

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

Jordano Vaz Ambus

**ESTRUTURA DE UM PLANOSSOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM TERRAS BAIXAS**

Santa Maria, RS, Brasil
2020

PPGCS/UFSM, RS

AMBUS, Jordano Vaz

Doutor 2020

Jordano Vaz Ambus

**ESTRUTURA DE UM PLANOSSOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO
AGROPECUÁRIA EM TERRAS BAIXAS**

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

Orientador: Prof. Dr. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2020

Ficha catalográfica elaborada por meio do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

Ambus, Jordano Vaz
ESTRUTURA DE UM PLANOSSOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM TERRAS BAIXAS / Jordano Vaz
Ambus.- 2020.
79 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. Física do solo 2. Conectividade de poros 3.
Tomografia 4. Raízes 5. Material orgânico I. Miguel
Reichert, José 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.

© 2020

Todos os direitos autorais reservados a Jordano Vaz Ambus. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Ciências Rurais – Departamento de Solos, Av. Roraima, n. 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900.


E-mail: jv.ambus@gmail.com

Jordano Vaz Ambus

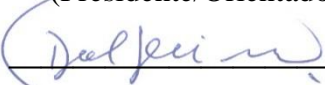
**ESTRUTURA DE UM PLANO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO
AGROPECUÁRIA EM TERRAS BAIXAS**

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

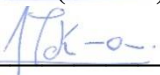
Aprovado em 5 de novembro de 2020:



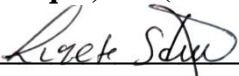
José Miguel Reichert, Dr. (UFSM) – Videoconferência
(Presidente/Orientador)




Dalvan José Reinert, Dr. (UFSM) – Videoconferência



Jackson Adriano Albuquerque, Dr. (UDESC) – Videoconferência



Lizete Stumpf, Dr.^a. (UFPel) – Videoconferência



Milton da Veiga, Dr. – Videoconferência

Santa Maria, RS, Brasil
2020

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) e a todos funcionários e dessa instituição renomada que me acolheu e me oportunizou realizar o doutorado.

Ao Professor-orientador José Miguel Reichert pela parceria e ensinamentos valiosos durante estes quatro anos, em que me orientou sempre em busca da excelência na atividade acadêmica e científica.

Aos demais mestres pelo compartilhamento de vosso conhecimento nas disciplinas cursadas.

Agradeço aos Departamentos de Solos e de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela disponibilidade na área experimental onde foi desenvolvido este estudo. Em especial, ao Professor Paulo César de Faccio Carvalho e todo seu grupo de estudos, por abrir as portas da UFRGS para realização desta parceria.

Sou imensamente grato à minha família: Ao meu pai Mariano Hoff Ambus, minha mãe Leci Vaz Ambus e minhas irmãs Gisleila Ambus Duarte, Lisiane Ambus Munhoz, Mariani Ambus Eckert e Cleidi Ambus por serem meu exemplo de perseverança, determinação, honestidade e apoio incondicional.

Aos meus amigos Bruno Tomazele Rovani, Paulo César Vargas Luz, Cristiano Sarzi Machado e Raimar Alexandre Krampe, pela parceria e por tonarem a caminhada mais leve.

Do mesmo modo à minha namorada Amanda Romeiro Alves, que esteve ao meu lado nos momentos mais importantes desta etapa, com atenção, carinho, apoio e incentivo.

Agradeço aos colegas Douglas Leandro Scheid, Micael Stolben Mallmann, Jean Pierre Cavalli, Alan Carlos Batistão, Raí Ferreira Batista, Gabriel Oladele Awe, Felipe Dalla-zen Bertol, Thaynara Diuliane, Karina Wegermann e Rafaella Richter Antunes, pelo auxílio nas coletas a campo e análises laboratoriais.

Por fim, agradeço aos demais colegas que de uma forma ou outra tem participação nessa realização.

A todos o meu muito obrigado!

RESUMO

ESTRUTURA DE UM PLANOSSOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM TERRAS BAIXAS

AUTOR: Jordano Vaz Ambus

ORIENTADOR: José Miguel Reichert

O sistema de produção com foco no monocultivo de commodities pode gerar o esgotamento dos recursos naturais e reduzir a segurança alimentar das populações ao redor do mundo, pondo em risco o desenvolvimento das gerações futuras. Isso reforça o papel fundamental e a responsabilidade da atividade agropecuária em garantir não apenas a produção de alimentos, mas produzir e conservar. Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) são considerados excelentes alternativas para aumentar a eficiência da produção, otimizar o uso das terras e conservar os recursos naturais. Esses sistemas já são utilizados há muitos anos em diversos locais do mundo, mas sua adoção em áreas com solos de difícil manejo, como os solos de Terras Baixas (Planossolos e Gleissolos) ainda é recente, e as alterações que podem ocorrer nesses solos são pouco conhecidas. A hipótese deste estudo foi de que os SIPA em Terras Baixas destinadas ao cultivo do arroz irrigado no Sul do Brasil melhoram a estrutura física e funcionalidade do solo. O objetivo foi investigar como os diferentes manejos desses sistemas influenciam na estrutura e a qualidade de um Planossolo. Para testar a hipótese, um experimento de longa duração está sendo desenvolvido em um Planossolo situado na Planície Costeira Interna do Rio Grande do Sul, Brasil. O experimento consiste em quatro sistemas de produção agropecuária envolvendo o cultivo do arroz irrigado: i) arroz – pousio – arroz, sem pastejo animal e com revolvimento do solo (grade aradoura) na primavera; ii) arroz – azevém pastejado – arroz, com semeadura direta; iii) arroz – azevém pastejado – soja – azevém pastejado – arroz, com semeadura direta; e iv) pastagem (azevém+trevo-branco+cornichão) no inverno, e campo de sucessão no verão, sendo continuamente pastejado e cultivado com arroz em semeadura direta a cada quatro anos. Foram determinados diversos parâmetros físicos estruturais e de funcionalidade da porosidade solo e biomassa radicular, por meio de técnicas como a tomografia computadorizada. Os resultados indicam que SIPA compostos majoritariamente por espécies gramíneas (arroz-azevém) mitigaram os efeitos nocivos do pisoteio e melhoraram a estrutura e funcionalidade do solo, com a diminuição da densidade em superfície, aumento da água disponível e da permeabilidade, principalmente a gases, devido à maior conectividade e orientação dos poros de forma longitudinal ao fluxo. O revolvimento do solo pode melhorar os parâmetros quantitativos igualando-os aos sistemas integrados, contudo, cria poros esféricos e pouco contínuos revelados pela tomografia computadorizada, o que pode ser nocivo à funcionalidade dos poros. Os SIPA não foram amplamente superiores ao sistema com revolvimento, todavia, os resultados indicam que após 6 anos de condução de experimento, a estrutura do solo tem se beneficiado gradativamente do manejo conservacionista, e revolvimento do solo não se justifica.

Palavras chave: Conectividade de poros, tomografia, raízes, material orgânico.

ABSTRACT

STRUCTURE OF A PLANOSOL IN INTEGRATED CROP LIVESTOCK SYSTEM IN LOWLANDS

AUTHOR: Jordano Vaz Ambus

ADVISOR: José Miguel Reichert

The production system with a focus on monoculture commodities can deplete natural resources and reduce food security for populations around the world, endangering the development of future generations. This reinforces the fundamental role and responsibility of agricultural activity in ensuring not only food production, but produce and conserve. Integrated crop–livestock systems (ICLS) are considered excellent alternatives to increase production efficiency, optimize land use and conserve natural resources. These systems have been used for many years in different parts of the world, but their adoption in areas with difficult soil management, such as lowland (Planosols and Gleysols) is still recent, and the changes that can occur in the soil are little known. The hypothesis of this study was that the ICLS in the Lowlands for the cultivation of irrigated rice in southern Brazil improves the soil physical structure and functionality. The objective was to investigate how the different managements of these systems influence the structure and quality of a Planosol. To test the hypothesis, a long-term experiment is being developed in a Planosol located in the Inner Coastal Plain of Rio Grande do Sul, Brazil. The experiment consists of four agricultural production systems involving the cultivation of irrigated rice: i) rice - fallow - rice, without animal grazing and with soil tillage (disc harrow) in spring; ii) rice - ryegrass with grazing - rice, and no-till; iii) rice - ryegrass with grazing - soybean - ryegrass with grazing - rice, and no-till; and iv) pasture (ryegrass + white clover + birdsfoot trefoil) in winter, and succession field in the summer, being continuously grazed and cultivated with rice under no-tillage every four years. Several structural and functional parameters of soil porosity and root biomass were determined using techniques such as computed tomography. The ICLS composed mainly of grass species (rice-ryegrass) reduced the harmful effects of trampling and improved the structure and functionality of the soil, with reduction in surface bulk density, increase in available water and air permeability due to greater connectivity and pore orientation longitudinal to the flow. Soil turnover can improve quantitative parameters by matching it to integrated systems, however, it creates spherical and non-continuous pores revealed by computed tomography, which can be harmful to the functionality of the pores. The ICLS were not widely superior to the system with soil revolving, however, the results indicate that after 6 years of conducting the experiment, the soil structure has gradually benefited from conservation management, and soil disturbance is not justified.

Keywords: pore connectivity, tomography, roots, organic material.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	HIPÓTESE	13
3	OBEJTIVO	14
4	REVISÃO DE LITERATURA	15
5	METODOLOGIA	19
	5.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E COLETA DE AMOSTRAS	19
	5.2 ANÁLISE DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO	22
	5.3 ANÁLISE DA POROSIDADE POR TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA	24
	5.4 QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA RADICULAR	27
6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	28
7	RESULTADOS	28
	7.1 DENSIDADE, ESTRUTURA E POROSIDADE DO SOLO	28
	7.2 CLASSIFICAÇÃO DE POROS	31
	7.3 RETENÇÃO DE ÁGUA	35
	7.4 RAÍZES E MATERIAL ORGÂNICO	39
	7.5 PROPRIEDADES DINÂMICAS DE FLUXO	40
	7.6 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA E CONECTIVIDADE DE POROS	42
8	DISCUSSÃO	45
	8.1 POROSIDADE E COMPACTAÇÃO DO SOLO	45
	8.2 CLASSIFICAÇÃO DOS POROS DO SOLO	48
	8.3 RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	52
	8.4 RAÍZES E MATERIAL ORGÂNICO	54
	8.5 PROPRIEDADES DE FLUXO DO SOLO	56
	8.6 CONECTIVIDADE E CONTINUIDADE DE POROS	59
	8.7 ANÁLISE QUALITATIVA DE IMAGENS TRIDIMENCIONAIS	63
8	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS	68
	ANEXO A — ESCANEAMENTO DE UMA AMOSTRA: DISPOSIÇÕES GERAIS	78
	ANEXO B — ETAPAS DO ESCAEAMENTO	78
	ANEXO C — RECONTRUÇÃO DA IMAGEM	78
	ANEXO D — PROCESSAMENTO DAS IMAGENS 3D	79

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o principal produtor de arroz das Américas, e o estado do Rio Grande do Sul (RS) se destaca como maior produtor dessa cultura no país. O sistema de cultivo predominante no RS é o irrigado por inundação, onde a superfície do solo permanece a maior parte do tempo com lâmina de água. A maioria das terras cultivadas com arroz no RS são preparadas no sistema convencional ou semidireto, com aração e gradagem antes da semeadura e logo após a colheita respectivamente, geralmente, permanecem todo o inverno em pousio com o solo praticamente descoberto, o que gera um excedente de terras agricultáveis ociosas no período de entressafra.

A cultura do arroz é altamente exigente em insumos para sua produção e, à medida que mais tecnologia é adicionada ao sistema a produção, torna-se mais onerosa; além disso, a oscilação do preço do grão aumenta os riscos da atividade. Aliado ao fato da maioria dos produtores de arroz do RS serem arrendatários de terras, o custo de produção e oscilação de preço tornam instável a atividade orizícola. Assim, uma alternativa ao monocultivo do arroz tem sido a rotação com culturas de sequeiro em áreas de Terras Baixas. A diversificação da produção, com a introdução da cultura da soja em rotação com o arroz, tem gerado ganhos econômicos aos produtores, pois reduz os gastos com insumos e facilita o manejo das áreas. A semeadura direta, tanto da soja quanto do arroz, também vem sendo adotada, com menor necessidade do preparo do solo e melhor controle de plantas espontâneas.

Outra estratégia para melhorar a utilização das terras, principalmente no período de entressafra, é a adoção de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA). Os SIPAs do sub trópico brasileiro geralmente se caracterizam pelo cultivo, em sistema de plantio direto (SPD), de culturas de verão produtoras de grãos, como soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*) e arroz (*Oryza sativa*), seguidas pelo estabelecimento de pastagens com gramíneas de estação fria, como aveia preta (*Avena strigosa*) e azevém (*Lolium Multiflorum*), destinados ao pastejo animal. Esses sistemas são altamente difundidos em outras regiões do estado e do Brasil, mas ainda é recente quando se trata de Terras Baixas e arroz irrigado, com potencialidade de aumentar não só a diversificação e produtividade, mas também a qualidade dos solos.

Os solos de Terras Baixas, devido às características de relevo plano, são essencialmente hidromórficos, fazendo com que passem longos períodos com excesso de água, o que dificulta a implantação das culturas pouco adaptadas a essas condições. Assim, o manejo do solo é extremamente importante nessas áreas, principalmente quanto à estrutura e funcionalidade do

sistema poroso, e visa fornecer condições físicas para o desenvolvimento das culturas, principalmente em relação à aeração e drenagem de água.

Os SIPAs podem melhorar as propriedades físicas do solo, pois as pastagens mantêm a cobertura do solo no período de entressafra e aumentam a proteção da superfície à compactação, e o desenvolvimento das espécies forrageiras favorece a atividade biológica pela maior adição de biomassa, sobretudo de raízes. A porosidade do solo é beneficiada pelo maior desenvolvimento radicular e microbiológico, capaz de criar poros contínuos que auxiliam na condução e disponibilidade de água e gases ao longo do perfil. Por outro lado, há de se considerar que os solos de Terras Baixas são de manejo delicado, principalmente em relação à condição de encharcamento frequente, o que dificulta o estabelecimento de um sistema integrado. Além disso, se mal manejado, esse sistema pode ser danoso à estrutura do solo, principalmente pela compactação gerada pelo pisoteio animal.

O desafio para os produtores que decidem adotar os SIPA é adequar as condições de manejo das áreas pastejadas, para não gerar compactação adicional ao solo, de forma que suas funções não sejam prejudicadas pelo excesso de pisoteio, que reduz o fluxo de água e ar, e dificulta o crescimento das raízes. Assim, espera-se que o sistema possa se beneficiar da entrada do componente animal. Em Terras Baixas, os desafios são ainda maiores, pois, além da má drenagem natural, a prática do revolvimento periódico pode levar ao colapso da estrutura e à ocorrência de valores elevados de densidade do solo nesses locais. Esse fato é uma barreira encontrada pelos produtores para obtenção de uma pastagem de qualidade no período de inverno, que forneça condições para uma pecuária produtiva e produção suficiente de resíduos para manter o solo coberto e protegido.

A condição estrutural do solo é um dos os principais limitantes ao desenvolvimento de plantas, tanto em Terras Altas quanto em Terras Baixas. No entanto, em solos de Terras Baixas busca-se uma estrutura do solo que facilite a distribuição da água ao longo do perfil, para que este não permaneça muito tempo saturado, o que favorece não só o estabelecimento de pastagens, mas também de culturas de sequeiro produtoras de grãos. Os principais problemas estão relacionados ao regime hídrico desses solos, pois ao passo que o solo permanece alagado durante longos períodos, principalmente em anos chuvosos, as culturas pouco adaptadas sofrem com deficiência de oxigênio. Uma característica comum em solos de Terras Baixas é a presença de horizontes superficiais A ou A e E arenosos, que possuem baixa capacidade de reter e disponibilizar água às plantas e, em épocas de baixa precipitação, o conteúdo de água no solo pode reduzir drasticamente. A presença de horizonte B argiloso imediatamente abaixo faz com

que o desenvolvimento radicular das plantas seja prejudicado, e reduz a área de exploração das raízes e as concentra na superfície; nessa situação, as plantas sofrem com o déficit hídrico. Assim, o solo de Terras Baixas pode apresentar dificuldades ao desenvolvimento das culturas, tanto pelo excesso como pelo déficit hídrico.

Mesmo com todas as dificuldades, tanto na introdução de culturas de sequeiro no verão quanto de pastagens de inverno, pode-se dizer que a rotação de culturas e SIPA aliados ao SPD têm grandes potencialidades de melhorar as condições biológicas, químicas e físicas dos solos de Terras Baixas. O sistema, quando bem manejado, pode progredir de forma sinérgica, pois a rotação das culturas facilita a introdução da pastagem e essa, por sua vez, subsidia um bom SPD como o alicerce da agricultura conservacionista e de baixo carbono. Dessa forma, obtém-se um ciclo onde o agricultor desempenha sua atividade econômica, social e ambiental de forma sustentável.

Os SIPAs são sistemas de produção extremamente emergentes no cenário mundial, pois tem potencial para aumentar a eficiência da produção e conservar o ambiente. Contudo, os impactos da sua adoção em áreas de Terras Baixas com solos hidromórficos ainda são pouco conhecidos, sobretudo com relação aos parâmetros físicos e de funcionalidade do solo. Assim, é importante conhecer as relações entre o manejo e a estrutura do solo, reconhecer o solo como regulador desse sistema, e sua saúde pode ser vista com a chave para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

2 HIPÓTESE

A hipótese do estudo foi de que a adoção dos Sistemas Integrados de Produção Agropecuária melhora a estrutura e funcionalidade do sistema poroso de um Planossolo em sistemas de produção de Terras Baixas, originalmente cultivadas com arroz no Sul do Brasil.

