

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIA RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Douglas Leandro Scheid

Espaço poroso avaliado por tomografia e propriedades hídricas e mecânicas em solos argilosos sob culturas anuais e campo natural

Santa Maria, RS
2020

Douglas Leandro Scheid

Espaço poroso avaliado por tomografia e propriedades hídricas e mecânicas em solos argilosos sob culturas anuais e campo natural

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS
2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Scheid, Douglas Leandro

Espaço poroso avaliado por tomografia e propriedades hídricas e mecânicas em solos argilosos sob culturas anuais e campo natural / Douglas Leandro Scheid.- 2020.
83 p.; 30 cm

Orientador: José Miguel Reichert

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, RS, 2020

1. Estrutura do solo 2. Alteração de uso do Solo 3. Permeabilidade do solo 4. Conectividade I. Reichert, José Miguel II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, DOUGLAS LEANDRO SCHEID, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Douglas Leandro Scheid

Espaço poroso avaliado por tomografia e propriedades hídricas e mecânicas em solos argilosos sob culturas anuais e campo natural

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Aprovado em 16 de julho de 2020:

José Miguel Reichert, Dr. (UFSM) - Videoconferência
(Presidente/Orientador)

Dalvan José Reinert, Dr (UFSM) -Videoconferência

Paulo Ivonir Gubiani, Dr. (UFSM) - Videoconferência

Dörthe Holthusen, Dr. - Videoconferência

Gabriel Oladele Awe, Dr. - Videoconferência

Santa Maria, RS
2020

DEDICATÓRIA

A minha família, em especial meus pais, Nelson Pedro Scheid e Ivete Amália Scheid, pelo constante apoio e por sempre acreditarem em mim. Dedico também a meu irmão, Jardel Luiz Scheid pelo auxílio

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da existência e por tudo de maravilhoso.

Aos meus pais, Nelson e Ivete e meu irmão Jardel pelo apoio incondicional, compreensão nos momentos de ausência e por sempre incentivarem a busca pelo conhecimento.

Ao orientador, professor e doutor José Miguel Reichert, pelos ensinamentos e momentos de discussão e reflexão, mas também os de descontração.

A banca examinadora pelas discussões e contribuições que engrandeceram a qualidade do trabalho.

Aos professores do curso pelo conhecimento repassado e discussões proporcionadas, que foram e serão muito importantes.

Aos colegas de curso pela amizade e troca de conhecimentos que foram de inestimável ajuda.

Aos colegas do grupo de pesquisa que não mediram esforços no auxílio da condução dos trabalhos.

Aos meus amigos por todo apoio, ajuda e pelos muitos momentos de alegria e descontração.

À CAPES pela bolsa de doutorado.

À Universidade Federal de Santa Maria pela estrutura, área experimental, laboratórios, equipamentos e apoio a realização deste trabalho.

Ao Povo Brasileiro, pelo ensino superior gratuito e de qualidade.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. **MUITO OBRIGADO!!**

RESUMO

ESPAÇO POROSO AVALIADO POR TOMOGRAFIA E PROPRIEDADES HÍDRICAS E MECÂNICAS EM SOLOS ARGILOSOS SOB CULTURAS ANUAIS E CAMPO NATURAL

AUTOR: Douglas Leandro Scheid
ORIENTADOR: José Miguel Reichert

A crescente demanda por alimentos e energia provocou uma intensificação na agricultura, com incorporação de novas áreas resultando em mudanças do uso do solo. A agricultura utiliza máquinas de grande porte, as quais aplicam pressões elevadas sobre os solos. As pressões podem resultar em alterações no sistema poroso do solo, alterando a permeabilidade do sistema poroso. O objetivo geral foi compreender o comportamento mecânico do solo e o efeito de pressões normais estáticas e transientes na permeabilidade de diferentes classes de solo do Planalto do Rio Grande do Sul, mediante utilização de ensaios mecânicos, avaliação da permeabilidade e escaneamento de raios-X. Amostras de solo foram coletadas em perfis sob campo nativo e uso agrícola, com duas classes de solo para cada uso: Latossolo Vermelho e Nitossolo Vermelho. Amostras foram coletadas com cilindros volumétricos na parte central de cada horizonte (Hz). Nas amostras foi mensurada a curva de retenção de água, a permeabilidade do solo ao ar (K_a), condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), a pressão de pré-consolidação e índice de compressão. Os ensaios de compressibilidade foram realizados em dois conjuntos de amostras: (i) aplicação de pressões de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa sequencialmente, com tempo de aplicação da pressão por 20 minutos e (ii) aplicação das pressões 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa com 30 ciclos de carregamento e descarregamento de cada pressão. O ensaio foi interrompido após a aplicação de cada pressão para medição da permeabilidade do solo ao ar. Além disso foram obtidas imagens tomográficas para caracterização da macroporosidade do solo. A condutividade hidráulica do solo saturado demonstrou a alteração na estrutura do solo, com diminuição de três a cinco vezes em cultivo agrícola em relação ao campo nativo. A pressão de pré-consolidação foi maior nos solos sob campo nativo e o índice de compressão foi maior nos horizontes superficiais do solo, indicando que as camadas superficiais dos solos são susceptíveis a compactação e que a subsuperfície já sofreu alterações devido a propagação das pressões aplicadas por tráfego de máquinas. A análise das imagens de tomografia permitiu distinguir a condição estrutural dos solos sob os diferentes usos. No campo nativo, a rede de poros está mais conectada, com maiores valores de conectividade e com poros de maior tamanho. Nos solos sob cultivo agrícola, os Hz superficiais tem predomínio de poros menores e menor conectividade. Entretanto, a permeabilidade do solo foi sensível ao rearranjo da estrutura do solo devido a aplicação de pressões, com diminuição nos valores na menor pressão aplicada 12,5 kPa. A permeabilidade do solo ao ar não foi alterada devido ao tipo de ensaio de compressibilidade estático ou cíclico. A tomografia computadorizada de raios-x é uma aliada na detecção de alterações na estrutura do solo, permitindo explicar o comportamento de propriedades de intensidade, como a condutividade hidráulica saturada e a permeabilidade do solo ao ar.

Palavras chave: Alteração uso do solo. Condutividade hidráulica saturada. Permeabilidade. Conectividade.

ABSTRACT

PORE SPACE EVALUATED BY TOMOGRAPHY AND HYDRIC AND MECHANICAL PROPERTIES IN CLAYEY SOILS UNDER ANNUAL CROPS AND NATURAL GRASSLAND

AUTHOR: Douglas Leandro Scheid

ADVISOR: José Miguel Reichert

The growing demand for food and energy causes an intensification in agriculture, which uses larger machines and results in high pressures applied to the soil. As the pressures increase there are changes in the soil porous system, affecting the permeability of the porous system. The general objective was to understand the mechanical behavior of the soil and the effect of normal and transient pressures and the corresponding permeability of different classes of soil in the Plateau of Rio Grande do Sul, making use of mechanical tests, evaluating permeability and employing X-ray scanning. Soil samples were collected in profiles under native grassland and agricultural use, in two soil types: "Latossolo Vermelho" and "Nitossolo Vermelho" (Brazilian Soil Classification System), both are Typic Hapludox by Soil Taxonomy. Samples were collected with volumetric cylinders in the central part of each horizon (Hz). In the samples, the water retention curve, soil permeability to air (K_a), hydraulic conductivity of saturated soil (K_{sat}), pre-consolidation pressure and compression index were measured. Compressibility tests were performed on two sets of samples: (i) application of pressures of 12.5, 25, 50, 100, 200, 400 and 800 kPa sequentially, with pressure application time for 20 minutes and (ii) application of pressures 12.5, 25, 50, 100, 200, 400 and 800 kPa with 30 loading and unloading cycles of each pressure. The test was interrupted after applying each pressure to measure the K_a . Also, X-ray computed tomography images were analyzed to characterize the macroposity. The saturated hydraulic conductivity of the soil showed that the soil structure changed, with a three to fivefold reduction in agricultural cultivation to the native grassland. The pre-compression stress was higher in the soils under the native grassland and the compression index was higher in the surface horizon of the soil, that showed surface layers of the soil are susceptible to the compaction and the subsurface already damaged due to the propagation of the pressures applied by traffic of machines. The analysis of tomography images allowed to distinguish the structural condition of the soils under different uses. In soils under native grassland, the pore network is more connected, with higher connectivity values and larger pores. In soils under agricultural cultivation, the surface horizon has a predominance of smaller pores and less connectivity. However, the permeability of the soil was sensitive to the rearrangement of the soil structure due to the application of pressures, as already a comparative low pressure of 12.5 kPa changed K_a . The air permeability of soil was not altered due to the type of static or dynamic compression test. X-ray computed tomography technique is useful in detecting changes in the soil structure, allowing the exploration of the behavior of the intensity properties such as saturated hydraulic conductivity and the permeability of the soil to air.

Keywords: Land use change. Saturated hydraulic conductivity. Permeability. Connectivity.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	HIPÓTESES	15
3	OBJETIVOS	16
	3.1 Objetivos específicos.....	16
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
	4.1 Permeabilidade do solo a água e ao ar.....	17
	4.2 Parâmetros mesomecânicos	18
	4.3 Parâmetros micromecânicos	20
	4.4 Tomografia computadorizada.....	25
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	27
	5.1 Locais de Coleta	27
	5.2 Caracterização dos solos: Textura e análise química	28
	5.3 Amostragem e preparação das amostras.....	31
	5.4 Análises	32
	5.4.1 Curva de retenção de água.....	32
	5.4.2 Permeabilidade do solo ao ar.....	32
	5.4.3 Condutividade hidráulica saturada	33
	5.4.4 Compressibilidade estática e cíclica	34
	5.4.5 Cisalhamento direto.....	35
	5.4.6 Reometria.....	36
	5.4.7 Tomografia computadorizada de Raio-X	37
	5.5 Análise estatística	39
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
	6.1 Densidade e porosidade	39
	6.2 Retenção de água	41
	6.3 Pressão de pré-consolidação, índice de compressão, coesão e ângulo de atrito interno	43
	6.4 Parâmetros reológicos.....	47
	6.5 Permeabilidade do solo ao ar.....	50
	6.6 Condutividade hidráulica de solo saturado.....	52
	6.7 Tomografia Computadorizada.....	56
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	APÊNDICE A.....	68
	Escaneamento de amostras	68

Reconstrução dos volumes 3D	74
Etapas do processamento das imagens – ImageJ/Fiji	79
Distribuição do tamanho de poros	79

1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico e da população aumentou a demanda por alimentos, sendo que a própria produção de alimentos é fonte de crescimento econômico e desenvolvimento. A maior produção de alimentos alterou as condições de uso do solo, com maior pressão de uso e alteração na cobertura vegetal, de campo nativo para cultivos agrícolas. Essas mudanças no uso do solo alteram propriedades biológicas, químicas e físicas do solo. As alterações nas propriedades do solo podem alterar o funcionamento do solo, sendo que assim não seja mais possível desempenhar as suas funções com excelência.

As mudanças no uso do solo ocorreram juntamente com a utilização de máquinas agrícolas, que estão cada vez maiores, com maior peso e aplicam altas pressões sobre o solo. A dissipação da pressão aplicada ocorre em profundidade no solo (KELLER ET AL., 2019; PULIDO-MONCADA et al., 2019). Assim, ocorrem alterações na estrutura do solo tanto na superfície como na subsuperfície.

Estudos do solo, em geral, se detêm na camada superficial, entretanto as camadas subsuperficiais desempenham funções ecossistêmicas de grande importância. Sendo que as propriedades físicas do solo influenciam em maior grau, a capacidade do solo desempenhar suas funções em todo o perfil. Uma das funções ecossistêmicas muito discutidas atualmente, devido ao seu impacto ambiental e econômico é o armazenamento de água. O armazenamento de água em camadas subsuperficiais é de extrema importância à produtividade do setor agropecuário, pois é reservatório de água que sofre menor influência das condições meteorológicas do que a camada superficial. Além do impacto sobre a recarga de lençóis de água subterrâneos. Assim, estudar as propriedades físicas na camada superficial e subsuperficial podem ampliar a compreensão dos fenômenos que afetam o ambiente e a produtividade agrícola.

Em solos compactados ocorrem alterações na estrutura, geralmente com diminuição da porosidade total e macroporosidade (BERISSO et al., 2012; CHEN et al., 2014; KUNCORO et al., 2014; REICHERT et al., 2016; ZHAI e HORN, 2018). Em consequência, o movimento de água e de ar diminuem (BERISSO et al., 2012; ETANA et al., 2013; KUNCORO et al., 2014; REICHERT et al., 2016), sendo que a quantidade de água armazenada pode aumentar (REICHERT et al., 2016a; SAFADOUST et al., 2014). A retenção de água e a condutividade hidráulica saturada do solo são afetadas pela densidade do solo, quantidade de areia e argila do solo (CHEN et al., 2014; GUEDES FILHO et al., 2013; QIAO et al., 2018).

Além de influenciar nos fluxos de água e gases, o manejo altera as propriedades mecânicas do solo. O tráfego de máquinas, durante as atividades de preparo, semeadura, controle fitossanitário e colheita, e do pisoteio animal são transientes e de curta duração, gerando tensões normais e cisalhantes no solo (REICHERT et al., 2016a). Assim, a mecânica do solo ajuda a entender o comportamento da resistência da estrutura do solo as deformações provocadas por estas pressões e processos, pois a deformação do solo altera a organização interna do solo, isto é, sua estrutura por meio da compressão e destruição de agregados, ligação e rompimento seletivo de ligações entre partículas e aumento da densidade do solo (REICHERT et al., 2010). O efeito da aplicação de tensões normais na K_{sat} e na K_a são negativos, entretanto o efeito de tensões cisalhantes sobre essas propriedades de permeabilidade do solo não está bem estabelecido, e ainda não sabemos qual o grau de magnitude do efeito das tensões sobre a permeabilidade do solo.

Além da estrutura, o comportamento mecânico do solo depende da textura e do conteúdo de água do solo, o qual interfere na reação do solo a aplicação de pressões, haja vista que a quantidade de poros, a densidade do solo e a textura do solo alteram o arranjo e o contato entre as partículas, que transmitem as tensões recebidas através do solo, e assim, podem resultar em deformações maiores ou menores.

O comportamento mecânico do solo está relacionado à reação a tensão-deformação. Se uma tensão for aplicada sobre o solo, a deformação ocorre na ligação mais fraca da matriz do solo (HORN, 2003). Essas tensões são transmitidas pelos pontos de contato entre as partículas individuais, e esses contatos estão arranjados ao acaso na estrutura do solo (REICHERT et al., 2010). Assim, as tensões sobre o solo alteram o espaço poroso do mesmo, sendo as alterações diferentes sob tensões normais e cisalhantes. A tensão normal aproxima as partículas do solo, enquanto tensões cisalhantes rearranjam os poros, com deslocamento tangencial, com redução da continuidade e aumento na tortuosidade dos poros.

As avaliações das propriedades de capacidade e intensidade (HORN e KUTILEK, 2009) podem ser avaliadas em diferentes escalas, pois em cada um dos níveis de detalhamento no estudo das propriedades de permeabilidade e mecânicas diferentes fatores influenciam na resposta do solo (HORN et al., 2019). As propriedades mecânicas do solo podem ser avaliadas na macroescala, ensaios de compressibilidade e cisalhamento direto, e na microescala por meio do teste de varredura de amplitude, que aplica os conhecimentos da reologia (HORN et al., 2019).

As propriedades do solo podem ser avaliadas por meio de ensaios em meso- e macroescala avaliam a resistência estrutural do solo oriunda de fontes diferentes. Na escala

mesoescala são consideradas as forças eletrostáticas de flocculação das partículas, dos meniscos de água e mecânicas. Na macroescala é considerada a resistência estrutural dos agregados e sua estabilidade, a permeabilidade do solo, K_{sat} e K_a . O advento de técnicas não invasivas como a tomografia computadorizada de raios-X permitiu a determinação do arranjo estrutural do solo (HELLIWELL et al., 2013). Além de permitir que diferentes propriedades sejam mensuradas em conjunto com outras (LUCAS et al., 2020; PICCOLI et al., 2019).

2 HIPÓTESES

Os diferentes usos do solo resultam em condições estruturais diferentes, onde solos sob campo nativo apresentam uma estrutura consolidada que resulta em maiores condutividade de água e permeabilidade do solo, pois a rede de poros não sofreu impacto de condições de ruptura como o revolvimento intenso. Além disso, as tensões cisalhantes aplicadas pela passagem de máquinas contribuem para alterar a conformação dos poros do solo, com a redução na condutividade de água sendo maior que na permeabilidade do solo ao ar, e essa redução ocorre por redução da continuidade e aumento da tortuosidade dos poros, enquanto a pressão normal tem maior impacto sobre a permeabilidade do solo ao ar. Por fim, a deformação do solo provocada pela compressibilidade cíclica causa maior alteração na permeabilidade do solo que a compressão estática.

3 OBJETIVOS

O objetivo geral foi contribuir para a compreensão do comportamento mecânico do solo e o efeito de pressões normais estáticas e transientes na permeabilidade de diferentes classes de solo do Planalto do Rio Grande do Sul, mediante utilização de ensaios mecânicos, condutividade hidráulica de solo saturado, permeabilidade do solo ao ar e testes de varredura da amplitude.

3.1 Objetivos específicos

- 1) Relacionar e compreender as alterações induzidas por tensões normais estáticas e transientes na permeabilidade do solo ao ar;
- 2) Compreender as modificações provocadas pela alteração de uso do solo no espaço poroso por meio de imagens tomográficas;
- 3) Relacionar parâmetros mecânicos do solo obtidos por ensaios em micro- e mesoescala.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Permeabilidade do solo a água e ao ar

As máquinas agrícolas utilizadas nos mais diversos momentos do ciclo das culturas têm aumentado seu peso e, com isso, ocorrem alterações na estrutura do solo. Essas alterações ocorrem também nas camadas subsuperficiais, com redução nos valores das propriedades de transporte de gases até 90 cm de profundidade, em um experimento que sofreu compactação adicional 14 anos antes do momento de avaliação (BERISSO et al., 2012). A compactação do solo diminui o espaço aéreo, a permeabilidade do solo ao ar (K_a) (REICHERT et al., 2016) e a difusividade relativa de gases, porém em solos argilosos este efeito é menor em baixos conteúdos de água, pelo fato de ocorrer a contração das argilas e formação de fendas (ZHAI e HORN, 2018).

O tráfego de máquinas compacta o solo, principalmente em camadas subsuperficiais. A compactação do solo, com máquina de massa de 8 Mg por eixo, ocorreu nas camadas de 30 e 50 centímetros de profundidade (OBOUR et al., 2017). Essa compactação reduziu a porosidade e o espaço aéreo, a K_a e na continuidade dos poros. A compactação que ocorre por tráfego de máquinas reduziu os fluxos preferenciais de água em solo de textura argilosa, pois ocorreu redução no volume e continuidade dos macroporos (MOSSADEGHI-BJÖRKLUND et al., 2016). Esses pesquisadores propuseram um modelo conceitual que sugere que mesmo com compactação e redução da macroporosidade, os fluxos preferenciais continuam ocorrendo e podem ficar maiores com uma compactação moderada, pois pode ocorrer aumento nos poros que conduzem água. Porém, em níveis elevados de compactação ocorre redução também da continuidade de poros (MOSSADEGHI-BJÖRKLUND et al., 2016).

As práticas de manejo do solo como o revolvimento têm sido utilizadas para reduzir ou mitigar os efeitos da compactação do solo. Em um solo de textura franco arenosa, Schwärzel et al. (2011) encontraram aumento na condutividade hidráulica saturada e na quantidade de poros, imediatamente após o revolvimento em comparação ao solo sem revolvimento.

Quando as pressões sobre o solo superam a capacidade de carga do solo ocorre redução do espaço aéreo e do índice de vazios, conseqüentemente havendo redução na K_a (TANG et al., 2011). A existência de macroporos verticais, que podem ser origem biológica, i.e., raízes e atividade da fauna edáfica aumenta a continuidade e o diâmetro médio dos poros, com isto aumenta a K_a e a difusão dos gases (ZHAI e HORN, 2018). Outro fator que afeta a K_a é o conteúdo de água no solo (HOLTHUSEN et al., 2018), pois aumenta linearmente a quantidade

de poros preenchidos com ar com a redução da umidade (ZHAI e HORN, 2018). A granulometria do solo altera o espaço aéreo, sendo que em solos mais argilosos houve redução da K_a .

Em solos em diferentes estados de conservação, os parâmetros físicos e estruturais do solo e de movimento de água foram efetivos em caracterizar a arquitetura do solo (TSENG et al., 2018). Os resultados obtidos pelos autores mostram que a estrutura do solo e o movimento de água no solo estão associados. A quantificação da retenção de água e da condutividade hidráulica permite avaliar as alterações que ocorrem na estrutura do solo (SCHWÄRZEL et al., 2011).

As aplicações de fertilizante orgânico e mineral aumentaram a microagregação e reduziram a pressão de pre-consolidação, com baixa K_a e alta K_s , indicando a presença de maior tortuosidade dos poros, na camada superficial do solo (HOLTHUSEN et al., 2012a). A fertilização do solo independentemente de ser orgânica ou mineral não alterou as propriedades físicas do subsolo, tais como porosidade total, permeabilidade do solo ao ar e condutividade hidráulica saturada, em um experimento de longa duração em solos da Alemanha (HOLTHUSEN et al., 2012a). Em solos com diferentes texturas e usos do solo foram encontradas correlações positivas entre K_s ou K_a e índice de compressibilidade cíclica, e este resultado indica que um solo com maior condutividade tem maior facilidade de sofrer deformações (HOLTHUSEN et al., 2018). Os autores atribuíram este resultado a menor ou mesmo ausência de agregação ou substâncias cimentantes, baixa fricção inter partículas e menor contato direto entre as partículas do solo.

O efeito de compressão estática ou cíclica afeta a porosidade total e o espaço aéreo dos solos independentemente da textura, em amostras reconstituídas em laboratório (ZHAI e HORN, 2018). A aplicação de cargas de 200 kPa reduziu a K_a em relação a carga de 25 kPa, em solos de uma topossequência do Rio Grande do Sul (BRAGA et al., 2015). Alaoui et al. (2011) encontraram que a geometria dos poros tem grande influência na compressibilidade dos solos, sendo que a compactação e o cisalhamento alteram a distribuição, a continuidade e a tortuosidade dos poros. Essas mudanças estruturais alteram o movimento de água e as propriedades hidráulicas, e.g., curva de retenção de água e condutividade hidráulica (ALAOUI et al., 2011). Entretanto, o grau de alteração nas características do espaço poroso com aplicação das tensões ainda não está claro, principalmente sob tensões cisalhantes.

4.2 Parâmetros mesomecânicos

O comportamento do solo é complexo e inclui a elasticidade, a plasticidade e a viscosidade, com comportamento viscoplástico sob tensão estacionária (GHEZZEHEI e OR, 2001) e como material viscoelástico sob tensões oscilatórias ou cíclicas (GHEZZEHEI e OR, 2001; MARKGRAF et al., 2006).

Durante o manejo do solo ocorrem alterações: (i) com a paralelização das partículas e redução do espaço poroso; (ii) das propriedades mecânicas devido a menor resistência interna do solo, mesmo que em maiores densidades do solo; (iii) na funcionalidade dos poros devido ao aumento da tortuosidade; (iv) menor crescimento das plantas, e conseqüentemente, menor rendimento (HORN, 2003). Deformações volumétricas e cisalhantes são provocadas pelo tráfego de máquinas e podem afetar a funcionalidade ecológica do solo (BERISSO et al., 2013), sendo que a tensão cisalhante causada pelo tráfego de máquinas pode causar danos no arranjo estrutural do solo, na K_a e na continuidade dos poros.

Nos ensaios de compressibilidade são obtidos os parâmetros: (i) pressão de pré-consolidação (σ_p) e (ii) índice de compressão (I_c), que é um indicativo da suscetibilidade do solo à compactação. Esses parâmetros são obtidos com a utilização de modelos matemáticos, e.g., Casagrande e/ou Dias Junior e Pierce (GUBIANI et al., 2017). Além disso, quando os ensaios são realizados com ciclos de carregamento e descarregamento das pressões (cargas), é possível obter o coeficiente de descompressão e a elasticidade do solo.

A tensão de pre-consolidação foi maior em solos manejados sob sistema conservacionista do que convencional (aração) com teor de argila variando de 40 a 310 g kg⁻¹, o que pode indicar maior estabilidade contra tráfego ou pisoteio animal no sistema conservacionista (RÜCKNAGEL et al., 2017). A tensão de pre-consolidação é menor quando: (i) maior o teor de argila em uma densidade do solo; (ii) menor a densidade em determinada textura do solo; (iii) menor a quantidade de material orgânico comparado com os tamanhos das partículas; (iv) maior o conteúdo de água (HORN, 2003). A pressão de pre-consolidação permite estimar a capacidade de suporte de carga do solo (KRÜMMELBEIN et al., 2008), sendo necessário considerar o conteúdo de água, a pressão de água nos poros, a carga de carregamento esperada, o tempo de carregamento e a frequência de carregamento. Porém, Holthusen et al. (2018) ressaltaram que é possível estimar a deformação do solo sob carga sob pressão estática, mas as pressões aplicadas sobre o solo são em sua maioria transientes, como o tráfego de máquinas e pisoteio animal, e não permitem que a água do solo se redistribua e atinja o equilíbrio.

