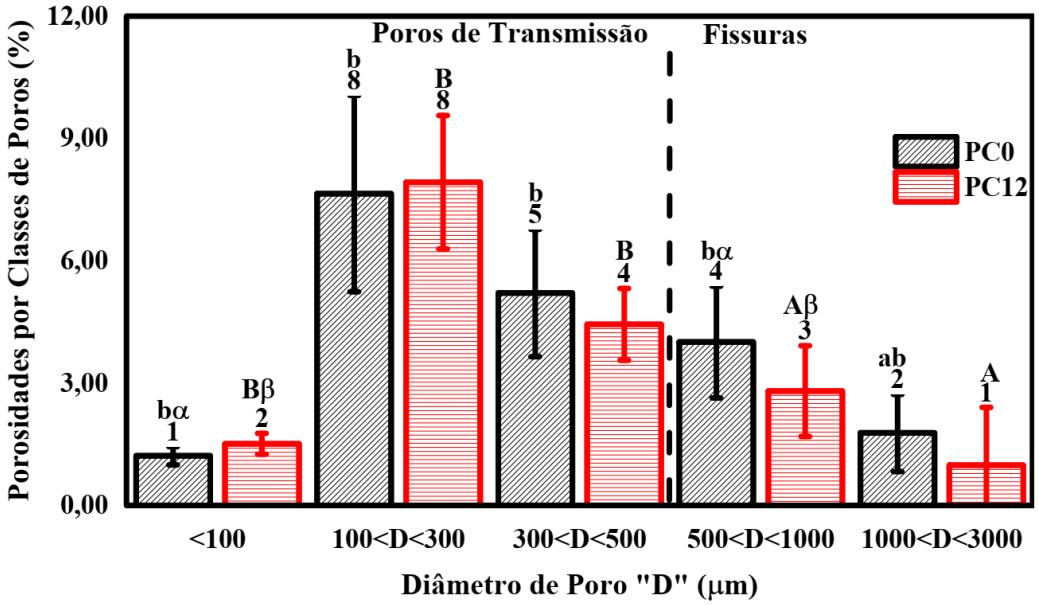
A modificação das CDPs com os ciclos de U-S foi constatada também por Bodner et al. (2013a, b) em estudos de amostras de solo submetidas a diferentes preparos. Esses autores demonstraram que as amostras além de possuírem alta variabilidade, também sofreram alterações significativas de porosidade associadas aos ciclos de U-S. Viana et al. (2004) sugerem que o surgimento de novos poros nas CDPs em latossolos está associado às tensões internas, entre os agregados do solo, provenientes do decréscimo gradativo da umidade das amostras o que causa a retração do volume do solo.

Na Figura 3.3 são apresentadas as modificações produzidas pela aplicação dos ciclos de U-S em termos das diferentes classes de tamanhos de poros.

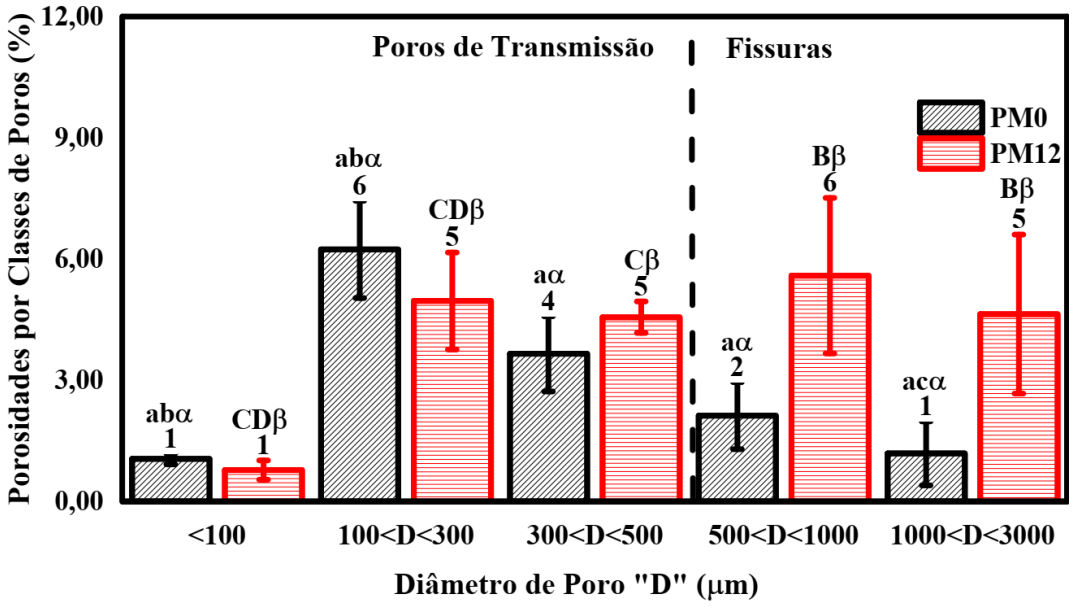
Figura 3.3 Porosidades acessadas pela imagem obtidas via simulação baseada no PIM em imagens µTC 3D divididas em classes de tamanhos de diâmetros característicos. As amostras foram submetidas a 0 e 12 ciclos de U-S. Floresta Secundária-F. Plantio Convencional-PC. Plantio Cultivo Mínimo-PM. Plantio Direto-PD.



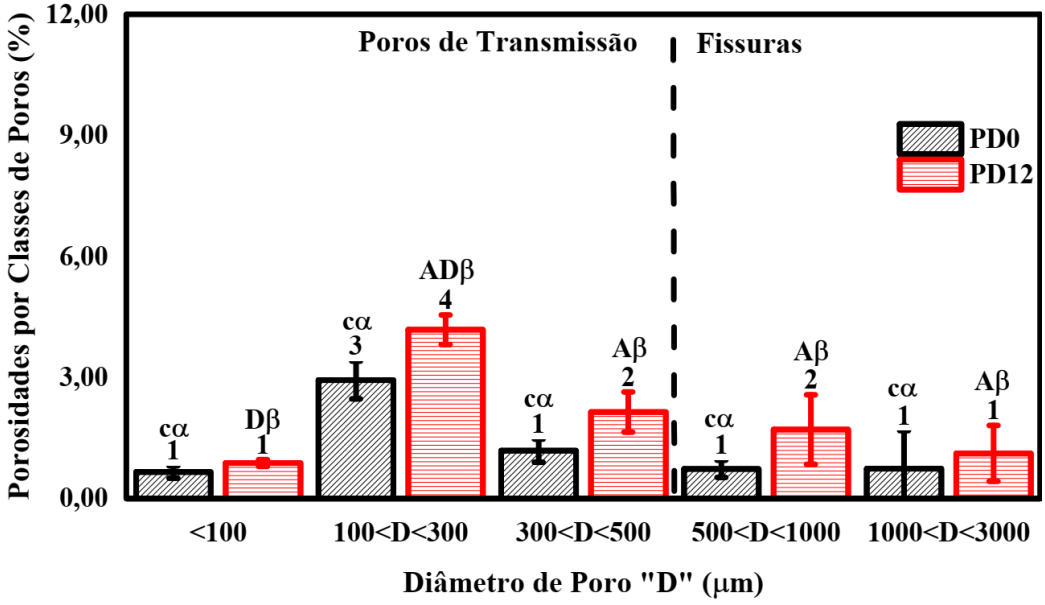
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: De Oliveira, Cássaro e Pires (2021).
Nota: Resultados seguidos pelas mesmas letras em árabe e grego não diferiram entre si pela ANOVA e Teste de Tukey (p <0,05). As comparações foram feitas entre os preparos antes e depois das aplicações dos ciclos U-S (Letras arábicas minúsculas e maiúsculas) e dentro de cada preparo considerando os ciclos U-S (Letras gregas). Barras de erro nas verticais representam os desvios padrões das medidas.

Os resultados mostram que o PM foi o preparo que sofreu as alterações mais significativas na distribuição de tamanho de poros após os 12 ciclos de U-S. Praticamente todas as classes de tamanho de poros analisadas, destacando-se aquelas acima de 500 µm apresentam mudanças importantes (Figura 3.3c). Os poros menores que 300 µm também apresentam diferenças significativas após a aplicação dos ciclos, reduzindo seu volume em torno de 46% em relação a porosidade total acessada.

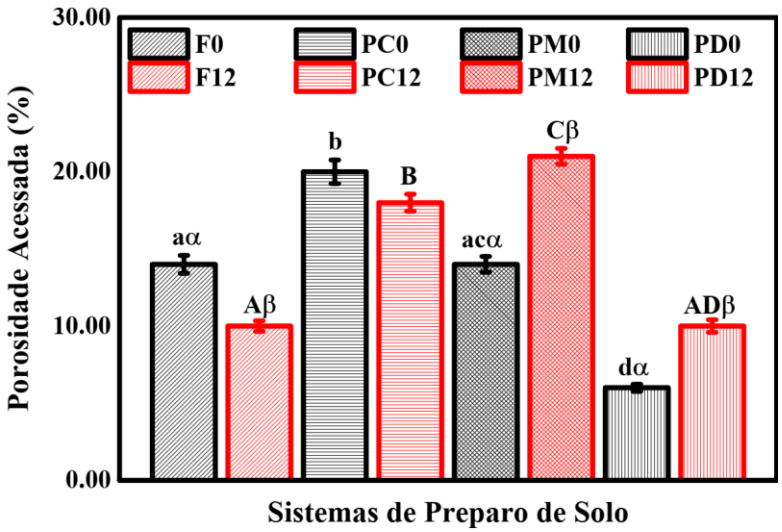
No PD, os ciclos de U-S ocasionaram aumentos na contribuição dos poros de tamanhos médios entre 300 a 1000 μm e dos poros de diâmetros equivalentes menores (Figura 3.3d). Para F, os ciclos de U-S induziram reduções na contribuição dos poros para a porosidade acessada em todas as faixas de tamanho, principalmente aqueles <300 μm (Figura 3.3a). Esse resultado indica que as modificações ocorridas no sistema poroso para F foram principalmente induzidas pela redução nesses tamanhos de poros. No PC, as principais modificações foram observadas para os poros com diâmetros característicos <100 μm e localizados na faixa entre 100 a 300 μm, com um aumento verificado de 28% no total desses diâmetros de poros e decréscimos de 89% nos poros de diâmetros equivalentes maiores (>300 μm).

Assim, as aplicações dos ciclos de U-S para os diferentes preparos estudados e F (Figura 3.3), causaram modificações distintas para cada uma das faixas de poros analisadas, com aumentos ou diminuições nas frequências de poros dependendo do preparo. Este resultado é bastante interessante, porque mostra que não somente a textura do solo exerce influência no sistema poroso do solo devido à aplicação dos ciclos de U-S, mas também a estrutura é extremamente importante. Sistemas de preparo muitas vezes tendem a afetar drasticamente a estrutura do solo.

Segundo Leij; Ghezzehei e Or (2002), durante o processo de secamento, há coalescência dos agregados do solo ocasionando o aumento na frequência das classes de poros de menores de diâmetros, como observado principalmente no solo sob PC. Hillel (2003) afirma que os ciclos de U-S promovem o rearranjo das partículas ou microagregados do solo após seu revolvimento em sistemas considerados não conservacionistas, e, portanto, alterações nas distribuições de tamanhos de poros geralmente são esperadas. Solos revolvidos quando comparados a solos pouco perturbados, como é o caso de F e PD, podem ser mais susceptíveis a mudanças devido aos ciclos de U-S (PAGLIAI et al., 2004; BODNER et al., 2013a, b). Porém, é válido ressaltar que no estudo aqui desenvolvido, as amostras estavam acondicionadas em cilindros, o que também pode limitar as mudanças ocorridas na estrutura do solo devido aos ciclos de U-S.

Os ciclos de U-S, além de causarem modificações na porosidade acessada pela imagem do solo, também afetaram a quantidade de poros responsáveis pela retenção, movimento e redistribuição de água e gases no solo (Figura 3.4).

Figura 3.4 Porosidades acessadas pela imagem obtidas via simulação baseada na simulação pelo PIM em imagens de µTC 3D. As amostras foram submetidas a 0 e 12 ciclos U-S. Floresta Secundária-F. Plantio Convencional-PC. Plantio Cultivo Mínimo-PM. Plantio Direto-PD.



Fonte: De Oliveira, Cássaro e Pires (2021).
Nota: Resultados seguidos pelas mesmas letras em árabe e grego não diferiram entre si pela ANOVA e Teste de Tukey (p <0,05). As comparações foram feitas entre os preparos antes e depois das aplicações dos ciclos U-S (Letras arábicas minúsculas e maiúsculas) e dentro de cada preparo considerando os ciclos U-S (Letras gregas). Barras de erro nas verticais representam os desvios padrões das medidas.

O PC foi o sistema de preparo com maior porosidade acessada pela imagem (20%) seguido pela F (14%), PM (14%) e PD (6%) (Figura 3.4). Proporcionalmente tem-se que a porosidade acessada no PC foi cerca de 40% maior que as de F e PM e cerca de 230% maior que a do PD. Após os 12 ciclos de U-S, F e PC tiveram redução em suas porosidades, a qual foi mais pronunciada em F, cerca de 29%, e 10% no PC. Pagliai, La Marca e Lucamante (1987) e Al-Kayssi (2016) relataram decréscimos das porosidades após aplicações de 11 e 3 ciclos de U-S, respectivamente. As diminuições das porosidades nesses casos, podem estar associadas aos processos de recombinação ou reorganização dos agregados das amostras de solo durante os ciclos de U-S (HORN; DEXTER, 1989, YIPING et al. 2016).

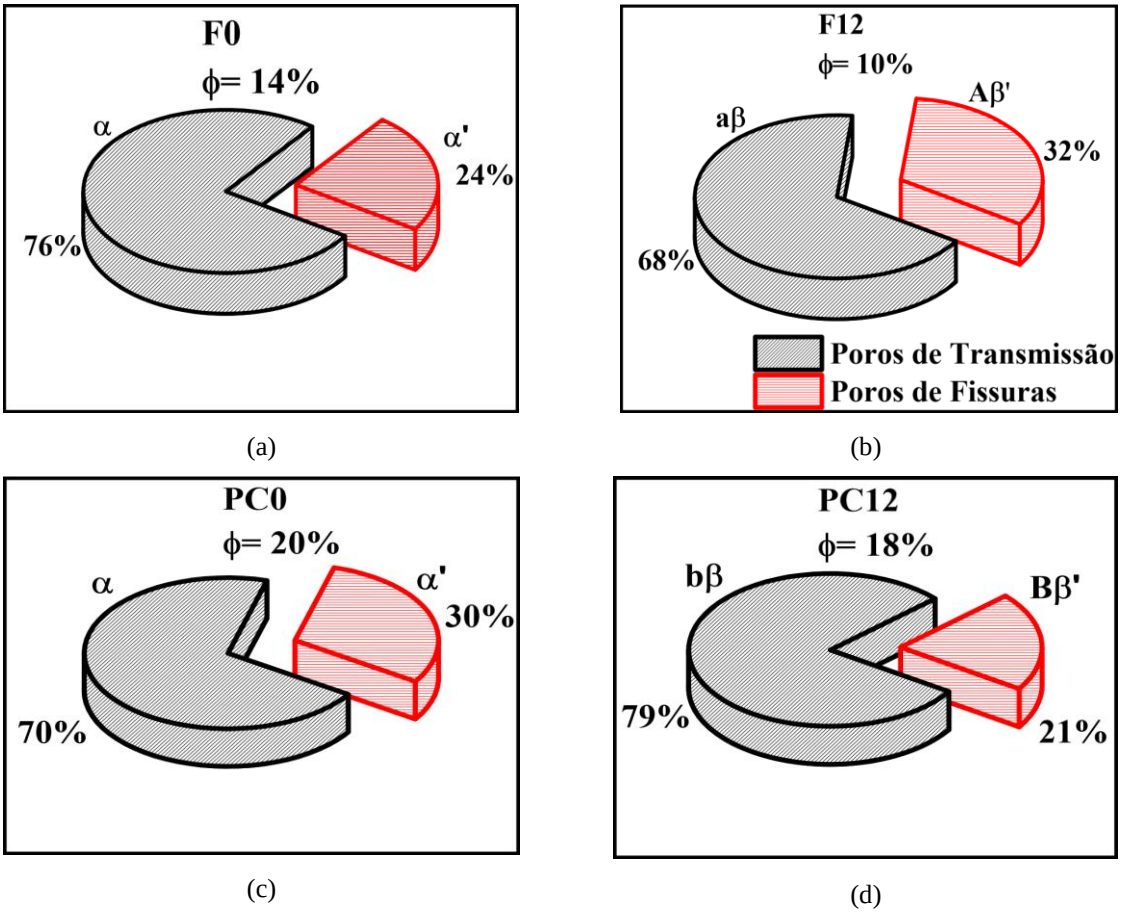
Conforme resultados relatados por Yiping et al. (2016), reduções e aumentos na porosidade são explicados pelos transportes e agregações de partículas sólidas que ocorrem durante o processo de umedecimento, bem como pela expansão (aumento de volume) da amostra de solo indeformada. Segundo esses autores, no secamento das amostras, minerais como ilita e montmorilonita perdem água diminuindo de volume e, portanto, forçando o aparecimento de rachaduras no solo. No entanto, muitas vezes esse tipo de comportamento também pode ser observado em solos não compostos por argilas expansivas (VIANA et al., 2004; CHEN; NG, 2013; ROSENBALM; ZAPATA, 2017).