3 OBEJTIVO

O objetivo deste estudo foi investigar como os diferentes manejos de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária influenciam na estrutura e funcionalidade do sistema poroso de um Planossolo em sistemas de produção de Terras Baixas, originalmente cultivadas com arroz irrigado no Sul do Brasil.

4 REVISÃO DE LITERATURA

A agricultura moderna, além de assumir um papel cada vez mais importante na garantia da segurança alimentar, enfrenta o desafio da produção sustentável, e para que a demanda por alimentos não seja a fonte do esgotamento dos recursos naturais, os sistemas de produção precisam ser eficientes (SADOWSKI; BAER-NAWROCKA, 2018). Nesse contexto, os sistemas integrados de produção tornam-se uma estratégia importante para aumentar a produção de alimentos com base na eficiência do uso dos recursos naturais, além de uma alternativa de diversificação da produção no campo como chave para um desenvolvimento sustentável da agricultura (HOMANN-KEE TUI *et al.*, 2020; SARKAR *et al.*, 2020; SNEESSENS *et al.*, 2019; SZYMCZAK *et al.*, 2020).

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) são exemplo de manejo sustentável e eficiente, no âmbito ambiental, social e econômico (HOMANN-KEE TUI *et al.*, 2020; SNEESSENS *et al.*, 2019; SZYMCZAK *et al.*, 2020). Os SIPA do subtópico brasileiro, geralmente, caracterizam-se pelo cultivo, em sistema de plantio direto, de culturas de verão produtoras de grãos, como soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*) e arroz (*Oryza sativa*), seguidas pelo estabelecimento de pastagens com gramíneas de estação fria, como aveia preta (*Avena strigosa*) e azevém (*Lolium Multiflorum*), destinado ao pastejo animal (DE MORAES *et al.*, 2014).

A necessidade de intensificação do uso das terras pode fazer com que áreas que antes, por questões culturais, econômicas ou mesmo de aptidão, eram exploradas com apenas uma atividade agrícola ou pecuária, sejam utilizadas de maneiras mais intensivas, podendo gerar impactos no ambiente. Um exemplo são as Terras Baixas do Sul do Brasil que historicamente foram cultivadas com arroz irrigado, e nas últimas décadas passaram a também ser cultivadas com soja em sucessão ao o arroz, a área cultivada com soja nesse ambiente vem crescendo constantemente e já representa 1/3 de toda área cultivada com arroz, com crescimento de mais de 200% nos últimos 10 anos (IRGA, 2021).

A agricultura nas Terras Baixas do Sul do Brasil caracterizam-se pela produção intensiva de arroz irrigado, em sua maioria com pelo menos uma operação de revolvimento do solo por ano (SOSBAI, 2018). A necessidade da diversificação da produção, aliada à conservação do solo, tornam os SIPA uma das alternativas mais promissoras para a diversificação e sustentabilidade da produção dessas áreas (THEISEN *et al.*, 2017), com maior

eficiência no uso da terra (GOULART; REICHERT; RODRIGUES, 2020). A introdução de sistemas integrados em áreas de cultivo de arroz podem trazer inúmeros benéficos para a qualidade do solo, como melhorar os atributos físicos (TUCHTENHAGEN *et al.*, 2018), aumentar os teores de carbono orgânico e favorecer a abundância e diversidade da fauna edáfica (CARVALHO *et al.*, 2016). Além disso, a adoção da semeadura direta no cultivo do arroz é capaz de aumentar a qualidade química, física e biológica do solo, com uma maior produtividade das culturas (CARLOS *et al.*, 2020; DENARDIN *et al.*, 2019). Contudo, os efeitos da integração de animais, rotação de culturas e o não revolvimento do solo na qualidade estrutural e de funcionalidade desses solos ainda são pouco conhecidos.

É importante definir as características dos solos de Terras Baixas do Sul do Brasil, em que cerca de 56% pertencem a classe dos planossolos ou gleissolos (GOMES *et al.*, 2006), formados em regiões de relevo plano e geralmente em baixa altitude, com presença de horizontes superficiais arenosos A e E, gradiente textural e transição abrupta para o horizonte diagnóstico Bt (DA SILVA *et al.*, 2019). As características estruturais somadas às condições de relevo favorecem o acúmulo de água; portanto, são essencialmente hidromórficos, com alta relação entre microporos/marcroporos e elevada densidade do solo em superfície, ou seja, são solos de má drenagem, naturalmente suscetíveis a inundação e de manejo delicado (PARFITT *et al.*, 2017; PEDROTTI *et al.*, 2005; PINTO, LUIZ; PAULETTO, ELOY; NETO, 2004).

Os solos de Terras Baixas tendem a permanecer muitos períodos com conteúdo de água acima da capacidade de campo, ou seja, momentos em que a maior parte da porosidade pode estar preenchida com água, o que dificulta o movimento de gases no interior do solo (GOULART; REICHERT; RODRIGUES, 2020; MENTGES *et al.*, 2016). Consequentemente, dificulta o desenvolvimento das culturas que não possuem mecanismos fisiológicos para suprir a ausência de O₂, diferentemente do arroz que é adaptado a essas condições (TAIZ *et al.*, 2014). Além disso, a capacidade do solo em conduzir a água através dos poros, que possibilita sua rápida drenagem após chuvas ou enchentes, é um fator preponderante para que as plantas não permaneçam grandes períodos com estresse hídrico por excesso de água (VOGELER *et al.*, 2019). Portanto, o sucesso de um sistema de rotação de culturas e o estabelecimento de pastagens em solos de Terras Baixas dependem da escolha de um manejo capaz de promover a construção de uma porosidade interconectada e funcional.

Fatores externos ligados ao manejo são capazes de degradar a estrutura do solo, como o revolvimento que perturba e desorganiza a estrutura, o que pode alterar significativamente a funcionalidade do sistema poroso do solo (EZE *et al.*, 2020), o tráfego de máquinas (LATSCH;

ANKEN, 2019) e o pisoteio animal (NEGRÓN; LÓPEZ; DÖRNER, 2019); tanto o tráfego quanto o pisoteio comprimem e compactam o solo. Nesse sentido, a adoção de sistemas integrados em solos de Terras Baixas do sul do Brasil, os quais possuem muitas peculiaridades quanto à estrutura, drenagem e disponibilidade de água, pode apresentar algumas dificuldades em sua implantação (DA ROCHA *et al.*, 2017; GOULART; REICHERT; RODRIGUES, 2020). Porém, sistemas de produção com enfoque conservacionista, uso de plantas de cobertura e, principalmente, desenvolvimento de raízes, podem criar um ambiente estrutural favorável do solo.

A alternância de plantas cultivadas é de grande importância na melhoria das propriedades físicas do solo e, conseqüentemente, sua qualidade estrutural (ADETUNJI *et al.*, 2020; TURMEL *et al.*, 2015). Essa importância está diretamente ligada à produção de biomassa, sobretudo de raízes (LU *et al.*, 2020). A alta atividade radicular promove a produção de poros contínuos (bioporos) (LUCAS *et al.*, 2019; VILLARREAL *et al.*, 2020), e a rotação de culturas estimula a microbiota edáfica e melhora a saúde do solo (NUNES *et al.*, 2020). Os SIPA são exemplos claros de sistemas que, se bem manejados, podem melhorar a qualidade do solo, por promoverem a rotação de culturas e a introdução de pastagens com desenvolvimento intenso de raízes (ANGHINONI *et al.*, 2013; ASSMANN *et al.*, 2014), com reflexo positivo na qualidade estrutural do solo (BREWER; GAUDIN, 2020). Portanto, estrutura e funcionalidade do solo e produção de biomassa nos sistemas agrícolas estão intimamente ligadas, pois há uma relação mútua entre esses fatores e a determinação da biomassa radicular é extremamente importante para se realizar inferência sobre o manejo do solo (CUI *et al.*, 2019; HAO *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019).

A estrutura do solo corresponde ao seu arranjo de partículas que formam o sistema poroso, que abriga e rege a dinâmica dos processos no solo, assim, pode ser considerado um indicador da qualidade do manejo de um sistema de produção, pois é responsável desde o suprimento de água e nutrientes às plantas, até as condições físicas para o desenvolvimento de raízes e microrganismos (RABOT *et al.*, 2018; SCHLÜTER; SAMMARTINO; KOESTEL, 2020).

As propriedades estruturais do solo estão intimamente ligadas com o tipo de solo e com o manejo adotado, e expressam as características de composição e arranjo das partículas; as propriedades de funcionalidade do sistema poroso, são dinâmicas e mais sensíveis ao manejo e, assim, são capazes de expressar a heterogeneidade e complexidade do solo em diferentes sistemas de produção (AMBUS *et al.*, 2018; CAVALLI *et al.*, 2020; HOLTHUSEN *et al.*, 2018;

REICHERT *et al.*, 2016b, 2017, 2018). Propriedades de composição do solo, como densidade e porosidade (SOKOLOWSKI *et al.*, 2020), e de funcionalidade, como retenção e disponibilidade de água (DE ANDRADE BONETTI *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2019), condutividade hidráulica de solo saturado (KREISELMEIER *et al.*, 2020; PATRA *et al.*, 2019; VANDERBURG *et al.*, 2020) e a permeabilidade do solo ao ar (HOLTHUSEN *et al.*, 2018; MARTÍNEZ *et al.*, 2016) são extremamente úteis para avaliar a qualidade dos sistemas de manejo.

As propriedades de funcionalidade do solo são uma função da qualidade estrutural, sobretudo da porosidade, e não dependem apenas da quantidade de poros, mas também da conectividade e tortuosidade do sistema poroso (ZHANG *et al.*, 2019). Assim, novas abordagens somadas as técnicas laboratoriais clássicas podem auxiliar no entendimento tanto da estrutura física do solo quanto na qualidade dos sistemas agrícolas. A tomografia computadorizada de raios X (TC) é uma ferramenta que possibilita a geração de parâmetros e imagens tridimensionais que auxiliam no entendimento da dinâmica do sistema poroso do solo (FENG *et al.*, 2019; PIRES *et al.*, 2020; VOGEL, 2008; ZHANG *et al.*, 2019). Permite estabelecer relações entre as propriedades de funcionalidade e os parâmetros tomográficos de volume, formato, orientação e conectividade dos poros, bem como a influência que o manejo dos diferentes sistemas de produção têm sobre essas propriedades (BORGES *et al.*, 2019; PIRES *et al.*, 2017).

A adoção de um manejo conservacionista, introdução de diferentes espécies vegetais, manutenção da cobertura do solo e integração de componente animal auxiliam de maneira efetiva na melhoria da qualidade e saúde do solos bem drenados das Terras Altas (ADETUNJI *et al.*, 2020; AMBUS *et al.*, 2018; NUNES *et al.*, 2020; TURMEL *et al.*, 2015). Porém, os solos de Terras Baixas possuem características muito distintas que podem dificultar a introdução dos SIPA nesses ambientes.

A qualidade estrutural do solo é a chave para o sucesso de qualquer sistema de produção, portanto, conhecer a dinâmica da funcionalidade do sistema poroso do solo pode auxiliar de forma importante no caminho para uma agricultura eficiente e sustentável.

5 METODOLOGIA

5.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E COLETA DE AMOSTRAS

O experimento está localizado na região fisiográfica da Planície Costeira Interna, produtora de arroz, no estado do Rio grande do Sul, região sul do Brasil (30°58'21.4"S latitude, 51°57'01.4"O longitude), altitude de 28 m, clima subtropical úmido e quente (Cfa) segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 18.3°C e precipitação média anual de 1.522 mm (KOTTEK *et al.*, 2006). O solo do estudo é classificado como um Planossolo Háplico Eutrófico típico (SANTOS *et al.*, 2013) ou Gleyic Luvic Planosol (WRB, 2014), localizado em relevo plano a suave ondulado com 4% declividade máxima, com textura franca com 17, 35 e 48% de argila, silte e areia, respectivamente, e com características de má drenagem.

Antes da implantação a área estava em pousio há três anos, desde o último cultivo de arroz irrigado. Em março de 2013 foram realizadas coletas para a caracterização química do solo, visando a correção do mesmo. Em abril do mesmo ano foi realizado o preparo convencional do solo em toda a área experimental com arado e grade niveladora. Entre as operações de gradagem foi feita a calagem do solo e posterior semeadura das pastagens hibernais.

O protocolo experimental foi constituído de quatro sistemas de produção agropecuária envolvendo o cultivo de arroz irrigado, dispostos em um delineamento de blocos ao acaso com três repetições, as dimensões das parcelas variam de 0.9 a 1.5 ha (Fig. 1). As características de cada sistema são descritas a seguir:

APoAsp-cr: arroz (A) – pousio (Po) – arroz (A). Consiste no cultivo mínimo, com revolvimento do solo (cr) por operações de gradagem, logo após a colheita e muito antes da semeadura do arroz. Nesse sistema não há pastejo animal (sp). O pousio caracteriza-se como restos culturais da cultura do arroz e vegetação espontânea, que são dessecados antes da semeadura direta do arroz, considerado sistema “semidireto”.

AAzApi-sd: arroz – azevém (*Lolium multiflorum*) (Az) – arroz. Consiste na semeadura do azevém logo após a colheita do arroz, com o pastejo animal no inverno (pi), e semeadura direta (sd) do arroz na primavera.

AAzSAzApi-sd: arroz – azevém – soja (*Glycine max*) (S) – azevém – arroz. Nesse sistema há uma alternância de cultivos de verão, com a semeadura da soja entre os cultivos de arroz.

Pc4A-sd: pastagem de inverno + campo de sucessão durante quatro estações – arroz. A pastagem de inverno consiste no consórcio de azevém + trevo branco (*Trifolium repens*) + cornichão (*Lotus corniculatus* L.) e o campo de sucessão é composto pelo prolongamento das pastagens hibernais e estabelecimento natural de espécies nativas. O sistema é pastejado continuamente (Pc) durante todo o período e o arroz irrigado é cultivado na segunda metade do quarto ano.

Com exceção do **APoAsp-cr**, todos os demais sistemas foram conduzidos em semeadura direta. O único evento de mobilização do solo ocorre na restauração das “taipas” (estruturas de contenção da água dentro das áreas de cultivo) antes do cultivo do arroz e o sulco de semeadura nas demais culturas de verão.

O pastejo nos sistemas **AAzApi-sd**, **AAzSAzApi-sd** e **Pc4A-sd** foi efetuado pelo método contínuo com lotação variável, composto por três animais-teste (*testers*) por unidade experimental e por animais reguladores que entravam e saíam da pastagem conforme a necessidade de ajuste da altura. Para isso, foram utilizados animais jovens recém-desmamados, com 10 meses de idade média, machos castrados, contendo cerca de 200 kg de peso vivo. O início do pastejo ocorria no momento em que a altura do pasto atingia aproximadamente 15 cm (em torno de 1,5 Mg de matéria seca ha⁻¹), entre os meses de junho e julho, mantendo-se essa altura ao longo do ciclo do pastejo, que se estendia até meados de outubro – novembro, dependendo da cultura em sucessão. No ciclo estival (**Pc4A-sd**), foram utilizados animais machos castrados, com cerca de 15 meses de idade e 300 kg de peso vivo, aproximadamente. A semeadura das pastagens, ocorria em meados de abril, do arroz em meados de outubro e da soja em novembro.

Figura 1: Vista aérea da área experimental e distribuição dos tratamentos - Fazenda Corticeiras, Cristal, RS.



Fonte: Autor.

O protocolo experimental prevê o fechamento de um ciclo de rotações a cada quatro anos. Como o experimento vem sendo conduzido desde o ano de 2013, no ano de 2016 o primeiro ciclo foi encerrado, ou seja, nesse ano todos os tratamentos foram cultivados com arroz irrigado no período estival. Dessa forma, no momento deste estudo o protocolo encontrava-se próximo à metade do segundo ciclo dos tratamentos (Tabela 1).

Tabela 1. Sequência cronológica dos tratamentos de diferentes sistemas integrados de produção agropecuária no Sul do Brasil, em destaque as épocas em que as coletas foram realizadas.

Ano	2017		2018		2019		2020	
Estação	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
<i>APoAsp-cr</i>	Pousio	Arroz	Pousio	Arroz	Pousio	Arroz	Pousio	Arroz
<i>AAzApi-sd</i>	Azevém	Arroz	Azevém	Arroz	Azevém	Arroz	Azevém	Arroz
<i>AAzSAzApi-sd</i>	Azevém	Soja	Azevém	Arroz	Azevém	Soja	Azevém	Arroz
<i>Pc4A-sd</i>	Azevém + Trevo	Azevém + Campo de	Azevém + Trevo	Azevém + Campo de	Azevém + Trevo	Azevém + Campo de	Azevém + Trevo	Azevém + Arroz
	Branco +	Sucessão	Branco +	Sucessão	Branco +	Sucessão	Branco +	
	Cornichão		Cornichão		Cornichão		Cornichão	

Fonte: Autor.

Para este estudo, amostras de solo com estrutura alterada e preservada foram coletadas nas parcelas, em três diferentes épocas: (i) Pastejo 2018, coletadas próximo ao fim de um ciclo

de pastejo (outubro de 2018) cinco anos e seis meses após a implantação, (ii) Colheita 2019, coletadas próximo ao fim de um ciclo de cultivo de verão (março de 2019) cinco anos e 11 meses após a implantação, e (iii) Pastejo 2019, coletadas próximo ao fim de um ciclo de pastejo (outubro de 2019) seis anos e seis meses após a implantação.