Assim, a utilização de ensaios de compressibilidade cíclica permite entender o comportamento do solo sob pressões transientes. Krümmelbein et al. (2008) aplicaram vinte

ciclos de carregamento e descarregamento no solo, com duração de 30 s por ciclo, e estes ciclos não causaram a máxima deformação. Assim mais ciclos podem aumentar a deformação do solo. Em ensaios de compressibilidade cíclica, as mudanças na pressão de água nos poros são mais intensas (KRÜMMELBEIN et al., 2008).

A aplicação de 300 ciclos de carregamento mostrou deformações adicionais no solo em relação à aplicação de 100 ciclos, sendo essas deformações consequência de propriedades do solo, como a condutividade de água (HOLTHUSEN et al., 2018). Krümmelbein et al. (2008) mostraram que repetidos ciclos de carregamento e descarregamento, mesmo que com a mesma pressão, e sem exceder a pressão de pre-consolidação levam a incrementos na deformação do solo, os quais são atribuídos a mudanças nas propriedades hidráulicas. Além disso, em condições iniciais mais úmidas pode ocorrer maior destruição da estrutura do solo e redução na condutividade hidráulica e nos fluxos de gases (KRÜMMELBEIN et al., 2008). O índice de compressibilidade cíclica é menor com mais ciclos, pois supõem-se que as deformações adicionais diminuam. Além disso, ciclos de carregamento mais longos permitem a dissipação da água e, assim, aumentam a compressibilidade do solo (HOLTHUSEN et al., 2018). Os resultados encontrados por esses autores não permitem uma conclusão definitiva neste aspecto, e assim recomendam novos ensaios em solos com menor heterogeneidade e com menor densidade.

A elasticidade do solo depende da composição do solo, do conteúdo de água e da densidade do solo, pois em maiores conteúdos de água do solo é possível que ocorra maior aprisionamento de ar no solo, e assim maior elasticidade (BRAIDA et al., 2008). Segundo os autores, a densidade inicial do solo é outro fator que altera a intensidade da deformação; em amostras mais densas a deformação é menor e, assim, uma pequena recuperação de volume resulta em maiores percentuais de recuperação após a retirada da pressão. Braida et al. (2008) demonstraram que o aumento do carbono orgânico do solo (CO) resulta em aumento da elasticidade do solo. A elasticidade e a plasticidade do solo aumentaram simultaneamente com o aumento da pressão aplicada ao solo, sendo esse resultado fisicamente incoerente (Gubiani et al., 2018). A pressão de pre-consolidação não representa exatamente a transição entre as deformações elásticas e plásticas do solo (GUBIANI et al., 2018).

4.3 Parâmetros micromecânicos

A avaliação da resistência estrutural na microescala é realizada com o teste de varredura de amplitude (TVA) que é uma técnica moderna e reconhecida para avaliação mecânica na

escala de partícula (PÉRTILE et al., 2018). Segundo Holthusen et al. (2017), o TVA detecta propriedades viscoelásticas do solo, isto é, relações tensão-deformação sobre tensões transientes que ocorrem devido à passagem de uma máquina ou pisoteio animal. As tensões transientes ou cíclicas provocam, no solo, deformações elásticas e viscosas (viscoelásticas). O TVA permite simular aplicação de tensão transiente e, se desejado, ao mesmo tempo tensão compressiva (HOLTHUSEN et al., 2017). A técnica possibilitou investigar a estabilidade microestrutural de solos com textura argilosa e siltosa com êxito (MARKGRAF et al., 2006).

O módulo de armazenamento (G') e o de perda (G''), o ponto de escoamento, o intervalo viscoelástico linear, o fator de perda $\tan\delta$ e a integral z caracterizam as propriedades microestruturais dos solos a nível partícula-partícula (MARKGRAF et al., 2012). Esses parâmetros obtidos com a reometria expressam a estabilidade da microestrutura do solo, a qual é afetada por diversos fatores: textura, mineralogia, concentração de íons, matéria orgânica e teor de água no solo. A resistência do solo na microescala é complexa e depende da interação de múltiplos parâmetros, que podem interagir de múltiplas maneiras (HOLTHUSEN et al., 2012b).

A mineralogia altera o comportamento micromecânico do solo com alterações a nível microscópico na estrutura das argilas (GHEZZEHEI e OR, 2001). Essas interações mecânicas das partículas (silte, areia, argila) são governadas pelas propriedades das ligações das argilas (GHEZZEHEI e OR, 2001). Em solos com predomínio de minerais esmectíticos, a estabilidade microestrutural é menor que em solos com predomínio de caulinita ou illita e óxidos de ferro (MARKGRAF, 2006; PÉRTILE, 2015). Em solos com predomínio de argilominerais 2:1 expansivos na fração argila, a elasticidade do solo aumenta, expresso pelo maior intervalo viscoelástico linear (PÉRTILE, 2015; PÉRTILE et al., 2018).

Íons com valência maior diminuem a densidade de carga e, assim, alteram o comportamento micromecânico do solo (MARKGRAF et al., 2012). Esses autores destacam que a reometria, juntamente com a determinação da densidade de carga das partículas, é apropriada para quantificar o comportamento viscoelástico de um solo e explicar os processos físico-químicos (dispersão e agregação) para partículas de tamanho coloidal ($< 1\mu\text{m}$) a microagregados ($< 250\mu\text{m}$).

Maiores concentrações de potássio aumentam os valores de deformação onde inicia o comportamento plástico do solo, sendo necessária superar uma maior resistência para chegar ao estado plástico (HOLTHUSEN et al., 2010). Em diferentes teores de potássio ocorreu comportamento variável da resistência microestrutural do solo, devido ao conteúdo de argila (HOLTHUSEN ET AL., 2012B). Segundo os autores, em solos com 40 a 60 g kg^{-1} de argila

houve aumento na resistência microestrutural, enquanto houve redução na resistência em solos com 130 a 150 g kg⁻¹ de argila, e não houve alteração na resistência em solo com 210 g kg⁻¹ de argila. Porém, Holthusen et al. (2012b) ressaltam que a menor resistência do solo não pode ser somente atribuída aos teores de potássio no solo e, com isso, devem ser utilizadas outras variáveis, como o carbono orgânico e conteúdo de água.

Na avaliação de parâmetros reológicos em solo de textura argilo-arenosa, utilizado em vasos para avaliar o efeito do potássio, nível de salinidade e déficit de água, Holthusen et al. (2012c) encontraram que o efeito do potássio é menor do que dos níveis de salinidade e déficit de água. No mesmo trabalho, o potencial matricial do solo teve maior impacto do que a fertilização com potássio, pois a formação dos meniscos de água durante a drenagem pode exercer forças de ligação entre as partículas, e este efeito é maior em amostras com depleção de potássio. A salinidade criou uma estrutura mais densa, mas menos persistente. O potássio não atenuou o efeito dispersante do sódio.

A resistência microestrutural do solo foi maior em solos com maior quantidade de argila e conteúdo de óxidos, e a elasticidade foi maior em solos com maior quantidade de argila e minerais expansivos na fração argila (PÉRTILE et al., 2018). Solos com textura arenosa e ocorrência de pseudoareia tiveram menor elasticidade, e solos arenosos apresentaram menor resistência estrutural (PÉRTILE et al., 2018). O limite de deformação viscoelástica linear aumentou com maior conteúdo de argila, CO, argilas expansivas e cátions (PÉRTILE et al., 2016). Uma maior fricção e resistência entre as partículas aumentaram a tensão de cisalhamento máxima e a rigidez do solo, e a τ_{max} e integral z são aumentadas com aumento de argila, caulinita e conteúdo de óxidos (PÉRTILE et al., 2016).

O efeito da matéria orgânica sobre o comportamento micromecânico foi estudado por Markgraf et al. (2012b), com maior resistência à deformação e maior elasticidade com maior teor de CO, o que permite maior deformação antes que o ponto de escoamento seja atingido em solo úmido. Pértile (2015) encontrou resultados similares em um conjunto de solos do Rio Grande do Sul. A liberação de exudatos por raízes e fungos aumentou a viscosidade em solos com predomínio de argilominerais 2:1, em condições saturadas, sendo que o efeito é menor em solos com menor conteúdo de água (BARRÉ e HALLETT, 2009).

O carbono orgânico do solo tem fundamental importância na microestrutura do solo, sendo que os solos com maiores teores de CO tiveram a maior resistência microestrutural (HOLTHUSEN et al., 2012b). Em trabalho realizado por Holthusen et al. (2017), o horizonte B do Latossolo tinha baixo conteúdo de carbono orgânico, mas alto conteúdo de goethita na fração argila, o que aumentou a resistência microestrutural. Assim, as deformações plásticas

são menores, sendo demonstrado pelos altos valores da integral z , bem como pela deformação no ponto de escoamento.

O conteúdo de água do solo altera a estabilidade microestrutural do solo, sendo que o efeito do potencial matricial nas análises reológicas é grande, sendo que o mesmo parâmetro explicativo pode influenciar diferentemente nos resultados (HOLTHUSEN et al., 2012b). Em menor conteúdo de água aumenta a resistência micromecânica dos solos devido ao aumento da força de meniscos, mas ocorre redução na resistência na tensão de água de 10 kPa, em solos mais arenosos e também em solos com alta quantidade de pseudoareia associada com baixa densidade do solo (PÉRTILE et al., 2016). A redução do conteúdo de água aumentou a resistência ao cisalhamento no final do intervalo viscoelástico linear em relação às condições saturadas e, conseqüentemente, ocorreu maior estabilidade, em amostras equilibradas no potencial matricial de -3 kPa (HOLTHUSEN et al., 2010).

A resistência mecânica de solos argilosos aumentou com aumento da tensão de água até 6 kPa, principalmente pelo aumento das forças capilares no solo. Com aumento da tensão de água ocorreu aumento da resistência estrutural, mensurada pela tensão de cisalhamento máxima e integral z , que foi mais acentuada que o aumento na elasticidade, medida pelo limite de deformação (γ_L) (PÉRTILE et al., 2016). A diminuição da resistência em alguns solos nas maiores tensões de água (10 kPa) foram observadas em horizontes arenosos e horizontes com percentual elevado de microagregados com alta resistência (pseudoareia), principalmente em solos associados com baixa densidade do solo (PÉRTILE et al., 2016).

Em um experimento, com diferentes conteúdos de água (100, 60 e 40% da capacidade de campo), a força do menisco foi baixa, resultando na ruptura dos meniscos em condições de baixo conteúdo de água. A irrigação causou uma estrutura mais estável, pois permitiu que as partículas se rearranjassem para uma posição mais estável (HOLTHUSEN et al., 2012c).

A transferência de resultados calculados e observados da micro para macroescala foi questionada (MARKGRAF et al. 2006), e alguns estudos foram realizados com este intuito (HOLTHUSEN et al. 2012a). A relação da resistência mecânica do solo em micro e mesoescala foi pequena, pois diferentes fatores devem influenciar o comportamento mecânico em cada uma das escalas (PÉRTILE, 2015). O comportamento reológico do solo está ligado à funcionalidade dos poros, tais como conectividade e tortuosidade (HOLTHUSEN et al., 2017). Holthusen et al. (2012a) comparando a condutividade hidráulica saturada e tensão máxima de deformação (τ_{max}) encontrou correlação com a conectividade e tortuosidade dos poros.

Os resultados dos TVAs dependem da preparação da amostra, onde pode ocorrer uma ligeira variação na altura da amostra. A grande maioria das pesquisas foi realizada com o

reômetro configurado com um tamanho de espaço fixo de 4 mm (gap), porém o gap fixo causa variação nas tensões verticais. Por isso, ao controlarem a tensão normal, Holthusen et al. (2017) visaram: (i) aumentar a representatividade do teste; (ii) permitir que uma maior variedade de materiais seja investigada; e (iii) permitir a transferência dos parâmetros reológicos para os processos na mesoescala, principalmente os relacionados a relações tensão-deformação. Ao controlarem a tensão normal, pretenderam reduzir o efeito do preparo da amostra e também aumentar a reprodutibilidade dos testes.

As tensões normais mais elevadas causam degradação estrutural e conseqüente rearranjo das partículas, com redução da condutividade da água de forma pronunciada, causando pressão positiva nos poros (HOLTHUSEN et al., 2017). Em TVAs com controle da tensão, (HOLTHUSEN et al., 2017) concluíram que a alta densidade da amostra e as altas tensões de compressão no conjunto de solos resultaram em maior fricção (aumento da tensão no IVL e da tensão máxima) e a uma perda de elasticidade (diminuição da Integral z, que mede a rigidez do solo). Segundo os autores, o efeito da densidade inicial e da tensão de compressão no IVL representa a deformação totalmente reversível. Porém, os resultados encontrados são pouco consistentes; parece haver um valor limiar de densidade e/ou tensão normal a partir do qual o IVL não incrementa mais devido ao maior contato partícula-partícula e maior fricção. Assim, para explicar esse fenômeno são necessárias novas pesquisas sobre densidade e tensão de compressão.

A densidade do solo tem grande importância na reologia, especialmente nos resultados do IVL. Desse modo, a comparação da tensão de pre-consolidação e IVL é restrito, pois o IVL é mais propenso a efeitos da densidade (HOLTHUSEN et al., 2017). A alteração do TVA transformando a tensão normal em um fator controlado (tal como, a frequência) gerou outro tipo de variabilidade que não se baseou na tensão normal (HOLTHUSEN et al., 2017). Em tensões muito baixas (1N) ou altas (10N) ocorreu aumento na variabilidade dos valores para o IVL, mas a maior tensão normal diminui a integral z; entretanto, são necessárias mais repetições e informações mais detalhadas sobre a microagregação do solo para esclarecer essas tendências (HOLTHUSEN et al., 2017). Pértile et al. (2018) realizaram ensaios com tensão normal e também encontraram alguns resultados conflitantes, e sugeriram mais estudos com tensão normal controlada no TVAs.

A tensão máxima de cisalhamento no TVA pode ser comparada com os resultados obtidos no teste de cisalhamento da mesoescala (HOLTHUSEN et al., 2010). O ponto de escoamento indica a transição do comportamento elástico para plástico, sendo que a estrutura interna da amostra é irreversivelmente destruída e a amostra pode iniciar a fluir.

Durante o cisalhamento ocorre rearranjo das partículas, geralmente nos TVAs ocorre aumento na deformação com alteração da organização das partículas desorganizadas para orientadas paralelamente (HOLTHUSEN et al., 2010). Para os autores, esse fato é comprovado pelo aumento da tensão em um primeiro momento até um máximo (primeiro pico), quando as ligações são quebradas e ocorre diminuição na tensão, o que sugere a organização paralela das partículas. Após, as partículas de silte e areia resultam em outro aumento na tensão (segundo pico). Esse segundo pico é da resistência das partículas maiores (silte e areia), que resultam em fricção adicional, até uma nova tensão máxima, posteriormente a tensão diminui e nesse momento temos elevadas deformações (HOLTHUSEN et al., 2010).

Em amostras com uma menor resistência mecânica, há um menor número de pontos de contato entre as partículas e conseqüente redução das forças capilares (PÉRTILE et al., 2016). Observaram que uma maior quantidade de ligações promoveu maior capacidade de recuperação após a deformação. Não obstante, mais estudos são necessários para avaliar a resistência de solos com baixa densidade e com argilas expansivas sob diferentes tensões de água no solo.

A obtenção dos parâmetros reológicos tem ocorrido em amostras com estrutura não preservada em muitos trabalhos (MARKGRAF et al., 2006; MARKGRAF et al., 2012; PÉRTILE, 2015; PÉRTILE et al., 2018), com poucos utilizando amostras com estrutura preservada (HOLTHUSEN et al., 2012a; HOLTHUSEN et al., 2012c). A utilização de amostras não deformadas na reologia precisa superar certos entraves, a distribuição de partículas não é homogênea e raízes de plantas podem estar presentes, o que pode gerar deformações desuniformes no solo durante o TVA, resultando em maior variabilidade das propriedades reológicas (PÉRTILE et al., 2018). Desse modo, a obtenção destes parâmetros em amostras com estrutura preservada é sugerida (PÉRTILE et al., 2018).

4.4 Tomografia computadorizada

A Tomografia Computadorizada (TC) é uma técnica não destrutiva, não invasiva que pode ser utilizada para visualizar o interior de objetos a partir de perspectivas 2-D e 3-D. A TC pode quantificar diferentes atributos e os impactos de diferentes práticas agrícolas e de manejo do solo e da água (PIRES et al., 2010). A TC permite uma outra abordagem sobre a compactação do solo (KELLER et al., 2013); análise contínua da densidade do solo e de sua porosidade, em camadas milimétricas (0,08 cm) (PIRES e BACCHI, 2010); interação solo-raízes através do uso de raios X (MOONEY et al., 2012); monitoramento em alta resolução de alterações nos constituintes do solo e na rede de poros do solo e suas características

(HELLIWELL et al., 2013); avaliação de características dos agregados de solos, sendo possível notar menor esfericidade dos agregados com o tempo, com aumento do volume e área dos mesmos (GARBOUET et al., 2013); e caracterização da porosidade do solo, principalmente para poros maiores que 300 μm de diâmetro (RAB et al., 2014), e na avaliação quantitativa das características da rede de poros (LUO et al., 2010).

A tomografia computadorizada permitiu análise contínua da densidade do solo e de sua porosidade, em camadas milimétricas (0,08 cm) (PIRES E BACCHI, 2010). A TC apresentou resultados quantitativos na avaliação de características da rede de macroporos, os quais podem apresentar implicações significativas para a predição do desequilíbrio de fluxo e transporte de solutos nos solos (LUO et al., 2010). A utilização da distribuição do tamanho de partículas e a dimensão fractal, obtidas por TC, permitiram uma descrição realística da evolução espacial e temporal das propriedades hidráulicas do solo durante os processos de drenagem (PÉRIARD et al., 2016).

A utilização da TC permite a quantificação do espaço poroso, da continuidade e tortuosidade dos poros em solos sob diferentes condições de conservação do solo (TSENG et al., 2018). A utilização da TC permitiu detectar as condições estruturais do solo, principalmente a conectividade dos poros por meio do número de Euler-Poincaré (TSENG et al., 2018). As imagens tomográficas detectam alterações no solo em escala de μm e, assim, é possível verificar como a compressão e o cisalhamento do solo alteram o espaço poroso, a organização dos macroporos e suas características, principalmente a continuidade e a tortuosidade.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Locais de Coleta

A área de estudo está situada na região das Missões do Rio Grande do Sul, nos municípios de São Miguel das Missões e Entre-Ijuís, entre as latitudes $28^{\circ} 33' 25''$ e $28^{\circ} 36' 15''$ sul e as longitudes $54^{\circ} 25' 20''$ e $54^{\circ} 27' 55''$ a oeste de Greenwich (Figura 1).

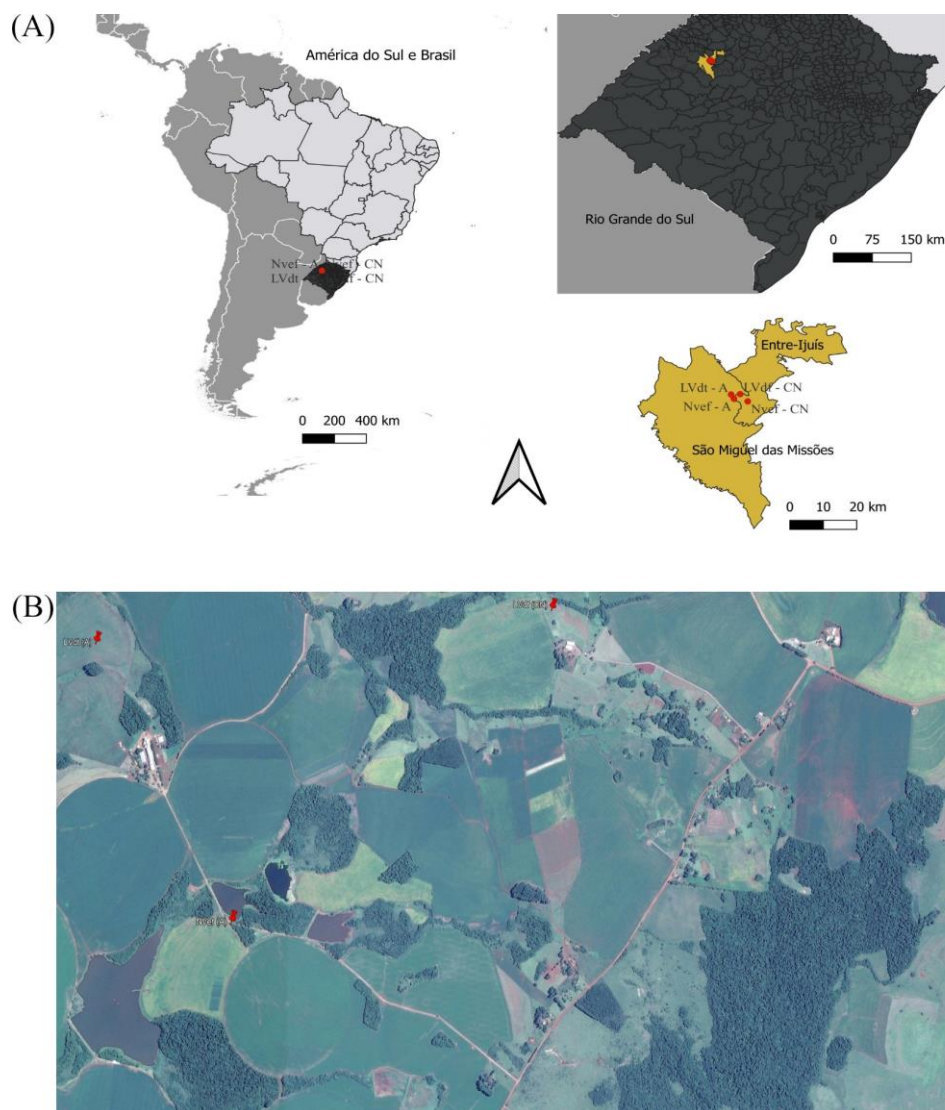


Figura 1 - Mapas de localização dos solos coletados (A) e Imagem de satélite com a distribuição espacial dos solos (B).

Os solos da região derivam de rochas ígneas extrusivas. As formas do relevo são homogêneas, com colinas suaves, arredondadas, esculpidas em rochas vulcânicas básicas. O relevo predominante é plano a suave ondulado, com altitudes que variam de 220 a 320 metros, aproximadamente.

A área do estudo tem Latossolos, Nitossolo, Gleissolos e Neossolos (WOLSKI, 2016). Os solos que foram coletados e utilizados para a realização deste trabalho foram descritos morfologicamente, e suas características químicas analisadas por Wolski (2016). Os solos que serão utilizados no estudo constam na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação, Classe textural, Condição de uso e Abreviação dos solos amostrados e utilizados no estudo.

Classificação do Solo ¹	Classe textural	Uso ²	Abreviação ³
Latossolo Vermelho Distrófico típico	Argilosa	A	LVd-A
Latossolo Vermelho Distroférico típico	Argilosa	CN	LVdf-CN
Nitossolo Vermelho Eutroférico latossólico	Argilosa	A	NVef-A
Nitossolo Vermelho Eutroférico típico	Argilosa	CN	NVef-CN

¹ Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Dos Santos, 2018). ² Condição de uso do solo: A: Cultivos agrícolas, foram submetidos a aração e gradagem antes da adoção do sistema de plantio direto; CN: Campo Nativo; ³Forma como o solo é referenciado no texto, mescla da abreviação oficial do SiBCS e da condição de uso do solo. Fonte: Autor.

O uso dos solos do LVd-A e do NVef-A é com agricultura, principalmente, com o cultivo de espécies produtoras de grãos: milho (*Zea mays*), soja (*Glycine max*) e trigo (*Triticum aestivum*), em sistema plantio direto. Os solos possuíam um histórico de uso agrícola de 35 anos no momento da coleta, anteriormente os solos eram ocupados com campo nativo e vegetação arborea. Segundo relatos dos proprietários das áreas, o atual sistema de cultivo utilizado preconiza o menor revolvimento do solo, sendo que houve anos com rotação das culturas e utilização de plantas de cobertura durante o outono: Aveia-preta consorciado com Nabo Forrageiro. Em alguns anos houve vazio outonal ou somente a sucessão de culturas (trigo-soja).

Os solos LVdf-CN e NVef-CN estão sob campo nativo, sendo utilizados para pastejo de animais. No momento da coleta, o LVdf-CN apresentava grande cobertura de biomassa vegetal, com as gramíneas com altura maior do que 35 cm de altura, enquanto que o NVef-CN apresentava sinais de pastejo intenso, com as gramíneas com altura em torno do 10 cm de altura.