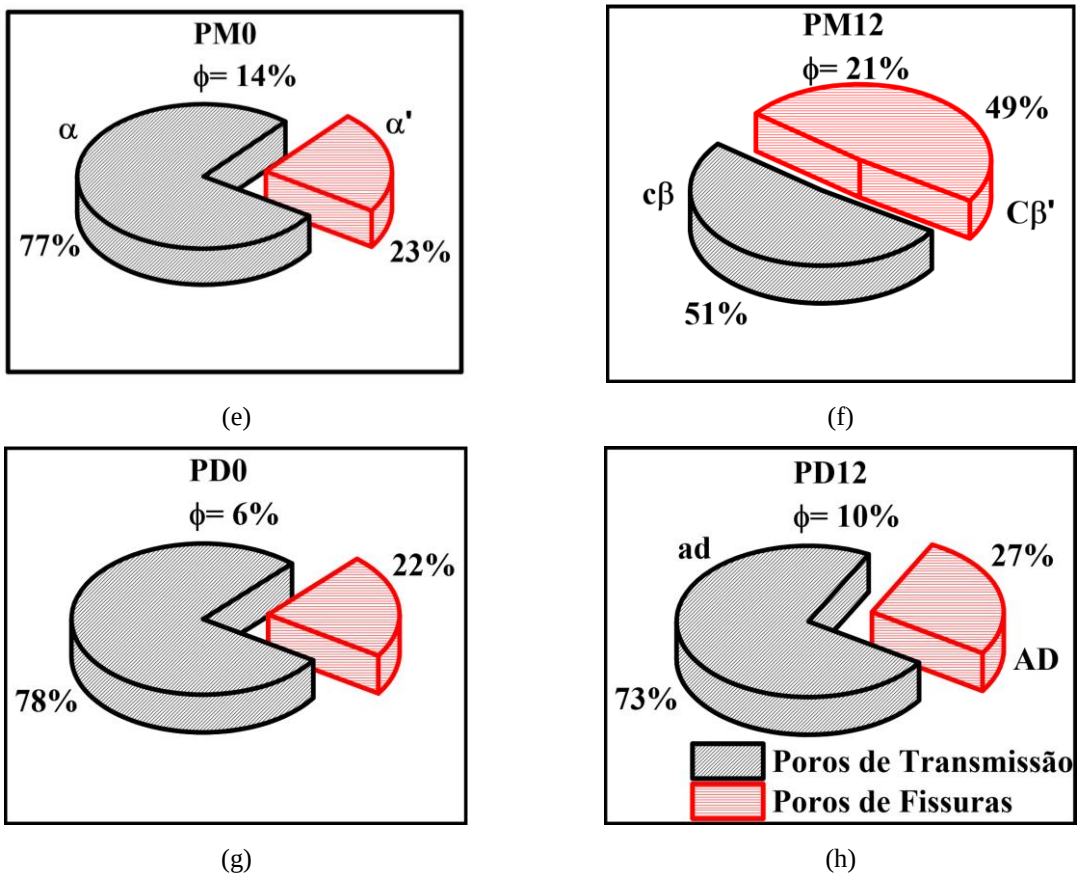
Para o PM e PD, foram verificados aumentos significativos nas porosidades acessadas (PM: 50% e PD: 67%) após a aplicação dos ciclos de U-S, respectivamente. Veiga et al. (2008), ao estudar amostras indeformadas de um Latossolo Vermelho, relataram aumentos da porosidade sob práticas de preparo de plantio convencional com combinações de preparo (implementos agrícolas e manutenção ou não resíduos), diferente do observado neste presente trabalho e, portanto, corroborando com a não linearidade das propriedades físicas do solo mencionada por eles.

Hussein e Adey (1998) verificaram em estudos envolvendo Vertissolos aumentos significativos da porosidade do solo mediante a aplicação de sucessivos ciclos de U-S, bem como mudanças na forma dos poros. Pires et al. (2008; 2009), Bodner et al. (2013) e Moreira et al. (2016) também registraram aumentos da porosidade do solo após sucessivos ciclos de U-S, corroborando os resultados observados no presente trabalho.

Na Figura 3.5 são apresentados os efeitos dos ciclos de U-S na estrutura do solo em função da distribuição do tamanho de poros tendo em vista a funcionalidade dos poros.

Figura 3.5 Porosidades acessadas pela imagem baseada na funcionalidade dos poros (GREENLAND, 1981). As amostras foram submetidas a 0 e 12 ciclos de U-S. Floresta Secundária-F. Plantio Convencional-PC. Plantio Cultivo Mínimo-PM. PD-Plantio Direto.





Fonte: De Oliveira, Cássaro e Pires (2021).
Nota: Resultados seguidos pelas mesmas letras em árabe e grego não diferiram entre si pela ANOVA e Teste de Tukey (p <0,05). As comparações foram feitas entre os preparos antes e depois das aplicações dos ciclos U-S (Letras arábicas minúsculas e maiúsculas) e dentro de cada preparo considerando os ciclos U-S (Letras gregas).

De forma geral, na ausência dos ciclos de U-S, vê-se que os poros de transmissão são dominantes em todos os preparos e F (Figura 3.5). Com base na funcionalidade dos poros, PC foi o sistema com maior quantidade de poros do tipo fissura (30%) e menor fração de poros de transmissão (70%) (Figura 3.5c). Esse resultado pode estar associado ao revolvimento das camadas superficiais do solo nessa prática de preparo (GABRIEL FILHO, 2000; TORMENA et al., 2004; SESSIZ; ALP; GURSOY, 2010).

Para os demais preparos e F, as proporções dos poros de transmissão contribuíram com aproximadamente 77% dos volumes de poros acessados (Figuras 3.5a, e, g). De acordo com Greenland (1977) e Hernández et al. (2019), tais tipos de poros são responsáveis pela infiltração e redistribuição de fluidos (gases e água) na matriz do solo, assim como pelo desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Uma comparação dos resultados das porosidades em termos da funcionalidade dos poros (Figura 3.5) e da distribuição do tamanho dos poros (Figura 3.3) mostra que os poros com tamanhos <300 μm sofreram redução de 26% para PC na comparação com F. Para os maiores tamanhos de poros entre 1000 a 3000 μm, o PD apresentou um aumento de 34% nesta classe de poros na comparação com PC e PM.

A aplicação dos 12 ciclos U-S revelou que o PM foi o preparo que apresentou as modificações mais significativas na estrutura do solo, de modo que os poros de transmissão (menores diâmetros) se transformaram em fissuras (Figura 3.5e, f). F e PD apresentaram comportamento oposto com reduções médias de 8% nos poros de transmissão e 30% nas fissuras para o PC. Pires et al. (2008, 2009) também observaram alterações nos formatos e funcionalidades dos poros para três solos diferentes submetidos a 9 ciclos de U-S.

Uma comparação dos resultados das porosidades em termos da funcionalidade dos poros (Figura 3.5) e da distribuição do tamanho dos poros (Figura 3.3) para as amostras submetidas aos 12 ciclos de U-S mostram que as modificações mais significativas ocorreram para os poros <300 μm; para esta faixa de tamanho de poros F, PM e PD tiveram reduções de 35, 92 e 24% na porosidade acessada quando comparada com as amostras não submetidas aos ciclos. Para o PC foi verificado um aumento de 57% para os tamanhos de poros <300 μm comparada as amostras não submetidas a aplicação dos ciclos de U-S. Nas regiões de poros maiores com tamanhos entre 1000 e 3000 μm (Figura 3.3), o PM apresentou um acréscimo de 167% nos poros fissurais com aplicação dos ciclos, contribuindo para a elevação desses poros no volume da amostra, e consequentemente na porosidade acessada. Em relação a F, os valores também foram altos, cerca de 72%, respectivamente, refletindo no aumento global deste tipo de poros, porém este aumento não repercutiu na porosidade acessada e, finalmente no PC, identificou-se comportamento oposto para tal região, onde a redução chegou a 47%, e também influenciando na porosidade deste preparo.

CONCLUSÕES

O algoritmo baseado na porosimetria por intrusão de mercúrio foi eficiente para quantificar as modificações causadas pelos ciclos de U-S no sistema poroso de amostras de um mesmo tipo de solo submetidas a diferentes preparos. As CDPs indicam que a aplicação dos ciclos produziu diminuição da porosidade acessada pela imagem no solo sob PC e F. Um comportamento oposto foi verificado quando o solo foi manejado sob PM e PD, para os quais foi observado um aumento da porosidade acessada pela imagem.

Portanto, esses resultados revelaram que mesmo para um solo que possui as mesmas características texturais, esse irá responder de forma diferente quando submetido a ciclos de U-S. Em medidas de retenção de água, na qual muitas vezes as amostras são submetidas a vários ciclos de U-S é preciso também considerar o preparo do solo. O fato das amostras serem coletadas em uma mesma área experimental, mas que estejam submetidas a diferentes preparos,

podem conduzir a medidas não representativas da curva de retenção, se somente for considerado o tipo de solo como única variável.

Os ciclos de U-S também provocaram mudanças nos tipos de poros de acordo com as suas funcionalidades. O PM foi o preparo com as mudanças mais sensíveis com os poros de transmissão sendo convertidos em fissuras. Nas diferentes faixas de diâmetros de poros característicos, os ciclos de U-S promoveram aumentos e diminuições significativas, tanto nas porosidades acessadas quantos nas funcionalidades dos poros, para cada uma das faixas de diâmetros característicos de poros estudados.

REFERÊNCIAS

ALBREGTSEN, F. Non-parametric histogram thresholding methods-error versus relative object area. *In:* **Proceedings of the Scandinavian Conference on Image Analysis**. Proceedings Published by Various Publishers, p. 273-273, 1993.

AL-KAYSSI, A. W. Impact of Successive Wetting and Drying Cycles on Some Physical Properties of Gypsifereous Soils. **Journal of Agriculture Food and Development**, v. 2, p. 5-15, 2016.

BACCHI, O. O. S. et al. Gamma-ray beam attenuation as an auxiliary technique for the evaluation of the soil water retention curve. **Scientia Agricola**, v. 55, n. 3, p. 498-502, 1998.

BODNER, G.; SCHOLL, P.; KAUL, H.-P. Field quantification of wetting–drying cycles to predict temporal changes of soil pore size distribution. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 1-9, 2013a.

BODNER, G. et al. Environmental and management influences on temporal variability of near saturated soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 204, p. 120-129, 2013b.

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

BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F.; BELMONT PEREIRA, A. Computed tomography to estimate the representative elementary area for soil porosity measurements. **The Scientific World Journal**, v. 2012, 2012.

BOYLE, J. R.; POWERS, R. F. Forest soils. **In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. Elsevier, 2013.

BREWER, R. **Fabric and Mineral Analysis of Soils**. Wiley, New York, 1964.

CALISTRU, A. E.; JITĂREANU, G. Applications of X-ray computed tomography for examining soil structure: a review. **Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture**, v. 72, n. 1, p. 30-36, 2015.

CAPOWIEZ, Y. et al. 3D skeleton reconstructions of natural earthworm burrow systems using CAT scan images of soil cores. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, n. 1, p. 51-59, 1998.

CHANDRASEKHAR, P. et al. Modeling the evolution of soil structural pore space in agricultural soils following tillage. **Geoderma**, v. 353, p. 401-414, 2019.

CHEN, R.; NG, C. W. W. Impact of wetting–drying cycles on hydro-mechanical behavior of an unsaturated compacted clay. **Applied Clay Science**, v. 86, p. 38-46, 2013.

DE OLIVEIRA, J. A. T; CÁSSARO, F. A. M.; PIRES, L. F. Estimating soil porosity and pore size distribution changes due to wetting-drying cycles by morphometric image analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104814, 2021.

DIEL, J.; VOGEL, H.-J.; SCHLÜTER, S. Impact of wetting and drying cycles on soil structure dynamics. **Geoderma**, v. 345, p. 63-71, 2019.

DO, Q. H.; BISHNOI, S.; SCRIVENER, K. L. Numerical simulation of porosity in cements. **Transport in Porous Media**, v. 99, n. 1, p. 101-117, 2013.

DONG, H. et al. Relationship between the size of the samples and the interpretation of the mercury intrusion results of an artificial sandstone. **Materials**, v. 11, n. 2, p. 201, 2018.

DOS SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

FERREIRA, T. R. et al. Lime application effects on soil aggregate properties: use of the mean weight diameter and synchrotron-based X-ray μCT techniques. **Geoderma**, v. 338, p. 585-596, 2019.

GARBOCZI, E.J.; BENTZ, D. P. Digitised simulation of mercury intrusion porosimetry. **Ceram. Trans.**, v. 16, p. 365-380, 1990.

GABRIEL FILHO, A. 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, n. 6, 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.

GREENLAND, D. J. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent? **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences**, v. 281, n. 980, p. 193-208, 1977.

GREENLAND, D. J. Soil management and soil degradation. **Journal of Soil Science**, v. 32, n. 3, p. 301-322, 1981.

HAMMER, Ø. et al. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, p. 9, 2001.

HERNÁNDEZ, T. D. B. et al. Assessment of long-term tillage practices on physical properties of two Ohio soils. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 270-279, 2019.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. Elsevier, 2003. 494 p.

HORN, R.; DEXTER, A. R. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. **Soil and Tillage Research**, v. 13, n. 3, p. 253-266, 1989.

HUSSEIN, J.; ADEY, M. A. Changes in microstructure, voids and b-fabric of surface samples of a Vertisol caused by wet/dry cycles. **Geoderma**, v. 85, n. 1, p. 63-82, 1998.

JAYANTH, S.; IYER, K.; SINGH, D. N. Influence of drying and wetting cycles on SWCCs of fine-grained soils. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 40, n. 3, p. 376-386, 2012.

KHAN, F. et al. 3D simulation of the permeability tensor in a soil aggregate on basis of nanotomographic imaging and LBE solver. **Journal of Soils and Sediments**, v. 12, n. 1, p. 86-96, 2012.

LEIJ, F. J.; GHEZZEHEI, T. A.; OR, D. Modeling the dynamics of the soil pore-size distribution. **Soil and Tillage Research**, v. 64, n. 1-2, p. 61-78, 2002.

MOREIRA, W. H. et al. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 160, p. 53-64, 2016.

NITSCHE, P. R. et al. **Atlas climático do estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 2019.

ROSENBALM, D.; ZAPATA, C. E. Effect of wetting and drying cycles on the behavior of compacted expansive soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 1, p. 04016191, 2017.

OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 9, n. 1, p. 62-66, 1979.

PAGLIAI, M.; LA MARCA, M.; LUCAMANTE, G. Changes in soil porosity in remolded soils treated with poultry manure. **Soil Science**, v. 144, n. 2, p. 128-140, 1987.

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.

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.

PIRES, L. F. et al. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. **Soil and Tillage Research**, v. 100, n. 1-2, p. 72-77, 2008.

PIRES, L. F. et al. Pore system changes of damaged Brazilian oxisols and nitosols induced by wet-dry cycles as seen in 2-D micromorphologic image analysis. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 81, n. 1, p. 151-161, 2009.

PIRES, L. F. et al. Soil pore characterization using free software and a portable optical microscope. **Pedosphere**, v. 23, n. 4, p. 503-510, 2013.

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

PIRES, L. F. et al. X-ray microtomography to evaluate the efficacy of paraffin wax coating for soil bulk density evaluation. **Geoderma**, v. 337, p. 935-944, 2019.

PENG, X.; HORN, R.; SMUCKER, A. Pore shrinkage dependency of inorganic and organic soils on wetting and drying cycles. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 4, p. 1095-1104, 2007.

RASBAND, W. **ImageJ**BethesdaU.S. National Institutes of Health, 2007. Disponível em: http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html. Acessado em: 15 mar. 2018.

SESSIZ, A.; ALP, A.; GURSOY, S. Conservation and conventional tillage methods on selected soil physical properties and corn (Zea mays L.) yield and quality under cropping system in Turkey. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v. 16, n. 5, p. 597-608, 2010.

TORMENA, C. A. et al. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 65-71, 2004.

VEIGA, M. et al. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a southern Brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1437-1446, 2008.

VIANA, J. H. M. et al.Effects of wetting and drying cycles on the reorganization of the microgranular structure of Latosols. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 11-19, 2004.

VOGEL, H. J.; ROTH, K. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure. **Advances in Water Resources**, v. 24, n. 3-4, p. 233-242, 2001.

YANG, B. H. et al. 3D characterization and analysis of pore structure of packed ore particle beds based on computed tomography images. **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, v. 24, n. 3, p. 833-838, 2014.

YANG, Z. et al. An Image-Based Method for Obtaining Pore-Size Distribution of Porous Media. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 9, p. 3248-3253, 2009.

YIPING, W. et al. Effect of Cyclic Wetting and Drying on the Microstructure of Slip Zone Soils in Huangtupo Landslide. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, v. 9, n. 4, p. 209-216, 2016.

YU, M. et al. Impact of land-use changes on soil hydraulic properties of Calcaric Regosols on the Loess Plateau, NW China. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 3, p. 486-498, 2015.