Amostras coletadas nas camadas de 0,0-0,10 (superficial) e 0,10-0,20 m (subsuperficial) de profundidade, em tubos de Polyvinyl Chloride (PVC) com 0,10 m de diâmetro interno e 0,10 m de altura, foram usados para a determinação da densidade do solo (D_s), porosidade total (P_t), macroporosidade (M_a), microporosidade (M_i), curva de retenção de água (CRA), distribuição de tamanho de poros (DTP), permeabilidade do solo ao ar (K_a) e condutividade hidráulica de solo saturado (K_s). Amostras coletadas em tubos de PVC de 0,075 m de diâmetro e 0,18 m de altura foram utilizadas para os ensaios de Tomografia Computadorizada de Raios X e determinação da biomassa radicular.

5.2 ANÁLISE DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

As amostras com estrutura preservada de solo foram saturadas por elevação capilar durante 48 h, e então foi determinada a retenção de água nos potenciais matriciais (Ψ_m) de -1, -6 e -10 kPa em uma coluna de areia (GUBIANI *et al.*, 2009; REINERT; REICHERT, 2006), em que, as amostras permaneceram 72 h para atingir o equilíbrio, em cada Ψ_m as amostras foram pesadas e foi determinada a K_a , após foram ressaturadas para a determinação da K_s .

A K_a ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2}$) foi determinada com o auxílio de um permeâmetro de carga constante, nos potenciais matriciais (Ψ_m) de -1, -6 e -10 kPa. O princípio da metodologia é baseado na quantificação do fluxo de ar que passa pela amostra de solo, mantendo-se um gradiente de pressão constante e baixa (0,1 kPa) para evitar o fluxo turbulento. A metodologia e equipamento foram adaptados de VOSSBRINK (2005). A partir da condutividade do ar, a K_a foi calculada usando a equação 1:

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g} \quad (1)$$

Onde: K_l condutividade ao ar (cm s^{-1}), η Viscosidade do ar ($\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1}$), ρ_l densidade do ar no momento da medida (g cm^{-3}), e g aceleração da gravidade (981 cm s^{-2}).

A K_s (mm h^{-1}) foi calculada com base no fluxo de água que passa pela amostra de solo, sob aplicação de carga hidráulica constante de 8 cm de coluna d'água, até condição de equilíbrio dinâmico, em um permeâmetro de carga constante, conforme descrito por LIBARDI (2005). A K_s foi calculada pelo rearranjo da equação de Darcy, conforme a equação 2:

$$K_s = \frac{V \cdot H}{A \cdot t \cdot (H + h)} \quad (2)$$

Onde: V é o volume de água que passa pela amostra (mm^3); H é o comprimento da amostra de solo (mm); A é a área da seção transversal da amostra de solo (mm^2); t é o tempo de medição do fluxo de água (h); h é a altura da lâmina de água sobre a amostra (mm).

Por fim as amostras foram secas em uma estufa a 105°C por 48 h para então determinar a massa do solo seco para o cálculo da densidade do solo (D_s). A umidade gravimétrica para Ψ_m menores que -500 kPa foi analisada com psicrômetro de ponto de orvalho (WP4), utilizando-se as amostras com estrutura alterada (GUBIANI *et al.*, 2013; KLEIN *et al.*, 2013).

A D_s (g cm^{-3}), foi calculada pela relação entre a massa do solo seco e o volume total das amostras. A M_i ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi determinada como sendo o conteúdo volumétrico de água no Ψ_m de -6 kPa. A P_t ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi calculada com base na relação entre a D_s e densidade de partículas (D_p) (g cm^{-3}), determinada pelo método modificado do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997; GUBIANI; REINERT; REICHERT, 2006). A M_a ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi definida como sendo a diferença entre P_t e M_i .

Com base nos valores de conteúdo de água, nos Ψ_m de -1, -6 e -10 kPa (coluna de areia), e -500, -1.000 e -1.500 kPa (WP4), foram ajustadas curvas de retenção de água no solo pelo modelo de (VAN GENUCHTEN, 1980), utilizando o Solver do Excel, conforme a equação 3:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^m} \quad (3)$$

Em que: θ é o conteúdo volumétrico de água estimado ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_r é o conteúdo de água residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_s é o conteúdo de água de saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); Ψ é a tensão com que a água é retida no solo (kPa); α , n e m são coeficientes de ajuste da equação, sendo $m=1-1/n$.

Por meio dos parâmetros extraídos da CRA, foram calculados: a capacidade campo (CC), que corresponde ao θ no Ψ_m -10 kPa; o ponto de murcha permanente (PMP), que

corresponde ao θ no Ψ_m -1.500 kPa; e a água disponível (AD), que corresponde à diferença no valor de θ entre a CC e o PMP. Também foi determinada a distribuição de tamanho de poros, utilizando-se a relação entre o Ψ_m água de solo e o respectivo diâmetro de poro drenado.

5.3 ANÁLISE DA POROSIDADE POR TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

O escaneamento das amostras foi realizado com um tomógrafo Nikon, modelo XT H 225 ST. O equipamento possui detectores de geometria bidimensional e feixe de raio-X cônico. Para o escaneamento das amostras foram utilizados aproximadamente 170 kV de voltagem e 300 μ A de potência de emissão. Para melhorar a resolução das imagens obtidas durante o escaneamento, foi usada a estratégia de aproximar o máximo possível a amostra do target de onde parte o feixe do raio-X. Dessa forma, as amostras necessitaram ser escaneadas em faixas de 0,06 m de altura, totalizando três segmentos por amostra (superior/superficial, médio e inferior/subsuperficial), alcançando uma resolução de 40 μ m. A reconstrução das imagens, segmentação e análise foi realizada utilizando software “VGStudio MAX 2.2 dongle license”.

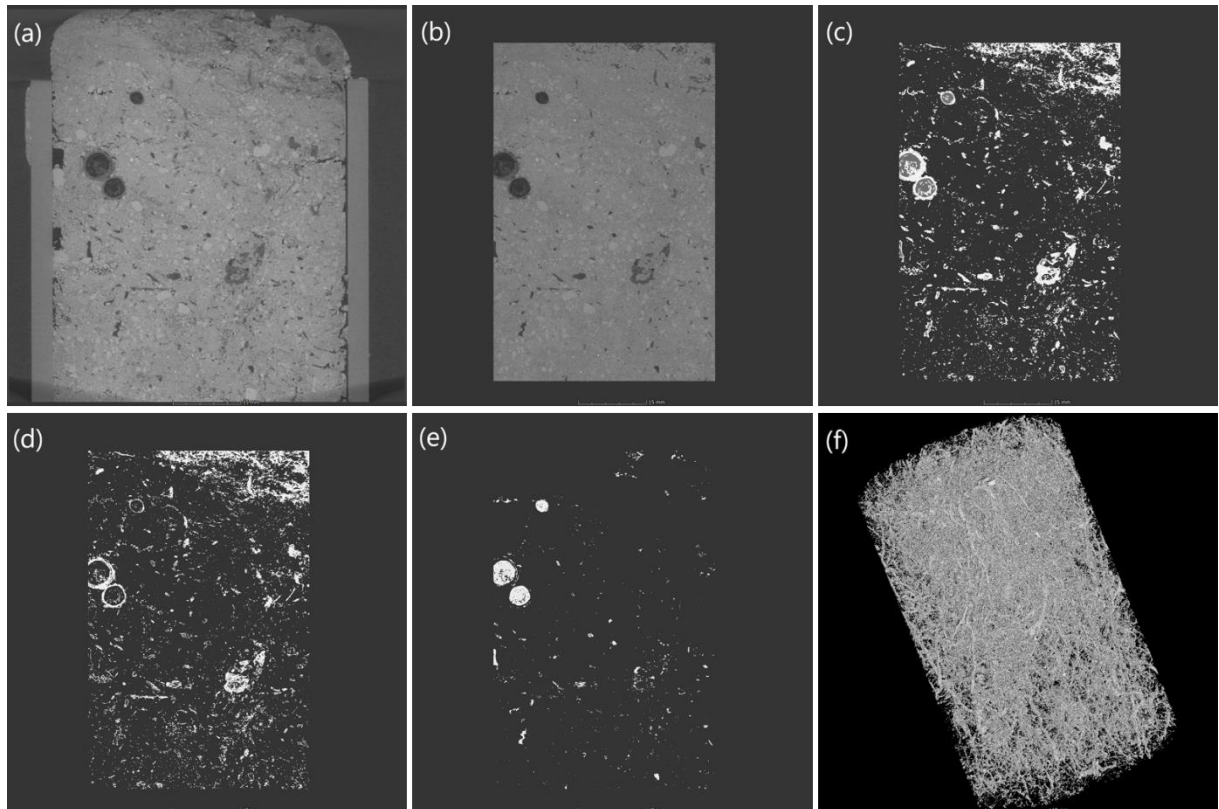
Após o escaneamento e reconstrução das amostras no VGStudio, primeiramente foi feita separação do volume de solo que seria efetivamente analisado, excluindo as bordas do cilindro utilizado na amostragem, e a porção de solo próxima as bordas, afim de evitar um efeito de bordadura, tanto da estrutura do solo quanto da escala de cinza, ficando com uma amostra de cerca de 0,05 m de diâmetro e 0,06 de altura (Figuras 2a e 2b).

De posse do volume efetivo a ser analisado, foi realizada a separação das três fases principais que compõe uma amostra de solo (sólidos, poros e material orgânico). A separação das fases tem como princípio básico o nível de atenuação que cada material distinto possui (ANDERSON *et al.*, 1988), e este é representado pela escala de cinza (KUKA *et al.*, 2013; SCHEFFER *et al.*, 2021; SLEUTEL *et al.*, 2008; VAN LOO *et al.*, 2014). Os níveis de atenuação possuem relação direta com a densidade de elétrons do material em questão e podem ser representados em um histograma (Figura 3). Com o auxílio de ferramentas do VGStudio, foi possível selecionar os limites (escala de cinza) dentro do histograma referentes a cada material de interesse, isto é, as chamadas “regiões de interesse” (ROI).

Após delimitados os limites de cada fase no histograma, foi feita a extração do volume das ROI's de maior importância para o estudo: material orgânico e porosidade (Figura 2d e 2e). De posse dos volumes de cada fração, determinou-se a superfície de poros e o material orgânico, com o auxílio do “surface determination tool”, onde os grupos “clusters” de voxels (pixels

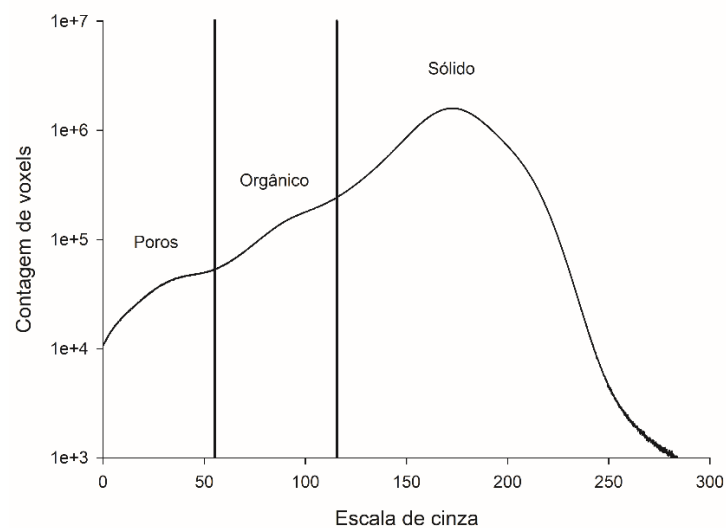
tridimensionais) são separados, sendo possível extrair diversas informações importantes, como: volume, superfície, número de voxels, entre outras.

Figura 2. Etapas da análise tomográfica: (a) volume escaneado; (b) volume efetivo analisado; (c) porosidade e material orgânico, (d) material orgânico; (e) porosidade e (f) porosidade 3D. Dimensões da amostra: Aproximadamente 50 mm de diâmetro e 60 mm de altura.



Fonte: Autor.

Figura 3. Histograma ilustrativo da escala de cinza e separação das fases, para uma amostra de solo aleatória.



Fonte: autor.

A porosidade total (P) ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foi determinada como sendo a relação entre o volume total de poros determinados por tomografia e o volume total da amostra. A mesma estratégia foi utilizada para se determinar o volume de material orgânico (Mo) ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Com base na P extraída, foi possível separar os clusters de poros pelo seu volume em mm^3 , e então realizada a classificação dos poros em quatro classes de volume (V): $V < 1 \text{ mm}^3$; $1 \text{ mm}^3 < V < 5 \text{ mm}^3$; $5 \text{ mm}^3 < V < 10 \text{ mm}^3$ e $V > 10 \text{ mm}^3$.

A porosidade conectada (Cp) ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foi considerada o volume de poros que pertencessem a clusters maiores que 1 mm^3 , onde Cp é, portanto, a relação entre somatório desses clusters e o volume total da amostra. Com base na relação entre a Cp e P, foi possível estabelecer um índice de conectividade (Ci), que informa o quanto da P é ocupada por poros maiores que 1 mm^3 .

A esfericidade dos poros (Ps) é a medida de quanto o formato de um poro aproxima-se de uma esfera, com base na relação entre a área de uma esfera de volume equivalente ao do poro e a área ocupada pelo poro:

$$\phi = \frac{A_{esf}}{A_p} \quad (4)$$

Onde: ϕ é a esfericidade; A_{esf} é a área superficial da esfera de igual volume da partícula; A_p é a área superficial da partícula ou poro.

Para o cálculo da Ps, tomou-se como base o diâmetro equivalente para o cálculo da área da esfera:

$$P_s = \frac{\pi \left(\sqrt[3]{\frac{6 V_p}{\pi}} \right)^2}{A_p} \quad (5)$$

Onde: V_p é o volume do poro; A_p área do poro.

Para cada cluster de poros, foi calculada a Ps e, para que fosse possível calcular a esfericidade e uma amostra por inteiro, foi calculada a média ponderada dos valores de esfericidade de cada cluster, onde o fator de ponderação foi justamente o percentual que cada aglomerado de voxels representava no volume total dos poros.

Um indicador que denota a conectividade entre os poros do solo, especialmente em longas distâncias, é o Γ – Indicator, que mede a probabilidade de dois voxels aleatórios pertencerem a um mesmo grupo “cluster”. O indicador pode variar de 0, quando há muitos

clusters não conectados, a 1, quando todos os voxels de poros pertencem para um único cluster conectado (Lucas et al., 2020). O Γ – Indicator pode ser calculado com base na transição de muitos clusters desconectados para um cluster muito grande (percolação), de acordo com a segunda métrica de (RENARD; ALLARD, 2013) a proporção dos pares de células (distintas ou não) que estão conectadas entre todos os pares de células permeáveis:

$$\Gamma(p) = \frac{1}{n_p^2} \sum_{i=1}^{N(X_p)} n_i^2, \quad (6)$$

Onde: n_p é o número de todos os voxels de poro p ; X_p o número de todos os clusters; e n_i o número de voxels de poros em cluster i .

5.4 QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA RADICULAR

Existem diferentes métodos para a determinação de raízes no solo, e muitos baseiam-se em métodos destrutivos, ou seja, na coleta e lavagem das raízes. Esses métodos podem ser de difícil realização e pouco acurados, devido à possibilidade da perda de material no momento da lavagem, sobretudo de raízes finas. Novas formas de se determinar as raízes, por técnicas não destrutivas, têm se mostrado satisfatórias, entre elas a tomografia computadorizada de raios X (TC). Com essa metodologia, é possível realizar a separação das principais fases do solo (sólidos, poros e material orgânico), podendo, assim, determinar a quantidade e distribuição espacial do material orgânico presente no interior do solo, como as raízes (GAO *et al.*, 2019b; HU *et al.*, 2019; KUKA *et al.*, 2013).

A determinação da biomassa de raízes foi realizada nas mesmas amostras utilizadas para o escaneamento no tomógrafo. Após a coleta, os tubos com as amostras permaneciam embalados hermeticamente e refrigerados e, imediatamente após o escaneamento, foram saturados por 48h e o solo foi retirado do tubo em forma de monólito, o qual foi dividido em partes de 0,06 m; cada parte foi cuidadosamente passada em peneira de 2 mm de abertura de malha para a retirada do solo. As raízes assim separadas foram colocadas em estufa a 65° C, até atingirem massa constante; após, foram pesadas e determinada a massa seca de raízes para cada porção do monólito. Com base na relação entre a massa seca e a área de cada porção, foi calculada a biomassa radicular em Mg ha⁻¹.

6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram inicialmente submetidos à análise de distribuição normal (teste de Shapiro-Wilk) e análise de homogeneidade de variância (teste de Bartlett). O efeito dos diferentes sistemas de manejo e das épocas de amostragem nas propriedades do solo foi avaliado por análise de variância em sistema bifatorial, levando em consideração dois fatores: A) sistemas de manejo e B) épocas de avaliação:

$$Y_{ijk} = m + b_j + A_i + B_k + AB_{ik} + e_{ijk} \quad (7)$$

Quando o teste F foi significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, utilizando o ambiente estatístico R.

Para alguns dados deste estudo foi realizada a análise de Correlação de Pearson a 5% de probabilidade de erro, quando F foi significativo os dados foram apresentados.