5.2 Caracterização dos solos: Textura e análise química

Os solos foram descritos e os atributos químicos e a textura analisados por Wolski (2016) (Tabela 2). A textura foi determinada nas amostras secas, destorroadas e peneiradas em peneira com malha de 2 mm (TFSA). A granulometria foi determinada após dispersão com

NaOH 0,1 mol L⁻¹ e agitação mecânica por 4 horas (EMBRAPA, 1997). A fração areia foi separada por tamisação úmida em peneira com malha de 0,053 mm. A fração argila foi

Tabela 2 -. Atributos físicos e químicos no Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob cultivo agrícola (Nvef -A), Nitossolo Vermelho eutroférico típico (Nvef -CN), Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN), Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN), Latossolo Vermelho distrófico típico sob cultivos agrícola (LVd -A). Adaptado de Wolski (2016).

H _z	Prof (cm)	Areia	Silte	Argila g kg ⁻¹	Argila dispersa	GL %	pH -	Ca	Mg	K	Al cmolc kg ⁻¹	Al + H	V %	P	CO g kg ⁻¹	Fe ₂ O ₃ %
Nvef - A																
Ap	0-12	161	330	509	171	66.4	5.5	10	2.1	1.02	0.07	3.82	77.17	38.2	15.41	30.5
A	12-48	165	350	485	248	48.86	5.3	13.9	1.7	0.56	0.07	2.87	85.05	10.9	10.83	33.6
B1	48-110	86	247	666	79	88.13	5.1	6.4	2.5	0.16	0.2	3.18	74.26	6	5.53	30.8
B2	110-137	75	222	703	11	98.43	4.4	3.5	2	0.12	0.4	4.46	56.2	4.5	2.57	29.1
Nvef - CN																
A	0-43	296	382	322	97	69.9	5.3	5	1.3	0.1	0.6	8.4	43.2	2.2	15.66	23.9
B1	43-70	110	350	540	133	75.4	5.4	3.9	1.1	0.1	0.8	7.41	40.8	2.2	8.7	31.5
B2	70-100	137	307	556	40	92.8	5.5	4.4	1.8	0.1	0.3	3.71	63	2.2	6.38	24.7
BC	100-	162	396	441	76	82.7	5.3	5.6	2.5	0.1	0.3	2.23	78.8	2.2	6.38	22.9
LVdf - CN																
A	0-17	183	433	384	174	54.7	4.8	4	1.2	0.2	0.6	7.17	42.9	3	14.5	21.4
BA	17-37	88	311	602	201	66.6	5.7	4.8	1.5	0.1	0.1	5.94	52	2.2	9.28	19.8
B	37-118	37	190	773	22	97.1	5.3	3	1.3	0.1	1	5.19	45.8	2.2	9.28	25.1
BC	118-	62	387	550	11	98	5	1.6	1.5	0.1	5.4	6.18	34	2.2	4.64	18.6
LVd - A																
Ap	0-25	98	270	632	214	66.1	5.3	5.5	5.8	1.1	0.9	4.2	74.6	18	19.1	25.4
A	25-50	57	212	732	84	88.5	5.1	2.9	3.8	0.6	1	3.8	65.7	22.1	10.4	15.4
BA	50-80	47	207	746	141	81.1	5	1.6	2.1	0.3	1.5	4.2	48.8	2	8.1	28.2
Bw1	80-140	45	179	776	2	99.7	4.5	1.6	1.2	0.1	2.7	3.1	48.3	1.5	5.2	38.1
Bw2	140-	37	170	793	6	99.2	4.4	1.2	1.3	0.1	2.4	3.3	44.1	1	2.9	14.7

Prof: Profundidade dos horizontes do solo; GL: Grau de Flocculação; V: Saturação por Bases; CO: Carbono Orgânico; Fe₂O₃: Óxidos de Ferro

determinada pelo método da pipeta e a fração silte teve sua determinação calculada por diferença.

O pH do solo em água (pH) foi determinado utilizando uma relação solo-solução de 1:2,5. Os teores de cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) trocáveis foram determinados por espectroscopia de absorção atômica após extração com KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Os teores de potássio trocáveis (K^{+}) foram determinados por fotometria de chama após extração com solução de HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4$ $0,025 \text{ mol L}^{-1}$. A acidez potencial trocável ($\text{H} + \text{Al}$) foi determinada em extrato de $\text{Ca}(\text{OAc})_2$ $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0 e titulado com NaOH $0,0606 \text{ mol L}^{-1}$. O alumínio trocável (Al^{+3}) foi extraído com solução de KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e titulado com NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$. Todas as análises seguiram metodologia da Embrapa (1997). A capacidade de troca de cátions (CTC), e a saturação de bases (V%) foram calculados a partir dos dados analíticos.

5.3 Amostragem e preparação das amostras

As amostragens foram realizadas: (i) no dia 19/08/2018 no NVef-A, o solo estava sendo cultivado com aveia que estava em plena floração; (ii) dia 04/12/2018 no NVef-CN e LVdf-CN; (iii) no dia 16/04/2019 no LVd-A e no LVef-A, quando os Latossolos estavam sob cultivo de soja que havia sido recém colhida.

As amostras de solos foram coletadas na parte central de cada horizonte do solo e incluíram a coleta de:

- (i) amostras de solo deformadas, que foram coletadas e acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados para realizar as análises reológicas e o ponto de murcha permanente;
- (ii) amostras de solo indeformadas foram coletadas com cilindros metálicos, com dimensões de 0,04m de altura e 0,057m de diâmetro, correspondendo a um volume de 102 cm^3 , utilizadas nas análises de retenção de água, permeabilidade do solo ao ar (K_a), condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e densidade do solo;
- (iii) Amostras de solo indeformadas com cilindros de 235 cm^3 , dimensões de 0,03m de altura e 0,10m de diâmetro, utilizadas nos ensaios de compressibilidade cíclica, estática e de cisalhamento direto;
- (iv) amostras de solo indeformadas com cilindros de PVC utilizados na técnica da tomografia computadorizada de raios-X (TC). As coletas para TC foram realizadas inserindo os cilindros de PVC com muito cuidado e cautela, pois o procedimento de coleta, quando não realizado com os cuidados necessários,

poderá resultar em artefatos (rachaduras) ou em desestruturação do solo, assim não representando as condições reais. Além disso, a utilização de cilindros de PVC e devido que os cilindros metálicos apresentam atenuação elevada do feixe de raios-X, sendo que nos cilindros de PVC a atenuação é menor (densidade menor em relação ao aço). Os cilindros de PVC tinham a dimensão de 0,075m de diâmetro e 0,10m de altura. As amostras de solo foram coletadas na

Após as coletas, as amostras foram encaminhadas para o laboratório, onde as amostras deformadas foram secas e peneiradas em peneira com malha de 2mm, com obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). As amostras indeformadas foram preparadas (ajuste do volume de solo ao volume do cilindro) e saturadas por capilaridade.

5.4 Análises

5.4.1 Curva de retenção de água

A retenção de água nos potenciais matriciais de -1, -6 e 10 kPa foi determinada em coluna de areia (REINERT e REICHERT, 2006), enquanto o conteúdo de água nos potenciais matriciais de -33 e -100 kPa foram determinados em câmara de Richards (KLUTE, 1986). Nos potenciais matriciais de -500 e -1500 kPa, o conteúdo de água foi determinado com a utilização de potenciômetro de ponto de orvalho (DECAGON DEVICES, 2007). O procedimento consistiu do umedecimento de TFSA até que o conteúdo de água correspondeu aproximadamente aos potenciais de -500, -1000, -1500, -2500 e -6000 KPa. Após a mensuração com o equipamento, as amostras foram pesadas, secas em estufa a 105°C e pesadas novamente. O conteúdo de água foi ajustado por meio de equação linear 1:

$$\log \text{Umidade}_\Psi = a + b \log \Psi \quad (1)$$

onde: a e b = parâmetros de ajuste da equação; Ψ potencial matricial (kPa).

Com os valores de conteúdo de água em cada potencial foram ajustados os parâmetros das curvas de retenção de água. O modelo utilizado foi o de van Genuchten (1980).

5.4.2 Permeabilidade do solo ao ar

A permeabilidade ao ar foi determinada nos potenciais matriciais de -6, -10, -33 e -100 kPa. A permeabilidade ao ar (K_a) foi determinada com a utilização de um permeâmetro de

carga constante, no qual o ar foi aplicado à pressão constante e baixa (0,1 kPa) para evitar fluxo turbulento. A condutividade do ar no solo (K_i) foi calculada usando a equação 2:

$$K_i = \rho_i g \frac{\Delta V l}{\Delta t \Delta p A} \quad (2)$$

onde: K_i é condutividade ao ar (cm s^{-1}); ρ_i densidade do ar no momento da medição (g cm^{-3}); g aceleração da gravidade (981 cm s^{-2}), l altura da amostra (cm); Δt variação de tempo (s); Δp pressão do ar que passa na amostra (1 cm de coluna de água = $1000 \text{ dinas cm}^{-2}$, dinas g cm s^{-2}) e A é a área da amostra (cm^2). A densidade do ar foi calculada com a equação: $\rho_i = \rho_n \left(\frac{T_n p}{p_n T} \right)$, onde: ρ_i é a densidade do ar (kg m^{-3}), ρ_n densidade padrão do ar ($1,293 \text{ kg m}^{-3}$), T_n temperatura padrão ($273,15 \text{ K}$), p pressão atmosférica durante a medida (mbar), p_n pressão atmosférica padrão (1013 mbar), e T temperatura do ar durante a medida (K).

A permeabilidade do solo ao ar foi calculada usando a equação 3:

$$K_a = K_i \frac{\eta}{\rho_i g} \quad (3)$$

onde: K_a é a permeabilidade ao ar (cm^2), K_i condutividade ao ar (cm s^{-1}), η viscosidade do ar ($\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$), ρ_i densidade do ar no momento da medida (g cm^{-3}), e g aceleração da gravidade (981 cm s^{-2}). Os valores de K_a foram transformados pela função $\log(K_a+1)$.

5.4.3 Condutividade hidráulica saturada

A condutividade hidráulica saturada (K_s) do solo será determinada com um permeâmetro de carga decrescente. O procedimento consistirá na medição do tempo necessário para um determinado volume de água atravessar a amostra de solo. O volume de água estará contido em tubo graduado. A carga hidráulica será a altura da água no ponto 1 (H_1) e no ponto 2 (H_2) do tubo. O cálculo da K_s será realizado com a utilização da equação 4:

$$K_s = \frac{(2.3) \cdot a \cdot L}{A \cdot (t_2 - t_1) \cdot (H_1 + H_2)} \quad (4)$$

onde: K_s é a condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1}); a área do tubo (mm^2); L é a altura de amostra (mm); A é a área da amostra (mm^2); t_1 e t_2 é o tempo (h) que a água passa na altura H_1 e H_2 , que serão as respectivas cargas hidráulica. O tempo transcorrido para a água percorrer a distância determinada no tubo foi gravado, por meio do software “Ksat” – Programa auxiliar na determinação da condutividade hidráulica de solo saturado (Gubiani et al., 2010). O software realizou os cálculos referentes a equação 4 e forneceu os resultados em tabela no formato Microsoft Excel. Os valores de condutividade hidráulica saturada foram transformados pela função $\log(K_s+1)$.

Após a mensuração da condutividade hidráulica saturada, as amostras foram secas em estufa a 105°C para cálculo da densidade do solo (D_s). A partir da D_s foi calculada a porosidade total das amostras por meio da relação D_s com a densidade de partículas (D_p). A macroporosidade foi obtida subtraindo a porosidade total do conteúdo volumétrico de água a 60 kPa. A quantidade de água disponível foi calculada por meio da diferença entre o conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo (-10 kPa) e o ponto de murcha permanente (-15000 kPa).

A densidade máxima ($D_{s\text{Max}}$) do solo foi estimada por meio da equação 6 (Marcolin & Klein, 2011).

$$D_{s\text{Max}} = 2,03133855 - 0,00320878 \text{ MO} - 0,00076508 \text{ Argila} \quad (6)$$

O grau de compactação (GC) foi calculado com a equação 8.

$$\text{GC} = (D_s/D_{s\text{Max}}) * 100 \quad (7)$$

5.4.4 Compressibilidade estática e cíclica

A pressão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressão (I_c) e a compressibilidade cíclica foram determinados com uma prensa automática de compressão pneumática (Multistep – Soil 23 Shear Strength, marca Wazau). As amostras de solo foram saturadas por capilaridade e submetidas a tensão de 10 kPa até cessar a drenagem de água (peso constante) (Reinert e Reichert, 2006). Durante os ensaios, a drenagem livre de água ocorreu por meio de placas porosas colocadas abaixo e acima da amostra. Durante os ensaios foram armazenados automaticamente os dados de pressão normal aplicada e deformação do solo em função do tempo. Após os ensaios, as amostras serão secas em estufa a 105°C para determinação da D_s e do índice de vazios.

Foram realizados dois tipos de ensaios de compressão uniaxial, com aplicação estática e cíclica das pressões:

(i) Ensaio estático: as amostras foram submetidas à compressão uniaxial nas pressões de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, cada pressão foi aplicada por 20 minutos, após transcorrido os 20 minutos era aplicada a próxima pressão até atingir 800 kPa. Nos ensaios com amostras do LVd-A foi mensurada a K_a . A mensuração da K_a ocorreu antes do início do teste, e após a aplicação de cada uma das pressões, isto é, após transcorrido os 20 minutos, o ensaio era interrompido, a amostra retirada da prensa, levada ao permeâmetro para mensurar o volume de ar que passa na amostra e a amostra era recolada na prensa para continuar o ensaio na próxima pressão.

(ii) Ensaio cíclico: as amostras foram submetidas à compressão uniaxial nas pressões de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa em ciclos de carregamento e descarregamento. Os ciclos consistiram em duas etapas: (i) carregar cada pressão por 36 segundos, (ii) descarregar a pressão por 36 segundos. Cada uma das pressões foi aplicada em um total de 30 ciclos, totalizando 18 minutos de carregamento das pressões e 18 minutos de descarregamento. Após finalizar a aplicação dos 30 ciclos era mensurada a K_a , seguindo o procedimento descrito acima para o ensaio estático.

A σ_p e o I_c foram determinados segundo o método de Casagrande (1936) por meio da equação de Van Genuchten (1980), com a utilização do suplemento Excel SCC (GUBIANI et al., 2017). As curvas de compressão foram representadas pelo índice de vazios e pressões da etapa de carregamento, mais o índice de vazios na pressão de 800 kPa. Ao ajustar a equação de Van Genuchten (1980) para as variáveis do ensaio foram utilizadas algumas restrições: índice de vazios inicial definido e calculado para a carga inicial zero; e m calculado como $m=1-(1/n)$, sendo estimados o índice de vazios final, α e n .

5.4.5 Cisalhamento direto

A coesão e o ângulo de atrito interno do solo foram determinados em amostras com estrutura preservada em anéis metálicos (9,8 cm de diâmetro e 2,8 cm d altura), coletadas em cada horizonte. As amostras foram saturadas por capilaridade e submetidas à tensão de 10 kPa até cessar a drenagem de água (peso constante) (REINERT e REICHERT, 2006). O ensaio de cisalhamento direto foi realizado em prensa de compressibilidade e cisalhamento do solo com medições automatizadas.

No ensaio foi aplicada uma força normal constante, com aplicação de uma força tangencial crescente que causou o deslocamento da amostra até sua ruptura. As amostras foram submetidas às forças normais de 50; 100; 200; 400 e 800 kPa e a força tangencial teve velocidade de deslocamento de $0,3 \text{ mm min}^{-1}$. Nessas condições, o ponto de ruptura, que corresponde à tensão de cisalhamento do solo (τ), foi considerado como a tensão na qual a taxa de deformação será menor que 5%.

A obtenção dos parâmetros (coesão e ângulo de atrito interno) foi realizada por meio do ajuste de uma reta, na qual a inclinação é a tangente do ângulo de atrito interno, e a intersecção com o eixo das ordenadas é a coesão do solo. A reta foi obtida plotando os resultados da tensão de cisalhamento versus as forças normais aplicadas no ensaio. Os parâmetros foram estimados utilizando a equação de resistência ao cisalhamento de Coulomb (Equação 6)

$$\tau = \sigma \cdot \tan\phi + c \quad (5)$$

onde: τ é a tensão de cisalhamento (kPa); σ a tensão normal aplicada (kPa); ϕ o ângulo de atrito interno do solo ($^{\circ}$) e c a coesão do solo (kPa).

5.4.6 Reometria

As análises reológicas foram realizadas com um reômetro modular compacto (Anton Paar MCR 102), equipado com dispositivo de medição de placas paralelas (placa inferior rugosa fixa de 50 mm de diâmetro e placa superior rugosa rotativa de 25 mm de diâmetro), no qual foram realizados testes de varredura de amplitude da deformação com frequência constante (MARKGRAF et al., 2006).

As análises reológicas foram realizadas em amostras homogeneizadas, que foram preparadas a partir da TFSA que foi umedecida, entre 10 a 30%, e deixadas em repouso hermético por 24 horas. A TFSA de cada horizonte foi transferida para anéis volumétricos de aproximadamente 3,58 cm de diâmetro e 0,96 cm de altura, volume de $9,6 \text{ cm}^3$. A TFSA foi compactada nos anéis para que a D_s fosse igual a de cada horizonte no campo (Tabela 3).

As amostras foram saturadas por capilaridade, com água destilada até estarem saturadas. Após foram separadas em dois conjuntos de amostras, o primeiro foi submetido ao Teste de Varredura de Amplitude (TVA) na condição saturada, e o segundo conjunto foi submetido a drenagem na tensão de água de 6 kPa, em mesa de tensão de areia (REINERT e REICHERT, 2006).

Nas medições reológicas foi utilizado um volume de aproximadamente 4 cm^3 das amostras preparadas. Esse volume foi extraído dos cilindros de $9,6 \text{ cm}^3$ com o máximo de cuidado para preservar a estrutura da amostra. Para tal, as amostras foram colocadas sobre a placa inferior de medição do reômetro, extraídas do anel e cortadas horizontalmente na altura aproximada de 4,5 mm (com fio de nylon ou estilete) e verticalmente (com anel de diâmetro de 25 mm) imediatamente antes do teste, de modo a se ajustar exatamente ao diâmetro da placa superior e ao gap (espaço entre as placas de medição) e para evitar os possíveis efeitos do solo circundante (HOLTHUSEN et al., 2010).

As condições durante a realização dos TVA foram: temperatura constante na placa paralela inferior = $20 \text{ }^\circ\text{C}$; período de repouso antes do início do teste = 30 s; amplitude da deformação controlada = 0,0001 a 100%; gap = 4mm; frequência angular = 0,5 Hz; série de pontos de medição = 30 e duração aproximada do teste = 15 min.

Com os resultados de tensão-deformação dos testes foram calculados com o software Rheoplus USD200, as propriedades reológicas dos solos: os módulos de armazenamento (G' (Pa)) e de perda (G'' (Pa)); o limite de deformação (γ_{LVE} (%)) e a tensão de cisalhamento (τ_{LVE} (Pa)) no limite do intervalo de deformação viscoelástica linear (LVE); a deformação (γ_{YP} (%)); a tensão de cisalhamento máxima durante o teste ($\tau_{\text{máx}}$); e a integral z.

5.4.7 Tomografia computadorizada de Raio-X

As imagens de tomografia foram obtidas por meio do Tomógrafo micrométrico Nikon, modelo XT H 225 ST. O tomógrafo possui detectores de geometria bidimensional e feixe de raio-X cônico, os quais são capazes de caracterizar o espaço poroso. Durante o processo de escaneamento, as imagens foram pré-visualizadas e, com auxílio de histogramas do gradiente de impedância da amostra foi determinada a voltagem a ser aplicada e, a necessidade de utilização de filtros durante o escaneamento das amostras. A voltagem utilizada foi de 160 KV, com corrente de $300 \mu\text{A}$, tempo de exposição de 1s e filtro de cobre. Os parâmetros sofreram pequenas alterações entre as diferentes amostras devido ao envelhecimento do filamento, que demanda maior potência ou maior tempo de exposição, para atingir os mesmos valores de impedância.

Após a aquisição das imagens em duas dimensões foi realizada a reconstrução do volume das amostras com o programa de computador CT Pro 3D (Nikon Metrology). No processo de reconstrução foram aplicados filtros gaussianos para redução do ruído, e do efeito de endurecimento de feixe. Os filtros estão implementados diretamente no programa de

reconstrução CT Pro 3D. A resolução do voxel obtida foi de 0,048 mm, correspondendo ao volume de 0,000116 mm³. A resolução espacial obtida foi 0.096 mm, pois são necessários no mínimo dois voxels e que precisam estar classificados na mesma classe, e.g. poro (vazio) ou sólido (matriz do solo) para que a característica da classe seja obtida com maior precisão (DOUBE et al., 2010).

Para o processamento das imagens 3D, estas foram convertidas em uma sequência 2D, nas quais foram aplicados os tratamentos de imagens para aumento da nitidez e obtenção de contraste uniforme no conjunto de imagens. Foi selecionada a parte central da amostra, com o objetivo de reduzir o impacto das paredes do cilindro e de manipulação nas faces superior e inferior das amostras.

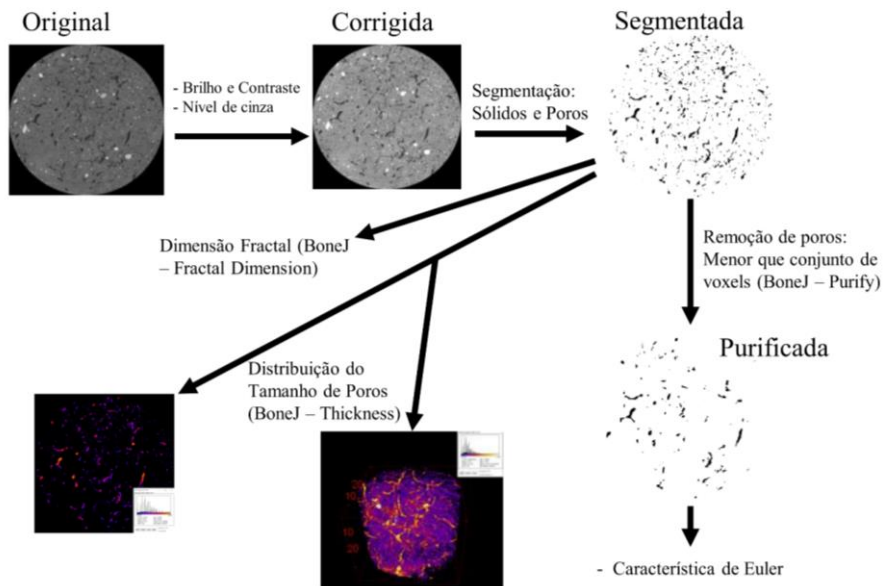
A segmentação foi realizada por meio da aplicação dos métodos globais disponíveis no software ImageJ/Fiji (SCHINDELIN et al., 2012). A segmentação foi realizada de modo a separar o material mineral do material orgânico+poros, pois a atenuação do ar e do material é muito próximo com possibilidade de ocorrer sobreposição (LE BAYON et al., 2020). Após a segmentação foi feita uma inspeção visual para verificar a qualidade da segmentação. Se a segmentação foi ineficiente, era realizado ajuste manual do valor limite entre poros e solo, com base na intensidade da coloração cinza do histograma de escalas de cinza característico de cada imagem.

As análises posteriores foram realizadas por meio do plugin BoneJ (DOUBE et al., 2010), versão 1.4.3. A distribuição do tamanho de poros foi calculada por meio da utilização do plugin BoneJ – Thickness. Para determinação do grau de anisotropia, número de Euler, as imagens foram submetidas a ferramenta Purify do plugin BoneJ, com a seguinte configuração de parâmetros: *Labelling algorithm = Multithreaded, Chunk size = 4 slices*. Na imagem purificada obtida foi calculado o número de Euler, por meio do plugin BoneJ – Connectivity. O número de Euler indica a conectividade dos poros, sendo que quanto mais negativo mais conectada é a estrutura.

A dimensão fractal foi calculada por meio do plugin BoneJ – Fractal Dimension. A porosidade total da amostra foi calculada por meio do plugin BoneJ – Volume Fraction, com os parâmetros: *Algorithm = Voxel, Surface resampling = 6*. A Figura 2 mostra o fluxo de trabalho realizado sobre as imagens.

A tortuosidade e o grau de anisotropia foram calculados com o programa Avizo, versão 2020.2, com os módulos de processamento: Centroid Path Tortuosity e Degree of Anisotropy.

Figura 2 - Esquema de processamento das imagens tomográficas para obtenção dos parâmetros por meio da utilização do programa ImageJ.



Fonte: Autor.

5.5 Análise estatística

As análises foram realizadas com o programa R (R CORE TEAM, 2019). A análise de variância foi realizada com os fatores principais sendo os horizontes do solo. Quando os fatores foram significativos, a comparação múltipla de médias foi realizada por meio de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Nas propriedades D_s , Porosidade total, macroporosidade, microporosidade foi realizada a análise trifatorial dos considerando os fatores: (i) Uso do Solo – Campo Nativo e Agrícola; (ii) Classes de solo – Latossolo e Nitossolo e (iii) horizontes de coleta.