4 ABORDAGEM MULTIFRACTAL E MICROMORFOLÓGICA 3D NA CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA POROSO DE UM SOLO SUBMETIDO A DIFERENTES PREPAROS

RESUMO

Os solos em estado natural como aqueles encontrados em matas nativas representam sistemas dinâmicos e complexos. Solos sujeitos às práticas de preparo e ações de intempéries, tendem a apresentar variações em suas complexidades, principalmente em termos de suas propriedades morfológicas em escala micrométrica. Para entender melhor as mudanças que podem ocorrer nos sistemas porosos em diferentes escalas, muitos pesquisadores têm usado a análise fractal e multifractal. Estas ferramentas têm sido aplicadas para entender como sistemas complexos se comportam quando submetidos a diferentes práticas de preparo. Esse estudo apresenta o uso da teoria multifractal tridimensional (3D), parâmetros de lacunaridade, espectros multifractais e entropia de Shannon 3D na caracterização de mudanças no sistema poroso de um Latossolo sob diferentes práticas de preparo (plantio convencional – PC, plantio cultivo mínimo – PM e plantio direto – PD) em comparação ao solo de uma área de floresta secundária (F). Os resultados obtidos permitiram classificar, do ponto de vista micrométrico, os solos em dois grupos: F e PD (primeiro grupo) e PC e PM (segundo grupo). Eles foram separados nestes dois grupos em virtude da grande auto-similaridade ou proximidade de características entre seus sistemas porosos. As lacunaridades 3D, dimensões fractais generalizadas (Dqs) e as entropias de Shannon normalizadas máximas e globais apresentaram correlação linear com as porosidades acessadas pelas imagens para os diferentes preparos e F. Lacunaridades 3D, Dqs e graus de assimetrias dos espectros multifractais evidenciaram as variabilidades espaciais das distribuições de tamanhos dos poros. Finalmente, a análise realizada destacou a potencialidade e sensibilidade da abordagem multifractal 3D na caracterização e diferenciação dos espaços porosos complexos e dinâmicos dessas amostras de solo.

ABSTRACT

Soils in a natural state like those found in native forests represent dynamic and complex systems. Soils under preparation practices and weather conditions tend to vary in their complexities, mainly in terms of morphological properties on a micrometric scale. To better understand the changes that can occur in porous systems at different scales, many researchers have used fractal and multifractal analysis. These tools have been also applied to understand how complex systems behave as submitted to different preparation practice. This study presents the use of tridimensional (3D) multifractal theory, lacunarity parameters, multifractal spectra, and 3D Shannon entropy in the characterization of changes in the porous system of an Oxisol under different preparation practices (conventional preparation planting - CT, minimum preparation – MT, and no-preparation - NT) as compared to the soil from a secondary forest area (F). The results obtained have been permitted to classify, in a micrometric point of view, the soils in two groups: F and NT (first group) and MT and CT (second group). They were separated into two groups because to the great self-similarity or proximity of characteristics between their porous systems. The 3D lacunarities, generalized fractal dimensions (Dqs), and the maximum and global normalized Shannon entropies presented linearly correlated with the porosities accessed by the images for the different preparation and F. 3D lacunarities, Dqs, and asymmetries degrees of the multifractal spectra showed the spatial variability of the pore size distributions. Finally, the performed analysis highlighted the potentiality and sensitivity of the

3D multifractal approach in the characterization and differentiation of the complex and dynamic porous spaces of these soil samples.

4.1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas do século XX, a geometria fractal e multifractal vem sendo empregada com frequência em estudos sobre o entendimento de processos naturais e artificiais, desde a escala macroscópica à microscópica. O uso dessa ferramenta está principalmente relacionado a sua não linearidade e alta complexidade (MANDELBROT, 1983; PACHEPSKY et al. 2000; BROWN et al., 2002; PACHEPSKY; PERFECT; MARTIN, 2006). Dessa forma, o comportamento, muitas vezes randômico, exibido por muitos fenômenos que ocorrem na natureza, torna as suas análises, na maioria das vezes, de extrema complexidade.

A teoria fractal surgiu como uma forma de buscar melhor compreensão e interpretação de sistemas complexos, dinâmicos e não lineares, por meio da análise de padrões de auto similaridade e dimensões fracionárias (MANDELBROT, 1983; MONREAL et al., 2013). A utilização de abordagens e tratamentos estatísticos probabilísticos em termos de distribuições de probabilidades, relacionado à teoria multifractal, pode ser utilizado no estudo de propriedades físicas e termodinâmicas de sistemas complexos trifásicos como é o caso do solo (CHHABRA; JENSEN, 1989; CHHABRA et al., 1989; MONREAL et al., 2013).

Na natureza, os objetos que apresentam dimensões fracionárias e repetições de padrões, independentemente da escala (autossimilaridade ou auto afinidade), são classificados como fractais ou multifractais. Na ciência do solo, a abordagem multifractal tem sido utilizada na resolução de diferentes problemas que vão desde estudos relacionados à compreensão dos formatos irregulares de partículas do solo e sua hierarquização até a análise da estrutura de macroporos e padrões preferenciais de fluxos de solutos (PACHEPSKY et al. 2000; PACHEPSKY; PERFECT; MARTIN, 2006; POSADAS et al., 2007; LUO; LIN, 2009).

Parâmetros como lacunaridade, a qual trata da contabilização das distribuições de lacunas ou espaços como função escalonada, o espectro multifractal, que define um conjunto de dimensões fractais generalizados, e entropia, têm sido empregados utilizando métodos computacionais no estudo de diferentes fenômenos (MANDELBROT, 1983; CHHABRA; JENSEN, 1989; CHHABRA et al., 1989; POSADAS et al., 2003, 2005; CHUNG et al., 2008; GOULD et al., 2011; ROY; PERFECT, 2014). Todos esses parâmetros podem ser usados na caracterização da heterogeneidade de sistemas porosos, como é o caso do solo.

Os avanços na tomografia de raios X aliado ao desenvolvimento de programas computacionais dedicados ao processamento de imagens vem possibilitando estudos cada vez mais detalhados da arquitetura do sistema poroso do solo. Por intermédio da análise tridimensional (3D) de imagens do solo em escala micrométrica os cientistas dos solos têm alcançado uma melhor compreensão de inúmeros processos e fenômenos que ocorrem nesse meio poroso (DAL FERRO et al., 2002; MUNOZ-ORTEGA; MARTÍNEZ; MONREAL, 2015; BORGES et al., 2019; FERREIRA et al., 2019; GALDOS et al., 2019). Além disso, parâmetros geométricos como a conectividade (C) e a tortuosidade (τ) dos poros, bem como a heterogeneidade do meio poroso, expressa por meio do grau de anisotropia (GA), também são medidos quando análises 3D são realizadas (MARTÍNEZ et al., 2010; SAMPURNO et al., 2016; ROQUE; ARCARO; LANFREDI, 2012; MARTÍNEZ et al., 2017; TORRE et al., 2018; BORGES et al., 2019; PIRES et al., 2019).

Dentre os inúmeros trabalhos publicados na literatura científica nos últimos anos (século XXI) que utilizam a análise multifractal para a caracterização de meios porosos, a grande maioria está baseada em análises bidimensionais (2D). Existem pouquíssimos trabalhos que fazem a análise de sistemas porosos usando a ferramenta multifractal em 3D. Em vista da escassez de estudos em 3D, a associação de imagens tridimensionais obtidas pela técnica de microtomografia com às análises fractal, multifractal e de entropia podem auxiliar na investigação de modificações causadas no sistema poroso do solo quando submetido a diferentes sistemas de preparo (MARTÍNEZ et al., 2010; SAMPURNO et al., 2016; TORRE et al., 2018; SOTO-GÓMEZ et al., 2020).

Assim, a abordagem empregada neste estudo foi mediante análises de lacunaridade, espectro multifractal e entropia, objetivando a caracterização e distinção de modificações ocasionadas no sistema poroso de um Latossolo, submetido a três práticas de preparo distintas. Parâmetros geométricos (C e τ) e de heterogeneidade (grau de anisotropia), bem como grau de multifractalidade, dimensões fractais de capacidade (D_0), de informação associada a entropia de Shannon (D_1) e de correlação (D_2) foram usados na caracterização do espaço de poros do solo.

A principal hipótese abordada aqui é se as lacunaridade, grau de multifractalidade, entropias de Shannon normalizadas e globais (Boltzmann) podem ser utilizadas para verificar distinções nas propriedades micromorfológicas de um Latossolo submetido a diferentes preparos e sob área de floresta secundária. Sendo assim, em caso de sucesso, essas propriedades permitiriam identificar e caracterizar diferenças entre os sistemas porosos do solo quando submetidos a ações antropogênicas. Outra hipótese plausível, seria que solos com nenhuma ou

com poucas perturbações em suas estruturas, como no caso de F e PD, apresentariam características multifractais mais semelhantes entre si.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Local e Coleta das Amostras

As amostras de solo coletadas são provenientes da fazenda experimental do "Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR)" localizado na cidade de Ponta Grossa, estado do Paraná, Brasil (25° 06' S, 50° 09' W, 875 m). O solo da região, segundo a classificação apresentada em Dos Santos et al. (2018), é um Latossolo Vermelho Distrófico. O solo utilizado neste estudo foi submetido a três diferentes práticas de preparo (plantio convencional – PC, plantio cultivo mínimo – PM e plantio direto – PD). Uma área sob floresta secundária (F) foi utilizada como referência. Um total de 20 amostras foram coletadas para este estudo (5 amostras para cada preparo + 5 amostras para F) na camada superficial (0-0,10 m), as quais foram amostradas em anéis volumétricos (0,05 m de altura por 0,05 m de diâmetro).

O solo coletado apresentou a seguinte composição em termos de textura: 578 g kg^{-1} de argila, 280 g kg^{-1} de silte e 142 g kg^{-1} de areia, sendo classificado como argiloso segundo o triângulo de classificação textural da USDA (HILLEL, 2003). As áreas destinadas aos preparos do PM e PC foram preparadas das seguintes maneiras: no primeiro sistema de preparo, o preparo se deu com a passagem de uma grade escarificadora de discos com 0,25 m de profundidade, e seguidamente duas gradagens leves com discos de cortes de 0,10 m; o preparo do segundo sistema foi feito por meio de uma passagem de arado de discos com 0,25 m, e após esta operação foram executadas mais duas gradagens. Na área destinada ao PD, o revolvimento do solo ficou restrito apenas às linhas de semeadura de 0,10 m de largura por 0,10 m de profundidade do disco de corte. As culturas cultivadas nos três preparos foram: milho e soja no período de verão; aveia-preta ou trigo e ervilhaca ou tremoço no inverno (BORGES et al., 2019).

4.2.2 Aquisição e Processamento das Imagens

Antes da realização das tomografias as amostras foram impermeabilizadas com parafina e transportadas para o Reino Unido (*The Hounsfield Facility, University of Nottingham, Sutton Bonington Campus*) para escaneamento, aquisição e posterior análise das

imagens por microtomografia de raios X (μTC). Um tomógrafo da marca GE, modelo v|tomex|m, operando com tensão de 180 kV, corrente de 160 μA e tempo de aquisição de cada imagem de 250 ms foi empregado nas medidas. As imagens foram reconstruídas em 32 bit, evitando sobreposições de tons de cinza, e recortadas entre 7 e 10 mm distantes da borda, a fim de minimizar possíveis artefatos devido a efeitos de bordadura advindos da coleta das amostras (PIRES; BACCHI; REICHARDT, 2004).

Na reconstrução 3D do sistema poroso utilizou-se informações de 860 imagens, adquiridas ao longo do sentido longitudinal (z) das amostras. A região de interesse selecionada foi de 30,1×30,1×30,1 mm^3 (860×860×860 *voxels*) com uma resolução de 35 μm.

Na etapa de segmentação usou-se o programa ImageJ 1.42, aplicando-se o método Otsu não parametrizado para obter as imagens binarizadas. Nessa etapa, as imagens originais (em tons de cinzas) foram processadas usando um filtro *median* 3D (diminuição de ruídos) e máscara de nitidez (desvio padrão 1 *voxel* e peso 0,8) para realce das bordaduras. Finalizando-se essas etapas, obteve-se um conjunto de imagens binarizadas (zeros e uns), com cores brancas representando os poros e pretas a matriz do solo.

4.2.3 Lacunaridade 3D

O conceito ou definição de lacunaridade foi proposta por Mandelbrot (1983) no intuito de melhorar o conhecimento acerca de objetos ou sistemas fractais. Como o próprio nome sugere, esta grandeza expressa as distribuições de lacunas/espaços vazios para um dado meio poroso, e, portanto, reflete o seu grau de heterogeneidade (vide Figura 4.1 para espaços porosos distintos). Por outro lado, a lacunaridade pode ser encarada como sendo um parâmetro de caracterização de padrões de distribuições de espaços ou lacunas (distribuição de tamanhos de diâmetros de poros) em função da escala. Observa-se que a lacunaridade (Equação 4.1) é dependente do tamanho da caixa (escala), ou seja, quanto maior for o tamanho da caixa menor será o valor da lacunaridade (MANDELBROT, 1983; CHUNG et al., 2008; GOULD et al., 2011; ROY et al., 2014; MONREAL et al., 2013; MARTÍNEZ et al., 2017):

$$\Lambda(\varepsilon) = \frac{\sum_s s^2 P(s,\varepsilon)}{[\sum_s sP(s,\varepsilon)]^2} = \frac{Z(2)}{[Z(1)]^2} \qquad 4.1$$

na qual s é o número de pixels de cor preta, ε o tamanho da caixa, $P(s,\varepsilon)$ são as probabilidades de distribuição de encontrar um pixel s na cor preta numa imagem de tamanho ε×ε, $Z(1)$ e $Z(2)$ estão associados ao primeiro e segundo momento da distribuição.

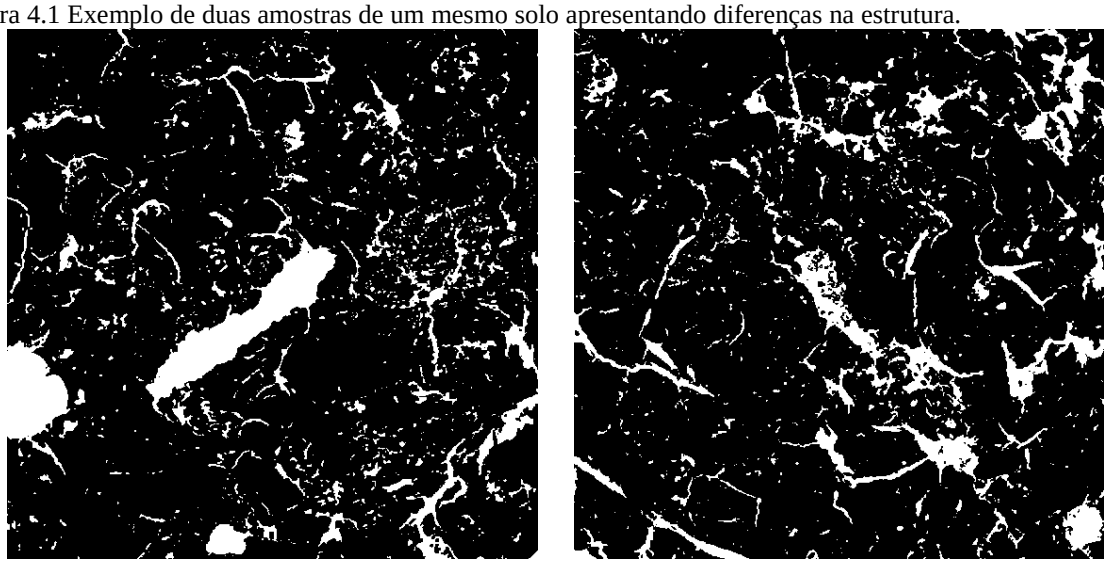
A lacunaridade também pode ser expressa em termos de médias ($\bar{\mu}$) e variâncias (σ) das distribuições de probabilidades de densidades de caixas:

$$Z(1) = \bar{\mu} \text{ e } Z(2) = \bar{\mu}^2 + \sigma^2 \qquad 4.2$$

$$\Lambda(\varepsilon) = \frac{Z(2)}{[Z(1)]^2} = \frac{\sigma^2}{\bar{\mu}^2} + 1 \qquad 4.3$$

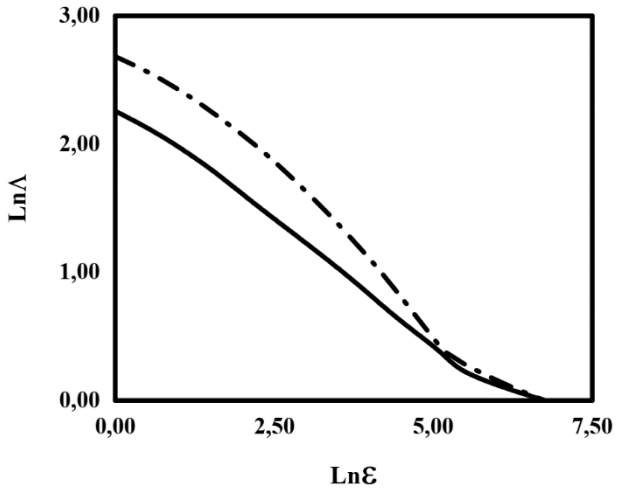
A curva da lacunaridade, quando expressa em um gráfico, é apresentada na base de ln em função da escala do tamanho das caixas ε, ou seja, lnΛ versus ln ε (Figura 4.2).