7 RESULTADOS

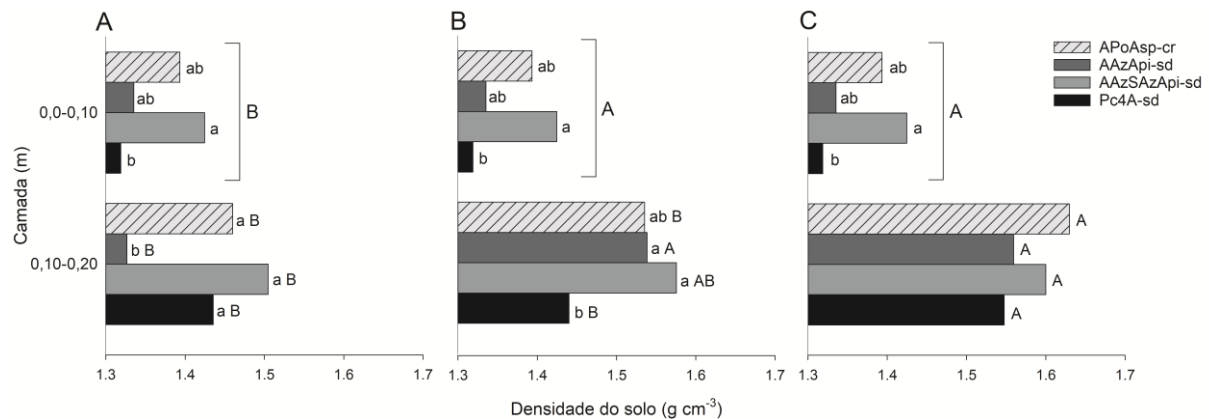
7.1 DENSIDADE, ESTRUTURA E POROSIDADE DO SOLO

Os tratamentos mantiveram as diferenças para a densidade do solo (Ds) na camada superficial, independentemente da época de avaliação, onde a menor Ds foi observada no Pc4A-sd (1.32 g cm^{-3}) e a maior no AAzSAzApi-sd (1.42 g cm^{-3}), enquanto os demais tratamentos não diferiram. O efeito simples das épocas de avaliação permite observar um aumento da Ds para as duas últimas épocas, 1.39 e 1.43 g cm^{-3} , respectivamente, em relação à primeira época 1.29 g cm^{-3} , incremento de 11% da primeira para a última época. Na camada de 0,10-0,20 m na primeira época, o AAzApi-sd (1.33 g cm^{-3}) teve o menor valor de Ds, na segunda época foi o Pc4A-sd (1.44 g cm^{-3}), mas não diferiu do APoAsp-cr, e na terceira época não houve diferenças significativas entre os tratamentos. Houve, também, um aumento gradativo na Ds da primeira para a terceira época na camada subsuperficial, onde os maiores incremento foram no AAzApi-sd, de 1.33 para 1.56 g cm^{-3} , o que gerou um acréscimo de 18%. Contudo, isso deve-se ao valor baixo da primeira época, e para o APoAsp-cr, de 1.46 para 1.63 g cm^{-3} que gerou um acréscimo de 12%, enquanto o acréscimo para os demais tratamentos não ultrapassou 10%. Destaca-se

que os valores de Ds foram ligeiramente maiores que os da camada superficial em relação à subsuperficial (Figura 4).

Figura 4. Densidade do solo para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as duas camadas nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).

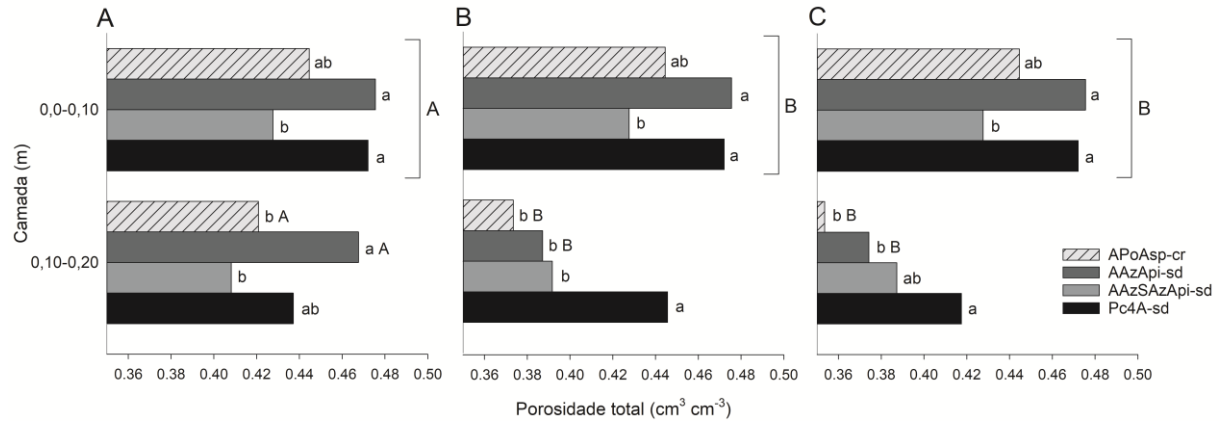


Fonte: Autor.

A porosidade total (Pt) na camada superficial não variou entre os tratamentos em todas as épocas avaliadas, onde a menor Pt foi observada no tratamento AAzSAzApi-sd ($0.43 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), enquanto os tratamentos AAzApi-sd ($0.48 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e Pc4A-sd ($0.47 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) tiveram maior volume de poros totais, enquanto que o APoAsp-cr não diferiu dos demais. Quanto às épocas de avaliação, houve uma diminuição da Pt nas duas últimas ($0.44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) em relação à primeira ($0.48 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), o que representou uma redução de cerca de 9%. Na camada subsuperficial, houve interação somente entre tratamentos e épocas em APoAsp-cr e AAzApi-sd, onde houve redução da porosidade da primeira para a última época avaliada, de 16 e 20%, respectivamente. Em relação aos tratamentos, a primeira época AAzApi-sd possui o maior valor ($0.47 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e não diferiu do Pc4A-sd; na segunda época. Pc4A-sd teve os maiores valores ($0.45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); e na última época de avaliação a maior Pt corresponde ao Pc4A-sd ($0.42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), mas não diferiu do AAzSAzApi-sd, que não diferenciou dos demais (Figura 5).

Figura 5. Porosidade total para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as duas camadas nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).

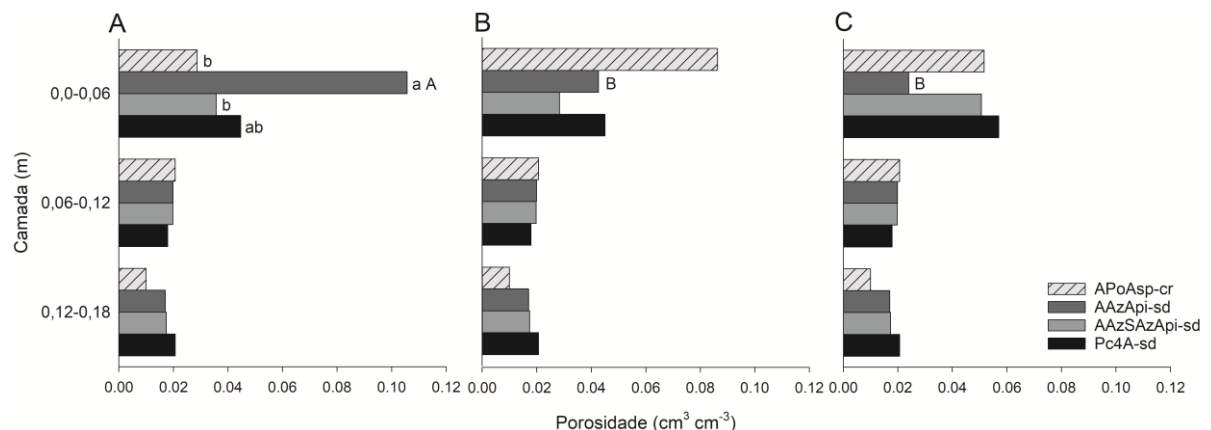


Fonte: Autor.

A porosidade determinada por tomografia (P_{TC}), por motivos de resolução, abrange uma faixa de diâmetro de poros de até aproximadamente $40 \mu\text{m}$, muito próxima da macroporosidade ($50 \mu\text{m}$). A maior estratificação entre as camadas revelou que a camada superficial (0,0-0,06 m) possui valores de P_{TC} maiores que as camadas mais profundas. Todavia, as diferenças entre os tratamentos só ocorreram na primeira época e para a camada de 0,0-0,06 m, onde AAzApi-sd ($0.11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi maior em relação a APoAsp-cr ($0.03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e AAzSAzApi-sd ($0.04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), enquanto Pc4A-sd não diferiu dos demais. Diferença significativa entre as épocas só ocorreu para o tratamento AAzApi-sd na camada superficial, em que houve uma redução de 80% da P da primeira para a última época de avaliação ($0.02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (Figura 6).

Figura 6. Porosidade (determinada por tomografia) para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as duas camadas nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).



Fonte: Autor.

7.2 CLASSIFICAÇÃO DE POROS

As classes de diâmetro de poros definidas neste estudo revelam que, independentemente da camada avaliada, a soma do volume dos poros menores que 50 μm corresponde a aproximadamente 70% de toda a porosidade, ou seja, para o solo em estudo há um predomínio de poros de menor diâmetro.

Quanto as classes em função dos tratamentos e épocas, na camada superficial (Figura 7 A, B e C), não houve diferença entre os tratamentos e épocas para a classe de poros com diâmetro maior que 50 μm , com valores próximos a $0.13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Na classe dos mesoporos, houve diferença apenas entre tratamentos, onde o maior volume de poros nessa classe foi do AAzApi-sd ($0.11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), enquanto o APoAsp-cr ($0.09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) não diferiu dos demais. Para os poros de diâmetro menor que 0.5 μm , os tratamentos diferiram nas duas primeiras épocas, em que, na primeira época, AAzApi-sd ($0.28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e Pc4A-sd ($0.27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foram significativamente maiores que os demais; na segunda época, o Pc4A-sd ($0.28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi maior que os demais, APoAsp-cr ($0.23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e AAzSAzApi-sd ($0.23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foram considerados intermediários e o AAzApi-sd ($0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) teve o menor volume de poros nessa classe; e, na última época, os tratamentos não diferiram com valores próximos a ($0.21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Na camada superficial, houve diferença entre as épocas apenas para a classe dos microporos e, de maneira geral, não houve diferença da primeira para a segunda época, e houve redução de 16% da segunda para a terceira; contudo, houve uma exceção para o AAzApi-sd que reduziu da primeira ($0.28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para a segunda ($0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e aumentou da segunda para a terceira época ($0.21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

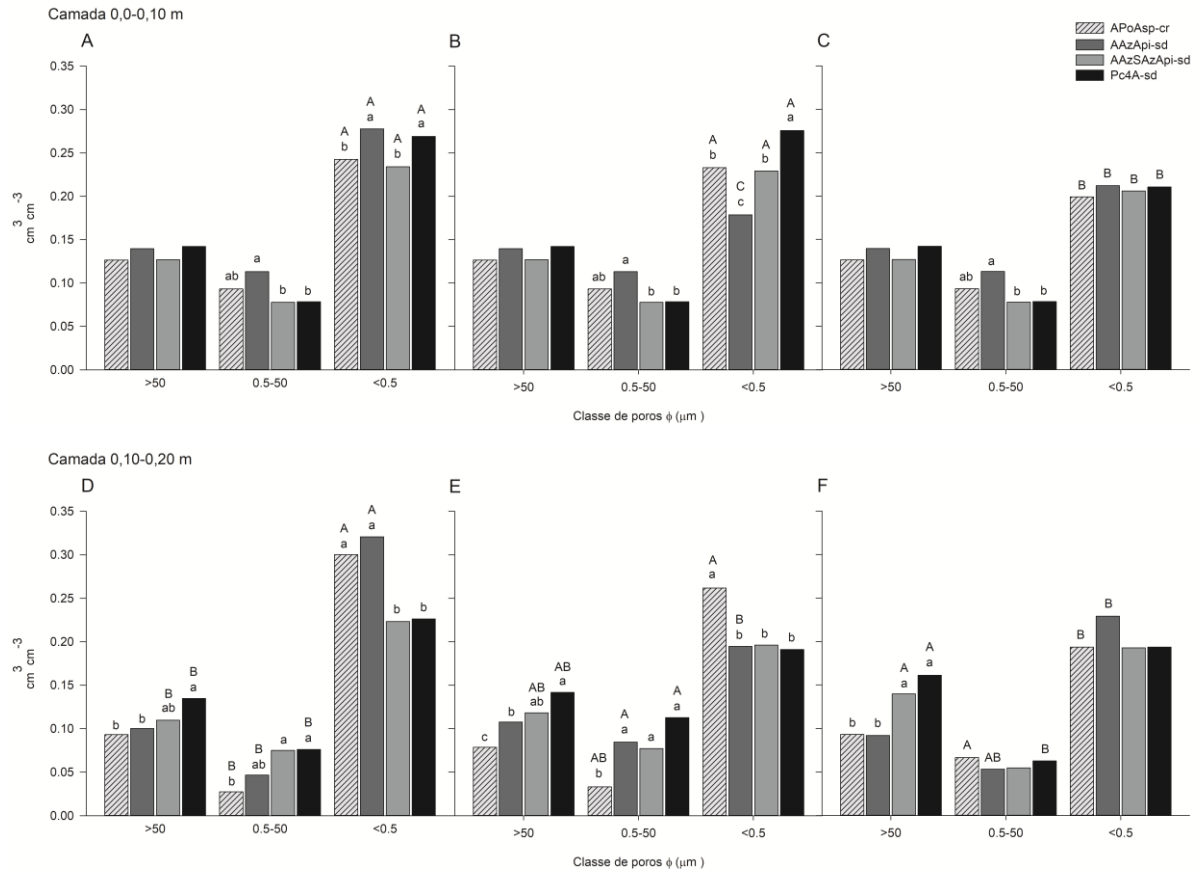
Na camada de 0,10-0,20 m, para as classes de diâmetro de poros foram observadas diferenças significativas entre tratamento e épocas (Figura 7 D, E e F). Na classe dos macroporos, na primeira época, o Pc4A-sd ($0.13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi maior, mas não diferenciou do AAzSAzApi-sd ($0.11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Na segunda época, novamente o maior valor foi do tratamento Pc4A-sd ($0.14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e não diferiu do AAzSAzApi-sd ($0.12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); contudo, o menor volume de poros nessa classe foi o APoAsp-cr ($0.08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), enquanto o AAzApi-sd ($0.11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi considerado intermediário. Na terceira época, o Pc4A-sd ($0.16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e AAzSAzApi-sd ($0.14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foram maiores que os demais ($0.09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e considerados estatisticamente iguais. As diferenças entre as épocas foram observadas nos tratamentos Pc4A-sd e AAzSAzApi-sd, onde houve um aumento da primeira para a segunda e da segunda para a terceira época de coleta, que gerou um acréscimo final de 23 e 27% respectivamente.

Para a classe dos mesoporos na camada de 0,10-0,20 m, na primeira época, os tratamentos AAzSAzApi-sd e Pc4A-sd tiveram o maior volume de poros nessa classe ($0.08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), o AAzApi-sd não diferiu dos demais e o menor valor foi para o APoAsp-cr ($0.03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Na segunda época, todos sistemas pastejados foram estatisticamente iguais e com valores maiores (média $0.09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) que o APoAsp-cr ($0.03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Na terceira época, não houve diferença entre os tratamentos com valores médios de $0.06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. As diferenças entre as épocas ocorreram no tratamento APoAsp-cr, que aumentou de $0.03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para $0.07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ da primeira para a última época; AAzApi-sd que aumentou da primeira ($0.05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para a segunda época ($0.08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e não diferiu na terceira época; e Pc4A-sd que aumentou da primeira ($0.08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para a segunda época ($0.11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), todavia, reduziu na terceira época e não diferenciou da primeira época.

O volume de microporos na camada de 0,10-0,20 m teve diferença entre os tratamentos nas duas primeiras épocas. Na primeira época, o APoAsp-cr ($0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e AAzApi-sd ($0.32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foram maiores que os demais ($0.22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), enquanto na segunda época apenas o APoAsp-cr ($0.26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi maior que os tratamentos pastejados ($0.19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Quanto às épocas, houve diferença para o tratamento APoAsp-cr, no qual o volume de microporos foi maior nas duas primeiras épocas (0.30 e $0.26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), respectivamente, e diminuiu na última época de avaliação ($0.19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); e para o AAzApi-sd em que a microporosidade na primeira época ($0.32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi superior as demais. Os tratamentos restantes não diferiam quanto as épocas de avaliação.

Figura 7. Distribuição de tamanho de poros em três classes de diâmetro, sendo: Macroporos ($\phi > 50 \mu\text{m}$); Mesoporos ($0.5 \mu\text{m} < \phi < 50 \mu\text{m}$); e Microporos ($\phi < 0.5 \mu\text{m}$). Para o Pastejo 2018 camada 0,0-0,10 m (A) e 0,10-0,20 m (D), Colheita 2019 camada 0,0-0,10 m (B) e 0,10-0,20 m (E) e Pastejo 2019 camada 0,0-0,10 m (C) e 0,10-0,20 m (F). Para os diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).

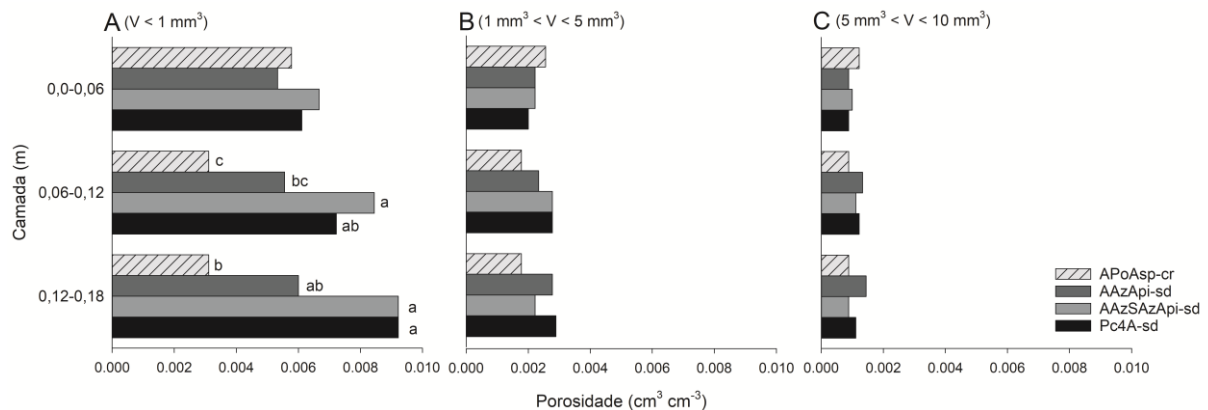


Fonte: Autor.