As curvas de retenção de água foram examinadas e comparadas por meio de intervalos de confiança a 95% que foram estimados por meio do comando `groupwiseMeans` do pacote `rcompanion`. A análise de correlação foi realizada utilizando o método de Spearman, como o comando `cor`.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Densidade e porosidade

Nos atributos densidade do solo, porosidade total e macroporosidade houve interação tripla (Tabela 3). Na densidade do solo, ao comparar as condições de uso, essa foi menor nos Hz1, Hz2 e Hz3 no Nitossolo sob uso agrícola, enquanto no Latossolo foi menor nos Hz2 e Hz4 sob uso agrícola. Na comparação dos solos houve variação na densidade do solo entre os Horizontes e condições de uso. A densidade do solo variou de 1,24 g cm⁻³ a 1,40 g cm⁻³ e 1,13 g cm⁻³ a 1,38 g cm⁻³ no Latossolo e Nitossolo, respectivamente.

A maior porosidade total foi encontrada no Nitossolo (0,60 cm³ cm⁻³) no Hz1 (Hz A) sob uso agrícola, enquanto a menor Pt foi encontrada no Latossolo (0,48 cm³ cm⁻³) sob campo nativo no Hz4 (Hz BC)(Tabela 3). A Pt foi maior sob uso agrícola nos dois solos, exceto no Hz3 no Nitossolo.

Tabela 3 - Densidade do solo (Ds), Porosidade total (Pt), Microporosidade (Micro) e Macroporosidade (Macro) no Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob cultivo agrícola (NVef -A), Nitossolo Vermelho eutroférico típico (NVef -CN), Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN) e Latossolo Vermelho distrófico típico sob cultivos agrícola (LVd -A).

		Solo							
		Lato	Nito	Lato	Nito	Lato	Nito	Lato	Nito
	Uso	Hz1		Hz2		Hz3		Hz4	
Ds	A	1.40 αAa*	1.13 βBc	1.25 βAb	1.23 βAb	1.28 αBb	1.38 βAa	1.24 βBb	1.34 αAa
	CN	1.40 αAa	1.33 αBb	1.40 αAa	1.36 αBab	1.28 αAb	1.31 αAb	1.29 αBb	1.38 αAa
Pt	A	0.50 αBb	0.60 αAa	0.54 αAa	0.55 αAb	0.54 αAa	0.48 αBc	0.55 αAa	0.52 αBd
	CN	0.50 αAa	0.49 βAbc	0.49 βBab	0.53 αAa	0.51 βAa	0.52 βAab	0.47 βBb	0.49 βAc
Macro	A	0.05 αAd	0.21 βBc	0.11 αAc	0.12 βBb	0.08 βAb	0.07 αBa	0.06 αAa	0.07 αBa
	CN	0.07 αAb	0.08 αAc	0.07 βBb	0.08 αAbc	0.07 αAa	0.06 αBab	0.06 αAa	0.07 αBa

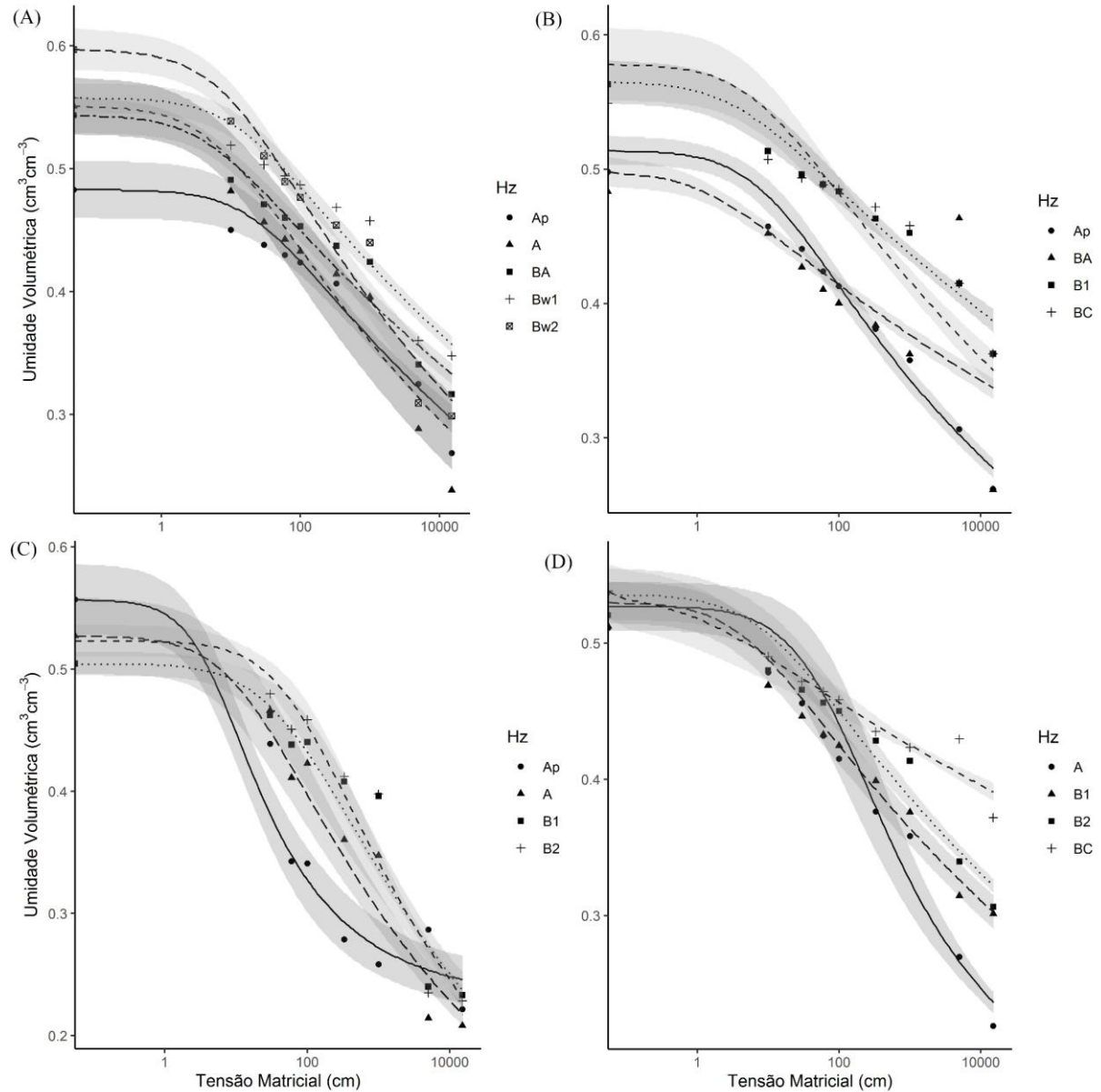
* Letras gregas iguais não diferem entre si para condição de uso do solo dentro de cada nível de solo e Hz, letras maiúsculas iguais não diferem entre si para solo dentro de cada nível de uso e Hz e letras minúsculas iguais não diferem entre si para Hz dentro de cada nível de uso e solo. Fonte: Autor.

A macroporosidade foi maior sob uso agrícola, em especial, nos horizontes superficiais (Tabela 3). A maior macroporosidade foi encontrada no Hz1 (A) do Nitossolo sob uso agrícola (0,21 cm³ cm⁻³), onde correspondeu a 35% da porosidade total. A menor densidade do solo foi encontrada no Hz1 do Latossolo sob uso agrícola. No campo nativo, a macroporosidade apresentou valores entre 0,05 cm³ cm⁻³ e 0,08 cm³ cm⁻³, representando entre 12,6% a 16% da porosidade do solo.

6.2 Retenção de água

As curvas de retenção de água mostram que houve alterações na retenção de água entre Hz do mesmo solo e provocadas pela alteração na condição de uso do solo (Figura 3). O Hz superficial do LVd-A e LVdf-CN (Figura 3A, 3B) apresentaram o menor θ de saturação. Enquanto nos Nitossolos não houve diferença na umidade de saturação entre os Hz (Figura 3C e 3D). Nas tensões iniciais de água, os Hz subsuperficiais apresentaram maior θ do que os superficiais. Esse resultado pode ser devido a menor influência do manejo, dos ciclos de umedecimento e secagem e crescimento radicular, que alteram a distribuição do tamanho de poros, pois a microporosidade foi maior nos Hz subsuperficiais e a macroporosidade não apresentou diferença entre Hz nos solos sob campo nativo (Tabela 3)

Figura 3 - Curvas de retenção de água no (A) Latossolo Vermelho distrófico típico sob uso agrícola (LVd -A), (B) Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN), (C) Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob uso agrícola (NVec -A) e (D) Nitossolo Vermelho eutroférico típico (NVec -CN).



Fonte: Autor.

O Nitossolo sob campo nativo apresentou diferença na θ entre todos os Hz a partir da tensão de 1000 cm. Nos solos sob campo nativo há uma clara distinção na θ a partir da tensão matricial de 330 cm (Figura 3B e Figura 3D).

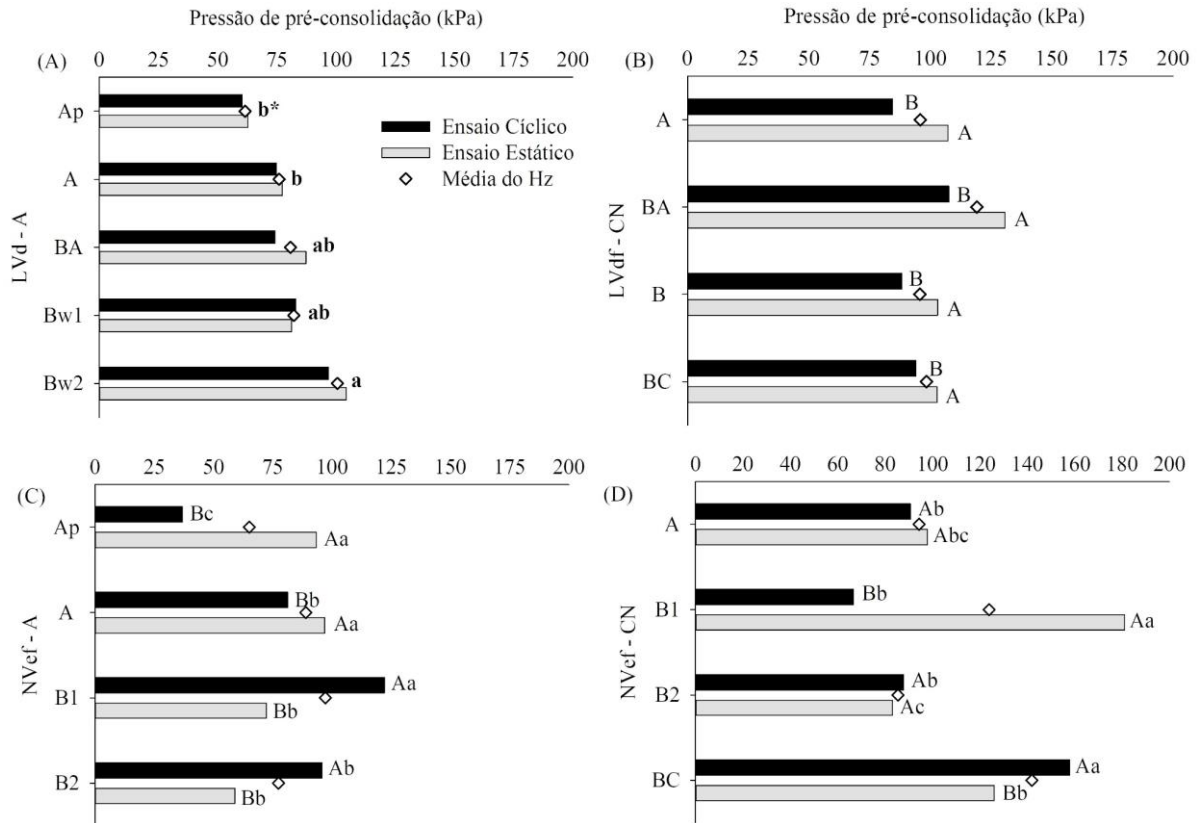
As maiores diferenças na θ menos negativos foram encontrados nos Hz dos solos que apresentaram as maiores diferenças na D_s (Tabela 3). Resultados similares foram relatados em solos cultivados sob sistema plantio direto sob vegetação nativa (HOLTHUSEN et al., 2018).

6.3 Pressão de pré-consolidação, índice de compressão, coesão e ângulo de atrito interno

A pressão de pré-consolidação do solo teve o valor máximo de 179,73 kPa e mínimo de 30,19 kPa. O tipo de ensaio de compressibilidade, cíclico ou estático, influenciou os valores de σ_p no Lvdf -CN e nos Nitossolos Vermelhos sob cultivo agrícola e campo nativo (Figura 4). No LVd -A, as maiores σ_p foram encontradas no Hz Bw2, sem diferir dos Hz BA e Bw1 (Figura 4A), isto é, em Hz abaixo dos 50 cm de profundidade (Tabela 2). O efeito das pressões aplicadas por máquinas pode alterar a estrutura do solo até os 50 centímetros (OBOUR et al., 2017), mas a maior capacidade de suportar pressões pode ser efeito da maior resistência estrutural do solo em função do tempo (MORAES et al., 2017).

Os ensaios estáticos resultaram em maiores valores de σ_p em todos os Hz do LVdf-CN, nos Hz Ap e A do NVef-A e no Hz B1 do NVef-CN, enquanto o ensaio conduzido de forma cíclica resultou em maior σ_p no Hz B1 de ambos os Nitossolos (Figura 4). Ensaio de compressão cíclicos e estáticos resultaram em diferentes valores de σ_p (GUBIANI et al., 2018). Dessa forma, não é possível afirmar que o tipo de ensaio define o valor a ser encontrado de σ_p .

Figura 4 - Pressão de pré-consolidação nos ensaios com aplicação cíclica e estática no (A) Latossolo Vermelho distrófico típico sob cultivos agrícola (LVd -A), (B) Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN), (C) Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob cultivo agrícola (NVef -A) e Nitossolo Vermelho eutroférico típico (NVef -CN).



*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si entre os ensaios estáticos e cíclicos, enquanto letras minúsculas iguais não diferem entre si nos horizontes de cada solo. Letras minúsculas em negrito iguais entre si indicam que não houve diferença na média dos ensaios cíclico e estático entre horizontes do mesmo solo. Fonte: Autor.

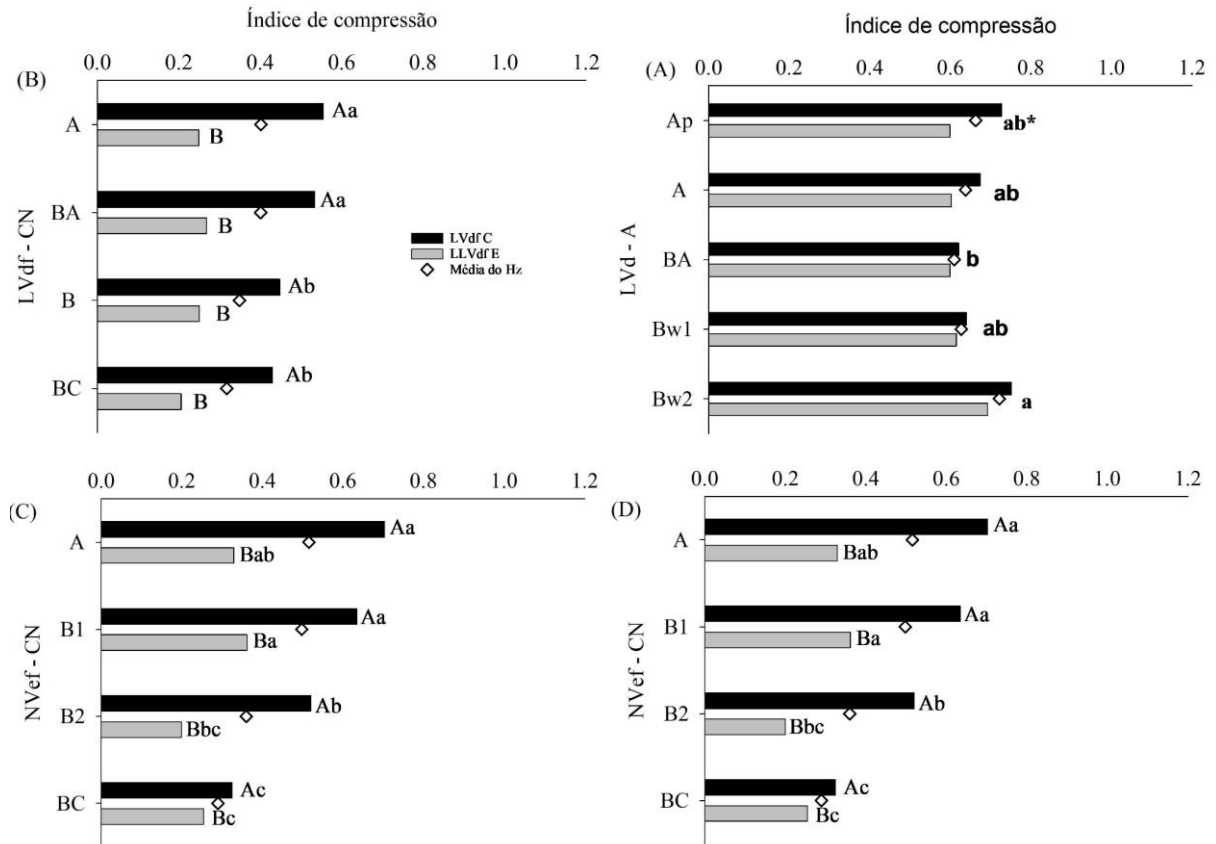
Nos Latossolos com D_s igual, valores mais elevados de σ_p foram encontrados sob campo nativo. No Hz Ap do LVd-A e no Hz do LVdf-CN, a D_s foi de $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabela 3), mas a σ_p foi de 60 kPa no Hz Ap do LVd-A e de 84 kPa no Hz A do LVdf-CN nos ensaios cíclicos e de 62 kPa e 107 kPa no Hz Ap e A nos ensaios estáticos, respectivamente (Figura 4). Padrão similar foram encontrados nos Hz A, BA, Bw1 do LVd-A em relação ao Hz B e BC do LVdf-CN (Figura 4, Tabela 3). Estes resultados demonstram que solos sem revolvimento, como o Latossolo sob campo nativo, sofrem efeito de fortalecimento da estrutura e apresentam maior estabilidade estrutural do que solos que sofreram revolvimento recentemente (MORAES et al., 2017; REICHERT et al., 2016b).

No LVd-A, o IC não variou entre os ensaios cíclico e estático, enquanto nos demais solos ocorreu diferença entre os ensaios, sendo o IC maior no ensaio estático. No LVd-A, o maior IC ocorreu no Hz Bw1 e o menor no Hz BA (Figura 5A). No ensaio cíclicos, os maiores IC ocorreram no Hz A e BA no LVdf-CN, no Hz Ap do NVef-A e no A e B1 do NVef-CN. Nos ensaios estáticos, os maiores IC ocorreram no Hz Ap, A e B1 do NVef-A, no Hz A e B1 do NVef-CN (Figura 5).

Valores maiores de IC demonstram maior susceptibilidade do solo a sofrer compactação. O maior valor de IC do Hz Ap do NVef-A no ensaio cíclico está associado com os ciclos, onde há recuperação de parte da deformação, mas também possibilidade de maior rearranjo das partículas de solo e redistribuição de água

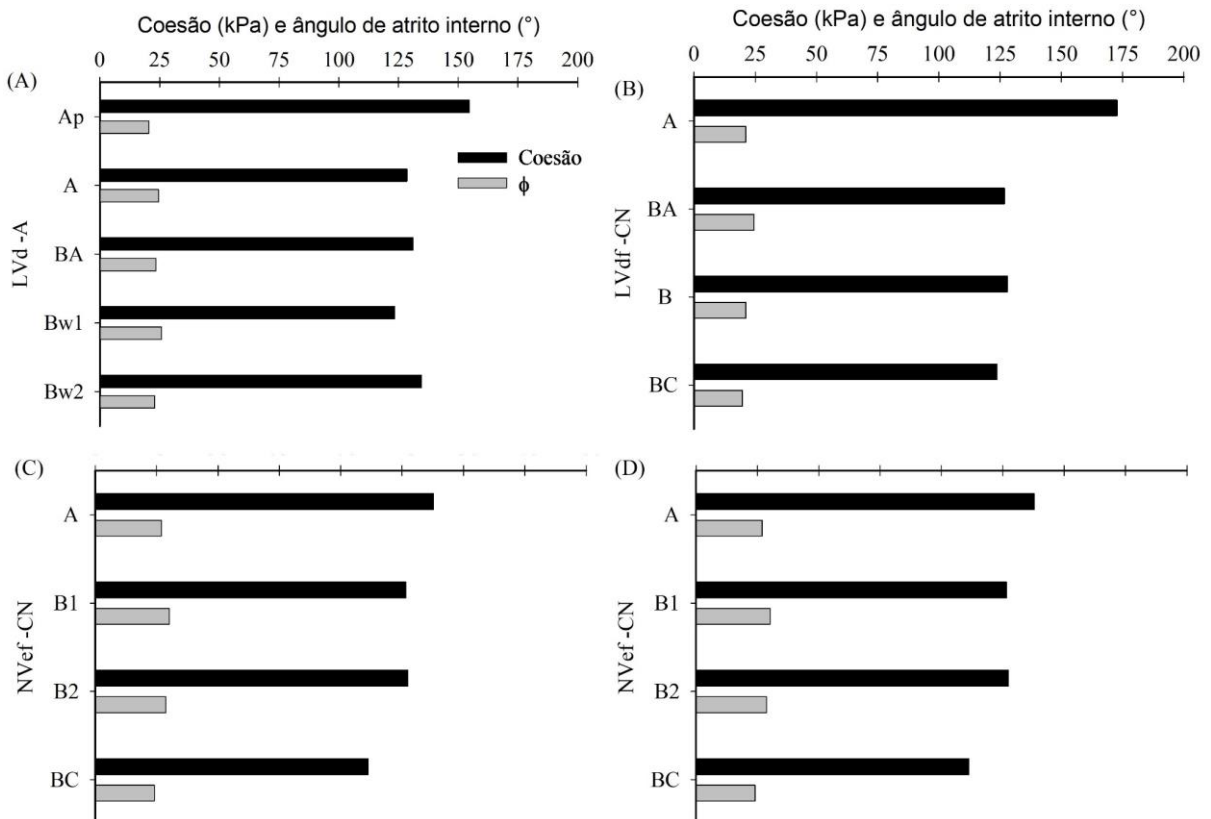
A coesão do solo e o ângulo de atrito interno não apresentaram diferença significativa nos Latossolos. No NVef-A, o Hz foi significativamente menor em relação ao Hz A, B1 e B2 (Figura 6C). Os valores de coesão variaram de 12 a 175 kPa, enquanto os valores de ângulo de atrito interno foram próximos a 25° (Figura 6).

Figura 5 - Índice de compressão nos ensaios com aplicação cíclica e estática no (A) Latossolo Vermelho distrófico típico sob cultivos agrícola (LVd -A), (B) Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN), (C) Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob cultivo agrícola (NVef -A) e (D) Nitossolo Vermelho eutroférico típico (NVef -CN).



*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si entre os ensaios estáticos e cíclicos, enquanto letras minúsculas iguais não diferem entre si nos horizontes de cada solo. Letras minúsculas em negrito iguais entre si indicam que não houve diferença na média dos ensaios cíclico e estático entre horizontes do mesmo solo. Fonte: Autor.

Figura 6 - Coesão e ângulo de atrito interno (ϕ) no (A) Latossolo Vermelho distrófico típico sob cultivos agrícola (LVd -A), (B) Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN), (C) Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob cultivo agrícola (NVef -A) e (D) Nitossolo Vermelho eutroférico típico (NVef -CN).



Fonte: Autor.

6.4 Parâmetros reológicos

O intervalo LVE variou de 0,007 a 0,015% e 0,007 a 0,026% em condição saturada e na tensão de -6 kPa (Tabela 4). O maior valor de γ LVE no Hz Bw2 do LVd-A e o menor valor nos Hz A do NVef-A e Hz A do LVd-A (Tabela 4). Nos Latossolos ocorreram as maiores diferenças entre a condição saturada e drenada a 6 kPa. O intervalo LVE indica comportamento elástico e plástico lineares (Markgraf et al., 2006).

A tensão de cisalhamento no limite do intervalo LVE (τ LVE) variou de 43,1 a 5713 Pa. A τ LVE foi maior na condição drenada a 6 kPa em ambos os Nitossolos, no LVdf-CN, nos Hz Ba, Bw1 e Bw2 do LVd-A e nos Hz Ba e B do NVef-A (Tabela 4).

Em alguns Hz, o módulo de armazenamento (G') e o módulo de perda (G'') não foram iguais (Tabela 4), dessa forma os comportamentos elástico e viscoso do solo não se igualaram, não havendo ponto de escoamento (HOLTHUSEN et al., 2010). Entretanto, quando houve ponto de escoamento, o maior valor de γ_{YP} foi no Hz do LVd-A e o menor no Hz Ap do LVef-A (Tabela 4). Os valores de γ_{YP} podem ser considerados elevados, aproximando-se de 100% para transição do comportamento elástico para o plástico. Esses valores podem estar relacionados a presença de óxidos de ferro (PÉRTILE et al., 2016), que são agentes cimentantes com elevada influência nos parâmetros reológicos do solo (MARKGRAF e HORN, 2007).