Figura 4.1 Exemplo de duas amostras de um mesmo solo apresentando diferenças na estrutura.



(a) (b)

Figura 4.2 Curva de lacunaridade para duas amostras de solo com características distintas. Menor lacunaridade (Linha cheia – imagem da Figura 4.1a) e maior lacunaridade (Linha tracejada – imagem da Figura 4.1b)

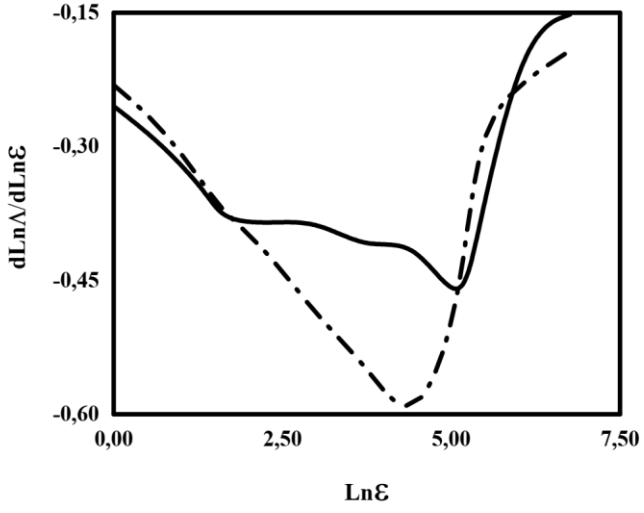


Fonte: O autor.

Inspecionando a Figura 4.2, observa-se que uma amostra apresenta maior lacunaridade que a outra, indicando em primeira análise que esta possui um sistema poroso mais heterogêneo, e sendo o contrário verdadeiro. A maior lacunaridade (Figura 4.2b) também evidencia a melhor dispersão espacial de distribuição de tamanhos de poros (lacunas) ao longo de uma amostra. Quando as amostras apresentam similaridades na arquitetura dos poros o que geralmente se observa é que as curvas de lacunaridade estarão próximas umas das outras ou sobrepostas.

O processo de derivação de primeira ordem da lacunaridade (Figura 4.3) propicia melhor detalhamento e diferenciação dessas curvas, assim como a análise de seus pontos de inflexão máximos e mínimos (ROY et al., 2014):

Figura 4.3 Curva de primeira derivada da lacunaridade para duas amostras de solo com características distintas. Linha cheia – imagem da Figura 4.1a e linha tracejada – imagem da Figura 4.1b.



Fonte: O autor.

$$\frac{d \ln \Lambda(\varepsilon)}{d \ln \varepsilon} = \frac{\ln \Lambda(\varepsilon_{i+1}) - \ln \Lambda(\varepsilon_{i-1})}{\ln \varepsilon_{i+1} - \ln \varepsilon_{i-1}} \quad 4.4$$

na qual i representa cada ponto da curva.

Nesse sentindo, vê-se claramente na Figura 4.3 que a primeira derivada da lacunaridade permite uma análise discretizada dos pontos de inflexão da curva, permitindo associá-los local e quantitativamente às distribuições de aglomerados de poros nos volumes das amostras investigadas (ROY et al., 2014). Assim, o ponto de inflexão (Figura 4.3) para a amostra da Figura 4.1b nos revela grandes quantidades de conglomerados de pequenos poros frente aos da Figura 4.1a, em que se nota visualmente a presença de poros de maiores calibres de diâmetros.

Para o cálculo e determinação da lacunaridade em 3D, redigiu-se um programa escrito em ambiente de Matlab® (Anexo I) usando o método de contagem de caixas (CC) com a aplicação das equações 4.1 ou 4.3, e com tamanhos de caixas cúbicas iguais a todos os divisores de 860 (12 divisores - 1, 2, 4, 5, 10, 20, 43, 86, 172, 215, 430 e 860), iniciando o cálculo da maior para a menor caixa por otimização do tempo (SARKAR; CHAUDHURI, 1992, 1995; DONG, 2000; JORGE et al., 2008). Para uma melhor análise da tendência do comportamento linear das curvas de lacunaridade, elas foram divididas em três partes com os seguintes intervalos: 1 - 10 *voxels* (1ª parte), 20 - 172 *voxels* (2ª parte) e 215 - 860 *voxels* (3ª parte). Calculados os ajustes lineares em cada uma das partes, os comportamentos lineares foram confirmados pela análise dos coeficientes de determinação (r^2) superiores a 0,90.

4.2.4 Análise Multifractal 3D

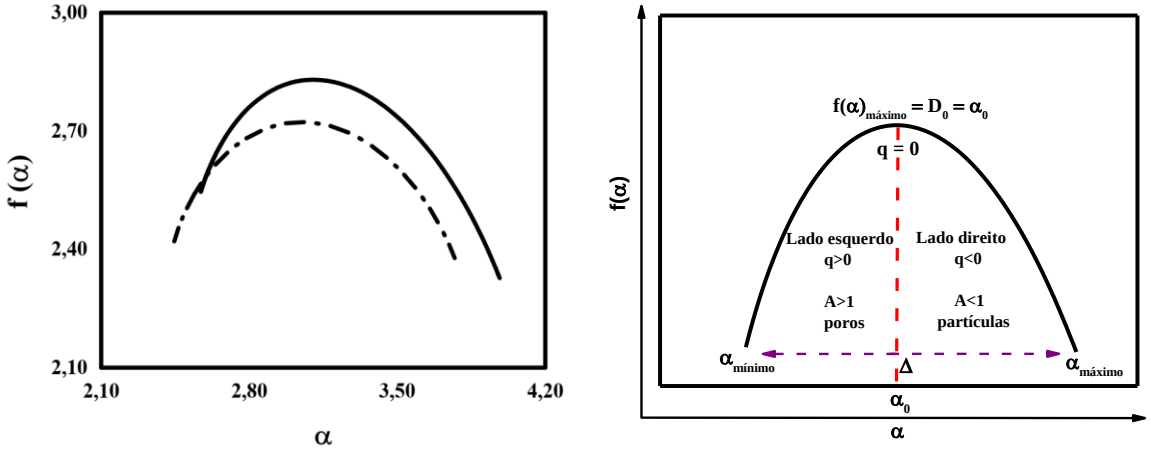
Sistemas mais complexos e dinâmicos, como no caso do solo, são vistos como generalizações dos fractais, uma vez que apenas uma dimensão fractal não é suficiente para caracterizá-los e descrevê-los. Dessa forma, uma análise multifractal faz-se necessária mediante abordagens de espectros multifractais e entropias visando um melhor entendimento e descrição desses sistemas. O espectro multifractal expressa quantitativamente a dispersão ou variabilidade de uma medida, e também permite associá-las às propriedades termodinâmicas mediante formalismo do método canônico para o cálculo da entropia (CHHABRA et al., 1989;

POSADAS et al., 2003, 2005; JORGE et al., 2008; MARTÍNEZ et al., 2010, 2017; LEIVA et al., 2019).

De acordo com Chhabra e Jensen (1989), Chhabra et al. (1989) e Posadas et al. (2003) os espectros multifractais (Figura 4.4) expressam a relação entre o espectro de singularidade, f(α(q)), ligado ao expoente de Lipschitz-Holder, ou pontos de singularidades (α(q)). Em termos físicos, f(α(q)) diz respeito à entropia do sistema (entropia de Boltzmann), e α reflete a energia interna do sistema.

A entropia de Boltzmann para um sistema é definida como sendo uma grandeza capaz de quantificar o grau de desordem das partículas existentes dentro desse sistema, e a energia interna, para esse mesmo sistema quando em equilíbrio, é dada em termos da primeira lei da termodinâmica (LAL; SHUKLA, 2004). Assim, a energia interna é uma propriedade ou função de estado que está relacionada à energia total de um sistema fechado.

Figura 4.4 (a) Espectro multifractal assimétrico (linha cheia – imagem da Figura 4.1a) e simétrico (linha tracejada– imagem da Figura 4.1b) para duas amostras de solo. (b) Parâmetros multifractais extraídos dos espectros multifractais.



Fonte: O autor.
Nota: A: Grau de assimetria. Δ: Grau de multifractalidade. α: Expoente de Lipschitz-Holder (Energia interna). $f(\alpha)_{máximo}$: Espectro de singularidade máximo (Entropia global). D_0: Dimensão de contagem de caixa ou de capacidade. q: ordens de momentos estatísticos da distribuição.

O espectro multifractal é definido nas equações subsequentes:

$$f(\alpha(q)) = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\sum_i \mu_i(q,\varepsilon)\log[\mu_i(q,\varepsilon)]}{\log\varepsilon} \quad 4.5$$

$$\alpha(q) = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\sum_i \mu_i(q,\varepsilon)\log[P_i(\varepsilon)]}{\log\varepsilon} \quad 4.6$$

sendo μ_i a medida normalizada ou função partição, q o momento estatístico da distribuição, e $P_i(\varepsilon)$ as probabilidades dos poros na caixa de tamanho ε.

Em termos da simetria e assimetria do espectro multifractal (Figura 4.4a), expoentes de Lipschitz-Holder tendendo ao máximo (assimetria da curva para o lado direito - $\alpha_{máx}$) apontam para menores probabilidades de distribuições das medidas. Enquanto um comportamento oposto, regiões com predisposições para α_{min} (assimetria da curva para o lado esquerdo) representam altas concentrações das medidas para quaisquer propriedades físicas à elas relacionadas. Finalmente, um espectro multifractal simétrico (Figura 4.4a) implicada na igualdade das probabilidades de distribuições de expoentes de Lipschitz-Holder, ou seja, mesmas concentrações de medidas para ambos os lados do espectro multifractal (POSADAS et al., 2005; SIQUEIRA et al., 2013; LEIVA et al., 2019).

No estudo também foram utilizados os parâmetros multifractais $\alpha_{máx}$ e $f(\alpha)_{máx}$ obtidos das curvas dos espectros multifractais 3D. Esses parâmetros estão relacionados fisicamente com a energia interna e a entropia média ou global (entropia de Boltzmann) do sistema analisado (CHHABRA et al., 1989; JORGE et al., 2008).

4.2.4.1 Parâmetros multifractais 3D

Para melhor análise, interpretação e quantificação das curvas dos espectros multifractais 3D, parâmetros como grau de multifractalidade (Δ) e de assimetria (A) foram calculados (SZCZEPANIAK; MACEK, 2008):

$$\Delta = \alpha_{máximo} - \alpha_{mínimo} \quad 4.7$$

$$A = \frac{\alpha_0 - \alpha_{mínimo}}{\alpha_{máximo} - \alpha_0} \quad 4.8$$

Altos valores numéricos de Δ representam maiores heterogeneidades do meio poroso. Valores positivos para A >1, indicam assimetria para o lado esquerdo do espectro (alta ocorrência de poros), ao passo que os positivos, A<1, indicam assimetria para o lado direito da curva multifractal (região da parte sólida); e quando A é igual a unidade (=1), o espectro é simétrico para ambos os lados.

4.2.4.2 Dimensão fractal generalizada (D_{qs})

A dimensão fractal generalizada (Equação 4.9) trata-se de um conjunto de dimensões fractais (Dq) para cada momento estatístico (q) considerado, a qual também pode ser usada como parâmetro para medição e análise do aspecto geométrico do sistema poroso. Do conjunto de dimensões fractais generalizadas há três momentos da distribuição (q = 0, 1 e 2) específicos possuindo propriedades distintas (JORGE et al., 2008; POSADAS et al., 2003, 2005, 2009).

Para q = 0, D_q é igual a D_0, sendo denominada dimensão fractal. Quando o momento da distribuição é igual a unidade (=1), $D_q = D_1$ esta é denominada dimensão de informação, a qual está associado à informação ou à entropia de Shannon, e quantifica o grau de incerteza dessa entropia ao longo da escala. Finalmente, D_2 para q=2 representa a dimensão de correlação, determinando a correlação das medidas restringidas nos intervalos de tamanhos ε (CHHABRA et al., 1989; POSADAS et al., 2005; MARTÍNEZ et al., 2010):

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\sum_i \log \mu_i(q,\varepsilon)}{\log \varepsilon} \qquad 4.9$$

4.2.5 Entropia de Shannon Normalizada 3D

Shannon (1948) propôs a extensão da entropia antes só aplicada a processos termodinâmicos para a Teoria da Informação ou Comunicação. Analogamente à entropia termodinâmica de Boltzmann, que considera a conexão entre microestados acessíveis ao sistema para descrever seus macroestados, a entropia de Shannon refere-se à alteração de sinais contínuos em discretos finitos. Nesta ótica, Shannon (1948) define a entropia de informação como sendo:

$$H = -\sum_i^n P_i \log P_i \qquad 4.10$$

A entropia de Shannon para um meio composto de duas fases (partículas e poros), como no caso de imagens binarizadas de dimensões ε por ε contendo 0 e 1, a equação 4.10 passa a ser reescrita em função da escala (ε) da seguinte forma (ANDRAUD; BEGHDADI; LAFAIT, 1994; ANDRAUD et al., 1997; CHUNG et al., 2008):

$$H(\varepsilon) = -\sum_{i=0}^{\varepsilon^2} P_i(\varepsilon) \log P_i(\varepsilon) \qquad 4.11$$

em que $P_i(\varepsilon)$ são as probabilidades dos poros ou partículas contidas na caixa de tamanho ε.

Assim, $H(\varepsilon)$ é visto como o grau de incerteza ou imprevisibilidade na realização de uma medida dos pixels correspondentes aos poros (0) ou partículas (1) dentro de uma imagem de tamanho ε x ε (BEGHDADI et al., 1993; ANDRAUD; BEGHDADI; LAFAIT, 1994). De acordo com Chung et al. (2008, 2011), a entropia de Shannon normalizada (Figura 4.5) é extremamente sensível na detecção de distinções na heterogeneidade do sistema poroso de um dado material. Portanto, a entropia normalizada é expressa por:

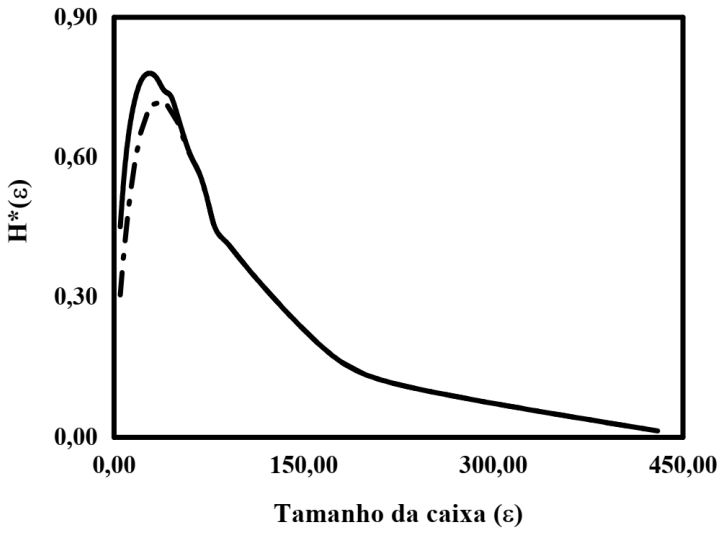
$$H^*(\varepsilon) = \frac{H(\varepsilon)}{H_M(\varepsilon)} = -\frac{1}{\log(\varepsilon^2+1)}\sum_{i=0}^{\varepsilon^2} P_i(\varepsilon)\log P_i(\varepsilon) \qquad 4.12$$

em que o termo $H_M(\varepsilon) = \log(\varepsilon^2 + 1)$ se refere a máxima entropia de Shannon de uma célula ou imagem binária com área de tamanho ε^2.

No caso 3D, a entropia normalizada, dada pela Equação 4.12, pode ser reescrita considerando o eixo longitudinal igual as dimensões da imagem binária, e, portanto, tem-se que:

$$H^*(\varepsilon) = \frac{H(\varepsilon)}{H_M(\varepsilon)} = -\frac{1}{\log(\varepsilon^3+1)}\sum_{i=0}^{\varepsilon^3} P_i(\varepsilon)\log P_i(\varepsilon) \qquad 4.13$$

Figura 4.5 Curva de entropia de Shannon normalizada para uma amostra de solo. Maior entropia (linha cheia – imagem da Figura 4.1a) e menor entropia (linha tracejada – imagem da Figura 4.1b).



Fonte: O autor.

Analisando a Figura 4.5, percebe-se que $H^*(\varepsilon)$ é mais sensível na detecção dos arranjos configuracionais dos poros na rede porosa do solo, permitindo assim inferir informações sobre sua complexidade. Novamente aqui o menor valor de $H^*(\varepsilon)_{máx}$ estaria refletindo a abundância quantitativa frente a distribuição de poros com menores diâmetros na amostra de solo (Figura 4.1b), visto que o contrário (maior de $H^*(\varepsilon)_{máx}$) é verificado para a Figura 4.1a (presença de poros de grandes calibres).