As classes de poros separadas por volume (TC) não diferiram quanto à época nas classes menores que 10 mm^3 . Assim, foi testado apenas o efeito simples dos tratamentos. Para a classe de poros $V < 1 \text{ mm}^3$, não houve diferença entre os tratamentos na camada superficial (0,00-0,06 m), com média de $0.006 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; na camada média (0,06-0,12 m), o sistema AAzSAzApi-sd ($0.008 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi o que apresentou maior volume de poros nessa classe, e o Pc4A-sd não diferiu, enquanto o tratamento APoAsp-cr ($0.003 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi o menor e o AAzApi-sd não diferiu do mesmo. Na camada inferior (0,12-0,18 m), o tratamento AAzSAzApi-sd foi acompanhado pelo Pc4A-sd, com os maiores volumes de poros nessa classe ($0.009 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), o AAzApi-sd não diferiu dos demais e o APoAsp-cr ($0.003 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi o menor (Figura 8A). Nas demais classes $1 \text{ mm}^3 < V < 5 \text{ mm}^3$ (Figura 8B) e $5 \text{ mm}^3 < V < 10 \text{ mm}^3$

(Figura 8C), não foram observadas diferenças entre os tratamentos em nenhuma camada, com valores médios de 0.002 e 0.001 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente.

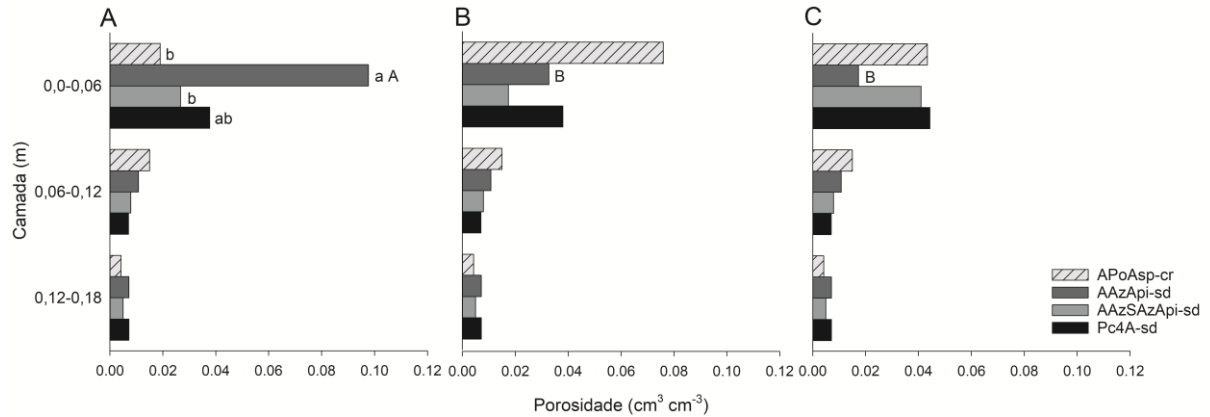
Figura 8. Classes de poros separados por volume (determinado por tomografia), onde: $V < 1 \text{ mm}^3$ (A), $1 \text{ mm}^3 < V < 5 \text{ mm}^3$ (B) e $5 \text{ mm}^3 < V < 10 \text{ mm}^3$ (C) para três camadas nos diferentes sistemas de manejo. Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).



Fonte: Autor.

Para os poros maiores que 10 mm^3 , houve pouca diferença entre os tratamentos, bem como entre as épocas. Houve diferença entre tratamentos apenas na primeira época, restrita à camada superior, onde o tratamento AAzApi-sd ($0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi maior que os demais ($0.03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (Figura 9A). Quanto às diferenças entre as épocas, ocorreu apenas para o AAzApi-sd na camada superior, em que a primeira época foi maior que as demais, e evidenciou uma redução de 80% da primeira ($0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para a última época ($0.02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Para todas as outras épocas e camadas não houve diferenças; todavia, é importante destacar a discrepância entre as camadas mais profundas (média e inferior) e a camada superficial (superior), pois o volume de poros para esta classe é maior em superfície (Figura 9).

Figura 9. Classe de poros separados por volume (determinado por tomografia), $V > 10 \text{ mm}^3$ para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para três camadas nos diferentes sistemas de manejo. Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).

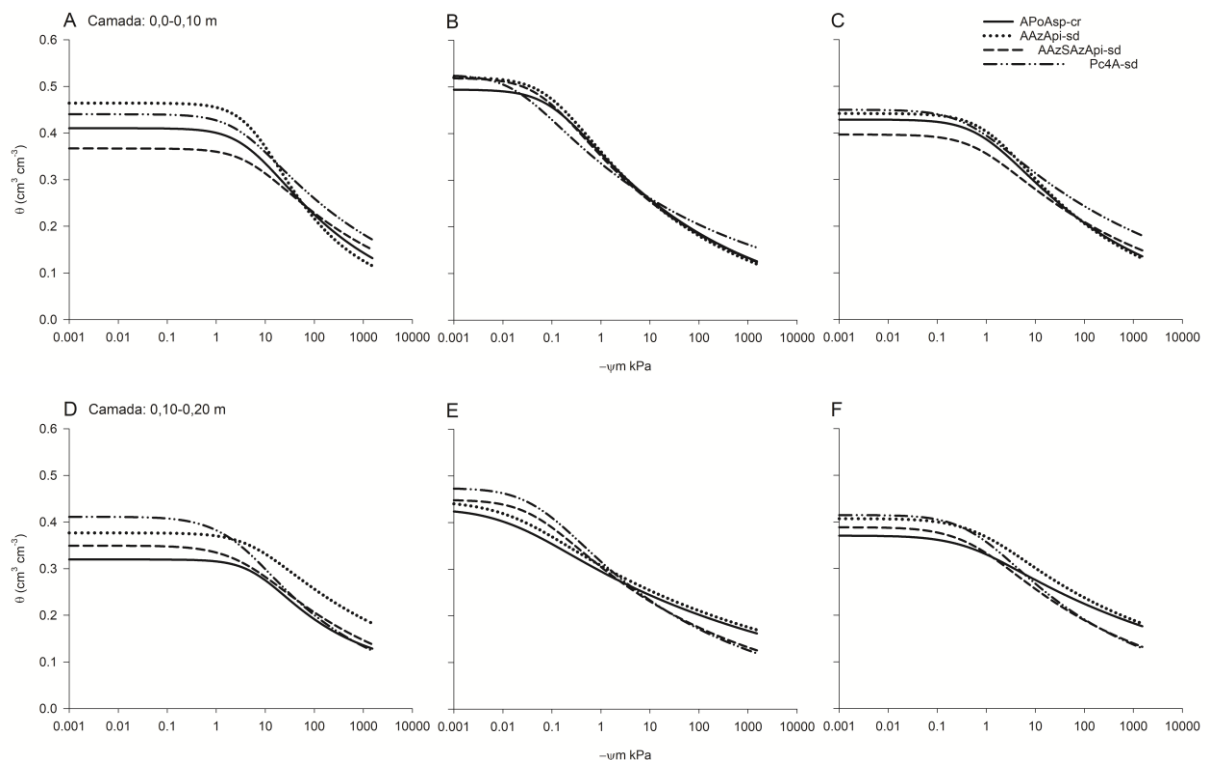


Fonte: Autor.

7.3 RETENÇÃO DE ÁGUA

As curvas de retenção de água (CRA) têm comportamento diferenciado entre as épocas de coleta. Nas coletas de inverno, as curvas iniciam com menor θ , e mantém este conteúdo de água até valores entre -1 a -10 kPa de potencial matricial, com redução rápida do θ após esses potenciais (Figura 10 A, C, D e F). Na segunda época, as curvas tendem a partir de valores maiores de θ e manterem uma redução mais linear do conteúdo de água com a diminuição do potencial matricial (Figura 10 B e E). Esse fenômeno é observado em ambas as camadas avaliadas. Contudo, para a camada subsuperficial, há uma redução dos valores de θ próximos à saturação, em relação à camada superficial.

Figura 10. Curvas de Retenção de Água no Solo, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para a camada de solo de 0,0-0,10 m e Pastejo 2018 (D), Colheita 2019 (E) e Pastejo 2019 (F) para a camada de solo de 0,10-0,20 m, nos diferentes sistemas de manejo.



Fonte: Autor.

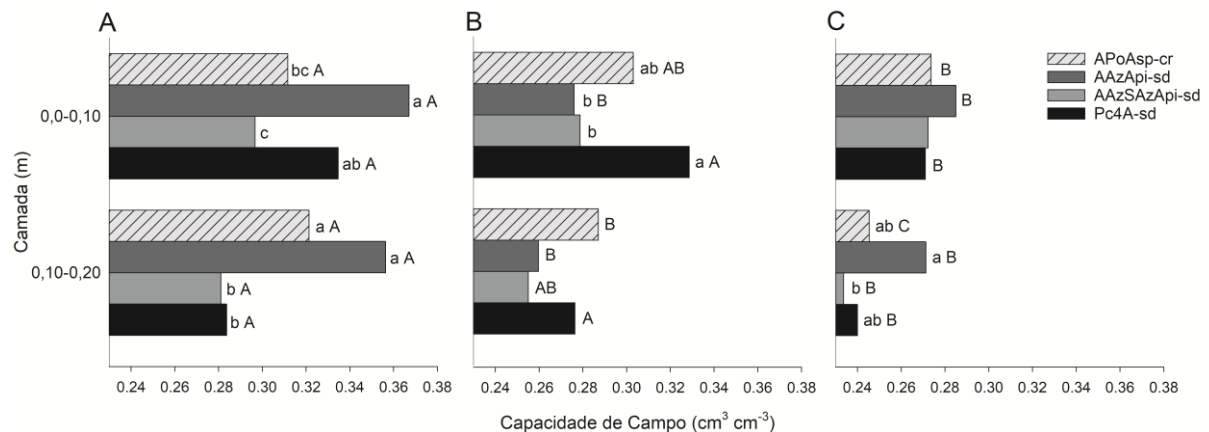
As curvas para os tratamentos, de maneira geral, tiveram o mesmo comportamento descrito acima, com diferenças nos valores de θ na saturação, que é equivalente à Pt, capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD). As diferenças entre os tratamentos quanto à Pt já foram descritas anteriormente, e os demais parâmetros extraídos da CRA serão descritos a seguir.

Para a CC na camada superficial, os tratamentos AAzApi-sd ($0.37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e Pc4A-sd ($0.33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) apresentam os maiores valores na primeira época de avaliação, seguidos por APoAsp-cr ($0.31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e AAzSAzApi-sd ($0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Na segunda época, apenas o Pc4A-sd ($0.33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) destacou-se dos demais com o maior conteúdo de água na CC, e não diferiu do APoAsp-cr, enquanto AAzApi-sd e AAzSAzApi-sd tiveram os menores valores ($0.28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Na terceira época, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Para a camada subsuperficial, houve diferença entre os sistemas na primeira e terceira época de avaliação. Na primeira época, os tratamentos APoAsp-cr ($0.32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e AAzApi-sd ($0.36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) destacam-se com a maior retenção de água na CC em relação aos demais ($0.28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); na terceira época, o AAzApi-sd ($0.27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi o maior, e não diferiu dos tratamentos

APoAsp-cr e Pc4A-sd, enquanto o menor valor foi observado no tratamento AAzSAzApi-sd ($0.23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (Figura 11).

Figura 11. Capacidade de campo para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as duas camadas nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).



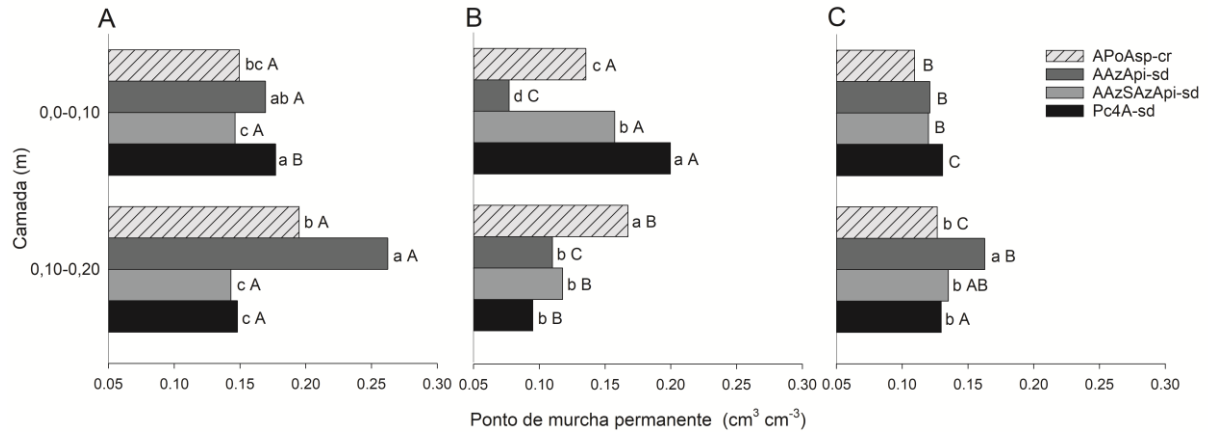
Fonte: Autor.

Em relação as épocas de avaliação, houve uma ligeira de diminuição da CC ao longo do tempo, onde a primeira época possui os maiores valores, a segunda com CC intermediária ou mesmo não difere das demais, e menor CC é observada na terceira época de avaliação (Figura 11). O percentual de redução da primeira para a última época entre os tratamentos na camada 0,0-0,10 m foi APoAsp-cr (12%), AAzApi-sd (22%) e Pc4A-sd (19%); o tratamento AAzSAzApi-sd não variou em função das épocas para essa camada. O percentual de redução da primeira para a última época entre os tratamentos na camada 0,10-0,20 m foi APoAsp-cr (24%), AAzApi-sd (24%), AAzSAzApi-sd (17%) e Pc4A-sd (15%).

O ponto de murcha permanente (PMP) teve grande variação entre tratamentos, épocas e camadas. Na camada superficial houve diferença entre os tratamentos nas duas primeiras épocas, onde em ambas o maior PMP ocorreu no tratamento Pc4A-sd na primeira ($0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e na segunda época ($0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), e os menores valores nos tratamentos AAzSAzApi-sd ($0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e AAzApi-sd ($0.08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) na primeira e segunda época, respectivamente. Para a camada subsuperficial, o tratamento AAzApi-sd foi maior em relação aos demais na primeira ($0.26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e terceira época ($0.16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), e o APoAsp-cr ($0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) na segunda época (Figura 12).

Figura 12. Ponto de murcha permanente para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as duas camadas nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).



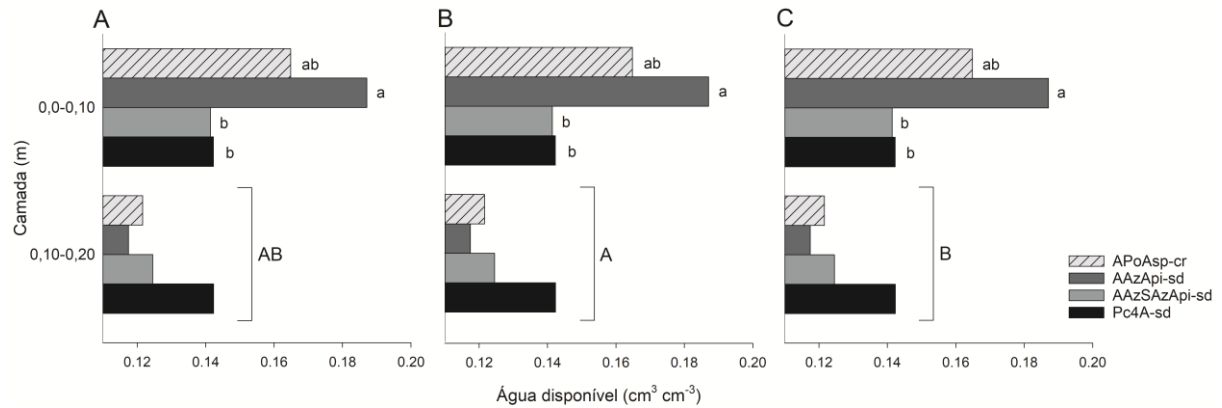
Fonte: Autor.

Quanto à variação da retenção de água no PMP ao longo do tempo, na camada superficial, APoAsp-cr e AAzSAzApi-sd não variam nas duas primeiras épocas com valores próximos a $0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, e ambos reduziram cerca de 20% na terceira época ($0.12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). O AAzApi-sd teve o maior valor na primeira época ($0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), reduziu ao menor valor na segunda época ($0.08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e voltou a aumentar na terceira época ($0.12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), mas ainda inferior ao PMP da primeira época. O Pc4A-sd teve um aumento de 0.18 para $0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ da primeira para a segunda época, e teve o menor valor na terceira época de avaliação ($0.13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Na camada subsuperficial, o APoAsp-cr reduziu o PMP da primeira para a segunda época (de 0.20 para $0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), e da segunda para a terceira época (de 0.17 para $0.13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), enquanto os demais tratamentos tiveram uma redução da primeira para a segunda época e aumentaram seus valores na última época. Contudo, o AAzApi-sd embora tenha aumentado o PMP na última época ($0.16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) em relação à segunda ($0.11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), foi significativamente menor que o valor na primeira época ($0.26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (Figura 12).