A tensão de cisalhamento máxima durante o teste ($\tau_{m\acute{a}x}$) seguiu o comportamento da τ_{LVE} . O menor valor de $\tau_{m\acute{a}x}$ foi de 565 Pa e o maior de 27267 Pa (Tabela 4). A $\tau_{m\acute{a}x}$ menor foi encontrada no Hz Ap do NVef-A, esse Hz apresentou a D_s de $1,12 \text{ g cm}^{-3}$, um pouco maior que o Hz Bw2 do LVd-A que apresentou D_s de $1,07 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabela 3). A $\tau_{m\acute{a}x}$ está relacionada com a resistência do solo (PÉRTILE et al., 2016).

Os maiores valores de integral z (I_z) foram encontrados no LVdf-CN, e os menor valor no Hz BA do LVd-A (Tabela 4). Os maiores valores de I_z indicam maior estabilidade estrutural do solo (MARKGRAF et al., 2012; BAUMGARTEN et al., 2012).

De modo geral, a drenagem das amostras na tensão de 6 kPa aumentou a resistência do solo, pois a água atua como lubrificante das partículas de solo (HOLTHUSEN, 2020; REICHERT et al., 2010), que permite maior rearranjo das partículas e resulta em perda de resistência estrutural do solo.

Tabela 4 - Parâmetros reológicos na tensão de água de 0 e 6 kPa (n=3) no Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob cultivo agrícola (Nvef - A), Nitossolo Vermelho eutroférico típico (Nvef -CN), Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN), Latossolo Vermelho distrófico típico sob cultivos agrícola (LVd -A).

Hz	Prof.(cm)	0		6		0		6		0		6	
		γ_{LVE} (%)	τ_{LVE} (Pa)	γ_{YP} (%)	G' (Pa)	τ_{max} (Pa)	Iz						
Nvef - A													
Ap	0-12	0.013	0.015	43.1	221.7	91.4	-*	106.5	-*	565.1	3076.3	38.1	54.4
A	12-48	0.007	0.011	155.7	1571.0	70.6	-*	370.3	-*	1340.2	11498.5	29.3	55.3
B1	48-110	0.011	0.011	1946.7	1893.3	-*	-*	-*	-*	12728.3	16310.3	42.9	48.4
B2	110-137	0.010	0.011	1473.3	2423.3	-*	-*	-*	-*	13031.7	19316.7	36.5	53.8
Nvef - CN													
A	0-43	0.015	0.015	351.3	1224.0	79.9	-*	673.3	-*	3910.4	12327.0	35.7	50.2
B1	43-70	0.009	0.009	1283.3	1406.7	60.3	67.2	8989.5	3271.8	11736.7	10852.0	23.8	35.5
B2	70-100	0.010	0.010	1233.0	2240.0	72.7	-*	4047.1	-*	7137.1	20070.3	26.5	47.8
BC	100-130+	0.010	0.010	1429.7	2120.0	58.8	74.7	16462.0	14789.0	11222.0	22050.3	41.7	26.8
LVdf - CN													
A	0-17	0.015	0.023	264.3	1380.0	61.2	-*	2768.9	-*	3162.3	13871.0	166.8	153.4
BA	17-37	0.010	0.022	162.3	2040.0	55.4	-*	1315.8	-*	1534.1	13962.7	170.6	157.2
B	37-118	0.010	0.018	1059.7	2283.3	46.8	52.2	4712.9	22428.0	7777.5	17807.3	180.5	163.1
BC	118-150+	0.010	0.014	1326.7	2223.3	47.8	49.1	5543.3	21387.0	8985.7	20774.3	178.0	165.8
LVd - A													
Ap	0-25	0.012	0.009	1373.3	514.0	99.6	30.2	5874.5	12469.0	14020.0	6286.9	21.2	9.5
A	25-50	0.011	0.007	1270.0	233.3	70.4	44.9	7497.2	897.1	11166.7	3006.9	25.5	18.8
BA	50-80	0.008	0.010	824.3	1666.7	37.5	72.0	6397.0	7937.7	8053.0	18051.7	18.4	25.2
Bw1	80-140	0.009	0.026	1503.3	5713.3	54.5	-*	4981.1	-*	12460.0	27266.7	24.8	38.7
Bw2	140-230+	0.009	0.008	913.3	1626.7	-*	65.5	-*	6633.7	6935.7	12356.0	42.7	28.6

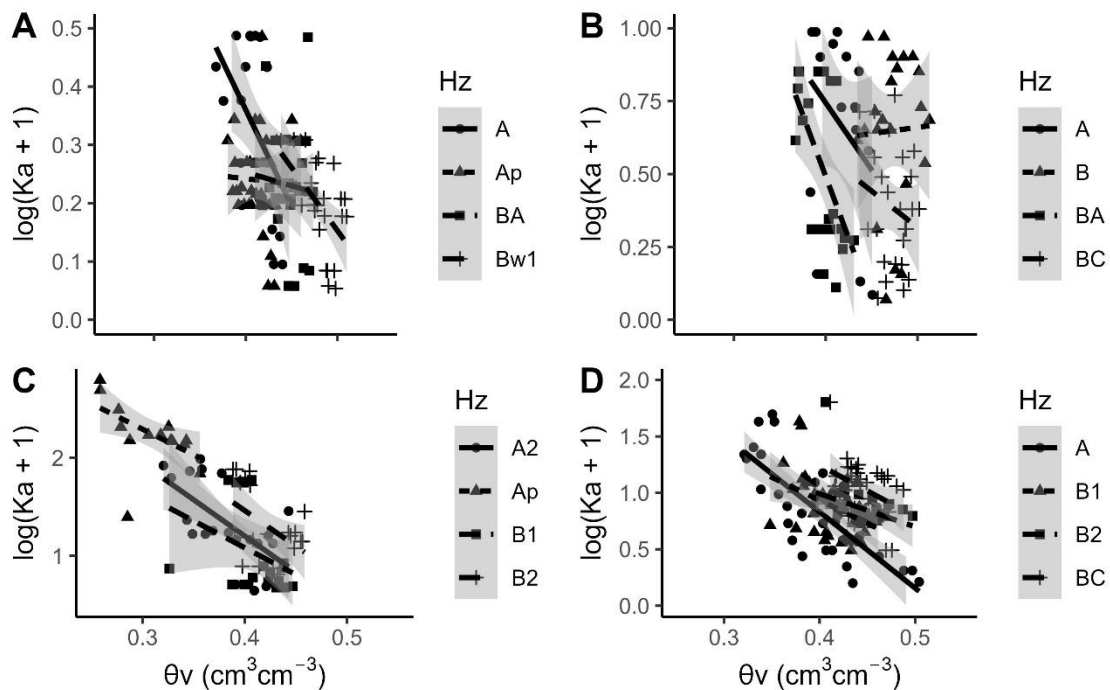
Fonte: Autor.

6.5 Permeabilidade do solo ao ar

A K_a do solo aumentou com a redução do conteúdo volumétrico de água (Figura 7). A K_a foi diferente entre os Hz do LVdf-CN, NVec-CN e NVec-A (Figura 7B, 7C e 7D). Os maiores valores de K_a foram encontrados no Hz Ap do NVec-A (Figura 7D), esse Hz apresentou a maior Pt e macroporosidade e a menor D_s (Tabela 3). A coleta das amostras no NVec-A foi realizada durante o mês de julho, no cultivo de aveia, onde as raízes apresentam maior crescimento e há resquícios do efeito da semeadura (KREISELMEIER et al., 2019).

No LVdf-CN, os valores de K_a no Hz A e BA foram no conteúdo volumétrico de água no intervalo entre 0,34 e 0,45 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, enquanto nos Hz B e BC o conteúdo de água variou de 0,42 a 0,51 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Figura 7B).

Figura 7 - Permeabilidade do solo ao ar em relação ao conteúdo volumétrico de água no (A) Latossolo Vermelho distrófico típico sob cultivos agrícola (LVd -A), (B) Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN), (C) Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob cultivo agrícola (NVec -A) e (D) Nitossolo Vermelho eutroférico típico (NVec -CN).



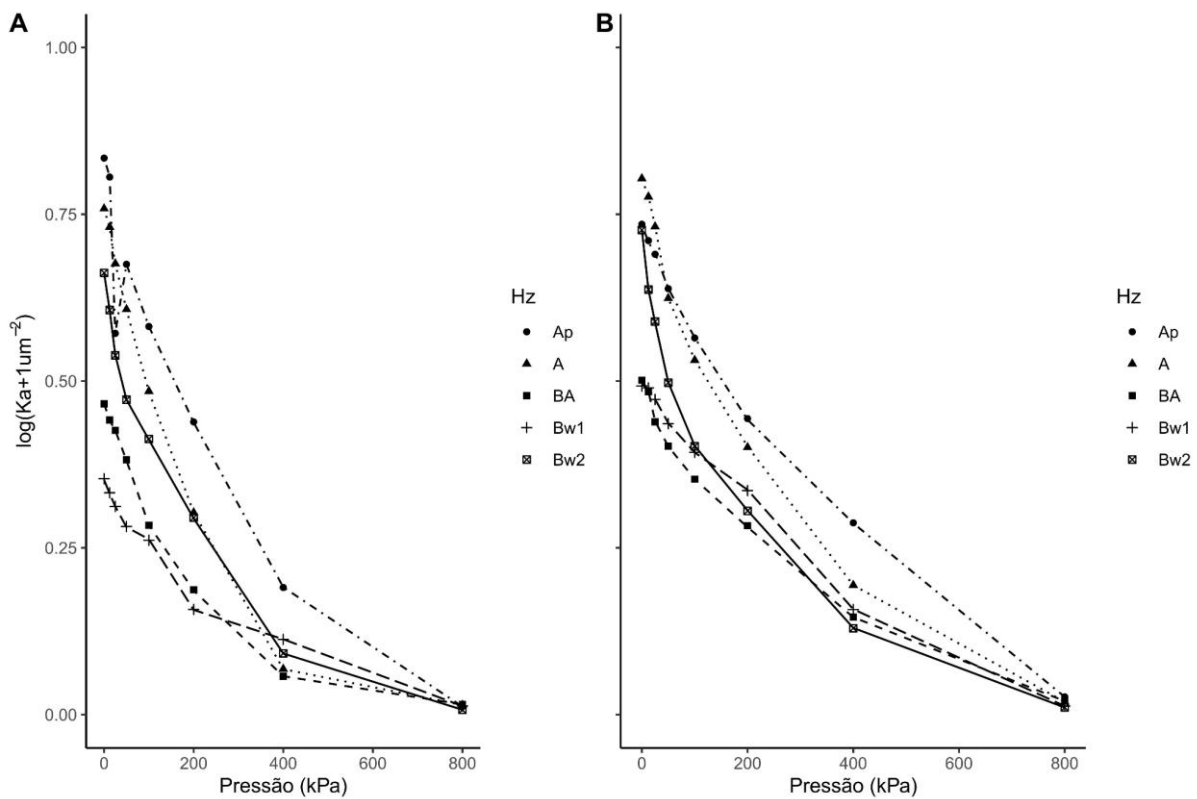
Fonte: Autor.

No Latossolo sob cultivos agrícolas, a variação dos valores de K_a foi menor que sob campo nativo, sem haver diferença entre os Hz dos solos (Figura 7A). Nos Nitossolos, a K_a

apresentou valores muito diferentes entre os Hz Ap e A (superficiais) sob cultivos agrícolas e no Hz A sob campo nativo (Figura 6C e 6D).

A permeabilidade do solo ao ar diminui com o aumento das pressões durante os ensaios de compressibilidade cíclica e estática, chegando a zerar ou muito próximo disso com aplicação de 800 kPa de pressão (Figura 8 e Figura 9). O comportamento da K_a é similar em todos os solos e Hz. Entretanto, em valores absolutos, a K_a inicial é maior nos Nitossolos do que nos Latossolos, independentemente da condição de uso do solo. No LVD-A, a redução da K_a foi elevada em todos os Hz, mesmo com na pressão de 12,5 kPa houve redução nos valores médios de K_a em ambos os ensaios de compressibilidade estático e cíclico (Figura 8).

Figura 8 - Permeabilidade do solo ao ar durante a realização dos ensaios de compressibilidade estático (A) e cíclico (B) no Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVD-A).

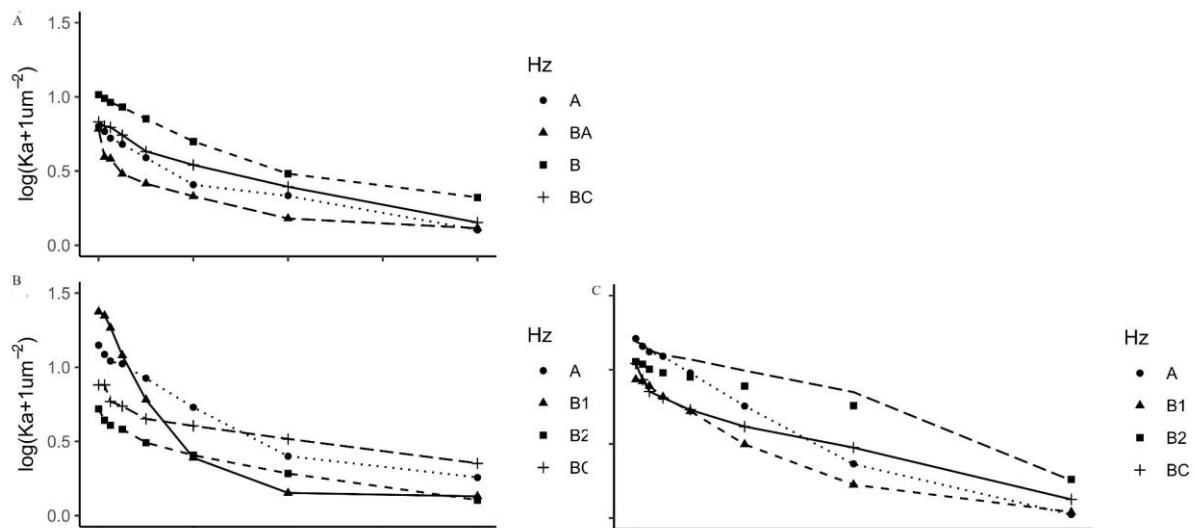


Fonte: Autor.

A redução nos valores de K_a no LVDf-CN, NVef-A, NVef-CN foi menos intensa que no LVD-A. Os solos sob campo nativo mostraram tendência de redução menos intensa nos valores de K_a do que sob uso agrícola (Figura 9). Esses resultados podem estar relacionados a maior estabilidade dos poros e rigidez da estrutura de solo. Pois, com maiores tempos de adoção de sistemas de semeadura direta resultaram em um solos menos susceptível a compactação

(MORAES et al., 2017; REICHERT et al., 2016b). Desse modo, os solos que não sofreram preparos de solo, podem estar em uma condição estrutural que permite a manutenção da funcionalidade do sistema poroso, mesmo com aplicação de maiores pressões.

Figura 9 - Permeabilidade do solo ao ar nos ensaios cíclicos no (A) Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN), (B) Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob cultivo agrícola (NVef -A) e (C) Nitossolo Vermelho eutroférico típico (NVef -CN).



Fonte: Autor.

6. 6 Condutividade hidráulica de solo saturado

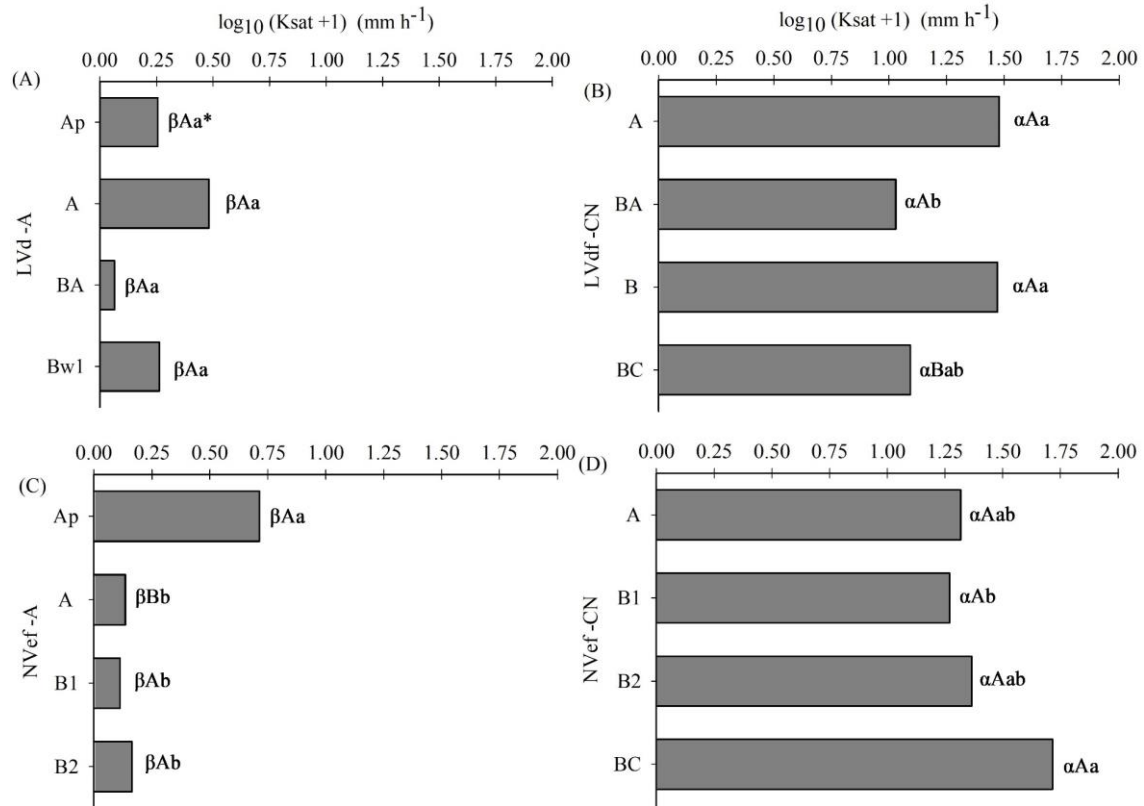
A condutividade hidráulica do solo saturado variou entre o uso agrícola e sob campo nativo, com valores aproximadamente cinco vezes maiores no campo nativo (Figura 10). A K_{sat} foi maior nos Hz A e Bw2 no LVd -A diferindo significativamente dos Hz Ap, Bw1 e BA, sendo o BA último com menor K_{sat} (Figura 10A). Na descrição morfológica do solo, o Hz Ap foi descrito como tendo a presença de agregados de origem antrópica, formatos colunar e prismático. Além de ser o Hz que apresentou a maior D_s e a menor macroporosidade (Tabela 3).

A K_{sat} no NVef-A foi significativamente maior no Hz Ap em relação aos Hz A, B1 e B2 (Figura 10D). O Hz Ap do NVef -A teve a menor D_s e maior macroporosidade (Tabela 3), atributos que influenciam na K_{sat} (AMBUS et al., 2018; REICHERT et al., 2016b). Entretanto a correlação de Spearman não confirmou essa relação entre D_s e macroporosidade (Tabela 3).

Esse solo encontrava-se sob cultivo de aveia e revolvido, além disso, na descrição morfológica consta que há presença de muitas raízes, que podem formar bioporos, os quais influenciam as propriedades de condutividade de água e ar (ZHAI e HORN, 2018).

Os coeficientes de Spearman não demonstraram muita relação entre as diferentes variáveis de permeabilidade, mecânicas e atributos de textura e químicos do solo (Tabela 5). Era esperado haver coeficientes mais elevados entre as propriedades mecânicas, em especial, as reológicas do solo com os atributos químicos, entretanto as maiores relações encontradas foram com coeficiente de 0.5 (Tabela 5). O cálcio, os óxidos de Ferro e o carbono orgânico do solo são agentes cimentantes da estrutura do solo, esses influenciam aumentando a estabilidade estrutural dos solos avaliados por parâmetros reológicos (AJAYI et al., 2016; BATISTÃO et al., 2020a, 2020b; MARKGRAF et al., 2012; PÉRTILE et al., 2016). Mas os ensaios reológicos foram realizados com diferentes Ds do solo, pois as amostras foram remoldadas na Ds encontrada no campo (Tabela 3). Pois, a textura e a Ds influenciam no comportamento dos parâmetros reológicos dos solo (Holthusen et al., 2017).

Figura 30 - Condutividade hidráulica saturada no (A) Latossolo Vermelho distrófico típico sob cultivos agrícola (LVd -A), (B) Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN), (C) Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob cultivo agrícola e (D) Nitossolo Vermelho eutroférico típico (NVef -CN).



* Letras minúsculas iguais não diferem entre si no teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Fonte: Autor.

O índice de compressão apresentou correlação positiva de 0,70 com o índice de vazios inicial do solo (Tabela 5). O índice de compressão do solo é relacionado com a susceptibilidade do solo a sofrer deformação, sendo assim, um maior número de vazios no solo permite que haja maior rearranjo das partículas de solo.

Tabela 5 - Coeficientes de correlação de Spearman das variáveis de permeabilidade, mecânicas, textura e químicas nos solos coletados sob diferentes condições de uso.

	IKs	Ds ¹	Pt	Mic	Mac	GC	Ivi	ΣP	IC	γ _{LVE}	τ _{LVE}	τ _{max}	Iz	Coesão	φ	Areia	Silte	Argila	CO	Ca	Mg	K	Al	Fe ₂ O ₃
IKs	1	-0.02	-0.19	-0.14	0.30	-0.49	-0.26	0.37	-0.17	0.22	-0.04	-0.20	0.53	-0.18	0.08	0.40	0.32	-0.38	0.02	-0.02	-0.48	-0.31	-0.09	-0.40
Ds		1.00	-0.71	-0.38	-0.51	0.42	-0.64	0.00	-0.39	0.31	-0.08	-0.02	-0.03	0.28	-0.18	0.46	0.63	-0.60	0.22	0.59	0.30	0.26	-0.51	-0.08
Pt			1.00	0.31	0.54	-0.18	0.72	-0.24	0.47	-0.30	-0.02	0.05	-0.28	-0.08	0.06	-0.42	-0.61	0.58	-0.06	-0.38	-0.10	0.06	0.36	0.30
Micro				1.00	-0.11	-0.05	0.06	0.14	-0.31	-0.51	0.23	0.17	-0.11	0.11	-0.37	-0.74	-0.42	0.51	-0.60	-0.56	-0.16	-0.36	0.59	0.08
Macro					1.00	-0.25	0.44	0.09	0.41	-0.10	0.03	-0.05	0.15	-0.30	0.37	0.07	-0.35	0.25	0.10	-0.19	-0.20	-0.05	0.10	0.04
GC						1.00	-0.05	-0.08	-0.11	-0.14	0.16	0.27	-0.18	0.22	-0.17	-0.19	-0.28	0.33	0.28	0.04	0.36	0.33	0.04	0.29
Ivi							1.00	-0.27	0.70	-0.30	0.02	0.09	-0.25	-0.24	0.28	-0.32	-0.63	0.58	0.08	-0.40	-0.11	0.03	0.38	0.28
ΣP								1.00	-0.39	-0.18	0.32	0.11	0.51	-0.12	0.05	0.05	-0.15	0.13	-0.47	-0.18	-0.34	-0.36	-0.06	-0.22
IC									1.00	0.10	-0.13	0.00	-0.24	-0.19	0.35	-0.01	-0.34	0.25	0.36	-0.19	-0.06	0.23	0.24	0.11
γ _{LVE}										1.00	-0.09	-0.04	0.22	0.11	-0.02	0.55	0.48	-0.56	0.43	0.50	0.17	0.40	-0.34	-0.09
τ _{LVE}											1.00	0.82	-0.04	0.02	0.01	-0.07	-0.34	0.31	-0.39	-0.21	-0.02	0.02	0.21	0.24
τ _{max}												1.00	-0.24	0.08	-0.01	-0.11	-0.36	0.33	-0.23	-0.19	0.11	0.16	0.29	0.33
Iz													1.00	-0.19	-0.01	0.17	0.03	-0.07	-0.13	-0.16	-0.52	-0.19	-0.06	-0.31
Coesão														1.00	-0.56	-0.07	0.07	-0.03	0.01	0.10	0.18	0.17	-0.05	0.01
φ															1.00	0.27	-0.08	-0.03	0.04	0.04	-0.13	-0.20	-0.18	0.22
Areia																1.00	0.64	-0.77	0.42	0.57	0.01	0.18	-0.58	-0.06
Silte																	1.00	-0.97	0.23	0.69	0.20	0.04	-0.56	-0.24
Argila																		1.00	-0.29	-0.69	-0.12	-0.08	0.59	0.21
CO																			1.00	0.37	0.33	0.36	-0.11	-0.05
Ca																				1.00	0.54	0.22	-0.80	0.11
Mg																					1.00	0.38	-0.21	0.04
K																						1.00	-0.20	0.03
Al																							1.00	0.03
Fe ₂ O ₃																								1.00

¹ Ds: Densidade do solo; Pt: Porosidade total; Mic: Microporosidade; Mac: Macroporosidade; GC: Grau de compactação; Ivi: Índice de vazios inicial; ΣP: Pressão de pré-consolidação; IC: Índice de compressão; γ_{LVE}: Deformação no final do intervalo viscoelástico linear; τ_{LVE}: tensão de cisalhamento (no limite do intervalo de deformação viscoelástica linear; τ_{max} : tensão de cisalhamento máxima; Iz: Integral z; φ: ângulo de atrito interno; CO: Carbono Orgânico. Coeficientes em negrito são maiores que 0,5 ou menores que -0,5.