Os espectros multifractais 3D e dimensões fractais genereralizadas foram determinados usando tamanhos de caixas iguais a 5, 10, 20, 43, 86, 172, 215 e 430, respectivamente, e momentos da distribuição (q's) variando de -1,4 a 2,0 com intervalos ou passos regulares de 0,1. Em relação às entropias normalizadas, os tamanhos de caixas utilizados para melhores refinamentos foram os seguintes: 30, 35, 40, 45, 50, 60, 65, 70, 75, 80, 90 e 100. Para as quantificações dos espectros multifractais, dimensões fractais genereralizadas e entropias normalizadas utilizou-se o software NASS (*Non-linear Analysis Scaling System - AgriEntech Ltda/Rutgers*), o qual se baseia no método canônico introduzido por Chhabra et al. (1989), Posadas et al. (2005) e Chung et al. (2008).

4.2.6 Parâmetros Geométricos 3D

4.2.6.1 Conectividade (C)

A conectividade (C) dos poros, um atributo geométrico capaz de fornecer informações a respeito da organização e distribuição do espaço poroso, representa uma medida do grau de interconexão dos poros (DULLIEN, 1992; DAL FERRO et al., 2012, 2014; BORGES et al., 2019; PIRES et al., 2019). A conectividade (Equação 4.14) pode ser obtida mediante a estimativa da característica ou número de Euler (CE – Equação 4.15). Este parâmetro leva em consideração o número de partes desconexas do espaço poroso por volume (n_v) subtraída da conectividade por volume (C_v) (ODGAARD; GUNDERSEN, 1993; ROQUE et al., 2009; DAL FERRO et al., 2014). As quantificações dos valores das conectividades foram realizadas utilizando o software ImageJ-Fiji (1.52) utilizando o plugin BoneJ com as imagens já filtradas no filtro *purify* (função *connectivity*) (DOUBE et al., 2010; DAL FERRO et al., 2014). No plugin BoneJ o algoritmo para a conectividade utiliza as suas vizinhanças de *voxels* na determinação da característica de Euler ajustando todas as suas contribuições no volume poroso analisado visando fornecer a conectividade da estrutura porosa da amostra:

$$C = 1 - CE \quad (4.14)$$

$$CE = n_v - C_v \quad (4.15)$$

4.2.6.2 Tortuosidade (τ)

A tortuosidade representa uma medida do grau de sinuosidade de um poro na rede porosa e é definida pela razão da distância geodésica (L_G), entre dois pontos ligados na rede de poros, e a distância Euclidiana (L_E) entre eles (ROQUE et al. 2009; ROQUE; ARCARO; LANFREDI, 2012; BORGES et al., 2019; PIRES et al., 2019):

$$\tau = \frac{L_G}{L_E} \quad (4.16)$$

O software *OsteoImage*, desenvolvido por Roque et al. (2009) e Roque, Arcaro e Lanfredi (2012), foi utilizado na obtenção dos valores de tortuosidade dos sistemas porosos analisados neste estudo.

4.2.6.3 Grau de anisotropia (GA)

A anisotropia é definida como sendo a direção com maior continuidade de estruturas espaciais extremamente orientadas ao longo do volume de uma amostra. Geralmente, a anisotropia, no caso de sistemas porosos como solo, está relacionada à heterogeneidade da arquitetura de sua rede de poros. Em termos práticos, estruturas anisotrópicas estão relacionadas à deposição horizontal de partículas, consolidação anisotrópica (tendência do alinhamento de partículas ou grupo de partículas ao longo dos seus planos preferenciais pelo princípio das tensões) e compactação (MITCHELL; SOGA, 2005; SANTOS; GEORGETTI, 2018). O grau de anisotropia (GA), o qual é uma medida de como as subestruturas estão dispostas, alinhadas e orientadas dentro de uma região de interesse, foi calculada pelo método do comprimento médio de intercepção no plugin BoneJ (DOUBE et al., 2010; TSENG; ALVES; CRESTANA, 2018):

$$GA = 1 - \frac{\text{Autovalor mínimo}}{\text{Autovalor máximo}} \quad (4.17)$$

Os valores de GA estão compreendidos entre 0 e 1, sendo que para o primeiro valor, o

meio é totalmente isotrópico e no outro extremo, um sistema poroso completamente anisotrópico. Maiores detalhes na construção dessa expressão são encontrados em Harrigan e Mann (1984) e Tseng; Alves e Crestana (2018).

4.2.7 Análises Estatísticas

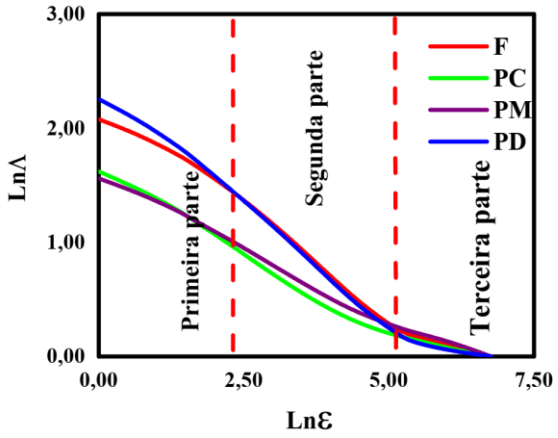
Análises de variância (ANOVA), teste de Tukey's HSD (p<0,05) e correlação linear de Pearson (p<0,05) foram aplicadas nos resultados das propriedades físicas quantificadas ($f(\alpha)_{máx}$, $\alpha_{máx}$, Δ, A, D_0, D_1, D_2, C, τ e GA). O programa PAST (*PAleontological STatistics*) versão 3.21 foi utilizado nas análises estatísticas (HAMMER et al., 2001).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

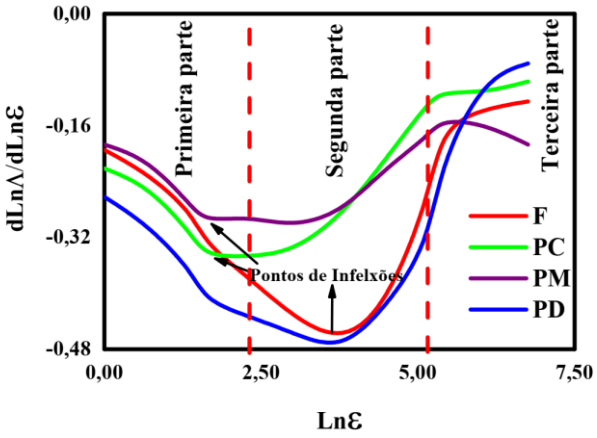
4.3.1 Lacunaridades 3D

Os valores da lacunaridade em 3D e de sua primeira derivada para todos os tratamentos analisados são apresentados na Figura 4.6.

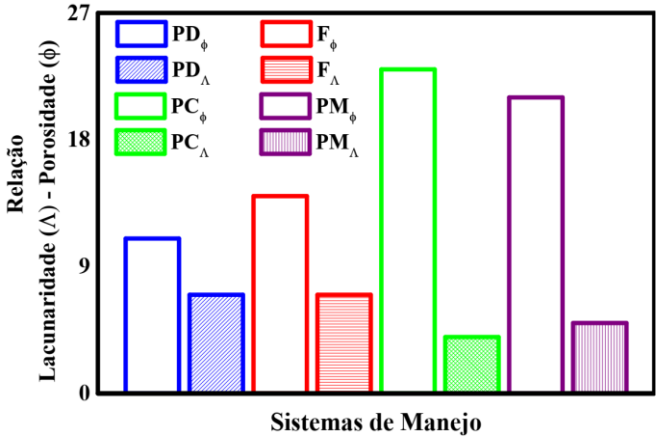
Figura 4.6 (a) Lacunaridades 3D e (b) sua primeira derivada para área sob floresta secundária (F) e para os três sistemas de preparo do solo (Plantio Convencional – PC, Plantio Cultivo Mínimo – PM e Plantio Direto – PD). (c) Relação entre lacunaridade 3D e porosidade.



(a)



(b)



(c)

Fonte: O autor.
Nota: As divisões em três partes são devidos aos melhores ajustes lineares para cada parte e evidenciação deste comportamento linear, e nos casos das derivadas, para melhores visualizações dos pontos de inflexão. Barras de erro nas verticais foram omitidas para melhores visualizações gráficas.

Os resultados dos gráficos de lacunaridades 3Ds seccionadas (em cada parte, 1ª, 2ª e 3ª) mostram que F e PD apresentam os maiores valores dessa propriedade quando comparado com PM e PC (Figura 4.6a). Os altos valores de lacunaridade observados para F e PD estão relacionados ao fato de solos sob estas formas de uso em geral apresentarem maiores frações de bioporos e poros do tipo fissuras na comparação com PC e PM (LUO; LIN, 2009; TAVARES FILHO; TESSIER, 2009). As maiores quantidades de material orgânico geralmente encontradas em sistemas considerados conservacionistas como o PD e área de F estão também associadas à maior ação da fauna do solo, contribuindo para a formação de bioporos.

Martínez et al. (2017) e Tseng; Alves e Crestana (2018) afirmam que lacunaridade e porosidade são grandezas inversamente proporcionais mediante as frações de distribuições de espaços ocupados no interior de cada caixa cúbica na determinação da lacunaridade, ou seja, quanto maior a fração ocupada por distribuições de lacunas ou espaços vazios espacialmente, mais alta será a lacunaridade e menor a porosidade. Assim, os resultados de porosidade acessadas por imagens em capítulos anteriores para F (14%) e PD (11%) corroboram com os resultados de altas lacunaridades encontradas para esses dois tratamentos, respectivamente. Por outro lado, o oposto da relação de inversibilidade entre porosidade-lacunaridade foi verificado para o PM e PC, uma vez que suas porosidades são 21 e 24%, reafirmando os resultados de menores lacunaridades encontrados para estes preparos (Figura 4.6c). Em outras palavras, a lacunaridade está relacionada a variabilidade da distribuição espacial de padrões de tamanho de poros, ao passo que a porosidade expressa o volume de poros das amostras (TSENG; ALVES; CRESTANA, 2018; SANTOS et al., 2020).

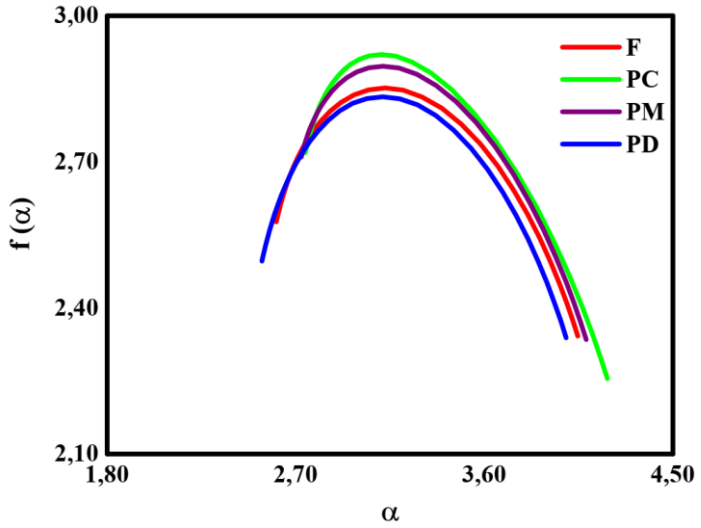
Observa-se para a área sob floresta secundária e os diferentes sistemas de preparo um comportamento linear para todas as partes seccionadas nas curvas de lacunaridade, bem como sua característica decrescente em função da escala, como constatado nos trabalhos de Luo e Lin (2009), Monreal et al. (2013) e Martínez et al. (2017). Efetuando a regressão linear de todas as curvas para cada uma das suas partes obteve-se um coeficiente de determinação em torno de 0,98 para a 1ª e 2ª partes e 0,96 para a 3ª parte (preparos e F). Este tipo de resultado é importante, pois indica a existência de uma alta linearidade e autossimilaridade de padrões de dispersões e agrupamentos de poros nos espaços porosos de F com PD e PC com PM, para uma ampla escala de tamanho de caixas (LUO; LIN, 2009; MONREAL et al., 2013; MARTÍNEZ et al., 2017). Esses conglomerados de poros influenciam sobremaneira o transporte, condução, redistribuição e disposição de fluidos (água e gases) no solo, essenciais ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

A alta semelhança de comportamento das curvas de lacunaridade 3D entre os dois grupos (F com PD e PC com PM) de tratamentos, fica ainda mais evidente quando são analisados os pontos de inflexão mínimos dessas curvas (Figura 4.6b). Nota-se que os pontos de inflexão de PC e PM são bem próximos um do outro, ocorrendo em menores tamanhos de caixas cúbicas, em torno de 10 *voxels* ($0{,}35^3$ mm^3 – primeira parte); e para F e PD esses pontos se dão em tamanhos de caixas cúbicas cerca de 4 vezes maiores, em torno de 43 *voxels* ($1{,}50^3$ mm^3– segunda parte). Percebe-se também nesses dois grupos de preparos (F e PD e PC e PM) diferenças nas curvas das derivadas nas transições da primeira parte para a segunda, onde há uma queda abrupta para um determinado intervalo de tamanho de caixas (1 a 5 *voxels* e 5 a 43 *voxels*). Por outro lado, para o segundo intervalo de tamanhos, o de 5 a 43 *voxels*, verifica-se um pequeno platô ou região constante da curva para PC e PM, o qual está associado a menores padrões de distribuições espaciais do espaço de poros comparados aos outros grupos citados anteriormente (LUO; LIN, 2009; MONREAL et al., 2013; ROY et al., 2014).

4.3.2 Espectros Multifractais 3D, Parâmetros Multifractais e Dimensões Fractais Generalizadas

Os resultados das curvas dos espectros multifractais 3D obtidos via software NASS® para F e os três preparos estudados (PC, PM e PD) são apresentados na Figura 4.7.

Figura 4.7 Espectros multifractais 3D para área sob floresta secundária (F) e para os três sistemas de preparo do solo (Plantio Convencional – PC, Plantio Cultivo Mínimo – PM e Plantio Direto – PD).



Fonte: O autor.
Nota: Barras de erro nas verticais e horizontais foram omitidas para melhores visualizações gráficas.

Analisando os espectros multifractais (Figura 4.7), é possível verificar novamente um comportamento similar entre grupos de práticas de preparo (F com PD e PC com PM), na mesma sequência dos resultados de lacunaridade já discutidos. Nota-se qualitativamente que os espectros no geral são assimétricos, destacando-se principalmente F e PD, cujos resultados são corroborados pelos valores de grau de assimetria (Tabela 4.1). Resultados semelhantes, referentes aos formatos dos espectros multifractais, foram encontrados em Martínez et al. (2010) e Torre et al. (2018), ao analisarem solos submetidos a diferentes preparos.

Na Tabela 4.1 é possível verificar os altos valores de Δ, refletindo a heterogeneidade e complexidade do sistema poroso para todos os tratamentos analisados (POSADAS et al., 2003; MARTÍNEZ et al., 2010; WANG et al., 2018; TORRE et al., 2018). Não foram verificadas diferenças significativas entre tratamentos e área de floresta para o Δ.

Tabela 4.1 Parâmetros fractais calculados a partir das curvas de espectros multifractais 3D para área sob floresta secundária (F) e para os três sistemas de preparo do solo (Plantio Convencional – PC, Plantio Cultivo Mínimo – PM e Plantio Direto – PD).

Preparos	F	PC	PM	PD
Δ	1,44±0,07	1,44±0,06	1,36±0,09	1,45±0,04
A	0,57±0,08^{a}	0,34±0,04^{b}	0,40±0,04^{b}	0,66±0,07^{c}
D_0	2,85±0,02^{a}	2,92±0,03^{b}	2,90±0,01^{b}	2,83±0,02^{a}
D_1	2,69±0,03^{a}	2,81±0,02^{b}	2,78±0,01^{b}	2,65±0,03^{a}
D_2	2,64±0,04^{a}	2,77±0,02^{b}	2,74±0,03^{b}	2,58±0,03^{c}
$\alpha_{máx}$	4,05±0,06^{a}	4,19±0,07^{b}	4,09±0,07^{ab}	3,99±0,04^{a}
$f(\alpha)_{máx}$	2,85±0,02^{a}	2,92±0,03^{b}	2,90±0,01^{b}	2,83±0,02^{a}

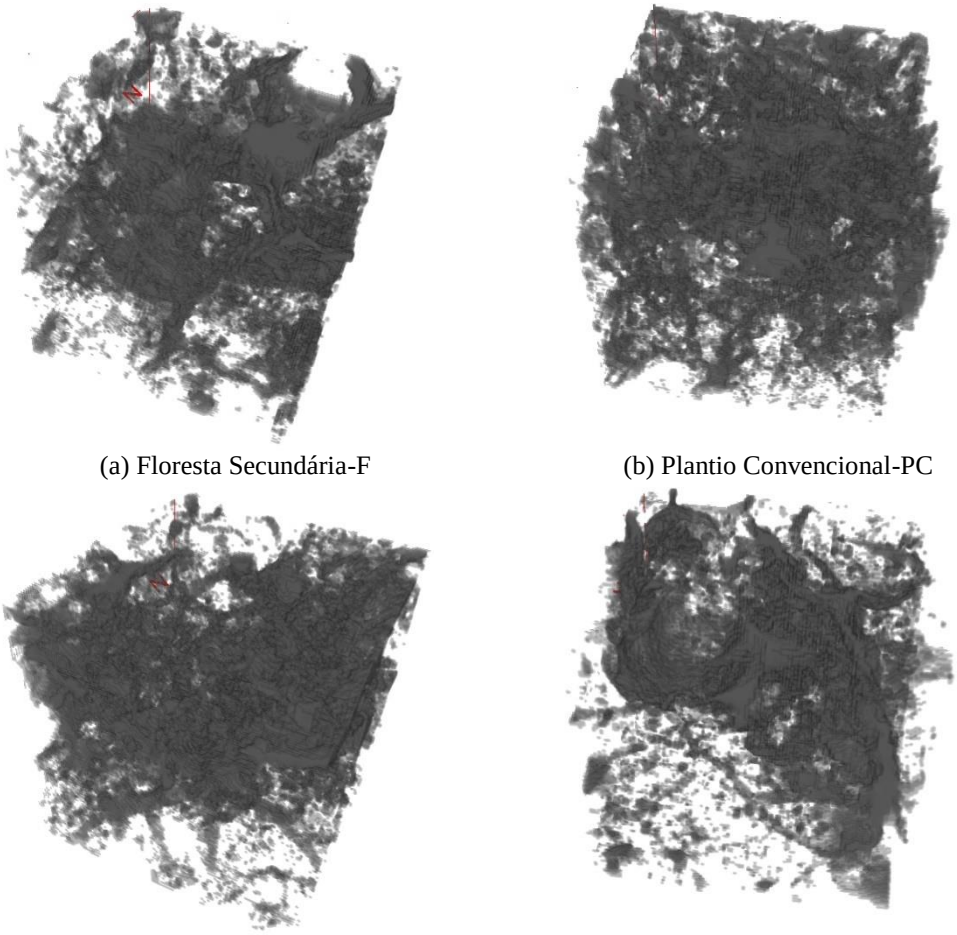
Fonte: O autor.