A água disponível (AD) não diferiu quanto às épocas da avaliação na camada superficial, e não variou entre tratamentos na camada subsuperficial. Na camada superficial, o tratamento AAzApi-sd possui o maior valor de AD ($0.19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) entre os sistemas, e os tratamentos AAzSAzApi-sd e Pc4A-sd os menores valores ($0.14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), enquanto APoAsp-cr ($0.16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) não diferiu dos demais. Na camada subsuperficial, os sistemas permanecerem estatisticamente iguais em todas as épocas com valor médio de AD de $0.13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Quanto às épocas, na segunda época de avaliação foram observados os maiores valores de AD e os menores na terceira época, a primeira época não diferiu das demais (Figura 13).

Figura 13. Água disponível para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as duas camadas nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).

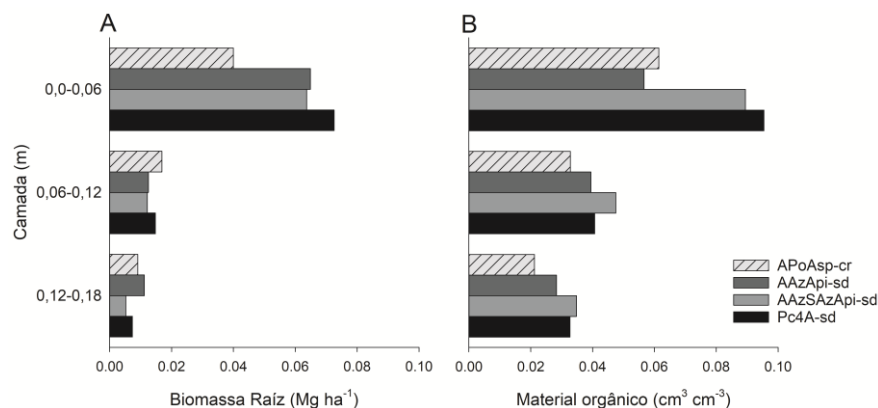


Fonte: Autor.

7.4 RAÍZES E MATERIAL ORGÂNICO

O material orgânico, determinado tanto diretamente quanto por tomografia, não apresentou diferença entre os tratamentos em nenhuma das camadas amostradas. Também não houve diferença entre as épocas (Figura 14). Mesmo não havendo diferença, é importante destacar a similaridade dos resultados entre os métodos de determinação de material orgânico, além do destaque para os valores maiores em superfície, com uma redução gradativa em profundidade.

Figura 14. Biomassa Radicular (A) e Material orgânico (B) para três camadas nos diferentes sistemas de manejo. Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).



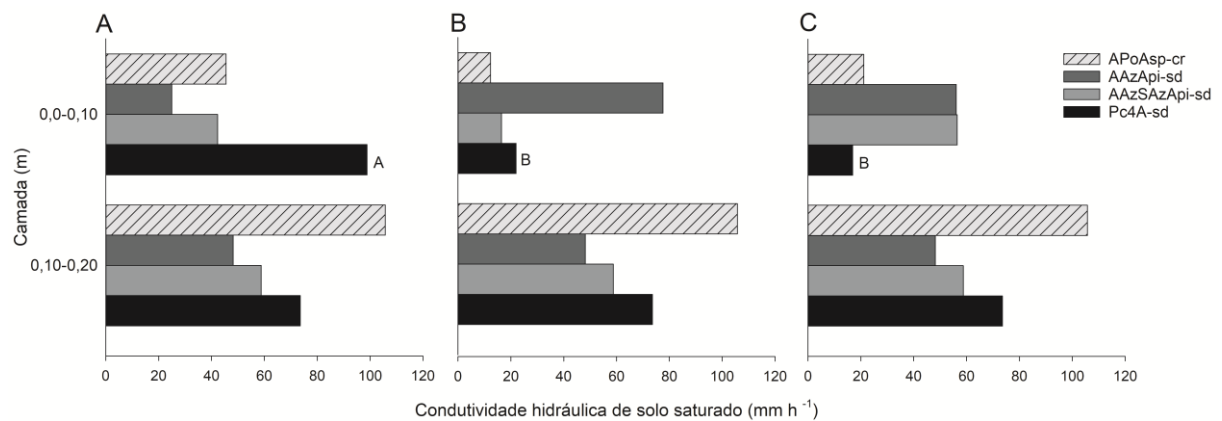
Fonte: Autor.

7.5 PROPRIEDADES DINÂMICAS DE FLUXO

A condutividade hidráulica de solo saturado (K_s) não teve diferença entre os tratamentos em nenhuma das camadas, e as médias dos valores foram de aproximadamente 53, 32 e 38 mm h^{-1} na camada superficial para primeira, segunda e terceira época respectivamente, e 70 mm h^{-1} na camada subsuperficial para todas as épocas. Somente o tratamento Pc4A-sd variou em função das épocas de avaliação na camada superficial, sendo os valores da primeira época (99 mm h^{-1}) maiores em relação a segunda (22 mm h^{-1}) e terceira (17 mm h^{-1}), o que representou uma redução de cerca de 82% ao longo das épocas (Figura 15).

Figura 15. Condutividade hidráulica de solo saturado para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as duas camadas nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).

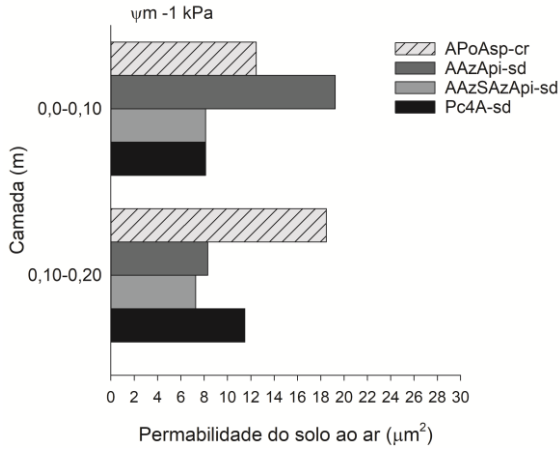


Fonte: Autor.

A permeabilidade do solo ao ar ($\Psi_m -1 \text{ kPa}$) não variou entre os tratamentos e épocas em nenhuma das camadas avaliadas, com valores baixos em ambas. Valores médios de 12 μm^2 para a camada superficial e 11 μm^2 para a camada subsuperficial e (Figura 16).

Figura 16. Permeabilidade do solo ao ar ($\Psi_m -1$ kPa) para as duas camadas do solo, nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).

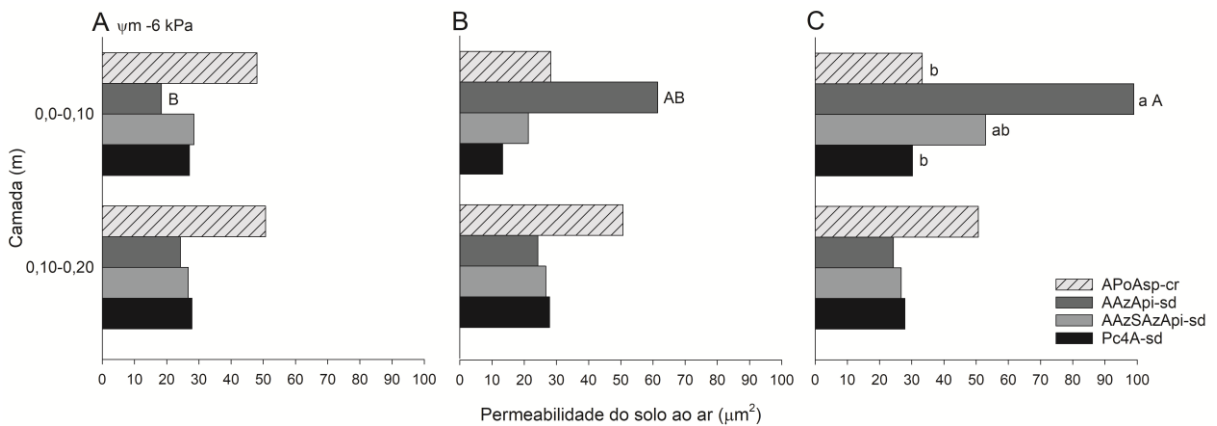


Fonte: Autor.

A permeabilidade do solo ao ar ($\Psi_m -6$ kPa) diferiu entre os tratamentos apenas na última época de avaliação e na camada superficial, onde o AAzApi-sd ($99 \mu m^2$) foi o maior, enquanto os menores valores foram observados nos sistemas APoAsp-cr ($33 \mu m^2$) e Pc4A-sd ($30 \mu m^2$), o AAzSAzApi-sd ($53 \mu m^2$) não diferiu dos demais (Figura 17C). A Ka em função das épocas variou apenas no AAzApi-sd, com uma tendência clara de aumento ao longo do tempo, com acréscimo da primeira época ($18 \mu m^2$) para a segunda ($61 \mu m^2$), da segunda para a terceira ($99 \mu m^2$) (Figura 17).

Figura 17. Permeabilidade do solo ao ar ($\Psi_m -6$ kPa) para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as duas camadas nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).

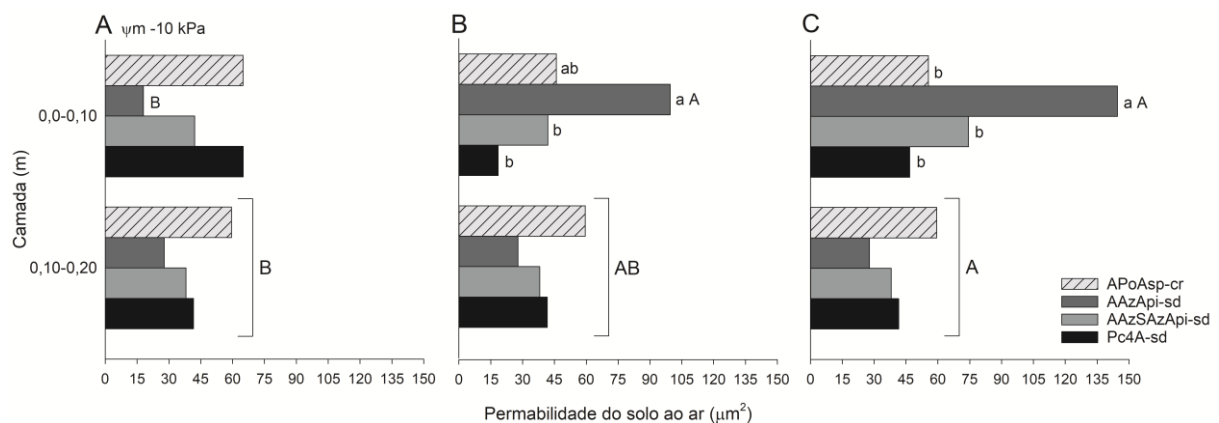


Fonte: Autor.

A permeabilidade do solo ao ar ($\Psi_m -10$ kPa) diferiu significativamente para os tratamentos nas duas últimas épocas de coleta na camada superficial, ambas com destaque positivo para o tratamento AAzApi-sd. Na segunda época, o valor de Ka foi de $100 \mu\text{m}^2$, maior que o Pc4A-sd ($18 \mu\text{m}^2$) e que o AAzSAzApi-sd ($42 \mu\text{m}^2$), o tratamento APoAsp-cr ($46 \mu\text{m}^2$) não diferiu dos demais (Figura 18 B). Na terceira época valor de Ka foi de $145 \mu\text{m}^2$, maior que o Pc4A-sd ($47 \mu\text{m}^2$), APoAsp-cr ($56 \mu\text{m}^2$) e AAzSAzApi-sd ($74 \mu\text{m}^2$) (Figura 18 C).

Apenas o AAzApi-sd variou entre épocas, com tendência de aumento ao longo das épocas de avaliação, com acréscimo da Ka da primeira ($18 \mu\text{m}^2$) para a segunda ($100 \mu\text{m}^2$) e terceira época ($145 \mu\text{m}^2$). Na camada subsuperficial também é observada de maneira geral uma tendência de aumento da Ka ao longo das épocas de avaliação (Figura 18).

Figura 18. Permeabilidade do solo ao ar ($\Psi_m -10$ kPa) para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as duas camadas do solo, nos diferentes sistemas de manejo. Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).



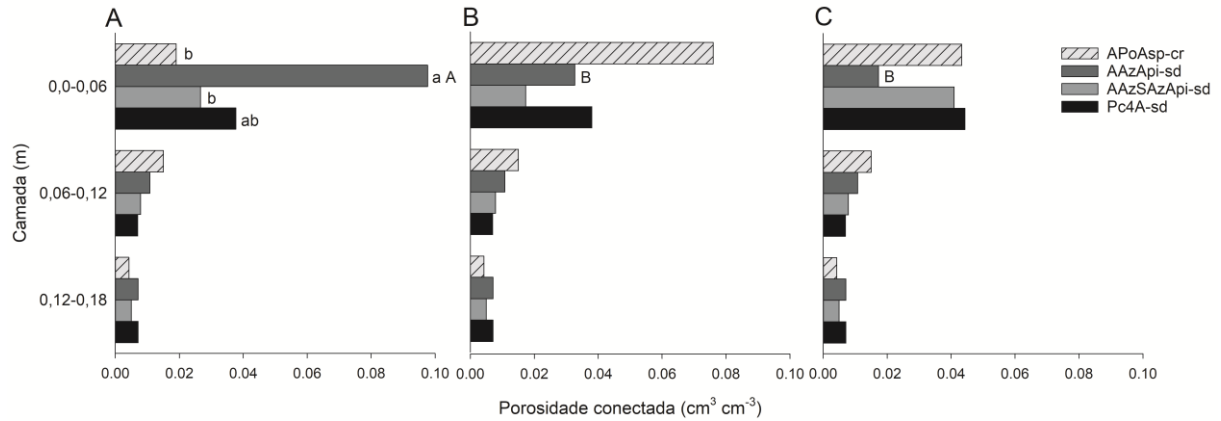
Fonte: Autor.

7.6 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA E CONECTIVIDADE DE POROS

A porosidade conectada do solo variou de maneira significativa entre os sistemas apenas na camada superior na primeira época de coleta, em que o AAzApi-sd foi maior do que APoAsp-cr e AAzSAzApi-sd, enquanto o Pc4A-sd não diferiu dos demais sistemas (Figura 19 A). Em relação às épocas de coleta, apenas o AAzApi-sd variou, onde a primeira época teve o maior volume de poros conectados (Figura 19), com uma concentração alta de poros contínuos na superfície.

Figura 19. Porosidade do solo conectada, para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as três camadas do solo, nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).

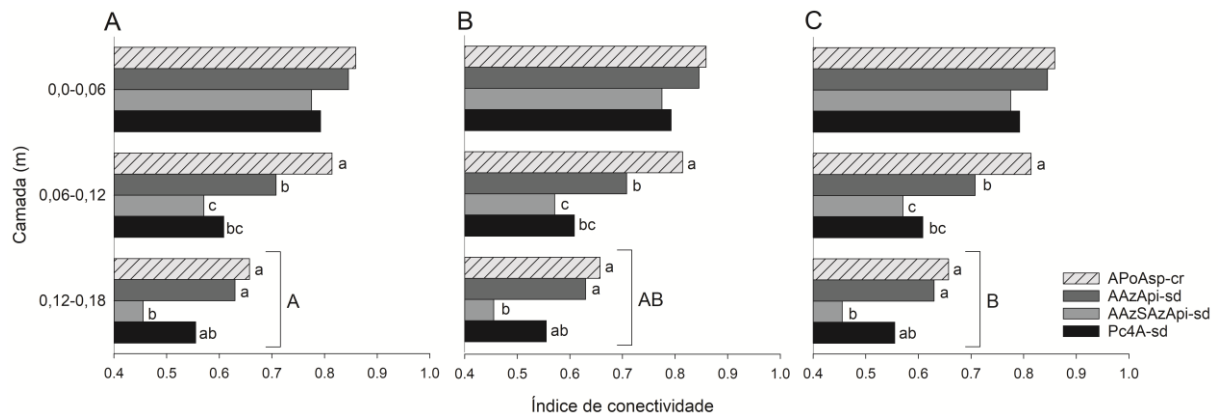


Fonte: Autor.

O índice de continuidade dos poros variou entre os tratamentos apenas nas duas camadas mais profundas. Na camada intermediária (0,06-0,12 m), os tratamentos tiveram o mesmo comportamento independente da época: APoAsp-cr > AAzApi-sd > AAzSAzApi-sd; o Pc4A-sd foi menor que o APoAsp-cr e não diferiu dos demais. Na camada inferior (0,12-0,18 m), APoAsp-cr e AAzApi-sd foram maiores do que o AAzSAzApi-sd, enquanto o Pc4A-sd não diferiu dos demais. Em relação às épocas, há uma tendência geral de redução ao longo do tempo na camada mais profunda (Figura 20).

Figura 20. Índice de conectividade, para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as três camadas do solo, nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).

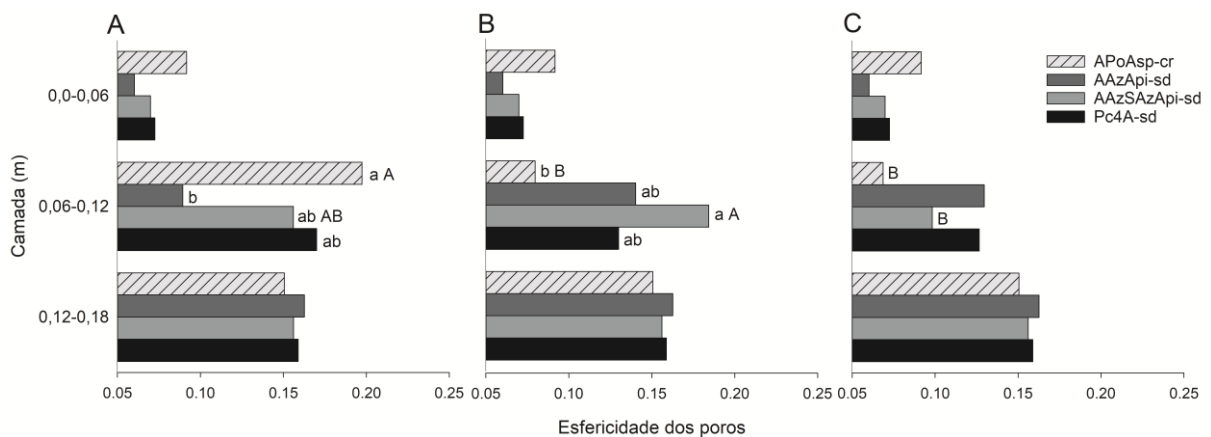


Fonte: Autor.