6. 7 Tomografia Computadorizada

A característica de Euler (Euler) apresentou valores negativos em Hz (Tabela 6). Os valores mais negativos de Euler foram no Hz A e B1 do Nvef-CN. Valores mais negativos de Euler indicam maior quantidade de poros conectados (VOGEL, 2002; VOGEL et al., 2010).

Tabela 6 - Característica de Euler, Conectividade, Dimensão Fractal (DF), Porosidade determinada por meio da Tomografia (Pt-TC), tortuosidade e Grau de Anisotropia (GA) no Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob cultivo agrícola (Nvef -A), Nitossolo Vermelho eutroférico típico (Nvef -CN), Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf - CN) e Latossolo Vermelho distrófico típico sob cultivos agrícola (LVd -A).

Hz	Prof. (cm)	Euler*	Conectividade (mm ⁻³)	DF	Pt-TC (cm ³ cm ⁻³)	Tortuosid ade	GA
Nvef - A							
Ap	0-12	-52202,000	0,487	2,647	0,041	5,465	0,551
A	12-48	-72812,000	0,688	2,607	0,090	3,016	0,575
B1	48-110	-2423,000	0,017	2,290	0,042	3,686	0,551
B2	110-137	-20949,000	0,191	2,487	0,083	3,349	0,543
Nvef - CN							
A	0-43	-83671,000	0,847	2,781	0,097	2,675	0,505
B1	43-70	-145987,000	1,375	2,791	0,082	2,425	0,529
B2	70-100	-42396,000	0,379	2,454	0,027	3,591	0,517
BC	100-130+	-45374,000	0,424	2,235	0,042	5,160	0,523
LVdf - CN							
A	0-17	-49832,000	0,467	2,701	0,068	2,816	0,518
BA	17-37	-8216,000	0,072	2,306	0,051	3,639	0,508
B	37-118	-56508,000	0,523	2,501	0,067	4,830	0,840
BC	118-150+	-37260,000	0,347	2,696	0,062	4,903	0,632
LVd - A							
Ap	0-25	-6433,000	0,057	2,522	0,015	10,904	0,656
A	25-50	-3462,000	0,029	2,535	0,023	8,176	0,645
BA	50-80	-31294,000	0,283	2,747	0,041	3,179	0,500
Bw1	80-140	-43479,000	0,392	2,807	0,019	8,454	0,620
Bw2	140-230+	-33395,000	0,612	2,544	0,009	12,165	0,593

* Número de Euler, Conectividade, DF=Dimensão fractal, Pt-TC= Porosidade calculada com as imagens de tomografia e GA=Grau de Anisotropia.

Os valores de conectividade variaram de -0,017 a 0,847 mm³ (Tabela 6). O valor negativo de conectividade representa que não há objetos (poros) conectados na amostra, mas sim parte deles encontra-se isolado (Figura 16-Bg), enquanto valores maiores indicam que a totalidade dos objetos se encontra conectada. O maior valor de conectividade ocorreu no Hz A do NVef-CN (Figura 12-A).

Os valores de dimensão fractal indicam a complexidade do sistema de poros. Os valores próximos a três indicam maior complexidade. Os valores de DF variaram de 1,596 a 2,807 (Tabela 6).

A Pt-TC foi próxima a macroporosidade para alguns solos, pois a resolução obtida foi de 0.048 mm, valor próximo ao considerado como sendo dos macroporos. Os valores de macroporosidade obtidos com os cilindros de 102 cm³ não foi aproximada ao da Pt-TC por causa da utilização de amostras diferentes para realizar as análises nas colunas de areia e com a tomografia. A utilização do mesmo conjunto de amostras na determinação da curva de retenção de água, permeabilidade do solo ao ar e na tomografia resultará em valores similares ou muito aproximados entre as técnicas. Lucas et al. (2020) utilizaram uma abordagem de subamostrar as amostras e obtiveram resoluções espaciais mais detalhadas, que permitiram estudar a distribuição dos poros na escala dos microporos.

A figura 11 mostra a organização estrutural dos poros conectados e isolados dos horizontes A de todos os solos amostrados. É possível verificar que a macroporosidade, até o limite da resolução, demonstra que a maior parte é conectada. Porém existem os afunilamentos que limitam a quantidade de água a ser transmitida pelo volume de solo. Os mesmos afunilamentos apresentam pontos que podem obstruir a passagem de ar, por estarem ocupados com água. Assim, reduzindo a permeabilidade do solo ao ar, e pode explicar a amplitude dos valores encontrados para permeabilidade do solo ao ar.

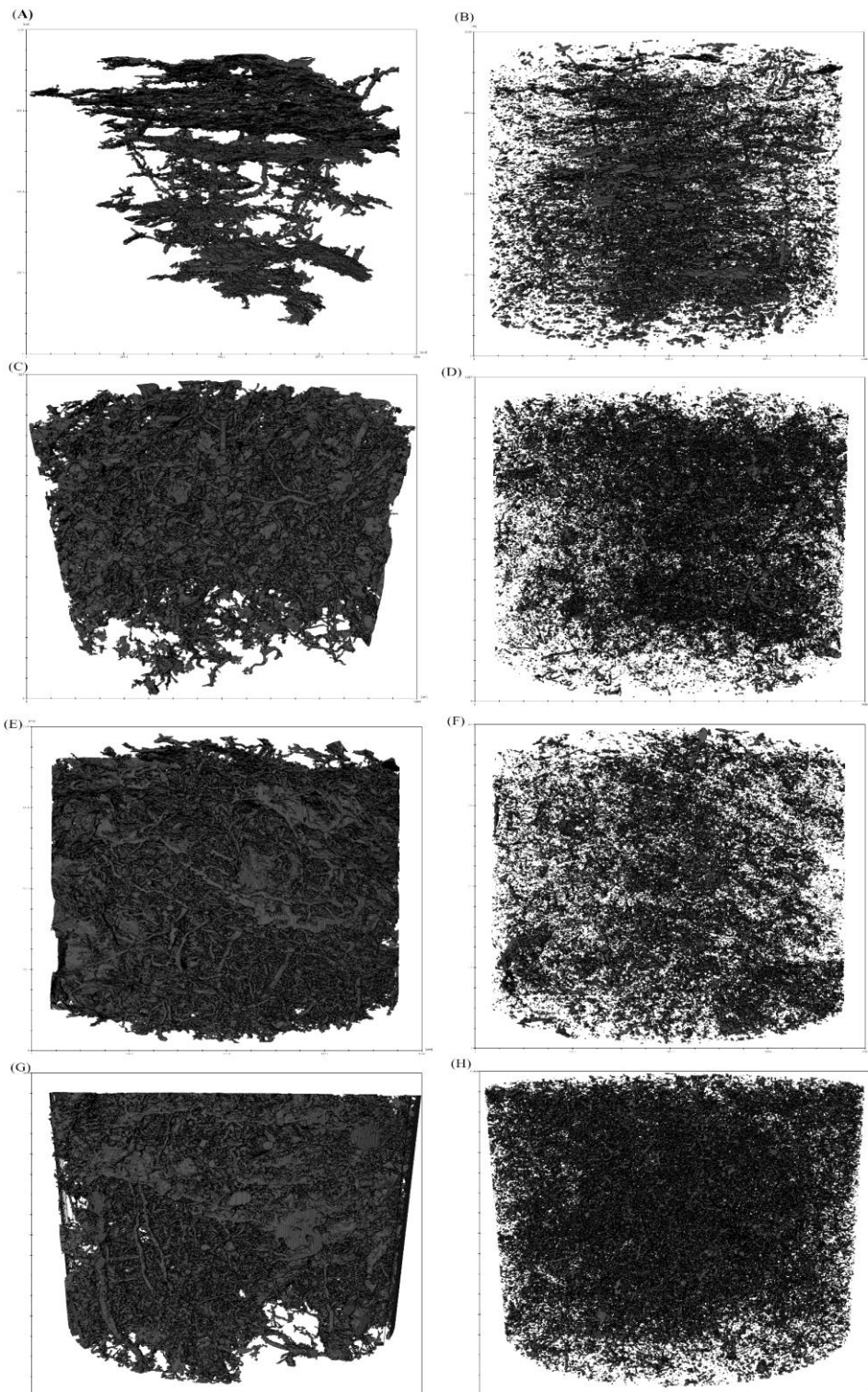
Nas figuras 21, 22, 23 e 24 (Apêndice B) está exibida a distribuição tridimensional dos poros. As cores indicam o diâmetro dos poros que foram encontrados nas amostras, com as cores mais escuras indicando poros menores e as cores claras poros com diâmetro maior. Os solos sob campo nativo têm uma rede de poros maiores e mais conectados (Figura 22 e 24, Tabela 6). Esse resultado pode estar relacionado ao efeito cisalhante do tráfego de máquinas (BERISSO et al., 2013), que acaba por romper a rede de poros. Nos Hz superficiais dos solos sob uso agrícola é possível observar uma quantidade grande de poros conectados, de diâmetro pequeno e circulares, esses poros provavelmente sejam raízes das culturas. Pois o método de segmentação empregado considerou como poros, os valores na escala de cinza que compreendiam material orgânico e vazios, pois os valores são muito próximos na escala de

cinza. Além disso, os Hz apresentam uma quantidade grande de poros isolados que não estão conectados e provavelmente não contribuem para a permeabilidade do solo.

A maior K_{sat} encontrada nos solos sob campo nativo é explicada pela organização da rede de poros (Figura 22 e 24, Apêndice B) e pela maior conectividade encontrada nesses solos (Tabela 6).

A maior variação na permeabilidade do solo ao ar no Latossolo sob campo Nativo está relacionada a estrutura do solo e distribuição do tamanho de poros (Figura 15). Pois, a existência de poros de origem biológica aumenta a continuidade e o diâmetro dos poros, que tem resultado um aumento na K_a (ZHAI e HORN, 2018). A diminuição do conteúdo de água nos solos resulta em aumento na K_a (HOLTHUSEN et al., 2018), com aumento na quantidade de poros livres de água. Nos Latossolos sob cultivos agrícolas que sofreram preparo do solo e tráfego de máquinas, a quantidade de poros isolados é maior e os poros são de menor diâmetro (Figura LVd-A e LVef-A TC), com a menos conectividade de poros (Tabela 6). Dessa forma, mesmo que o conteúdo de água diminua nesses solos, a K_a pode não aumentar pelo efeito da obstrução dos poros pela água que é retida no ponto de menor diâmetro do poro.

Figura 11 - Imagens tridimensionais dos poros conectados (A, C, E e G) e isolados (B, D, F e H) do (A,B) Latossolo Vermelho distrófico típico sob cultivos agrícola (LVd -A), (C, D) Latossolo Vermelho distrófico típico sob campo nativo (LVdf -CN), (E, F) Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico sob cultivo agrícola e (G, H) Nitossolo Vermelho eutroférico típico (NVef -CN).



Fonte: Autor.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As condições de uso do solo, campo nativo e cultivos agrícolas, permitiram estudar se há alterações na estrutura do solo sob os diferentes usos do solo. A condutividade hidráulica do solo saturado demonstrou a alteração na estrutura do solo, com diminuição de três a cinco vezes em cultivo agrícola em relação ao campo nativo.

A análise das imagens de tomografia permitiu distinguir a condição estrutural dos solos sob os diferentes usos. No campo nativo, a rede de poros está mais conectada, com maiores valores de conectividade e com poros de maior tamanho. Nos solos sob cultivo agrícola, os Hz superficiais tem predomínio de poros menores e menor conectividade. Portanto, a tomografia computadorizada de raio-X é uma aliada na detecção de alterações na estrutura do solo, permitindo explicar o comportamento de propriedades de intensidade, como a condutividade hidráulica saturada e a permeabilidade do solo ao ar.

Alteração na condição de uso do solo não resultou em alterações na permeabilidade do solo ao ar. Entretanto, a permeabilidade do solo foi sensível ao rearranjo da estrutura do solo devido à aplicação de pressões, com diminuição nos valores na menor pressão aplicada 12,5 kPa. A permeabilidade do solo ao ar não foi alterada devido ao tipo de ensaio de compressibilidade estático ou cíclico.

A pressão de pré-consolidação foi maior nos solos sob campo nativo e o índice de compressão foi maior nos horizontes superficiais do solo, indicando que as camadas superficiais dos solos são susceptíveis a compactação e que a subsuperfície já sofreu alterações devido à propagação das pressões aplicadas por tráfego de máquinas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJAYI, A. E. et al. Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils. **Soil Tillage Research**, v. 155, p. 166-175, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.007>.

ALAOUI, A. et al. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. **Soil Tillage Research**, v. 115-116, p. 1-15, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.06.002>.

AMBUS, J. V. et al. Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. **Geoderma**, v. 330, p. 232-243, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.005>.

BARRÉ, P.; HALLETT, P. D. Rheological stabilization of wet soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy. **European Journal of Soil Science.**, v. 60, p. 525-538, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01151.x>

BATES, D. et al. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, p. 1-48, 2015. doi:10.18637/jss.v067.i01.

BATISTÃO, A. C. et al. Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma**, v. 363, p. 114130, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114130>.

BATISTÃO, A. C. et al. Soil solution composition affects microstructure of tropical saline alluvial soils in semi-arid environment. **Soil Tillage Research**, v. 203, p. 104662, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104662>

BAUMGARTEN, W. et al. Structural stability of Marshland soils of the riparian zone of the Tidal Elbe River. **Soil and Tillage Research**, v. 125, p. 80-88, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.002>

BERISSO, F. E. et al. Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. **Soil Tillage Research**, v. 131, p. 36-46, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.005>.

BERISSO, F. E. et al. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. **Soil Tillage Research**, v. 122, p. 42-51, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.02.005>.

BRAGA, F. de V. A. et al. Propriedades mecânicas e permeabilidade ao ar em topossequência argissolo-gleissolo: Variação no perfil e efeito de compressão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1025-1035, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140724>.

BRAIDA, J. A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 477-485, 2008. Disponível em: <https://doi.org/doi:10.1590/S0100-06832008000200002>.

CHEN, G. et al. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil Tillage Research**, v. 136, p. 61-69, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004>.

DOUBE, M. et al. BoneJ: free and extensible bone image analysis in ImageJ. **Bone**, v. 47, p. 1076-1079, 2010. doi: 10.1016/j.bone.2010.08.023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bone.2010.08.023>

DOS SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. Ed. Rio de Janeiro, RJ. Embrapa – CNPS. 1997. 212p.

ETANA, A. et al. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. **Geoderma**, v. 192, p. 430-436, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.015>.

GHEZZEHEI, T. a.; OR, D. Rheological Properties of Wet Soils and Clays under Steady and Oscillatory Stresses. **Soil Science Society American Journal**., v. 65, p. 624, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653624x>.

GUBIANI, P. I. et al. Excel add-in to model the soil compression curve. **Journal of Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 37, p. 603-610, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n3p603-610/2017>.

GUBIANI, P. I. et al. Permeâmetro de carga decrescente associado à programa computacional para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 993-997, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300041>

GUBIANI, P. I. et al. Relationship of precompression stress with elasticity and plasticity indexes from uniaxial cyclic loading test. **Soil Tillage Research**, v. 180, p. 29-37, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.004>.

GUEDES FILHO, O. et al. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. **Geoderma**, v. 207-208, p. 99-110, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.008>.

HELLIWELL, J. R. et al. Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: A review. **European Journal of Soil Science**, v. 64, p. 279-297, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.12028>.

HOLTHUSEN, D. et al. Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses. **Geoderma**, v. 295, p. 129-141, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.034>.

HOLTHUSEN, D. et al. Flow and deformation behavior at the microscale of soils from several long-term potassium fertilization trials in Germany. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, p. 535-547, 2012b. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jpln.201100073>.

HOLTHUSEN, D. et al. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters. **Soil Tillage Research**, v. 111, p. 75-85, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.002>.

HOLTHUSEN, D. et al. Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments: II. Microscale behavior and its relation to the mesoscale. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, p. 14-23, 2012a. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jpln.201100076>.

HOLTHUSEN, D. et al. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil Tillage Research**, v. 177, p. 113-124, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.003>.

HOLTHUSEN, Dörthe; BATISTÃO, Alan Carlos; REICHERT, José Miguel. Amplitude sweep tests to comprehensively characterize soil micromechanics: brittle and elastic interparticle bonds and their interference with major soil aggregation factors organic matter and water content. **Rheologica Acta**, v. 59, n. 8, p. 545-563, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00397-020-01219-3>

HORN, Rainer. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, v. 116, p. 77-88, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00095-8).

HORN, Rainer; HOLTHUSEN, Dörthe; DÖRNER, Jens; MORDHORST, Anne; FLEIGE, Heiner. Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? **Soil Tillage Research**, v. 195, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104388>.

HORN, Rainer; KUTILEK, Miroslav. The intensity-capacity concept—how far is it possible to predict intensity values with capacity parameters. **Soil Tillage Research**, v. 103, p. 1-3, 2009.

KELLER, Thomas et al. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil Tillage Research**, v. 194, p. 104293, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>.

KREISELMEIER, Janis et al. Quantification of soil pore dynamics during a winter wheat cropping cycle under different tillage regimes. **Soil Tillage Research**, v. 192, p. 222-232, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.014>.

KRÜMMELBEIN, Julia; PETH, Stephan; HORN, Rainer. Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. **Soil Tillage Research**, v. 99, p. 139-148, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.008>.

KUNCORO, Praptiningsih Hadi; KOGA, Keisuke; SATTA, Naoya; MUTO, Yasushi. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. **Soil Tillage Research**, v. 143, p. 172-179, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.006>.

Le Bayon, R.C. et al. Use of X-ray microcomputed tomography for characterizing earthworm-derived belowground soil aggregates. **European Journal of Soil Science**, v. 72, p. 113-1127, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.12950>.

Lucas, M. et al. Revealing pore connectivity across scales and resolutions with X-ray CT. **European Journal of Soil Science**, v. 72, p. 516-560, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.12961>.

Luo, L. et al. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography. **Journal of Hydrology**, v. 393, p. 53-64, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.031>.

Marcolin, C. D.; Klein, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 349-354, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.6120>.

Markgraf, W. **Microstructural Changes in Soils Rheological Investigations In Soil Mechanics**. Kiel: Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2006. 167 p.

Markgraf, W.; Horn, R. Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Scan Analyses and Rheological Investigations of South-Brazilian Soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 71, p. 851-859, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0231>.

Markgraf, W.; Horn, R.; Peth, S. An approach to rheometry in soil mechanics-Structural changes in bentonite, clayey and silty soils. **Soil Tillage Research**, v. 91, p. 1-14, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.007>.

Markgraf, W.; Moreno, F.; Horn, R. Quantification of Microstructural Changes in Salorthidic Fluvaquents Using Rheological and Particle Charge Techniques. **Vadose Zone Journal**, v. 11, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/vzj2011.0061>.

Markgraf, W.; Watts, C.W.; Whalley, W.R.; Hrkac, T.; Horn, R. Influence of organic matter on rheological properties of soil. **Applied Clay Science**, v. 64, p. 25-33, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.009>.

Mooney, S.J.; Pridmore, T.P.; Helliwell, J.; Bennett, M.J. Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil. **Plant and Soil**, v. 352, p. 1-22, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1039-9>.

Moraes, M.T. et al. Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil Tillage Research**, v. 170, p. 27-37, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.03.002>.

Mossadeghi-Björklund, M. et al. Effects of subsoil compaction on hydraulic properties and preferential flow in a Swedish clay soil. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p. 91-98, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.013>

Obour, P.B. et al. Subsoil compaction assessed by visual evaluation and laboratory methods. **Soil Tillage Research**, v. 173, p. 4-14, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.015>.

Pértile, P. **Propriedades mecânicas em micro e mesoescala de solos do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2015. 164p.

Pértile, P. et al. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities. **Scientia Agricola**, v. 75, p. 154-162, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0267>.

Pértile, P. et al. Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-14, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150286>.

Piccoli, I. et al. Coupling gas transport measurements and X-ray tomography scans for multiscale analysis in silty soils. **Geoderma**, v. 338, p. 576-584, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.029>.

Pulido-Moncada, M. et al. Wheel load, repeated wheeling, and traction effects on subsoil compaction in northern Europe. **Soil Tillage Research**, v. 186, p. 300-309, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.005>.

Qiao, J. et al. Estimating the spatial relationships between soil hydraulic properties and soil physical properties in the critical zone (0-100 m) on the Loess Plateau, China: A state-space modeling approach. **Catena**, v. 160, p. 385-393, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.006>.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

Reichert, J.M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil Tillage Research**, v. 158, p. 123-136, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.11.010>.

Reinert, D.J., Reichert, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo-protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1931-1935, 2006.

Rücknagel, J. et al. Uniaxial compression behaviour and soil physical quality of topsoils under conventional and conservation tillage. **Geoderma**, v. 286, p. 1-7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.015>.

Safadoust, A. et al. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. **Agricultural Water Management**, v. 136, p. 34-41, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.007>.

Schindelin, J. et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. **Nature Methods**, v. 9, p. 676-682, 2012.

Schwärzel, K. et al. Soil hydraulic properties of recently tilled soil under cropping rotation compared with two-year pasture. **Vadose Zone Journal**, v. 10, n. 1, p. 354-366, 2011.

Tang, A. M. et al. A study on the air permeability as affected by compression of three French soils. **Geoderma**, v. 162, n. 1-2, p. 171-181, 2011.

Tseng, C. L., Alves, M. C., Crestana, S., 2018. Quantifying physical and structural soil properties using X-ray microtomography. **Geoderma**, v. 318, p. 78-87, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.042>.

Vogel, H.-J. Topological Characterization of Porous Media. **Morphology of Condensed Matter**, 2002, p. 75-92. Disponível em: https://doi.org/10.1007/3-540-45782-8_3.

Vogel, H. J., Weller, U., Schluter, S., 2010. Quantification of soil structure based on Minkowski functions. **Computers & Geosciences**, v. 36, p. 1236-1245, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.03.007>.

Wolski, M. S. **Modelagem do terreno e mapeamento digital de solos por extrapolação das relações solo-paisagem**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, 2016. 255p.

Zhai, X., Horn, R., 2018. Effect of static and cyclic loading including spatial variation caused by vertical holes on changes in soil aeration. **Soil Tillage Research**, v. 177, p. 61-67, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.008>.

APÊNDICE A

Escaneamento de amostras

As imagens de tomografia foram obtidas por meio do Tomógrafo micrométrico Nikon, modelo XT H 225 ST, com energia máxima de 225 KV e com painel detector de 2000 X 2000 pixels. Os parâmetros específicos utilizados na aquisição das imagens estão na seção Material e Métodos, como energia (KV), potência (W), tempo de exposição (ms) e número de projeções. Neste apêndice descreveremos como foram definidos esses parâmetros e outros detalhes importantes na aquisição das imagens, é importante ressaltar que o este fluxo de aquisição de imagens é válido no equipamento acima descrito

O equipamento estando ligado e autocondicionado por alguns minutos podemos iniciar a aquisição das imagens. O autocondicionamento é um processo no qual o programa de controle vai aumentando gradativamente a energia (KV) aplicada na “gun” (fonte) de raios-X até atingir o máximo do equipamento ou um nível de energia solicitado pelo usuário (e. g. 200 KV). A energia aumenta em rampa (por exemplo, estabiliza a energia por alguns segundos em 10 KV e aumenta para 15 KV). Se o equipamento permaneceu desligado ou sem realizar escaneamentos por um longo período, esse processo pode demorar para ser finalizado.

O primeiro passo para realizar o escaneamento de volumes 3D é acessar a Aba/Janela no programa Inspect-X chamada de “CT”. O processo de aquisição das imagens consiste em escanear as amostras com incidência dos raios-X, enquanto a amostra é rotacionada em 360°. Para iniciar o processo de configuração do escaneamento é necessário clicar em “New Circular CT Scan” (12), ao clicar, a janela apresentará cinco abas e iniciará na aba “Position and Optimize” (Figura 13). Nessa aba ajusta-se a posição da amostra e os parâmetros do escaneamento conforme as Figuras 13 e 14.

Figura 42 - Aba CT com New Circular CT Scan assinalado.