Nota: Resultados seguidos da mesma letra indicam que não existem diferenças estatísticas entre os dados analisados (Teste de Tukey $p<0,05$). Δ – Grau de multifractalidade. A – Grau de assimetria. D_0 – Dimensão de capacidade ou Dimensão de contagem de caixa. D_1 – Dimensão de informação. D_2 – Dimensão de correlação. $\alpha_{máx}$ – Relacionado a energia interna do sistema. $f(\alpha)_{máx}$ - Relacionado a entropia global do sistema (entropia de Boltzmann). ± indica o desvio padrão da média.

De acordo com Martínez et al. (2010), Siqueira et al. (2013) e Leiva et al. (2019), assimetrias das curvas multifractais para o lado direito, mostram a prevalência de pontos de singularidades (α) mais elevados de maiores variedades, e, portanto, indicam menores concentrações de medidas e valores de $q<0$. Em Posadas et al. (2005), esse mesmo tipo de A para o lado direito do espectro foi relacionado aos baixos padrões de variabilidades espaciais do mineral ulexita, e, portanto, aqui neste trabalho esse tipo de assimetria está relacionado a baixa variabilidade espacial de aglomerados de poros de grandes ou grossos calibres, como podem ser observados na Figura 4.8.

Assim, os menores valores de A (Tabela 4.1) para PC e PM indicam baixas variabilidades de distribuições espaciais de grandes aglomerados de poros (Figuras 4.8b, c) ao longo dos volumes das amostras, ou seja, estes grandes aglomerados de poros são de diâmetros na faixa de intervalos de 100 a 500 µm (inferência ao capítulo 2), e estão mais concentrados em determinadas regiões espaciais dos seus volumes. Este fato aponta para fortes indícios que há alguns poros isolados (não conectados ao resto da rede porosa, mas conectados localmente entre si) decorrentes do revolvimento do solo efetuadas nessas duas práticas de preparo. Para F e PD (0,57 e 0,66), têm-se valores de A mais elevados, significando que existem aglomerados de poros melhores distribuídos espacialmente dentro dos seus volumes (Figuras 4.8a, d), implicando possivelmente em estruturas do solo mais adequadas proporcionadas por esses tratamentos (TAVARES FILHO; TESSIER, 2009).

Figura 4.8 Esqueletos da rede de poros das amostras de solo para os sistemas de preparo (PC, PM e PD) estudados e área sob floresta (F).



(a) Floresta Secundária-F (b) Plantio Convencional-PC

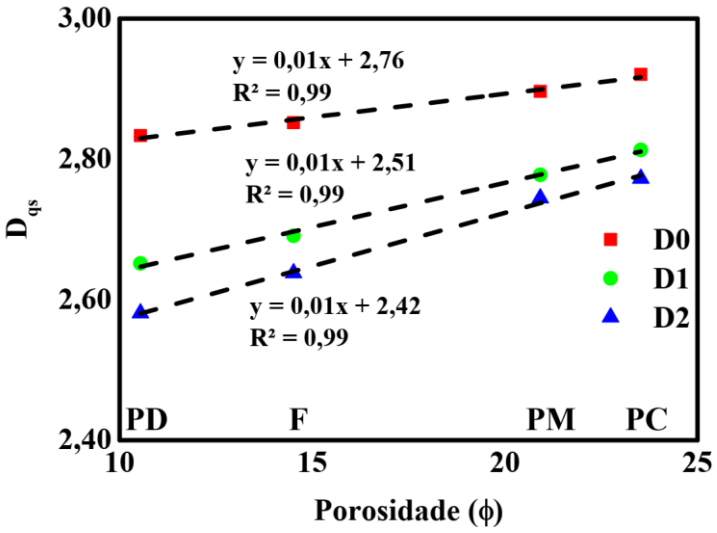
(c) Plantio Cultivo Mínimo-PM (d) Plantio Direto-PD

Fonte: O autor.

Outra evidência da forte multifractalidade presente na distribuição de tamanhos dos poros para os diferentes preparos e F, pode ser verificada pelos decréscimos graduais das dimensões fractais generalizados (D_{qs}), onde $D_0 > D_1 > D_2$ em todos os casos (Tabela 4.1) (Leiva et al., 2019). Novamente, nota-se que os valores das D_{qs} diferem significativamente entre dois pares de grupos (F com PD e PC com PM), sendo todas as D_{qs} para PC e PM maiores que as de F e PD. Observou-se que as D_{qs} aqui calculadas apresentaram relações lineares fortes com as porosidades para os diferentes preparos e F (Figura 4.9). Os pares de grupos que apresentaram maiores valores numéricos de D_{qs} (PM e PC), também possuem as maiores porosidades, sendo que o oposto é verificado para os outros dois grupos (POSADAS et al., 2003; FERREIRA et al., 2019). Esta alta relação linear entre a porosidade e as Dqs indica a presença de consideráveis quantidades de diâmetros de poros pequenos, uma vez que estes possuem maiores capacidades de preenchimentos ou ocupação dos espaços porosos (DENG et al., 2017). D_0 é denominado como dimensão de contagem de caixa (dimensão de capacidade), e reflete as informações gerais

médias do sistema, e, portanto, PC e PM tendem a apresentar maiores informações acerca de seus sistemas porosos quanto à distribuição de tamanhos de poros em relação aos outros dois preparos que apresentam menores valores para esta dimensão fractal generalizada.

Figura 4.9 Relação entre dimensão fractal generalizada e porosidade para área sob floresta secundária (F) e para os três sistemas de preparo do solo (Plantio Convencional – PC, Plantio Cultivo Mínimo – PM e Plantio Direto – PD).



Fonte: O autor.
Nota: Barras de erro nas verticais foram omitidas para melhores visualizações gráficas.

D_1 é associada à dimensão de informação ou à entropia de Shannon, que exprime o grau de incerteza na medida da distribuição dessa informação ou entropia ao longo da escala (WANG et al., 2008; WANG et al. 2015, 2018). Dessa maneira, é possível afirmar que essa imprevisibilidade da medida de distribuição presentes nos diferentes preparos e F estariam associadas a medidas de heterogeneidades e complexidades dos sistemas porosos, e expressadas em termos das maiores e menores larguras e alturas das curvas de distribuições de tamanhos de diâmetros de poros, as quais são apresentadas no segundo capítulo do presente trabalho (WANG et al., 2008; SOTO-GÓMEZ et al., 2020). Assim, os altos valores de D_1 para PM e PC corroboram as maiores diversidades das suas redes porosas, principalmente no PM com clusters de poros superiores a 500 µm comparadas as de F e PD que aparentam serem mais homogêneas, dados pelos seus D_{1s} menores. Os valores de D_1 (Tabela 4.1) corroboram com as curvas de entropias de Shannon normalizadas em função da escala, onde os picos máximos de entropias para um tamanho específico de caixa ocorreram na seguinte ordem: PC > PM > F > PD.

A D_2 quantifica a correlação da medida numa escala de intervalo de tamanho ε ou no caso do presente trabalho em uma caixa de tamanho ε^3 (POSADAS et al., 2003; WANG et al., 2008). Assim, como D_0, D_2 também está relacionado com a distribuição de tamanho de poros

no solo, sendo assim, os maiores valores de D_2 encontrados para PM e PC indicam possibilidades da ocorrência de maiores quantidades de distribuições de poros ao longo das suas redes porosas, mesmo que existam pequenas regiões contendo aglomerados de poros isolados (Figuras 4.7b, c). Na F e PD, estas possibilidades de distribuições de poros apresentam-se em menores quantidades (Figuras 4.7a, d).

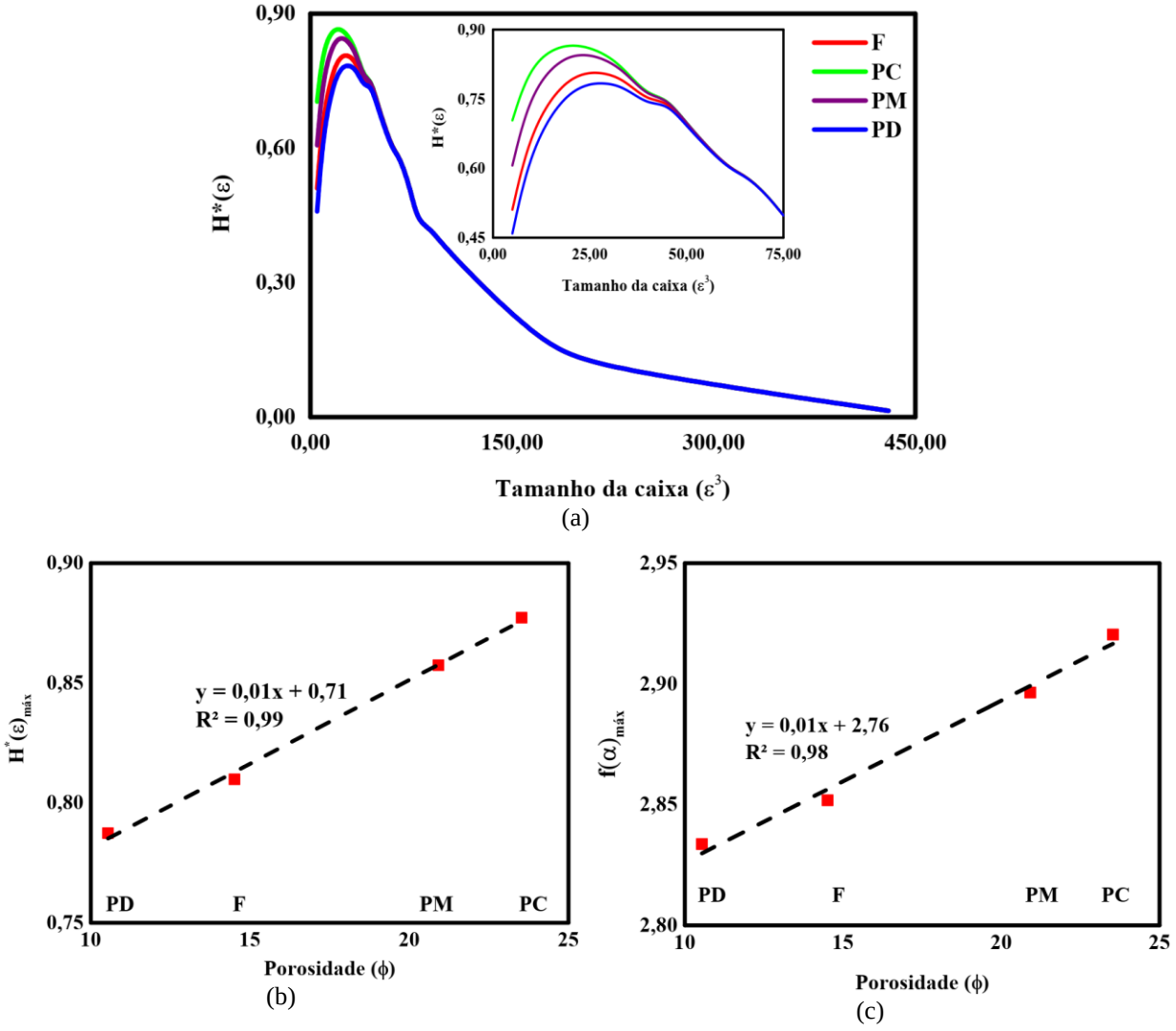
Nas linhas antecedentes discutidas, apresentou-se a estreita relação das Dqs com as distribuições espaciais de tamanhos de diâmetros de poros para os preparos e F. No segundo capítulo deste trabalho, esta estreita relação de variabilidade espacial de distribuição de tamanho de poros é também associada à capacidade de armazenagem de água do sistema poroso desses tratamentos. Portanto, nesse paralelo, PC apresentando os maiores valores de Dqs, é o preparo que deteve maior variação no seu conteúdo de água, estando atrelado à quantidade e disposição espacial dos poros <500 µm, como já discutido. No outro extremo, PD, com menores dimensões fractais generalizadas, foi o tratamento que apresentou a menor variação de conteúdo de água, o que é explicado por meio da menor conectividade e elevada tortuosidade dos seus poros na matriz porosa (Tabela 4.2).

Os parâmetros multifractais $\alpha_{máx}$ e $f(\alpha)_{máx}$ obedecem, respectivamente, a mesma sequência de aumentos para os dois grupos de tratamentos (F com PD e PC com PM) como já verificado para os outros parâmetros analisados (Tabela 4.1). Fisicamente, $\alpha_{máx}$ e $f(\alpha)_{máx}$ estão associados a energia interna e a entropia de Boltzmann ou entropia global média dos sistemas analisados, e, portanto, as energias internas e entropias globais encontradas neste trabalho foram maiores para PC e PM comparadas as da F e PD. A energia interna está relacionada aos estados configuracionais de um sistema, de modo que qualquer mudança abrupta no sistema acarreta na sua elevação. Estes resultados indicam que estes preparos (PC e PM) apresentam maiores variações de energia interna e são mais entrópicos, refletindo assim a instabilidade (vulnerabilidade) do sistema poroso sujeito a alterações provocadas por processos externos intensivos, principalmente no PC. Os preparos como os de PC e PM são submetidos a inversão das camadas superficiais do solo pelo revolvimento, o que promove desorganização da rede de poros, o que resulta em aumento da entropia. Solos com ou sem perturbações como no caso de PD e F, espera-se que apresentem baixas entropias e energias internas como as verificadas aqui neste estudo (POSADAS, 2007; POSADAS et al., 2009).

4.3.3 Entropia de Shannon Normalizada

Analisando os resultados da entropia de Shannon normalizada 3D (Figura 4.10), vê-se por meio dos picos que F e PD possuem as menores $H^*(\varepsilon)_{máx}$ (0,81 e 0,79) quando comparadas a PC e PM (0,88 e 0,86), e que tais resultados corroboram com aqueles quantificados a partir dos espectros multifractais 3D ($f(\alpha)_{máx}$ - entropias de Boltzmann). Para F, PC e PM os valores de $H^*(\varepsilon)_{máx}$ ocorrem para valores ótimos de caixas cúbicas de 20 *voxels* e para PD essa caixa é maior, 30 *voxels*. Segundo Chung et al. (2008) a entropia é uma medida de randomicidade ou incerteza dentro de um conjunto de elementos, a qual para o caso do solo é afetada pela variação da abundância de poros e partículas sólidas no seu interior.

Figura 4.10 (a) Entropia de Shannon Normalizada 3D para área sob floresta secundária (F) e para os três diferentes sistemas de preparo do solo (Plantio Convencional – PC, Plantio Cultivo Mínimo – PM e Plantio Direto – PD). (b) Relação entropia de Shannon normalizada máxima 3D e porosidade. (c) Relação entropia global ou de Boltzmann e porosidade



Fonte: O autor.
Nota: Barras de erro nas verticais foram omitidas para melhores visualizações gráficas.

Assim, o tamanho de caixa cúbica maior para o PD indica uma menor taxa de ocupação pelos poros neste tamanho de caixa (30 *voxels*) e, portanto, o valor de $H^*(\varepsilon)_{máx}$ diminui; resultado oposto foi verificado para PC. A explicação do exposto anteriormente, de acordo com Chung et al. (2008), é devida à probabilidade de distribuições $P_i(\varepsilon)$ de poros ser baixas na ocupação de volume de grandes tamanhos de caixas, e isso acarreta a queda de $H^*(\varepsilon)_{máx}$. A configuração de máxima entropia de valor igual a unidade só será possível quando todos os valores possíveis de i (números de pixels ou *voxels* correspondentes aos poros) num volume de ε^3 sejam igualmente equiprováveis, ou seja, apresentem as mesmas probabilidades $P_i(\varepsilon)$ de ocorrências. Dessa forma, a entropia de Shannon normalizada nos fornece o grau de informação ou incerteza da taxa de ocupação de poros (quantidade de tamanhos de diâmetros de poros) em função da escala para as áreas de floresta secundária e sob os diferentes preparos, permitindo assim também a diferenciação entre os dois grupos distintos de tratamentos como observado anteriormente para outros parâmetros.