A esfericidade dos poros foi afetada pelos tratamentos apenas na camada superior e nas duas primeiras épocas. Na primeira época, o APoAsp-cr foi maior do que o AAzApi-sd e os demais não diferiram entre si; na segunda época, AAzSAzApi-sd apresentou a maior esfericidade dos poros e o APoAsp-cr a menor, e os demais não diferiram entre si. Nas épocas também houve variação apenas na camada intermediária, onde o APoAsp-cr foi maior na primeira época, o AAzSAzApi-sd na segunda e, em ambos os casos, os valores mais baixos foram observados na última época (Figura 21).

Figura 21. Esfericidade dos poros, para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as três camadas do solo, nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).

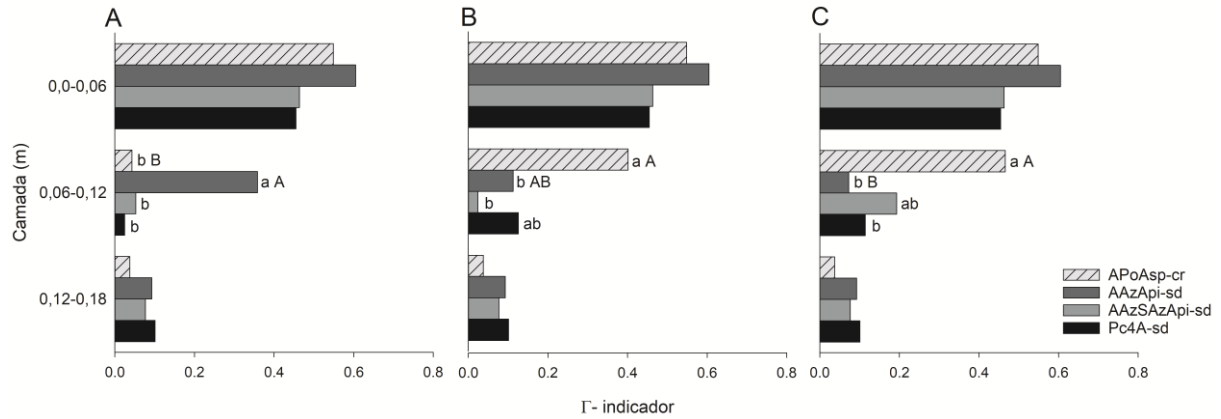


Fonte: Autor.

O Γ – Indicador diferiu entre os tratamentos e épocas somente na camada intermediária. Na primeira época, o AAzApi-sd foi maior que os demais (Figura 22A); na segunda, o maior valor foi para a APoAsp-cr e os menores valores foram para os tratamentos AAzApi-sd e AAzSAzApi-sd, enquanto o Pc4A-sd não diferiu dos demais (Figura 22B); na terceira época de avaliação, novamente o maior valor foi no tratamento APoAsp-cr, mas os menores valores foram para AAzApi-sd e Pc4A-sd, e o AAzSAzApi-sd não diferiu dos demais (Figura 22C). Quanto à diferença entre os tratamentos em função da época, APoAsp-cr teve um aumento ao longo das avaliações e foi maior nas duas últimas épocas, o AAzApi-sd, por sua vez, reduziu ao longo das avaliações com menor valor para a última época (Figura 22).

Figura 22. Γ – Indicador, para o Pastejo 2018 (A), Colheita 2019 (B) e Pastejo 2019 (C) para as três camadas do solo, nos diferentes sistemas de manejo.

Médias seguidas por letras minúsculas (comparação entre sistemas) e letras maiúsculas (comparação entre épocas de coleta) diferem pelo teste de Tukey ($\alpha=0.05$) e, quando as letras não aparecem, não há diferença significativa (Tukey $\alpha=0.05$).



Fonte: Autor.

8 DISCUSSÃO

8.1 POROSIDADE E COMPACTAÇÃO DO SOLO

Os resultados obtidos no nosso estudo destoam dos observados na maioria dos estudos que comparam sistemas com pastejo animal em diferentes tipos de solo. Ou seja, esperava-se aumento da densidade e, conseqüentemente a redução da porosidade do solo, sobretudo nas camadas superficiais devido ao impacto do pisoteio (DE ANDRADE BONETTI *et al.*, 2019; NEGRÓN; LÓPEZ; DÖRNER, 2019). Um primeiro fator importante a se considerar é a granulometria do solo em estudo, com altos teores de areia e silte, o que já o torna menos suscetível à compactação quando comparado a solos com maiores teores de argila, devido à menor interação interpartículas e entre as partículas e a água (REICHERT *et al.*, 2018). Para o solo sob o sistema semidireto, ou seja, com revolvimento, é possível que uma menor densidade do solo em superfície esteja relacionada à descompactação que ocorre após o revolvimento do solo, pelo menos logo após essa operação. Neste estudo, em todas as épocas, a camada superficial do solo no tratamento APoAsp-cr teve menor Ds e maior Pt em relação à camada subsuperficial.

Porém, os tratamentos com pastejo não tiveram nenhum aumento significativo da Ds em relação ao APoAsp-cr, em termos de valores, e os tratamentos AAzApi-sd e Pc4A-sd frequentemente estiveram abaixo. A priori, pode-se concluir que, para este sistema de produção

nesse tipo de solo, operações de revolvimento visando reduzir a Ds não se justificam. Para se compreender a dinâmica do sistema é necessário conhecer a complexidade do mesmo e os fatores que o compõe. Mesmo que os tratamentos AAzApi-sd, AAzSAzApi-sd e Pc4A-sd sejam pastejados e sofram o impacto do pisoteio animal, há um manejo de plantas de cobertura, e um fator reconhecidamente capaz de mitigar os efeitos nocivos da compactação é a cobertura viva ou morta do solo (PÖHLITZ *et al.*, 2018; VASQUES *et al.*, 2019).

Dentre os sistemas pastejados, o AAzSAzApi-sd foi o que teve a maior Ds e menor Pt em superfície, o que pode indicar que ele tenha sido influenciado negativamente pelo pisoteio dos animais. Uma possibilidade, para que isso se justifique, é que em uma das estações esse tratamento é cultivado com soja, leguminosa com baixo crescimento de raízes e aporte de fitomassa com baixa relação C:N, com menor cobertura da superfície o que pode ter levado à menor proteção da camada superficial do solo (BRAIDA *et al.*, 2006; HOLTHUSEN *et al.*, 2018; REICHERT *et al.*, 2016a). Contudo, essa menor Ds é significativa apenas se comparado ao Pc4A-sd, enquanto em comparação com os demais tratamentos não há diferença; portanto, grande parte dessa diferença também deve-se ao fato do Pc4A-sd ter baixa Ds em superfície. A Pt foi menor em relação aos demais sistemas pastejados, indicando que AAzApi-sd e Pc4A-sd são de fato diferentes em termos de estrutura na camada superficial.

Os sistemas AAzApi-sd e Pc4A-sd possuem uma característica em comum em relação à cobertura do solo, feita majoritariamente por espécies gramíneas, sobretudo no AAzApi-sd que é uma sucessão de arroz-azevém, enquanto o Pc4A-sd recebe algumas espécies leguminosas no consórcio de pastagem, mas a maioria das espécies cultivadas são gramíneas. As gramíneas possuem uma capacidade de produção de biomassa superior às leguminosas, tanto em termos de parte aérea quanto de raiz, e sua decomposição é mais lenta devido à relação C:N do material orgânico (GREGORUTTI; CAVIGLIA, 2019; MATHEW *et al.*, 2020). Assim, a produção intensa de biomassa e proteção física da cobertura nesses dois tratamentos são fatores preponderantes para os menores valores de densidade e maior porosidade, principalmente na camada superficial do solo, com destaque para o Pc4A-sd. Este sistema, mesmo pastejado continuamente no inverno e verão, possui menores valores de Ds e maior porosidade entre todos os tratamentos, possivelmente pelo estímulo ao perfilhamento e emissão de novas raízes gerado pelo pastejo (ANGHINONI *et al.*, 2013), e o consórcio de leguminosas e gramíneas no inverno pode aumentar o teor de C orgânico (LI *et al.*, 2016).

A Pt, como esperado, possui relação inversa com a Ds; no entanto, a magnitude com que uma propriedade age sobre a outra é diferente entre os tratamentos. Mesmo não havendo

muita variação para a D_s entre os tratamentos em ambas as camadas, principalmente na última época de avaliação, a P_t revelou que os tratamentos pastejados foram iguais ou mesmo superiores ao tratamento com revolvimento quanto ao volume total de poros, com destaque maior para AAzApi-sd e, principalmente, Pc4A-sd. Isso deixa evidente que o SIPA foi eficiente na manutenção da porosidade quando comparado ao sistema semidireto e, nesse caso, o revolvimento do solo como estratégia para melhorar a sua estrutura física não se justificaria.

A porosidade determinada por tomografia (P), neste estudo, abrange principalmente a faixa da macroporosidade; portanto, os resultados entre P_t e P são pouco semelhantes com ainda menos variação entre os tratamentos. De maneira geral, o que pode ser destacado são os valores baixos, característicos deste tipo de solo de textura franca com baixa macroporosidade (DA SILVA *et al.*, 2019; PINTO, LUIZ; PAULETTO, ELOY; NETO, 2004). Entre as camadas, destacam-se os maiores valores em superfície, em praticamente todas as épocas, o que no sistema semidireto possivelmente esteja ligado ao revolvimento periódico e incorporação de material orgânico (SCHLÜTER *et al.*, 2018), e nos sistemas com pastejo tenha relação direta com a maior quantidade de raízes e material orgânico nessa camada (HAO *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2020).

A maior estratificação das camadas na avaliação tomográfica expõe, de maneira mais evidente, a diferença de comportamento do solo de Terras Baixas quanto à suscetibilidade à compactação superficial em relação aos SIPA em Terras Altas. Os solos de textura franca naturalmente apresentam baixa macroporosidade e a baixa coesão entre partículas pode o tornar suscetível ao adensamento, podendo alcançar valores críticos de D_s para o desenvolvimento de plantas (PÖHLITZ *et al.*, 2020). No entanto, essa menor coesão entre as partículas do solo quando aliada ao intenso aporte de material orgânico e desenvolvimento radicular das plantas, favoreceu o aumento da P em superfície nos sistemas pastejados, tornando-os semelhantes ao APoAsp-cr ou mesmo superiores no caso do AAzApi-sd na primeira época.

Os sistemas aqui estudados possuem uma tendência geral de aumento da densidade e redução da porosidade ao longo do tempo, diferentemente do que ocorre em solos mais argilosos e de Terras Altas onde após um ciclo de cultivo pode ser percebida regeneração das propriedades do solo (AMBUS *et al.*, 2018; FERNÁNDEZ; ALVAREZ; TABOADA, 2015; VEIGA *et al.*, 2016). Os solos de textura franca de Terras Baixas são mais sensíveis a perturbações, e a estabilidade da sua estrutura é dependente da matéria orgânica devido à baixa reatividade da areia (ŠIMANSKÝ *et al.*, 2019). Esse comportamento indica um rearranjo e acomodação das partículas que gera o adensamento do solo (HUANG; HARTEMINK, 2020).

Por se tratar de um experimento recente que se encontra no segundo ciclo de rotações, o solo segue se acomodando e os tratamentos com menor perturbação já demonstra que o manejo conservacionista e as plantas de cobertura estão agindo na manutenção e melhoria da qualidade física do solo. Em contraste, o tratamento com revolvimento apresenta piora na Ds e Pt devido à constante perturbação da sua estrutura.

8.2 CLASSIFICAÇÃO DOS POROS DO SOLO

A porosidade do solo é extremamente dinâmica e a medida da sua totalidade pode não representar as suas características de funcionalidade. Portanto, usualmente os poros do solo são classificados por categorias de tamanho, com base no seu diâmetro e suas principais funções. Assim, são definidas as classes dos macroporos (Ma) ($\phi > 50 \mu\text{m}$), responsáveis pelo movimento dos gases e drenagem do excesso de água; mesoporos (Me) ($0.5 \mu\text{m} > \phi < 50 \mu\text{m}$), responsáveis por armazenar a água prontamente disponível as plantas; e microporos (Mi) ($\phi < 0.5 \mu\text{m}$), que retêm a água pouco disponível às plantas, ou seja, Ψ_m abaixo de -600 kPa (AJAYI *et al.*, 2021; PIRES *et al.*, 2017).

O solo de Terras Baixas deste estudo possui uma predominância de poros de diâmetro menor que $50 \mu\text{m}$, cerca de 70% da Pt, independente da camada e manejo adotado, o que possivelmente tenha relação com a textura franca predominante nos solos da planície costeira do Sul do Brasil e que confere a eles alta relação microporos/macroporos (DA SILVA *et al.*, 2019; PINTO, LUIZ; PAULETTO, ELOY; NETO, 2004). Desse modo, a Ma é baixa em ambas as camadas, principalmente na camada subsuperficial com valor próximos aos considerados críticos para uma boa aeração e desenvolvimento das plantas (REICHERT *et al.*, 2007), sobretudo para o tratamento com revolvimento do solo que, além de possuir valores de Ma baixos, não teve alteração ao longo do tempo, o que demonstra que o revolvimento não foi capaz de reduzir o adensamento do solo. Além disso, a Ma igual entre todos os tratamentos na superfície indica que, nos tratamentos pastejados, o pisoteio animal não foi capaz de compactar o solo e reduzir a Ma, principal classe de poros afetada pela compactação superficial (BILSON; UGARTE, 2021; DE ANDRADE BONETTI *et al.*, 2019; NEGRÓN; LÓPEZ; DÖRNER, 2019).

Além de não demonstrar efeito negativo em comparação ao sistema revolvido, os tratamentos pastejados AAzSAzApi-sd e Pc4A-sd tiveram aumento da Ma ao longo do tempo

na camada de 0.10-0.20 m, chegando a valores maiores que $0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ similares à camada superficial e considerados acima do limite crítico ao desenvolvimento de plantas (REICHERT *et al.*, 2007), isso demonstra que, além de não sofrerem com o pisoteio dos animais, o efeito do desenvolvimento das raízes melhorou a estrutura do solo na camada subsuperficial, e fornecem uma melhor condição de aeração do solo, principalmente para as culturas pouco adaptadas a condição de encharcamento.

Todos os tratamentos pastejados tiveram algum destaque na distribuição de tamanho de poros, seja pela manutenção ou aumento da macro ou mesoporosidade. Visto que os dados sugerem que a M_i reduziu ao longo do tempo em todos os tratamentos e não houve diferença entre eles na última época, os sistemas com aumento no volume de poros maiores nesse período apresentam, provavelmente, um processo de inversão da M_i em M_e e M_a , o que é comum em sistemas conservacionistas com rotação de culturas e produção intensa de biomassa (GAO *et al.*, 2019a). Solos estruturados tendem a possuir uma distribuição mais homogênea da porosidade e uma menor relação M_i/M_a (MENON *et al.*, 2020a; ZHAO; HU; LI, 2020). Assim, há uma tendência de que os tratamentos nos quais o manejo conservacionista e o pastejo animal foram adotados propiciem o aumento do diâmetro dos poros. Em contraste, no sistema com revolvimento não há um padrão da DTP, justamente pela constante perturbação. Em sistemas sem revolvimento, o crescimento de raízes e a atividade biológica tendem a aumentar o volume dos poros maiores, com o desenvolvimento de bioporos (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004; LUCAS *et al.*, 2019). Por outro lado, as sucessivas perturbações geradas pelo preparo do solo acarretam em aumento do volume de poros pequenos, devido à desestruturação e compressão do solo.

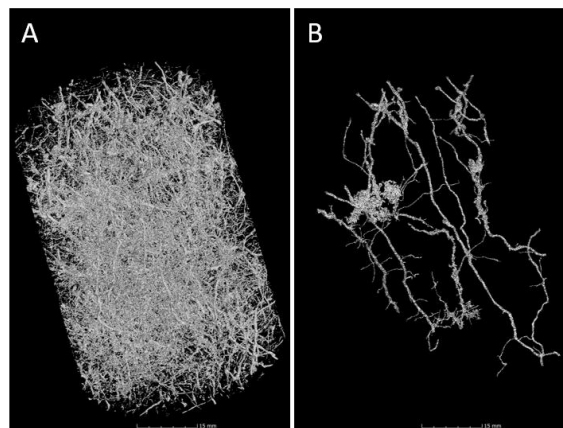
Solos arenosos são de estrutura extremamente delicada e sensíveis ao manejo, sobretudo ao revolvimento, e o processo de agregação é lento e muito dependente da MO estabilizada (ŠIMANSKÝ *et al.*, 2019). Assim, acredita-se que o balanço adequado da DTP que forneça as condições para o melhor desenvolvimento das plantas esteja fortemente associado ao material orgânico incorporado ao solo, principalmente pelas raízes nos sistemas pastejados, visto que a microporosidade está ligada à condição textural. Portanto, para esta condição de solo, é imprescindível que o manejo adotado propicie o desenvolvimento de raízes para se alcançar uma porosidade adequada.