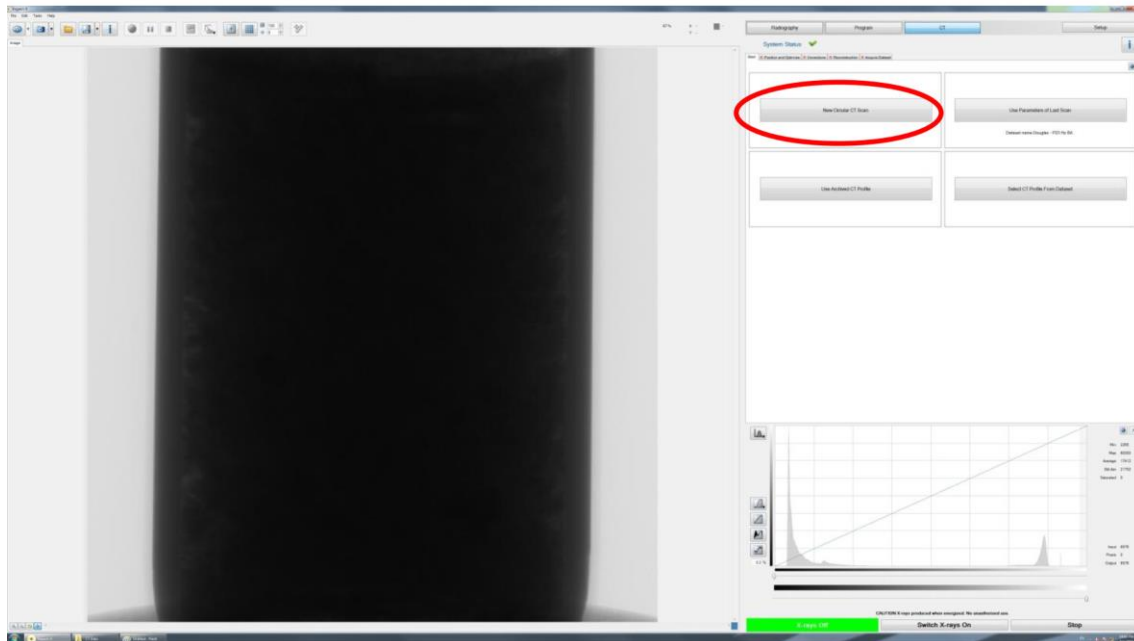


Figura 13 - Aba "Position and Optimize" onde ajustaremos os parâmetros de posição da amostra e do escaneamento para obtenção das imagens.

- Na aba "Position and Optimize", iremos alterar os parâmetros buscando um ajuste dos valores de cinza no histograma entre 10000-60000.


Aqui ajustamos a posição da amostra e também se a amostra precisar ser subdividida em múltiplos escaneamentos. Travar o Eixo X e Tilt.

Alteramos estes parâmetros para obter o ajuste adequado

Buscar ajuste adequado dos valores mínimo próximo de 10000 e máximo abaixo de 60000.

Figura 14 - Detalhe das opções de "Optimise Image". São os parâmetros de ajuste, além desses, podemos utilizar um filtro físico (placa de cobre) que é inserida entre a fonte emissora e a amostra. Quando maior a espessura da placa, maior é a atenuação (filtragem), isto é, os raios-X de baixa energia não incidem mais na amostra. A utilização do filtro físico é muito útil quando é utilizado alta energia no escaneamento, reduzindo os valores na escala do cinza.

Optimise Image – ajuste de parâmetros



The screenshot shows the 'Optimise Image' interface with the following parameters and controls:

- Beam energy:** Actual 0, Requested 160 kV
- Beam current:** Actual 0, Requested 300 uA
- Power:** Actual 0.0, Requested 48.0 W
- Imaging preset:** A dropdown menu.
- Exposure:** A slider with values 1.00 fps and 1.00 s.
- Gain:** A slider with a value of 24.0 dB.
- Safe focus:** A checked checkbox and a slider.

Parâmetros que podem ser alterados para obter os valores adequados no histograma da escala de cinza - mínimo (~10000) e máximo (60000) no histograma:

- Beam energy:
- Beam current:
- Power:
- Exposure:
- Gain:

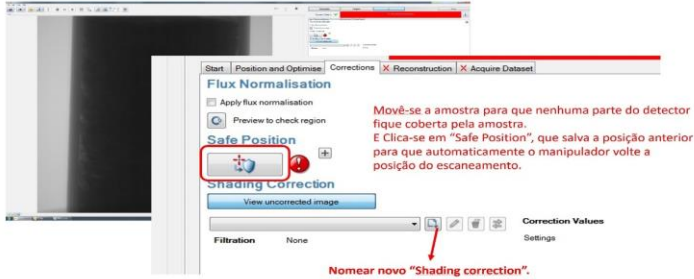
Após definida a posição da amostra e os parâmetros de escaneamento, clicamos na aba "Shading correction". Nessa aba é realizada a correção da sensibilidade do detector em relação aos parâmetros definidos para realizar o escaneamento. O Shading correction, devido a configuração do equipamento e do programa, precisa ser atualizado diariamente ou até mais de uma vez durante o dia, se forem realizados vários escaneamentos. Na figura 14 podemos visualizar as configurações necessárias e todos os passos que envolvem a realização do Shading correction.

A próxima aba é "Reconstruction", onde são definidos os parâmetros de reconstrução do volume 3D a partir das imagens 2D capturadas no processo de escaneamento. Se escanear uma amostra e conheceres os parâmetros adequados de reconstrução podes seleccionar, que ao final do escaneamento será realizada a reconstrução. Usualmente, os parâmetros de reconstrução alteram juntamente com a alteração nos parâmetros de escaneamento e com o tempo de utilização do filamento de tungstênio, pois em filamentos com muitas horas de uso, há uma redução na intensidade do feixe. Quando o filamento não permite a aquisição de imagens com contraste suficiente, é necessário fazer a troca. Além disso, a utilização do

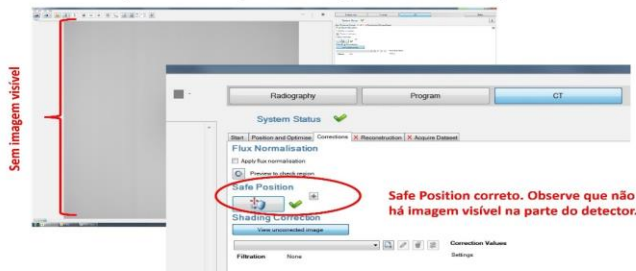
programa CT Pro 3D, permite reconstruir com as diferentes opções de cada parâmetro e visualizar o resultado instantaneamente.

Figura 15 - Processo de realização do Shading correction.

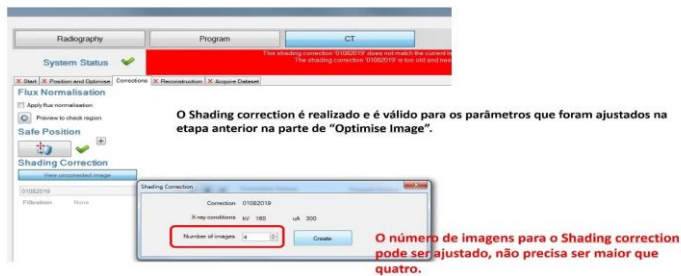
Aba Shading correction – correção necessária antes de cada escaneamento



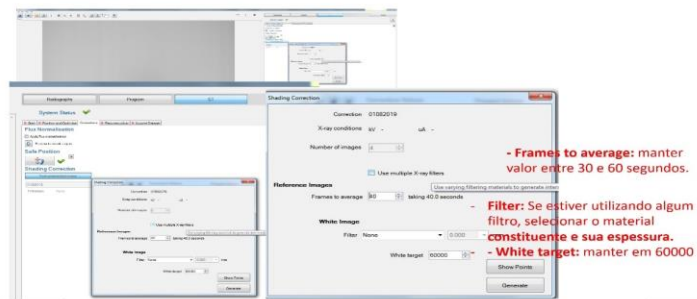
Safe position (Shading correction)



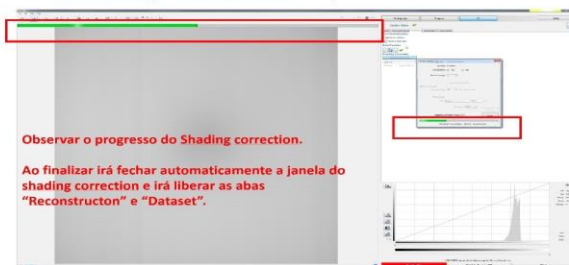
Shading correction - parâmetros



Shading correction - parâmetros



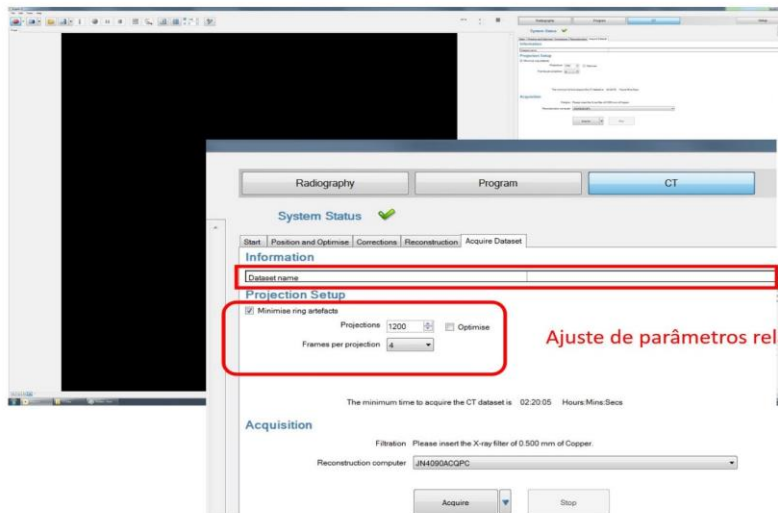
Shading correction - processamento



Na aba “Acquisition” são fornecidos os últimos parâmetros do escaneamento (Figura 16), como o número de projeções, o qual determina o ângulo de avanço na rotação entre a primeira projeção, segunda e assim por diante, por exemplo, se determinarmos um número de 1200 projeções para aquisição da amostra, teremos um ângulo de rotação entre as projeções de $0,30^\circ$ (360° dividido por 1200). O número de projeções determina o tamanho do conjunto de dados (quanto mais projeções, maior o tamanho em GB) e a qualidade das imagens após reconstrução, de modo geral, um número maior de projeções reduz o ruído nas projeções. Nessa aba é indicado o número de frames (imagens que serão adquiridas para compor uma projeção), quando maior o número de frames, menor o ruído das imagens. Além disso, é possível optar por utilizar a opção “minimise ring artifacts”, que interrompe a rotação da amostra para fazer a aquisição das imagens. Essa opção quando desmarcada faz a aquisição das imagens sob rotação constante da amostra (objeto a ser escaneado) e nessa aba é indicado o nome do conjunto de dados.

Figura 16 - Aba "Acquisition" do programa Inspect-X. Após concluída o ajuste dos parâmetros, clicar em "Acquire" para iniciar o escaneamento.

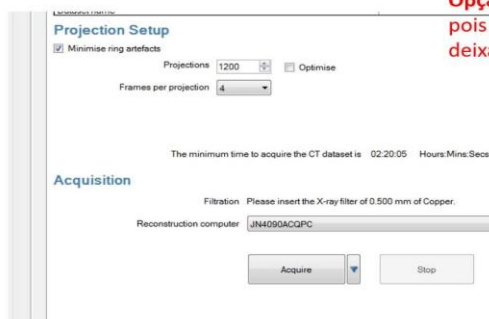
(A) Aba Dataset



Inserir o nome da amostra

Ajuste de parâmetros relacionados com o escaneamento.

(B) Aba Dataset – Projection setup



Opção Minimise ring artefacts: Faz com que o escaneamento seja mais longo, pois a amostra para de rotacionar para aquisição das imagens. Recomendável deixar essa opção sempre marcada.

Projections: Permite ajustar o número de imagens do qual será constituído o escaneamento. Indica também o ângulo de avanço entre uma imagem e a seguinte: Exemplo: $360^\circ / 1200$ projeções = $0,3^\circ$ de avanço. Um número muito grande, fará com que o escaneamento seja muito longo. Ao marcar a opção "Optimise" o programa inserirá o máximo número de projeções possíveis, sendo esse o menor ângulo de avanço possível entre as projeções.

Frames per projection: Número de imagens que serão adquiridas para constituir uma projeção. Quando maior o valor, maior provavelmente será a qualidade das imagens. Mas também será o tempo para adquiri-las.

Acquisition: Permite selecionar o computador no qual serão salvas as imagens: JN4090ACQPC – Computador do tomógrafo e RECONPC é o computador de reconstituição.

Quando o ajustes dos parâmetros estiver concluído, basta clicar em Acquire. Se a amostra conter mais de um escaneamento – opção Tall samples – o botão mostrará Add to program/batch.

Na configuração dos parâmetros do escaneamento é necessário levar em consideração:

- (i) a energia e a voltagem aplicadas, quando excessivas reduzem a vida útil do filamento ou quando muito baixas resultam em imagens com baixo contraste e sem a penetração necessária na amostra;
- (ii) o tempo de exposição de cada frame, quando muito longo aumenta o tempo de escaneamento ou quando muito curto, aumenta a presença de ruído (noise) e impacta no nível de contraste das imagens;
- (iii) utilização do filtro físico, pode aumentar o contraste, pois permite a incidência de raio-X de maior energia na amostra, porém aumenta a ocorrência de ruídos na imagens e
- (iv) o número de projeções e frames quando elevado aumenta o tempo de aquisição das imagens. Assim é necessário buscar um balanço entre os parâmetros que permita a obtenção de imagens de alta qualidade em um período plausível.

Na configuração atual do tomógrafo e conforme o tipo de escaneamento ("CT Circular") de serem realizados, a resolução das imagens obtidas depende do tamanho da amostra, pois é

necessário que toda a amostra esteja visível horizontalmente no detector, para assim possibilita a reconstrução do volume 3D. A resolução obtida em amostras com diâmetro de 100 mm é de 60 μm (0,060 mm), enquanto em amostras com diâmetro de 50 mm obtemos uma resolução de 35 μm . Amostras com altura maior do que o detector não é impeditivo para obter a máxima resolução possível, pois podemos adquirir dois conjuntos de imagens e posteriormente a reconstrução fazer a união (“merge”) dos volumes, por exemplo, amostra de 100 mm de diâmetro e altura de 200 mm, para obtermos a máxima resolução de 60 μm , somente será visível no detector, em torno, de 100 mm de altura, logo se quisermos obter os 200 mm de altura, a resolução final seria de aproximadamente 120 μm . A solução para obtermos 60 μm de resolução é fazer o escaneamento da amostra em duas porções, com sobreposição na porção central, e posteriormente a reconstrução fazer a união das duas porções, obtendo assim um volume de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura com resolução de 60 μm .

Reconstrução dos volumes 3D

A reconstrução dos volumes 3D das imagens é realizada com o programa CT Pro 3D da Nikon Metrology, de forma interativa. O programa Inspect-X que controla a aquisição das imagens gera um conjunto de arquivos: (i) formato .TIF, cada projeção é representada por uma imagem; (ii) arquivos .XML, informações relacionadas aos parâmetros utilizados para aquisição, dia e horário; (iii) arquivo .ANG, essencial para o programa CT Pro 3D encontrar o início e final da aquisição e (iv) arquivo .XTEKCT, formato nativo aberto pelo CT Pro 3D. Assim, duplo clique nesse último arquivo abre o programa e carrega as informações necessárias para a reconstrução.

Ao abrir o programa haverá várias abas, no decorrer da reconstrução navegarás entre as abas para fazer a reconstrução. Na primeira aba “Image” somente é necessário checar que a primeira e última projeções adquiridas estão alinhadas (Figura 17), selecionando “Projection Image” e “Extra projection image” (assinaladas em vermelho), podes alternar utilizando as flechas esquerda e direita do teclado. Se houver muita alteração na posição das projeções é um indicativo de que a amostra pode ter se movimentado durante o escaneamento e que a reconstrução não seja possível.

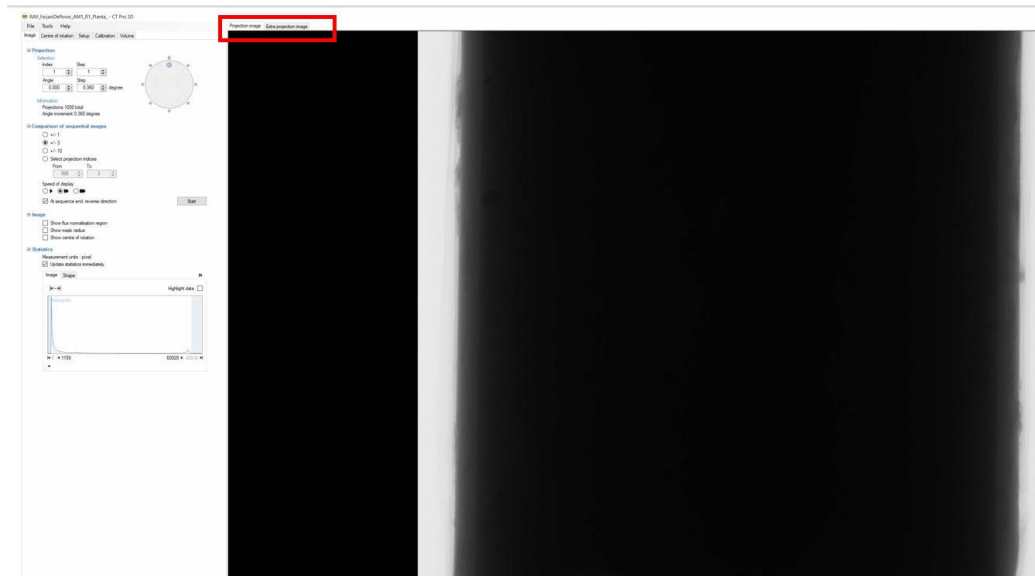
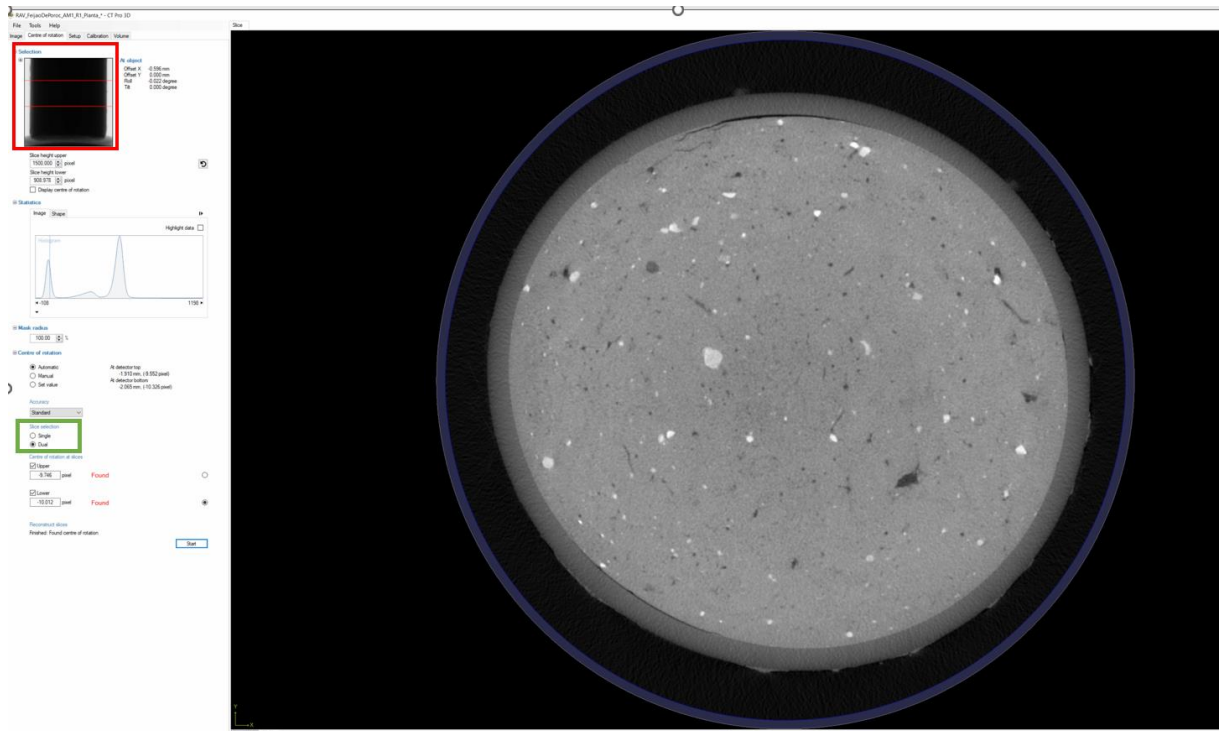


Figura 17 - Aba "Image" do Programa de reconstrução CT Pro 3D.

Ao checar as projeções e estar tudo certo, seguirás para a próxima aba “Centre of rotation” que fará o alinhamento das projeções e caso haja desvios corrigíveis fará esse ajuste. A figura 18 mostra que é possível selecionar uma ou duas posições (assinalado em verde) para encontrar o centro de rotação das imagens e fazer o alinhamento. Além disso, podes ajustar a posição na qual o programa se baseará para fazer os ajustes, clicando e movendo as barras em vermelho (assinalado em vermelho). Após encontrar o centro de rotação (aparecerá “Found” sob “Centre of rotation at slices”), clicar na aba “Setup”, contudo se não for possível encontrar o centro de rotação, não é possível continuar com a reconstrução e será necessário fazer novo escaneamento da amostra.

Figura 18 -5 Aba "Centre of rotation" do programa de reconstrução.



A aba “Setup” apresenta a maior parte das opções do processo de reconstrução (Figura 19), consistindo na aplicação de vários filtros para correção de efeitos inerentes ao processo de aquisição de imagens por tomografia. Os filtros disponíveis são:

- flecha alaranjada: “Interpolation” há duas opções com e sem interpolação. Na opção com interpolação são utilizados os pixels vizinhos para determinar os valores na escala de cinza do pixel, enquanto sem interpolação, o valor não é alterado em relação ao gerado no escaneamento;

- flecha verde: filtro do efeito de endurecimento do feixe (“Beam hardening”), o filtro objetiva corrigir a atenuação que o feixe de raios-X sofre ao penetrar a amostra, em especial, os raios-X de baixa energia são mais rapidamente atenuados do que os de alta energia, e assim a quantidade de fótons no detector não é linear a espessura da amostra. Na figura 25A podemos observar que o exterior da amostra é mais claro que o centro, demonstrando o efeito de endurecimento do feixe, enquanto na Figura 25B, o filtro foi aplicado e não há mais essa diferença.

- flecha azul: filtro de redução de ruído (“Noise reduction”), filtros que atuam reduzindo os ruído presente nas imagens. O ideal é o escaneamento resultar na menor quantidade possível de ruído, por meio do aumento da relação sinal/ruído que é obtida com maior número de projeções.

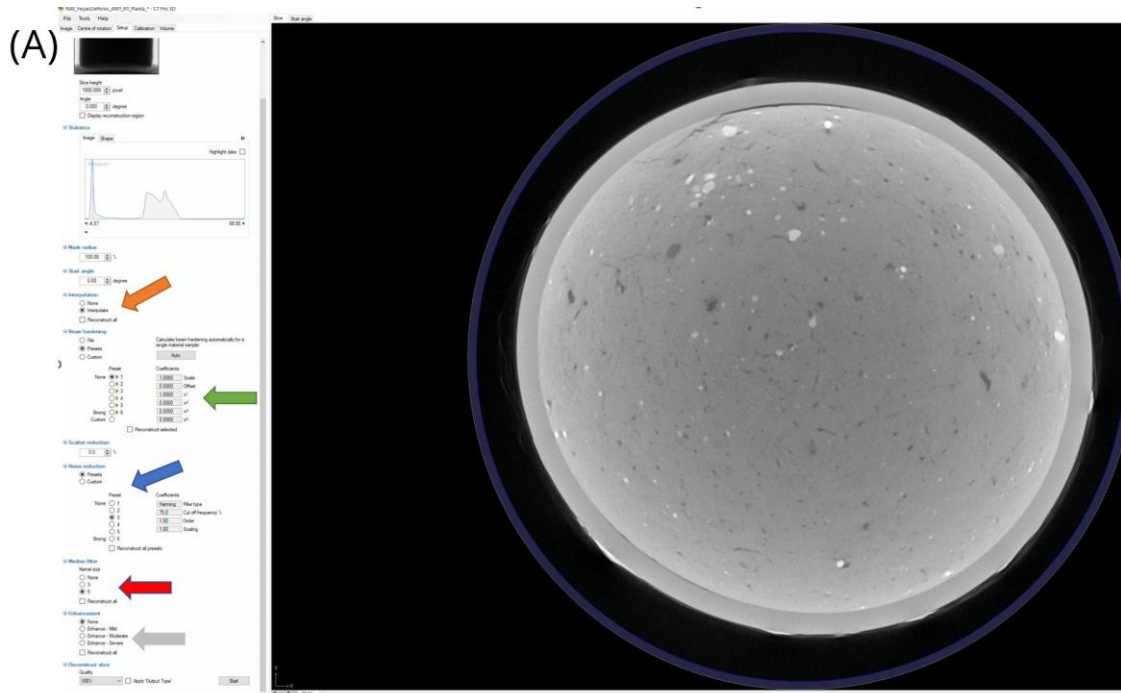
- flecha vermelha: filtro mediano (“Median filter”) atua reduzindo o ruído das imagens, substitui o valor de cada pixel pela mediana dos valores dos pixels vizinhos. No filtro há três opções: sem, 3 e 5, sendo que os números indicam o número de pixels vizinhos que são utilizados pelo filtro no cálculo.

- flecha cinza: filtro de realce (“Enhancement”) aprimora as características de uma imagem, borda ou detalhes. Em geral, o filtro de realce precisa ser utilizado com cuidado, pois pode introduzir ruído nas imagens.