Noutro ponto de vista, de acordo com Wang et al. (2008), a complexidade da distribuição de tamanho dos poros aumenta ao passo que o tamanho da caixa diminui, pois a taxa ou a probabilidade de ocupação dessa caixa por poros é maior, mais evidente e definida (para melhor entendimento ver Posadas et al. 2003). Nessa ótica, os maiores de valores de $H^*(\varepsilon)_{máx}$ para PC e PM revelam maior riqueza na quantidade da distribuição de tamanhos de diâmetros de poros, inferindo grande heterogeneidade (complexidade) do sistema poroso nestes tratamentos; e valores menores de $H^*(\varepsilon)_{máx}$ como os encontrados para F e PD refletiriam justamente o oposto, menor riqueza da distribuição de tamanhos de poros, ou seja, ambientes mais homogêneos.

Finalmente, as Figura 4.10b e as Figura 4.10c revelam as relações lineares entre a entropia de Shannon normalizada máxima ($H^*(\varepsilon)_{máx}$) e a entropia de Boltzmann ($f(\alpha)_{máx}$) com as porosidades para os diferentes preparos e F, mostrando que para PC e PM os sistemas porosos são mais heterogêneos, ao passo que em F e PD seus sistemas porosos são mais homogêneos.

4.3.4 Parâmetros Geométricos 3D

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados obtidos para os parâmetros geométricos 3D obtidos a partir da análise das imagens.

Tabela 4.2 Parâmetros geométricos 3D do sistema poroso para área sob floresta secundária (F) e para os três sistemas de preparo do solo (Plantio Convencional – PC, Plantio Cultivo Mínimo – PM e Plantio Direto – PD).

Preparos	F	PC	PM	PD
GA	0,16±0,07	0,14±0,02	0,19±0,07	0,15±0,04
C	3,26±0,56^{a}	10,17±5,15^{b}	5,61±2,48^{ab}	2,64±0,58^{a}
τ	1,41±0,05^{a}	1,30±0,04^{b}	1,31±0,03^{b}	1,52±0,07^{c}

Fonte: O autor.
Nota: Resultados seguidos de letra iguais não apresentam diferenças significativas entre si (Teste de Tukey p<0,05). GA - Grau de anisotropia. C - Conectividade dos poros. τ – Tortuosidade. ± são os desvios padrões.

O parâmetro GA não apresentou diferenças significativas entre os sistemas de preparo e área de floresta, de modo que para este parâmetro os preparos apresentaram os mesmos efeitos na estrutura do solo em relação a F. Os valores de GA próximos de 0 indicam que os sistemas porosos, independentemente do preparo, apresentam-se isotrópicos. Os resultados aqui observados são corroborados pelos trabalhos de Dal Ferro et al. (2014) e, principalmente, Pires et al. (2019), que estudaram o mesmo tipo de solo e preparos. Os baixos valores de GA mostram que os poros no solo não apresentam direções privilegiadas, existindo, portanto, grande correspondência entre as diferentes orientações espaciais (x, y, z) analisadas ou ainda que este parâmetro não foi sensível o suficiente para demonstrar diferenças entre sistemas porosos com aglomerados de poros.

No que concerne à conectividade dos poros, foram encontradas diferenças significativas entre os diferentes preparos do solo (Tabela 4.2). As conectividades medidas seguiram a seguinte sequência: PC > PM > F > PD, resultado semelhante ao observado por Pires et al. (2019). Novamente, pode-se dizer que o solo, após aplicação dos preparos, ficou dividido em dois grupos, PC e PM sendo um deles e F e PD o outro, como já observado para os demais parâmetros medidos.

Via de regra, solos sob práticas de preparo mais intensivas tendem a apresentar maior suscetibilidade a degradação, principalmente em países de clima tropical, como é o caso do plantio convencional, podendo apresentar grandes quantidades de poros com conexões não contínuas, ou seja, poros isolados (TSENG et al., 2018). Neste estudo, a maior conectividade do PC, pode também estar relacionada com o período no qual as amostras foram coletadas no campo experimental, ou seja, quase seis meses após as operações de aração e gradagem. Isto significa que neste período, entre a intervenção e a coleta das amostras, devido principalmente à ação de processos naturais como chuvas, da fauna do solo e sistema radicular da cultura cultivada na época (milho), o solo sofreu mudanças na estrutura de modo a novamente

apresentar agregados, o que provavelmente contribuiu para um aumento da conectividade dos poros.

Os menores valores de conectividade observados para F e PD obtidos neste estudo em relação aos outros dois tratamentos foi algo inesperado, pois esses tratamentos são os que mais apresentam, geralmente, maiores atividades biológicas. No entanto, é válido ressaltar que mesmo assim, o solo sob PD apresenta valores de conectividade dos poros iguais a área sob F, o que indica a boa estrutura do solo sob PD. Galdos et al. (2019) reportaram resultados opostos aos quantificados aqui com relação a conectividade dos poros. Fatores como o tempo no qual o sistema de preparo tem sido empregado, o tipo de cultura cultivada, o tipo de solo, os procedimentos de preparo e os regimes de chuva podem explicar as diferenças observadas entre estudos.

Referente à tortuosidade foram observadas diferenças significativas entre os diferentes preparos, com exceção de PC e PM, e a área sob F (Tabela 4.2). Os preparos PC e PM apresentaram as menores tortuosidades, o que já seria esperado pela quebra da estrutura do solo por estes sistemas de preparo do solo. A tortuosidade dos poros é um parâmetro importante que impacta no crescimento das raízes, movimentação e transporte de massa e energia (água e gases) no solo (BORGES et al., 2019; GALDOS et al., 2019, 2020).

4.3.5 Correlações de Pearson entre os Parâmetros e Propriedades Quantificadas

A fim de aprimorar a compressão das relações entre os parâmetros multifractais e geométricos 3D foi realizada a análise de correlação de Pearson para os diferentes parâmetros avaliados neste estudo (Tabela 4.3).

Os resultados obtidos pela análise de correlação para a floresta secundária (F) com relação aos parâmetros geométricos e multifractais, demonstram correlação negativa entre τ em relação à D_0, D_1, D_2 e $f(\alpha)_{máx}$, e pelos parâmetros multifractais, A, $\alpha_{máx}$, estas também são negativas entre si (p<0,05). Essas correlações negativas permitem afirmar que elevados valores do parâmetro τ indicam que valores mais baixos para os parâmetros D_{qs} e $f(\alpha)_{máx}$ serão encontrados no ambiente poroso, sendo que menores valores de τ poderão sugerir elevados valores para os parâmetros D_{qs} e $f(\alpha)_{máx}$. Consequentemente, o mesmo ocorre com as demais correlações negativas encontradas, como ocorreu em A frente ao $\alpha_{máx}$. Verificou-se correlação positiva entre $f(\alpha)_{máx}$ para D_0, D_1 e D_2 (p<0,05), revelando que a medida em que $f(\alpha)_{máx}$ decai as D_{qs} acompanham esta mesma tendência.

Os resultados de correlação para PD apresentaram comportamento bastante similar ao da F, cujos resultados foram negativos entre os parâmetros multifractais e geométricos (τ com D_0 e $f(\alpha)_{máx}$, $p<0,05$), e entre os geométricos (C e τ, $p<0,05$). As correlações foram positivas entre os parâmetros multifractais: D_1 com relação a D_0 e D_2 e $f(\alpha)_{máx}$ com relação à D_0 e D_1 ($p<0,05$). Portanto, esses resultados para o PD revelam que seu ambiente poroso é semelhante ao da floresta secundária, uma vez que este preparo é o que menos sofre perturbações pelas ações antrópicas.

Os resultados para PC foram correlações positivas ($p<0,05$) entre C para D_0 e $f(\alpha)_{máx}$ sendo significativas, bem como entre os parâmetros multifractais de Δ e $\alpha_{máx}$, $f(\alpha)_{máx}$ com D_0 e D_1. O mesmo ocorreu entre as D_{qs} quando são comparadas as da F, as quais foram negativas. Um exemplo desse tipo de comportamento pode ser verificado nas dimensões fractais generalizados, onde há essa tendência tanto positiva quanto negativa para a correlação de D_1 com relação à D_0 e D_2. Segundo Soto-Gómez et al. (2020) todos esses resultados de correlações encontradas para este preparo (PC) sugerem certo nível de complexidade da rede de poros.

Os resultados para o PM, assim como no PC, foram de correlações positivamente fortes ($r>0,9$), ocorrendo entre τ e D_1 em relação mútua de diminuição dos valores desses parâmetros, assim como em C com Δ, D_0, $\alpha_{máx}$ e $f(\alpha_{máx})$ nas relações de aumentos recíprocos (parâmetros multifractais - geométricos). Dentro dos parâmetros multifractais, estas ocorreram entre D_0 e $f(\alpha)_{máx}$ e Δ com D_0, $\alpha_{máx}$ e $f(\alpha)_{máx}$, e o vínculo entre os mesmos será no sentido direto dos seus valores. O PM pode ser considerado um preparo intermediário entre o PC e o PD, e, sendo assim, essas correlações de parâmetros indicariam possivelmente uma complexidade média da sua estrutura porosa.

De modo geral, observaram-se correlações negativas entre os parâmetros multifractais e geométricos τ, D_0 e $f(\alpha)_{máx}$ em comum para F e PD, e positivas entre C, D_0 e $f(\alpha)_{máx}$ para PC e PM. Assim, tais correlações sugerem que a arquitetura porosa não segue uma tendência linear para todos os preparos e nem em F a partir da avaliação de seus parâmetros multifractais e geométricos, caracterizando, assim, a dinamicidade e complexidade desses ambientes (MONREAL et al., 2013; MUÑOZ-ORTEGA et al., 2015).

Tabela 4.3 Matriz de correlação linear entre os parâmetros multifractais e morfométricos 3D para área sob floresta secundária (F) e os diferentes preparos (Plantio Convencional – PC, Plantio Cultivo Mínimo – PM e Plantio Direto - PD). continua

F_Coeficiente de correlação de Pearson (*r*)										
	GA	C	τ	Δ	A	D_0	D_1	D_2	$\alpha_{máx}$	$f(\alpha)_{máx}$
GA	1,00	-0,02	0,22	-0,46	0,62	-0,48	-0,53	-0,40	-0,72	-0,48
C	--	1,00	-0,14	0,13	0,04	-0,04	-0,03	-0,04	0,10	-0,04
τ	--	--	1,00	0,44	0,49	**-0,94**	**-0,92**	**-0,96**	-0,09	**-0,94**
Δ	--	--	--	1,00	-0,52	-0,34	-0,16	-0,27	0,84	-0,34
A	--	--	--	--	1,00	-0,57	-0,73	-0,67	**-0,88**	-0,57
D_0	--	--	--	--	--	1,00	**0,98**	**0,98**	0,22	**1,00**
D_1	--	--	--	--	--	--	1,00	**0,99**	0,39	**0,98**
D_2	--	--	--	--	--	--	--	1,00	0,29	**0,98**
$\alpha_{máx}$	--	--	--	--	--	--	--	--	1,00	0,22
$f(\alpha)_{máx}$	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1,00
PC_Coeficiente de correlação de Pearson (*r*)										
GA	1,00	0,21	0,06	-0,69	0,39	-0,11	0,03	-0,08	-0,67	-0,11
C	--	1,00	0,39	-0,34	0,74	**0,92**	0,83	0,52	-0,29	**0,92**
τ	--	--	1,00	-0,35	0,86	0,15	-0,17	-0,53	-0,55	0,15
Δ	--	--	--	1,00	-0,61	-0,04	-0,08	0,00	**0,96**	-0,04
A	--	--	--	--	1,00	0,45	0,24	-0,15	-0,71	0,45
D_0	--	--	--	--	--	1,00	**0,93**	0,72	0,05	**1,00**
D_1	--	--	--	--	--	--	1,00	**0,90**	0,09	**0,93**
D_2	--	--	--	--	--	--	--	1,00	0,23	0,72
$\alpha_{máx}$	--	--	--	--	--	--	--	--	1,00	0,05
$f(\alpha)_{máx}$	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1,00

Tabela 4.4 Matriz de correlação linear entre os parâmetros multifractais e morfométricos 3D para área sob floresta secundária (F) e os diferentes preparos (Plantio Convencional – PC, Plantio Cultivo Mínimo – PM e Plantio Direto - PD). conclusão

PM_Coeficiente de correlação de Pearson (*r*)										
GA	1,00	-0,55	-0,76	-0,35	-0,03	-0,49	-0,62	0,34	-0,29	-0,49
C	--	1,00	0,08	**0,98**	0,13	**0,95**	-0,11	-0,73	**0,92**	**0,95**
τ	--	--	1,00	-0,09	-0,52	-0,02	**0,98**	0,32	0,00	-0,02
Δ	--	--	--	1,00	0,10	**0,93**	-0,26	-0,71	**0,96**	**0,93**
A	--	--	--	--	1,00	0,21	-0,61	-0,73	-0,17	0,21
D_0	--	--	--	--	--	1,00	-0,20	-0,70	0,87	**1,00**
D_1	--	--	--	--	--	--	1,00	0,49	-0,14	-0,20
D_2	--	--	--	--	--	--	--	1,00	-0,49	-0,70
$\alpha_{máx}$	--	--	--	--	--	--	--	--	1,00	0,87
$f(\alpha)_{máx}$	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1,00
PD_Coeficiente de correlação de Pearson (*r*)										
GA	1,00	0,00	-0,10	-0,02	0,36	0,25	0,42	0,40	0,18	0,25
C	--	1,00	**-0,92**	0,24	-0,45	0,84	0,85	0,83	0,78	0,84
τ	--	--	1,00	-0,25	0,09	**-0,90**	-0,78	-0,69	-0,63	**-0,90**
Δ	--	--	--	1,00	0,16	-0,16	-0,11	-0,08	0,65	-0,16
A	--	--	--	--	1,00	-0,15	-0,39	-0,52	-0,42	-0,15
D_0	--	--	--	--	--	1,00	**0,90**	0,81	0,42	**1,00**
D_1	--	--	--	--	--	--	1,00	**0,98**	0,62	**0,90**
D_2	--	--	--	--	--	--	--	1,00	0,68	0,81
$\alpha_{máx}$	--	--	--	--	--	--	--	--	1,00	0,42
$f(\alpha)_{máx}$	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1,00

Fonte: O autor.

Nota: Valores em negrito demonstram correlação significativa a $p<0,05$. GA - Grau de anisotropia. C - Conectividade dos poros. τ – Tortuosidade. Δ – Grau de multifractalidade. A – Grau de assimetria. D_0 – Dimensão de capacidade ou Dimensão de contagem de caixa. D_1 – Dimensão de informação. D_2 – Dimensão de correlação. $\alpha_{máx}$ – Relacionado a energia interna do sistema. $f(\alpha)_{máx}$ - Relacionado a entropia global do sistema (entropia de Boltzmann).

CONCLUSÕES

A principal conclusão foi que a abordagem multifractal 3D permitiu a diferenciação do sistema poroso do solo quando submetido a diferentes preparos e área sob floresta

secundária. Foram separados dois grupos de preparos com características bem distintas entre si, sendo eles: F com PD e PM com PC. As análises de lacunaridade 3D mostraram que F e PD quando comparados a PM e PC apresentam maiores valores destes parâmetros e são corroboradas pelas porosidades acessadas pela imagem e curvas de distribuições de tamanhos de diâmetros de poros dos capítulos anteriores.

Constatou-se que as dimensões generalizadas (D_0, D_1 e D_2), entropia de Shannon normalizada máxima e a entropia de Boltzmann ou global apresentam fortes correlações lineares com as porosidades dos preparos e F, podendo inferir indiretamente informações a respeito das mesmas serem maiores ou menores para um ou outro preparo com base nos seus valores. Lacunaridades 3D e dimensões fractais generalizadas também apontaram para as variabilidades dos padrões espaciais de distribuições de diâmetros de poros para cada um dos preparos e F, bem como questões relacionadas aos processos de armazenamentos dos seus conteúdos de água junto as suas respectivas redes porosas.

As curvas de espectros multifractais 3D se revelaram assimétricas para os diferentes tratamentos estudados, podendo também serem associadas às distribuições de aglomerados de poros condizente a cada um desses tratamentos. As quantificações dos parâmetros multifractais advindos das mesmas permitiram uma análise mais rica, e assim pode-se observar comportamentos similares (o que é verificado visualmente nas curvas) entre dois grupos de tratamentos. Os parâmetros multifractais $\alpha_{máx}$ e $f(\alpha)_{máx}$ permitiram a exploração de propriedades termodinâmicas de energia interna e entropia global dos tratamentos estudados, possibilitando melhor compreensão das modificações provocadas nos seus sistemas porosos pelas análises de cada um deles, e em adição aos parâmetros geométricos na sua grande maioria auxiliaram nas explicações dos resultados obtidos pela abordagem multifractal 3D.