Os filtros possuem diferentes níveis, podemos selecionar “Reconstruct all” e clicar em “Start”, esse procedimento é feito um filtro por vez, ele fará a reconstrução e fornecerá uma prévia do resultado do filtro, sendo possível escolher visualmente o melhor resultado do filtro aplicado e seguir para o próximo. Após concluído a aplicação dos filtros disponíveis na aba “Setup”, poderás seguir para a aba “Volume”.

Na aba volume são indicados o tamanho do volume e o formato de exportação do volume reconstruído (Figura 20), que podem ser .VGL (gera um arquivo que pode ser aberto no programa Volume Graphics), no qual as imagens podem apresentar os valores (bits) salvos em ponto flutuante, 16 bit (escala de cinza do 0 ao 65536) ou 8 bit (escala de cinza do 0 ao 256) ou em .TIFF 16 bit (a opção simple), gera um volume a partir do empilhamento de fatias (slices).

Figura 19 -6. Aba "Setup" com as flechas indicando os filtros disponíveis para reconstrução, observe na prévia da amostra a presença do efeito de endurecimento do feixe (A) e prévia da amostra com aplicação do filtro de endurecimento do feixe (B).



(B)

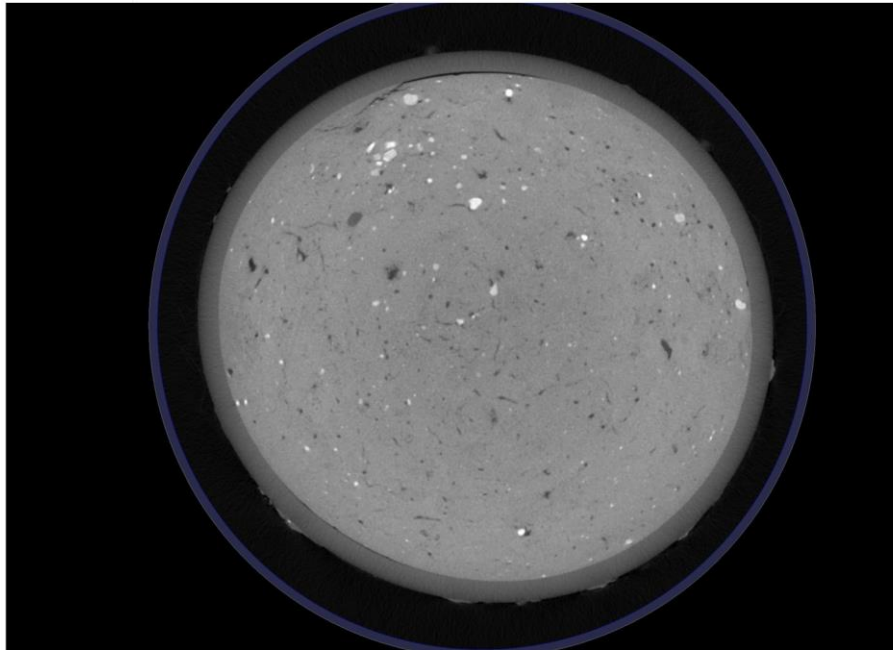
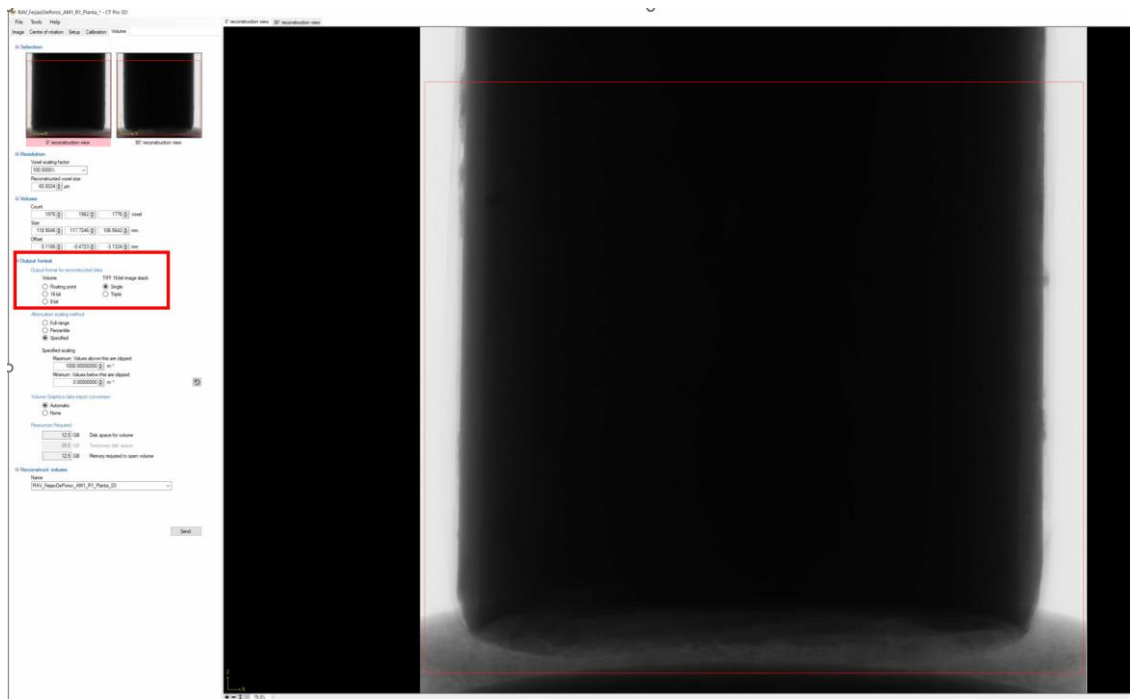


Figura 20 -7. Aba Volume do programa de reconstrução.



Etapas do processamento das imagens – ImageJ/Fiji

- 1- File -> Import -> Image Sequence
- 2 – Image -> Adjust -> Threshold: Definir limite entre Background e Foreground
- 3 – Edit -> Selection -> Specify: Permite especificar tamanho a ser processado
- 4 - Importante salvar após essa etapa para tal: File -> Save as -> Image sequence
- 5 – Edit -> Clear Outside: Remover tudo que não foi selecionado no passo anterior
- 6 – Edit -> Invert: Inverter as cores da imagem: Salvar as imagens conforme passo 4.
- 6.1 – Fechar as imagens e importar as imagens invertidas do passo 6.
- 6.2 – Fazer a inversão (Edit -> Invert), não deve haver seleção (circulo ou quadrado amarelo). Os poros devem ficar pretos (background) e o restante branco (foreground).

Distribuição do tamanho de poros

Os poros devem estar em preto e os sólidos em branco. Nesta situação, na versão do BoneJ 2, deve ser escolhido a opção de analisar o “Trabecular spacing” e marcar as opções “Show thickness Maps” e “Mask thickness maps”.

Após a análise esta concluída pode-se gerar o histograma da imagem ou do conjunto de imagens (Ctrl+H ou Analyze -> Histogram). Podemos alterar o número de classes (Bins). Importante: Se o objetivo for analisar o stack de imagens, marcar a opção Stack histogram.

Será computado o histograma conforme solicitado, podemos visualizar diferentes informações como a média, desvio padrão, Moda, etc. Abaixo do histograma aparecem três botões: List = Abre uma nova janela com os valores de Bins, Bin start e count; Copy = Cópia para área de transferência as colunas Bin start e count, Log = adiciona a contagem na escala logarítmica.

Dimensão Fractal (DF)

O módulo Dimensão Fractal (“Fractal Dimension”) é utilizado para caracterizar a complexidade da estrutura porosa do solo, quando aplicado em uma imagem 3D, a DF indica a irregularidade de uma superfície. Em amostras segmentadas, essa superfície é a parede dos poros (Ferreira, 2018), assim quando mais irregular a superfície, maior a dimensão fractal (próxima de 3).

Grau de anisotropia (“Degree of anisotropy”) – plugin BoneJ

Plugin gera linhas no stack de imagens que são amostradas e geram pontos onde ocorre mudança do background (preto) para foreground (branco), i. e. onde a linha entra em um objeto. Há recomendação de rodar o algoritmo várias vezes na mesma amostra, para obter uma média da resposta. Isso é necessário por causa que o algoritmo é estocástico e não garante resultados exatos.

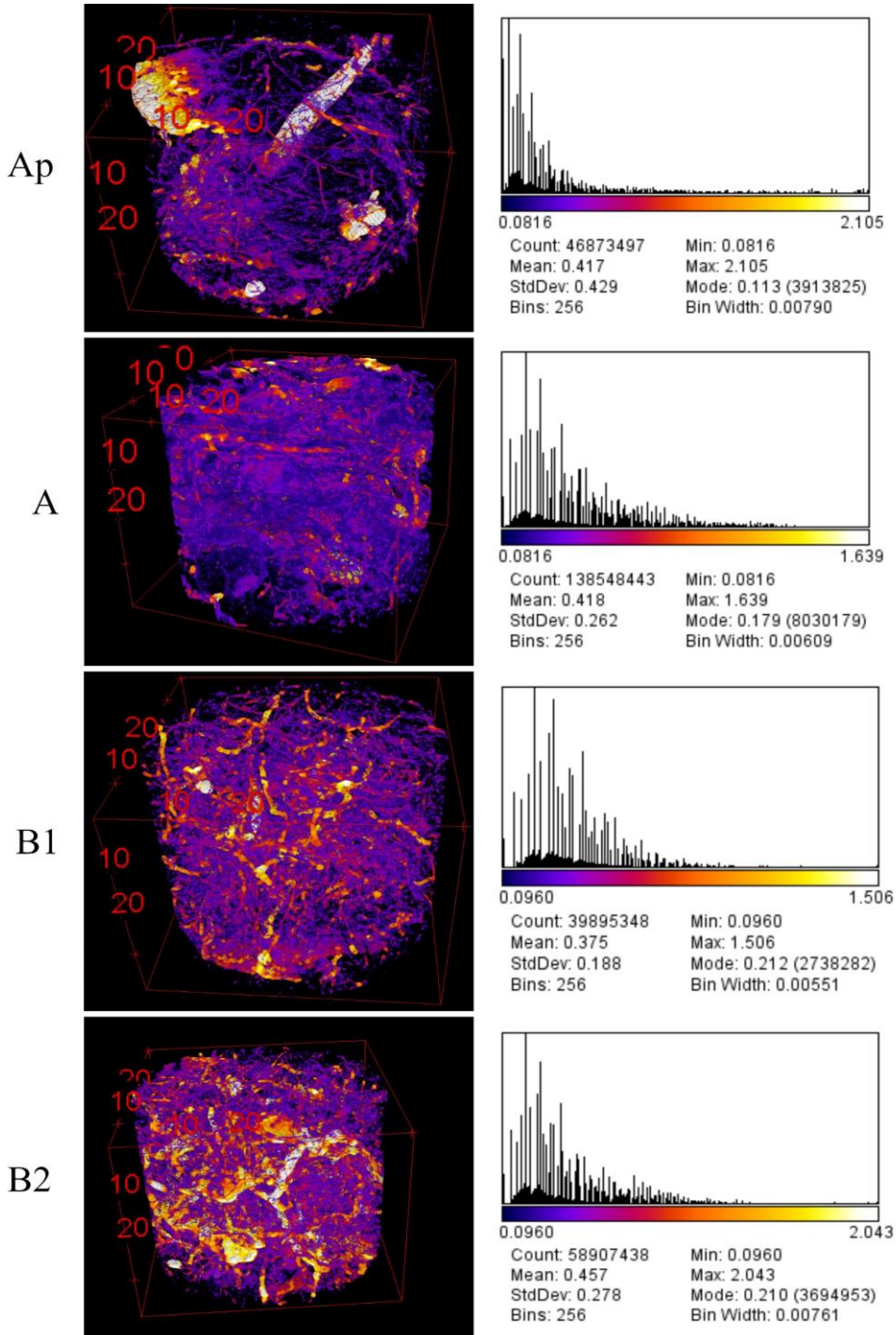
Os parâmetros são:

- *Directions* – número de amostragens de diferentes direções, mínimo é 9 (número de vezes que o algoritmo precisa para solucionar o “formato” da orientação);
- *Lines per Direction* – número de linhas paralelas em cada direção;
- *Sampling increment* – distância entre pontos de amostragem em uma linha, sendo que o comprimento do segmento da linha define a quantidade;
- *Show radii* – se marcado, exibe o raio do elipsóide na tabela de resultados;
- *Show Eigens* – se marcado, autovetores e autovalores dos elipsóides são exibidos;

O resultado gerado indica quanta orientação há na estrutura. O valor Zero indica que é uma estrutura isotrópica, enquanto o valor um significa que há uma orientação predominante na estrutura.

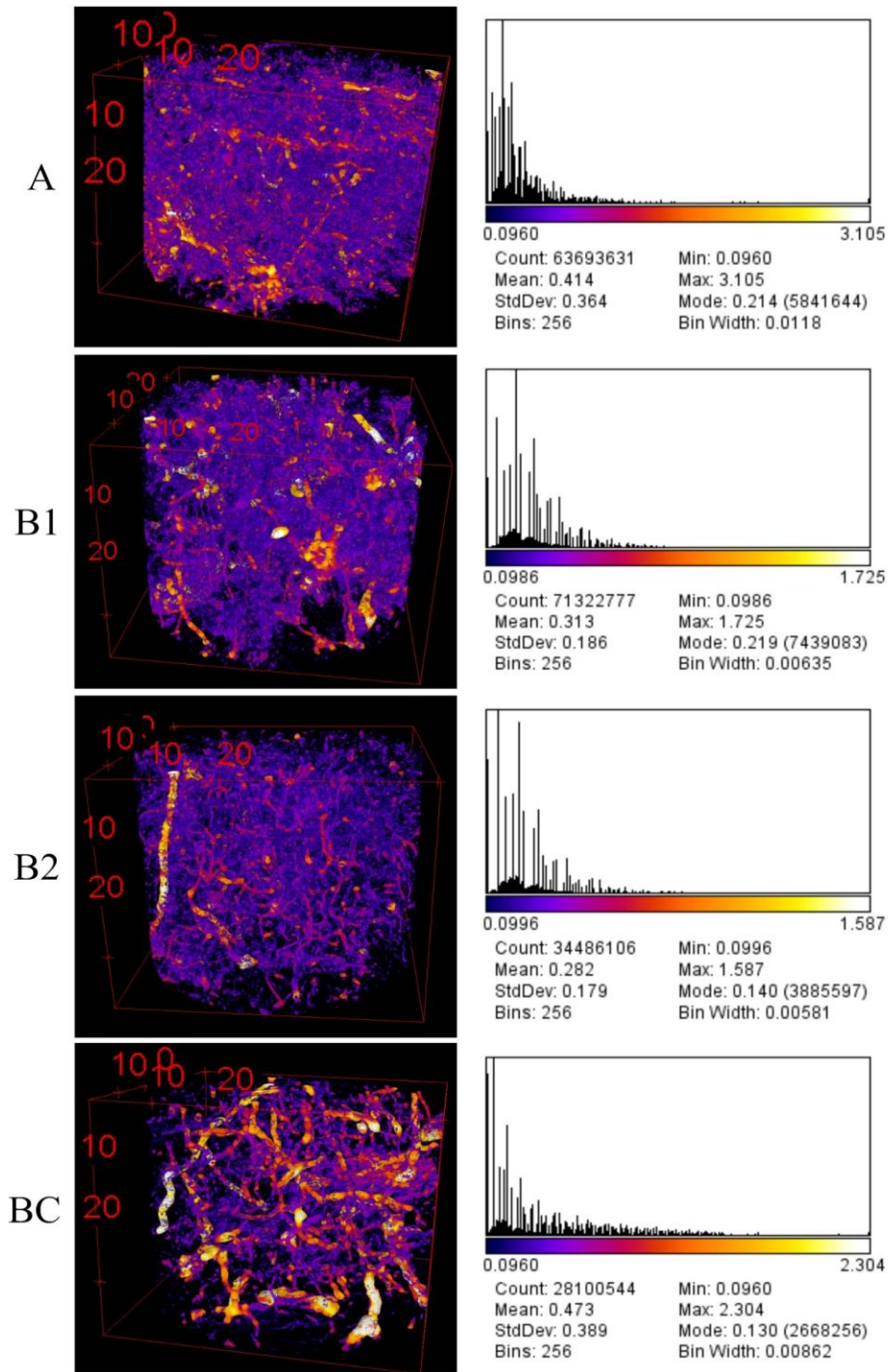
APÊNDICE B – IMAGENS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE POROS

Figura 28 - Distribuição do tamanho de poros no Nitossolo Vermelho Eutroférico latossólico sob cultivos agrícolas. Na coluna da esquerda, representação em 3D dos poros e na direita, histograma com as dimensões dos poros em mm e sua respectiva escala de cores.



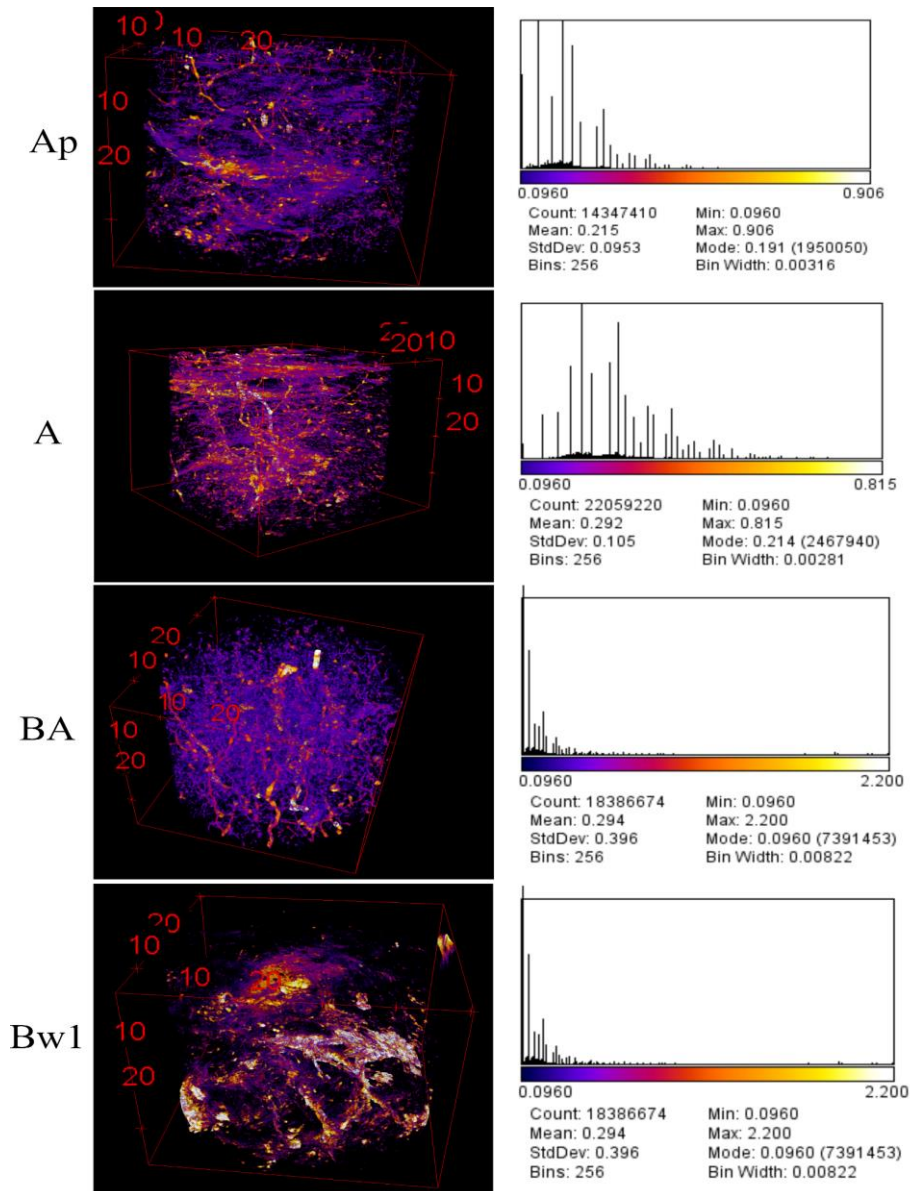
No histograma, as barras indicam a contagem de voxels (Count), Bins é a quantidade de classes, Bin Width é o intervalo representado por cada classe em mm. Fonte: Autor.

Figura 22 - Distribuição do tamanho de poros no Nitossolo Vermelho Eutroférico latossólico sob Campo Nativo. Na coluna da esquerda, representação em 3D dos poros e na direita, histograma com as dimensões dos poros, em mm, e sua respectiva escala de cores.



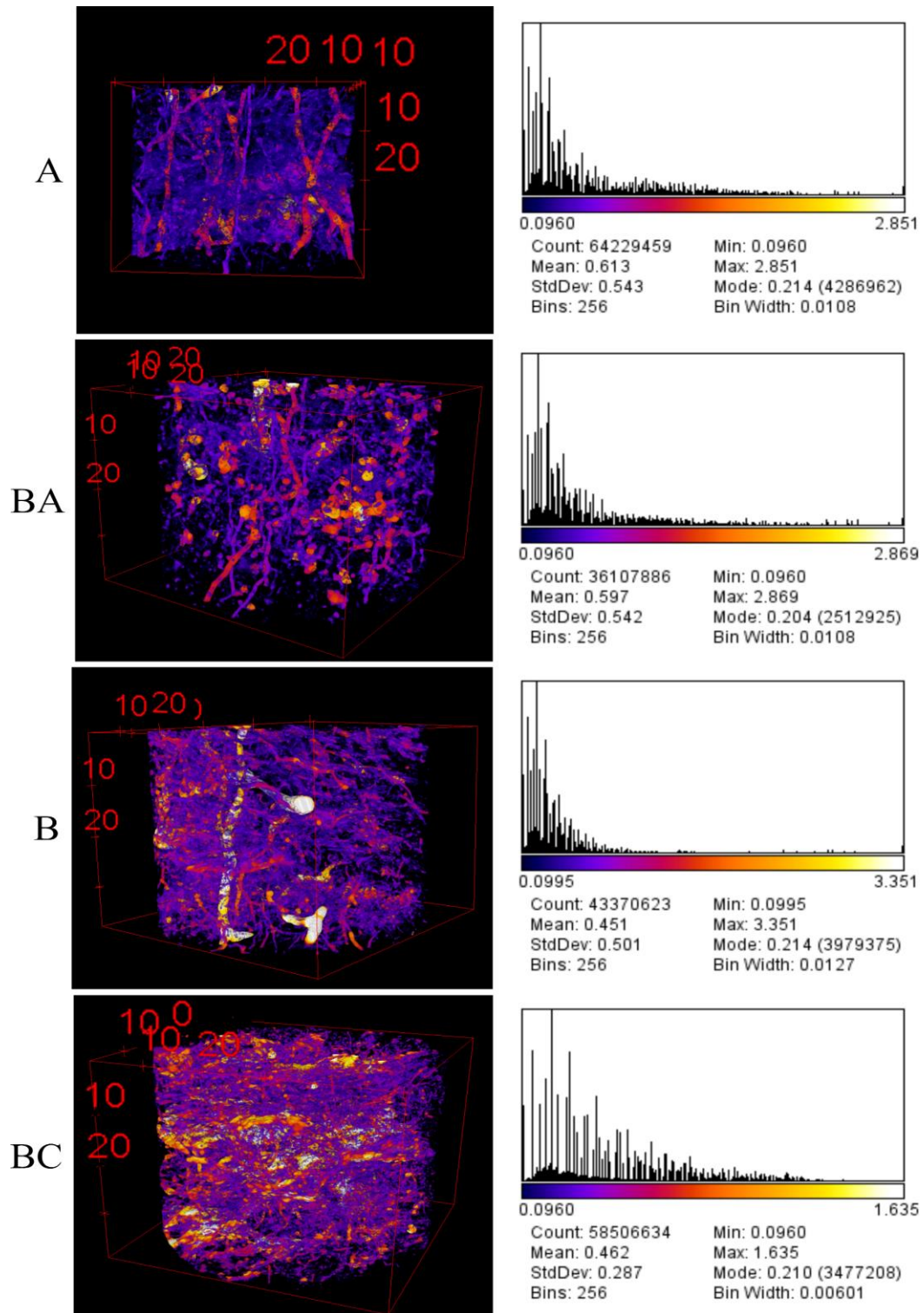
No histograma, as barras indicam a contagem de voxels (Count), Bins é a quantidade de classes, Bin Width é o intervalo representado por cada classe em mm. Fonte: Autor.

Figura 23 - Distribuição do tamanho de poros no Latossolo Vermelho Distrófico típico sob cultivos agrícolas. Na coluna da esquerda, representação em 3D dos poros e na direita, histograma com as dimensões dos poros, em mm, e sua respectiva escala de cores.



No histograma, as barras indicam a contagem de voxels (Count), Bins é a quantidade de classes, Bin Width é o intervalo representado por cada classe em mm. Fonte: Autor.

Figura 24 - Distribuição do tamanho de poros no Latossolo Vermelho Distroférico típico sob Campo Nativo. Na coluna da esquerda, representação em 3D dos poros e na direita, histograma com as dimensões dos poros, em mm, e sua respectiva escala de cores.



No histograma, as barras indicam a contagem de voxels (Count), Bins é a quantidade de classes, Bin Width é o intervalo representado por cada classe em mm. Fonte: Autor.