Finalmente, as entropias de Shannon normalizadas corroboram também para a separação dos dois grupos, em que F e PD apresentaram menores valores de entropias, porém em tamanhos de caixas cúbicas diferentes, ao passo que PM e PC tiveram os mais altos valores para um mesmo tamanho de caixa. Cabe aqui também salientar a potencialidade e sensibilidade da abordagem multifractal 3D para a caracterização e diferenciação dos ambientes porosos complexos dessas amostras de solo.

REFERÊNCIAS

ALLAIN, C.; CLOITRE, M. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. **Physical review A**, v. 44, n. 6, p. 3552, 1991.

ANDRAUD, C.; BEGHDADI, A.; LAFAIT, J. Entropic analysis of random morphologies. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 207, n. 1-3, p. 208-212, 1994.

ANDRAUD, C. et al. Local entropy characterization of correlated random microstructures. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 235, n. 3-4, p. 307-318, 1997.

BORGES, J. A. R et al. X-ray computed tomography for assessing the effect of preparation systems on topsoil morphological attributes. **Soil and Tillage Research**, v. 189, p. 25-35, 2019.

BEGHDADI, A. et al. Entropic and multifractal analysis of disordered morphologies. **Fractals**, v. 1, n. 03, p. 671-679, 1993.

BROWN, J. H. et al. The fractal nature of nature: power laws, ecological complexity and biodiversity. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 357, n. 1421, p. 619-626, 2002.

CHHABRA, A.; JENSEN, R. V. Direct determination of the f(α) singularity spectrum. **Physical Review Letters**, v. 62, n. 12, p. 1327, 1989.

CHHABRA, A. B. et al. Direct determination of the f(α) singularity spectrum and its application to fully developed turbulence. **Physical Review A**, v. 40, n. 9, p. 5284–5294, 1989.

CHUNG, H. C. et al. Morphology, lacunarity and entropy of intra-aggregate pores: Aggregate size and soil management effects. **Geoderma**, v. 146, n. 1-2, p. 83-93, 2008.

CHUNG, H. C. et al. Review of Soil Structure Quantification from Soil Images. **Korean Journal of Soil Science and Fertilizer**, v. 44, n. 3, p. 517-526, 2011.

DAL FERRO, N. et al. Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilisation treatments. **Soil and Tillage Research**, v. 119, p. 13–21, 2012.

DAL FERRO, N. et al. Soil macro-and microstructure as affected by different preparation systems and their effects on maize root growth. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 55-65, 2014.

DENG, Y. et al. Fractal features of soil particle size distribution under different land-use patterns in the alluvial fans of collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China. **PLoS One**, v. 12, n. 3, p. e0173555, 2017.

DONG, P. Test of a new lacunarity estimation method for image texture analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 17, p. 3369-3373, 2000.

DOS SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

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

DULLIEN, F. A. L. **Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure**. 2 ed. San Diego: Academic Press, 1992.

FERREIRA, T. R. et al. Lime application effects on soil aggregate properties: use of the mean weight diameter and synchrotron-based X-ray μCT techniques. **Geoderma**, v. 338, p. 585-596, 2019.

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.

GALDOS, M. V. et al. Brachiaria species influence nitrate transport in soil by modifying soil structure with their root system. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2020.

GOULD, D. J. et al. Multifractal and lacunarity analysis of microvascular morphology and remodeling. **Microcirculation**, v. 18, n. 2, p. 136-151, 2011.

HARRIGAN, T. P.; MANN, R. W. Characterization of microstructural anisotropy in orthotropic materials using a second rank tensor. **Journal of Materials Science**, v. 19, n. 3, p. 761-767, 1984.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Elsevier, 2003. 494 p.

JORGE, L. C. et al. Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo. **Embrapa Instrumentação-Documentos (INFOTECA-E)**, 2008.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of soil physics**. CRC Press, 2004.

LEIVA, J. O. R. et al. Multifractal analysis of soil penetration resistance under sugarcane cultivation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 7, p. 538-544, 2019.

LUO, L.; LIN, H. Lacunarity and fractal analyses of soil macropores and preferential transport using micro-X-ray computed tomography. **Vadose Zone Journal**, v. 8, n. 1, p. 233-241, 2009.

MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**/Revised and enlarged edition. whf, 1983. 468 p.

MARTÍNEZ, F. S. J. et al. Multifractal analysis of discretized X-ray TC images for the characterization of soil macropore structures. **Geoderma**, v. 156, n. 1-2, p. 32-42, 2010.

MARTÍNEZ, F. S. J.; CANIEGO, F. J.; GARCÍA-GUTIÉRREZ, C. Lacunarity of soil macropore space arrangement of TC images: effect of soil management and depth. **Geoderma**, v. 287, p. 80-89, 2017.

MITCHELL, J. K.; KENICHI, S. **Fundamentals of soil behavior**. Vol. 3. New York: John Wiley & Sons, 2005.

MONREAL, J. C. et al. Lacunarity of the spatial distributions of soil types in Europe. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 3, 2013.

MUNOZ-ORTEGA, F. J.; MARTÍNEZ, F. S. J.; MONREAL, F. C. Volume, surface, connectivity and size distribution of soil pore space in TC images: comparison of samples at different depths from nearby natural and preparation areas. **Pure and Applied Geophysics**, v. 172, n. 1, p. 167-179, 2015.

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.

PACHEPSKY, Y. A. et al. Conventional and fractal geometry in soil science. *In:* **Developments in Soil Science. Elsevier**, 2000. p. 7-18.

PACHEPSKY, Y.; PERFECT, E.; MARTIN, M. A. **Fractal geometry applied to soil and related hierarchical systems**. 2006.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O.; REICHARDT, K. Damage to soil physical properties caused by soil sampler devices as assessed by gamma ray computed tomography. **Soil Research**, v. 42, n. 7, p. 857-863, 2004.

PIRES, L. F. et al. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting preparation systems by X-ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 197-206, 2019.

PIRES, L. F. et al. X-ray microtomography to evaluate the efficacy of paraffin wax coating for soil bulk density evaluation. **Geoderma**, v. 337, p. 935-944, 2019.

POSADAS, A. N. D. et al. Multifractal Characterization of Soil Pore Systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 5, p. 1361, 2003.

PIRES, L. F. et al. Multifractal characterization of the spatial distribution of ulexite in a Bolivian salt flat. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 3, p. 615-627, 2005.

PIRES, L. F. et al. Characterizing water fingering phenomena in soils using magnetic resonance imaging and multifractal theory. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 16, n. 1, p. 159, 2009.

POSADAS, A. N. D. Characterizing and modeling preferential flow using magentic resonance imaging and multifractal theory. **International Potato Center**, 2007.

ROQUE, W. L. et al. The Euler-Poincaré characteristic applied to identify low bone density from vertebral tomographic images. **Revista Brasileira de Reumatologia**. Campinas. Vol. 49, no. 2 (mar./abr. 2009), p. 140-152, 2009.

ROQUE, W. L; ARCARO, K.; LANFREDI, R. B. Tortuosidade e conectividade da rede trabecular do rádio distal a partir de imagens microtomográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, v. 28, n. 2, p. 116-123, 2012.

ROY, A.; PERFECT, E. Lacunarity analyses of multifractal and natural grayscale patterns. **Fractals**, v. 22, n. 03, p. 1440003, 2014.

ROY, A. et al. A technique for revealing scale-dependent patterns in fracture spacing data. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 119, n. 7, p. 5979-5986, 2014.

SANTOS, R. A.; GEORGETTI, G. B. Anisotropy Effect on the Small Strain Shear Modulus of a Compacted Lateritic Soil. *In:* **10th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 2018, Rio de Janeiro. 10th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics**, 2018.

SANTOS, C. R. et al. 3D soil void space lacunarity as an index of degradation after land use change. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 42, 2020.

SOTO-GÓMEZ, D. et al. 3D multifractal characterization of computed tomography images of soils under different tillage management: Linking multifractal parameters to physical properties. **Geoderma**, v. 363, p. 114129, 2020.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **Bell System Technical Journal**, v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948.

SAMPURNO, J. et al. Multifractal characterization of pore size distributions of peat soil. **Journal of Mathematical and Fundamental Sciences**, v. 48, n. 2, p. 106-114, 2016.

SARKAR, N.; CHAUDHURI, B. B. An efficient approach to estimate fractal dimension of textural images. **Pattern recognition**, v. 25, n. 9, p. 1035-1041, 1992.

SARKAR, N.; CHAUDHURI, B. B. Multifractal and generalized dimensions of gray-tone digital images. **Signal Processing**, v. 42, n. 2, p. 181-190, 1995.

SIQUEIRA, G. M. et al. Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at the field scale. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 20, n. 4, 2013.

SZCZEPANIAK, A.; MACEK, W. M. Asymmetric multifractal model for solar wind intermittent turbulence. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 15, n. 4, p. 615-620, 2008.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Characterization of soil structure and porosity under long-term conventional tillage and no-tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1837-1844, 2009.

TORRE, I. G. et al. Multifractal analysis of 3D images of tillage soil. **Geoderma**, v. 311, p. 167-174, 2018.

TSENG, C. L.; ALVES, M. C.; CRESTANA, S. Quantifying physical and structural soil properties using X-ray microtomography. **Geoderma**, v. 318, p. 78-87, 2018.

WANG, D. et al. Multifractal characteristics of soil particle size distribution under different land-use types on the Loess Plateau, China. **Catena**, v. 72, n. 1, p. 29-36, 2008.

WANG, J. et al. Multi-fractal characteristics of the particle distribution of reconstructed soils and the relationship between soil properties and multi-fractal parameters in an opencast coal-mine dump in a loess area. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 8, p. 4749-4762, 2015.

WANG, J. et al. Multi-fractal characteristics of three-dimensional distribution of reconstructed soil pores at opencast coal-mine dump based on high-precision TC scanning. **Soil and Tillage Research**, v. 182, p. 144-152, 2018.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados apresentados ao longo dos três capítulos deste trabalho, conclui-se que as hipóteses levantadas inicialmente foram todas confirmadas. Nos dois primeiros capítulos observou-se que as propriedades físicas e micromorfológicas dos solos foram alteradas pela adoção do sistema de preparo e/ou pelos ciclos de U-S adotados para a análise. Estas modificações nas propriedades físicas e micromorfológicas foram verificadas principalmente por meio das CDPs em termos das variações na amplitude de frequência de poros, das porosidades acessadas pelas imagens e funcionalidades dos poros em cada um dos preparos realizados e na floresta secundária.

O algoritmo computacional em 3D foi sensível para quantificar as diferenças introduzidas no sistema poroso dos solos em escala micrométrica, ora pela prática de preparo empregada, ora pela ação dos ciclos de U-S aplicados neste estudo. A utilização do algoritmo para obtenção das curvas parciais de retenção de água se mostrou relativamente adequado, e, portanto, representa uma alternativa para obtenção rápida de propriedades associadas à retenção de água pelo solo. A validação dessa análise ocorreu mediante comparação com o método tradicional (mesa de tensão) de aquisição dessas mesmas curvas em laboratórios.

A abordagem multifractal 3D revelou-se uma ferramenta adequada para a caracterização de sistemas porosos complexos como o solo, os quais puderam ser separados em diferentes grupos que apresentavam elevado grau de semelhanças (auto similaridades) entre si. Essas semelhanças para a divisão dos grupos foram observadas por meio dos resultados de parâmetros de lacunaridade, espectros multifractais e entropia de Shannon 3D.

POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS

I) Aplicar grande parte das análises aqui feitas para imagens com maiores resoluções a fim de estudar o comportamento dos poros menores, ou seja, diâmetros de poros inferiores a 70 μm;
II) Adquirir e comparar CDPs mediante outros métodos de simulações computacionais, como por exemplo, watershed, poro-ligação etc.;
III) Analisar e verificar a influência dos ciclos de umedecimento e secamento para uma classificação de formatos de poros (poros alongados, arredondados, dentre outros);
IV) Explorar mais a fundo a parte termodinâmica do sistema poroso por intermédio da abordagem multifractal;
V) Aplicar outros modelos multimodais para as interpolações das curvas de retenção de água no solo.

APÊNDICE A – PROGRAMA LAC3D.M PARA OBTENÇÕES DAS LACUNARIDADES 3D

```
clear all; clc;

img_i = 1; %Imagem inicial
img_f = 500; %Imagem final
extension = '.bmp';
default_folder = 'C:...'; %Local do diretório de seleção das imagens

%% Carrega imagens de uma pasta (todas as imagens *.bmp)
% Customiza o carregamento (uma sequência de arquivos de um diretório)
root_dir = uigetdir(default_folder,'Open image directory');
filenames = {};
for i=img_i:img_f
        filenames = [filenames, fullfile(root_dir,strcat(num2str(i),extension))];
end

% Carregamento automático (toda a sequência de arquivos de um diretório)
% root_dir = uigetdir([],'Open image directory');
% filelist = dir(root_dir);
% filenames = {};
% for i=1:length(filelist)
                % filename = filelist(i).name;
                % [filepath,name,ext] = fileparts(filename);
                %if(isequal(ext,extension))
                %filenames = [filenames, fullfile(root_dir,filelist(i).name)];
        %end
% end

if(~isempty(filenames))
                imginfo = imfinfo(filenames{1});
                Image3D = zeros([imginfo.Height ,imginfo.Width ,length(filenames)]);
                for i=1:length(filenames)
```

```
            Image3D(:,:,i) = single(imread(filenames{i}));
        end
else
        error('Não há imagens disponíveis na pasta selecionada!');
end

%% Ajusta as dimensões imagem 3D
im_size = size(Image3D);
min_dim = min(im_size);
diff_dim1 = abs(min_dim-im_size(1));
diff_dim2 = abs(min_dim-im_size(2));
diff_dim3 = abs(min_dim-im_size(3));
idx1 = (1+floor(diff_dim1/2)):(im_size(1)-ceil(diff_dim1/2));
idx2 = (1+floor(diff_dim2/2)):(im_size(2)-ceil(diff_dim2/2));
idx3 = (1+floor(diff_dim3/2)):(im_size(3)-ceil(diff_dim3/2));
Image3D = Image3D(idx1,idx2,idx3);
clear diff_dim1;clear diff_dim2;clear diff_dim2;
clear idx1;clear idx2;clear idx3;

%% Binarizações das imagens
level = 0.5;
%[level, em] = graythresh(Image3D);
%Image3D = imbinarize(Image3D,level);
Image3D = Image3D>level;

%% Calcula divisores
D = divisors(min_dim);
%D = D(2:(end-1)); Descomentar para remover o primeiro e último divisor.
div_str = '';
for i=1:length(D)
            if(i<length(D))
            div_str = strcat(div_str,num2str(D(i)),',');
        else
            div_str = strcat(div_str,num2str(D(i)));
```

```
                end
end
answer = inputdlg('Enter comma-separated numbers:','L-Values', [10 50],{div_str});
if(~isempty(answer))
        D_user = [];
        %answer = split(answer{1},','); %Matlab2018a version
        answer = strsplit(answer{1},',');
        for i=1:length(answer)
        D_user = [D_user, str2num(answer{i})];
        end
        D = D_user;
end

%% Calcula Pk(L)
tic
r_Lac = [];
for r = length(D):-1:1
        L = D(r);
        fprintf('L = %d\n',L);
        Nx = floor(size(Image3D,2)/L);
        Ny = floor(size(Image3D,1)/L);
        Nz = floor(size(Image3D,3)/L);
        N = zeros(Ny,Nx,Nz);
for z1 = 1:Nz
        z = z1-1;
        z = ((z*L)+1):((z*L)+L);
        N(:,:,z1) = blockproc(Image3D,[L L],@(k) sum_3D(k,z));
end

  %Inicio do calculo da lacunaridade

         [Q,edges] = histcounts(N(:),'Normalization','probability');
        Q = Q';
        s = movsum(edges,2)/2;
```

```
        s=s(2:end);
        Z1 = s*Q;
        Z2 =(s.^2)*Q;
        Lac=Z2/((Z1).^2); %Image3D calcula a lacunaridade 3D
        %forward concat
        %r_Lac=[r_Lac; L,Lac]; %Valores de lacunaridade 3D em função do tamanho das caixas 3D
        %backward concat
        r_Lac=[L,Lac; r_Lac]; %Valores de lacunaridade 3D em função do tamanho das caixas 3D
end
toc

%% Salvando e mostrando resultados
dlmwrite(fullfile(root_dir,'Nome_Arquivo.txt'),r_Lac,'delimiter','\t','newline','pc');  %Arquivo de saída valores de lacunaridade 3D em função do tamanho das caixas 3D

y = log(r_Lac(:,2));
x = log(r_Lac(:,1));
N=length(x);
X=[ones(N,1) x];
a=(X.'*X)\(X.'*y(:));
b = a(1);
m = a(2);
xm=min(x);
xM=max(x);
x_1=linspace(xm,xM,20);
f=b+m*x_1;
%beta associado à lacunaridade é o m
beta=m;
plot(x,y,'ok')
hold on
plot (x_1,f,'-r')
```

APÊNDICE B - ARTIGOS PUBLICADOS ORIGINÁRIOS DESTA PESQUISA

Título: The porous size distribution obtained and analyzed by free access software.
DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-20200192

Título: Modeling of soil water retention based on 3D micro-tomographic image analysis.

Título: Estimating soil porosity and pore size distribution changes due to wetting-drying cycles by morphometric image analysis.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104814

Título: Quantification of the pore size distribution of a Rhodic Hapludox under different preparation systems with X-ray microtomography and computational simulation.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104941