Assim como a P_t não expressa a complexidade da porosidade do solo, a separação dos poros por categorias de diâmetro, embora já carregue informações importantes quanto à sua funcionalidade, não leva em consideração as características dos poros, pois as classes são

definidas de forma arbitrária. Isso pode criar uma imagem distorcida de que um poro do solo é um volume esférico e isolado de determinado diâmetro, quando, na realidade, a porosidade do solo é uma complexa rede de espaços vazios, por vezes interligados, e um poro é um contínuo que possui diversas formas e diâmetros.

Fazendo o uso da tomografia computadorizada de raio X em nosso estudo, foi possível acessar características do sistema poroso do solo, que não são possíveis por meio de determinações clássicas, mostrando-se uma ferramenta importante para a descrição mais detalhada da estrutura e arquitetura dos poros (FENG *et al.*, 2019; PIRES *et al.*, 2020; VOGEL, 2008). Com a geração de imagens tridimensionais, é possível visualizar a rede de poros e compreender, de forma mais clara, a dinamicidade dessa propriedade do solo. Na Figura 23 podemos visualizar uma amostra de solo onde é apresentada a porosidade total versus um único poro totalmente interligado que ocupa praticamente todas as regiões da amostra e possui diversos diâmetros.

Figura 23. Imagem tridimensional dos poros totais (A), imagem tridimensional de um único poro conectado (B) (tratamento AAzApi-sd camada 0.0-0.10 m). Dimensões da amostra: Aproximadamente 50 mm de diâmetro e 60 mm de altura.



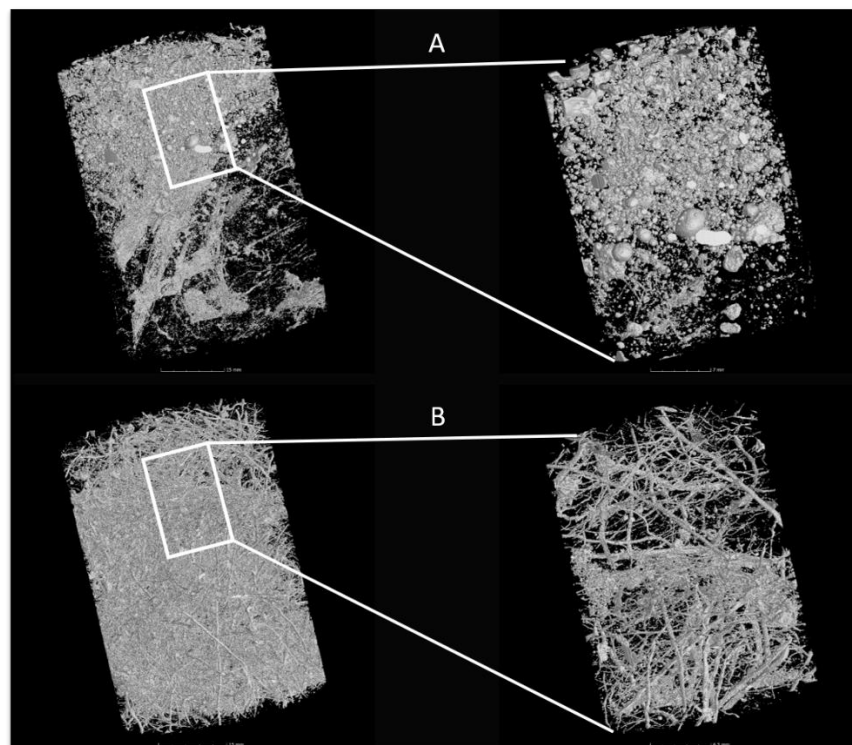
Fonte: Autor.

Considerando que o poro é um contínuo e seu diâmetro irá variar de acordo com seu comprimento e ramificações, uma outra abordagem para classificar os poros pode ser estabelecida, que considere o volume ocupado pelo poro (ZHAO; HU; LI, 2020). Poros de grande diâmetro e muitas ramificações ocupam um grande volume dentro da amostra, e participam de forma mais intensa na dinâmica dos processos. Por outro lado, poros pequenos e isolados tendem a representar pouco da porosidade; portanto, a separação por volume pode ser uma estratégia interessante para verificar a existência de poros interligados. Em nosso estudo, houve uma predominância de poros na classe $V > 10 \text{ mm}^3$, com valores podendo exceder em

até 10x os observados nas classes de menor volume. Isso indica que, para este estudo, a maior parte da macroporosidade é composta por poros grandes e/ou conectados.

Desse modo, é necessária a separação entre poros de grande volume e baixa conectividade de poros ramificados e de grande volume ocupado. Isso provavelmente é o que ocorre nos tratamentos com revolvimento, nos quais existem poros grandes, porém com baixa conectividade devido à sua formação pelo rompimento da estrutura por força mecânica, diferentemente do que ocorre nos tratamentos pastejados, onde os poros são formados pela ação das raízes e pela atividade biológica (BORGES *et al.*, 2019; PIRES *et al.*, 2017). Portanto, a semelhança nos resultados de volume de macroporos entre os tratamentos é decorrente de motivos diferentes (Figura 24).

Figura 24. Imagem tridimensional dos poros na camada superficial do solo com ampliação de uma área da amostra, (A) Sistema com revolvimento (B) Sistema pastejado. Dimensões da amostra: Aproximadamente 50 mm de diâmetro e 60 mm de altura. Dimensões da área ampliada: Aproximadamente 25 mm de diâmetro e 30 mm de altura.



Fonte: Autor.

Apenas em duas classes foi possível observar variação nos tratamentos ($V < 1 \text{ mm}^3$ e $V > 10 \text{ mm}^3$), mas são diferenças muito importantes. Na classe de poros com volume $< 1 \text{ mm}^3$, os maiores volumes correspondem aos tratamentos pastejados, o que tem relação direta com a estrutura da macro e mesoporosidade desses tratamentos que, pelo grande aporte de raízes e

material orgânico, se beneficiam dos espaços deixados após a decomposição (VILLARREAL *et al.*, 2020). Isso gera uma distribuição mais homogênea da porosidade, enquanto no solo revolvido prevalecem os poros de maior volume e pouco ramificados, gerados pelo revolvimento ou associados ao material orgânico incorporado. Esses resultados revelam que, embora não haja grande diferença entre a Ma dos sistemas pastejados e do solo revolvido, a estrutura da porosidade é extremamente diferente, algo que apenas pôde ser observado com o auxílio da TC.

As raízes finas presentes nos sistemas com predomínio de gramíneas, além de ocupar os espaços vazios presentes no solo, tendem a se decompor, em locais de latitude média, de forma mais acelerada em comparação com as raízes grossas, o que altera não apenas a estrutura do solo mas também as relações bioquímicas que ocorrem no seu interior (ZHANG; WANG, 2015). Após a decomposição de uma raiz fina, o espaço ocupado por ela fica livre para que os processos bioquímicos ocorram e, principalmente, para que outra raiz cresça nesse espaço, o que torna a porosidade mais robusta a cada ciclo, pela interação entre raiz e parede do poro (HAAS; HORN, 2018).

Para a classe $V > 10 \text{ mm}^3$, a única diferença observada foi na camada superficial e na primeira época, com um destaque positivo para os tratamentos AAzApi-sd e Pc4A-sd. Esse resultado corrobora com os demais que indicam que estes tratamentos, tanto pela intensa atividade radicular das gramíneas quanto pela maior proteção gerada pelos resíduos em superfície, mantiveram ou melhoraram as propriedades físicas do solo em comparação com o APoAsp-cr e, provavelmente, possuem um maior volume de poros contínuos (BACQ-LABREUIL *et al.*, 2018). Ao longo dos ciclos de avaliação, AAzApi-sd reduziu o volume de poros $> 10 \text{ mm}^3$, possivelmente em virtude de um processo de acomodação das partículas comum em solos arenosos (HUANG; HARTEMINK, 2020), potencializada pela ação mecânica das raízes em crescimento que aproximam as partículas do solo, o que causa uma “compactação aparente”, além de ocupar os espaços obstruindo a porosidade (NGUYEN; ISHIKAWA; MURAKAMI, 2020; NI; NG, 2019).

8.3 RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

O manejo do solo é um dos principais fatores capaz de alterar a porosidade e, conseqüentemente, a disponibilidade de água (DE ANDRADE BONETTI *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2019). O efeito da alteração do espaço poroso é percebido quando analisamos as CRA das

coletas de inverno, em que o manejo com revolvimento está recentemente desestruturado pelo preparo do solo e os sistemas com gado estão sob efeito imediato do pisoteio e grande parte da porosidade é obstruída pelas raízes. Nessas condições, a retenção de água próximo à saturação é reduzida, fazendo com que as curvas iniciem em menores valores de θ em virtude da redução da macroporosidade. No verão, os valores de θ próximo à saturação são maiores, pois a decomposição dos resíduos incorporados ao solo aumenta a porosidade do solo no sistema semidireto e a descompactação natural do solo pela retirada dos animais, aliada à maior decomposição dos resíduos nesse período, fazendo com que os sistemas pastejados aumentem a porosidade devido aos espaços deixados pelas raízes em decomposição. O Pc4A-sd, que segue sendo pastejado no verão, tem o mesmo comportamento que os demais, certamente beneficiado pela decomposição e ciclagem do material orgânico que é acelerado nesse período (VILLARREAL *et al.*, 2020). Isso indica que, para este solo, a redução da porosidade pela obstrução gerada pelo crescimento radicular é mais intensa que a eventual compactação que pode ser causada pelo pisoteio dos animais.

A forma das CRA muda de uma estação para outra; porém, a água disponível praticamente não se altera em função do tempo, principalmente na camada superficial, área de maior atividade radicular das plantas e extração de água e nutrientes. Apesar da oscilação das curvas a partir do $\Psi_m -10$ kPa, a CC e o PMP variam proporcionalmente mantendo o volume de água disponível. A capacidade de retenção de água no solo está totalmente ligada ao espaço poroso e, como os dados deste estudo sugerem, a porosidade reduz em virtude do processo de acomodação das partículas, e acarreta em diminuição da CC. De acordo com a DTP, há um predomínio de poros de menor diâmetro ($\phi < 50 \mu\text{m}$) no solo deste estudo, capazes de reter a água em menores potenciais matriciais. Todavia, também há uma tendência de redução do volume de poros com $\phi < 0.5 \mu\text{m}$, motivada pela incorporação de material orgânico em todos os sistemas, o que favorece a redução do volume de água no PMP e contribui para a manutenção da água disponível.

A AD entre os pastejados foi maior no tratamento AAzApi-sd, o qual possui a maior disponibilidade de água às plantas na camada superficial, independentemente da estação de coleta. Esse comportamento corrobora com os demais resultados que indicam que sistemas com predomínio de gramíneas realmente despontam como fundamentais na garantia da qualidade estrutural e funcional do solo. Sistemas com predomínio de gramíneas com produção intensa de raízes finas são capazes de produzir uma porosidade mais homogênea, e gerar uma maior qualidade estrutural do solo (HAO *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2020).

O tratamento com revolvimento do solo não diferiu quanto a AD de nenhum dos demais sistemas. Possivelmente, esse comportamento seja reflexo da perturbação constante que ele sofre, o que aumenta o volume de poros de maior diâmetro a cada evento de mobilização. Contudo, para que as plantas consigam acessar essa água é imprescindível que os poros sejam contínuos, algo que a TC revela que não ocorre nesse sistema. Os demais sistemas pastejados tem menor AD, o que no AAzSAzApi-sd é reflexo da maior Ds e menor Pt desse tratamento, e para o Pc4A-sd possivelmente tenha relação com a alta retenção de água no PMP que pode ser atribuída ao adensamento gerado pela acomodação das partículas.

É importante fazer a diferenciação de que a qualidade estrutural do solo é uma medida qualitativa e que os parâmetros físicos devem ser usados sempre levando em consideração a complexidade do sistema solo-planta. Ou seja, propriedades físicas semelhantes não significam qualidade estrutural semelhante.

8.4 RAÍZES E MATERIAL ORGÂNICO

Para o solo deste estudo, é notória a influência que o material orgânico e a atividade radicular têm sobre a estrutura e funcionalidade do sistema poroso. Assim, a determinação da biomassa radicular é extremamente importante para se realizar inferência sobre o manejo do solo e da sua qualidade estrutural (CUI *et al.*, 2019; HAO *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019). Em nosso estudo, fizemos o uso de dois métodos de determinação do material orgânico presente no solo: o método destrutivo com a lavagem das raízes e o não destrutivo fazendo o uso da TC. Os resultados indicam que a CT foi satisfatória para descrever a quantidade de material orgânico presente nos tratamentos, com resultados semelhantes entre os métodos e correlação positiva entre os parâmetros (Tabela 2). Além disso, a existência de correlações com as propriedades físicas do solo corrobora o fato de que a determinação da biomassa radicular é extremamente importante para se descrever a qualidade estrutural do solo em sistemas agrícolas, sobretudo em solos de Terras Baixas.

Tabela 2. Correlação de Pearson para biomassa radicular (Br), material orgânico (Mo), densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt) e porosidade definida por tomografia (P). Valores seguidos por asteriscos possuem correlação significativa ($\alpha = 0.05$).

	<i>Br</i>	<i>Mo</i>	<i>Ds</i>	<i>Pt</i>	<i>P</i>
<i>Br</i>	1	0.64*	-0.41*	0.36*	0.55*
<i>Mo</i>		1	-0.28*	0.25*	0.55*
<i>Ds</i>			1	-0.98*	-0.49*
<i>Pt</i>				1	0.47*
<i>P</i>					1

Fonte: Autor.

Não foram evidenciadas diferenças entre as épocas de coleta, possivelmente pelo fato de os tratamentos terem um manejo estável há cerca de 8 anos, com uma tendência de estabilização da quantidade de material orgânico dentro de cada sistema. Além disso, a decomposição dos resíduos de um ciclo para o outro pode ser mais lenta, principalmente pelo excesso de água no solo nos meses mais chuvosos de inverno e durante o cultivo do arroz no verão, o que dificulta a atividade dos microrganismos decompositores e gera acúmulo de material orgânico (VON HADEN; DORNBUSH, 2014; WALTER, 2018). A variação entre sistemas era esperada, principalmente entre o semidireto e os demais, pois sistemas onde o solo é revolvido tendem a fragmentar e incorporar mais os materiais orgânicos, facilitando a decomposição dos mesmos pela biota edáfica e aumenta as perdas de material orgânico (YE *et al.*, 2020). Diferentemente, em sistemas sem revolvimento, a melhor estruturação do solo e a cobertura permanente aumentam a adição de material orgânico e, conseqüentemente, melhoram a saúde do solo (NUNES *et al.*, 2020). Contudo, como não houve diferença do sistema com preparo do solo para os demais, a resposta pode estar no fato de que, em Terras Baixas, a dinâmica da decomposição dos resíduos orgânicos seja diferente, devido ao regime hídrico, como ressaltado anteriormente.

Por meio da TC, observamos que o sistema com preparo do solo, mesmo com valores de densidade, porosidade e disponibilidade de água semelhantes aos sistemas com pastejo e sem revolvimento, possui uma condição de porosidade menos conectada e com maior número de poros isolados. Essa menor conectividade dos poros pode gerar dificuldades com a drenagem desse solo pelo aprisionamento da água após os frequentes eventos de encharcamento, o que leva a condições desfavoráveis para a decomposição dos resíduos. Portanto, mesmo não havendo diferenças significativas entre os sistemas para a biomassa e material orgânico, as condições de qualidade estrutural diferem, e o sistema com preparo possivelmente não fornece todas as condições para o desenvolvimento das plantas (DENARDIN *et al.*, 2019).

Em sistema de cultivo de arroz é comum que a área de principal atividade radicular concentre-se nos primeiros 10 cm de profundidade (MONDAL *et al.*, 2019). O solo deste estudo possui baixa K_s principalmente na camada subsuperficial e, como as raízes dependem de espaços livres para crescerem, pode haver alteração na arquitetura das raízes e potencializar a sua concentração em superfície (FANG *et al.*, 2019). O grande volume de raízes e material orgânico na superfície, camada de 0,0-0,06 m, auxilia no entendimento dos valores menores de D_s e maior P na camada superficial do solo, bem como a maior proteção do solo à compactação. Destaca-se para o papel preponderante do material orgânico em manter a qualidade estrutural do solo, pois mesmo o solo sob pastejo e sem revolvimento possui as propriedades físicas semelhantes ou superiores ao solo revolvido periodicamente.

8.5 PROPRIEDADES DE FLUXO DO SOLO

A K_s não diferiu entre tratamentos nas camadas avaliadas. Isso não significa que os sistemas não influenciaram o movimento de água no solo. Manejos diferentes podem gerar resultados iguais, mas há de se conhecer a gênese das variações das propriedades do solo. A camada superficial é como se fosse a “epiderme” do solo; portanto, é a primeira a absorver os resultados do manejo e tanto o pisoteio animal quanto o revolvimento do solo podem ser danosos à estrutura da porosidade do solo e, conseqüentemente, aos fluxos de água (DE ANDRADE BONETTI *et al.*, 2019; PATRA *et al.*, 2019). A K_s é extremamente dependente da quantidade e qualidade dos poros, onde, em sistemas com revolvimento, a continuidade dos poros é quebrada frequentemente pelas ações de preparo do solo e o rompimento dos agregados gera uma acomodação mais adensada das partículas, que reduz a porosidade em curto/médio prazo (KREISELMEIER *et al.*, 2020). Em sistemas pastejados o pisoteio animal pode levar à compactação do solo, principalmente na camada superficial, pela pressão causada pelos cascos dos animais (AMBUS *et al.*, 2018; VANDERBURG *et al.*, 2020). Além disso, o pisoteio também pode cisalhar a superfície, fator reconhecidamente capaz de interromper a continuidade dos poros (BERISSO *et al.*, 2013), o que pode resultar em estrutura laminar.

A alteração da estrutura da porosidade do solo, gerada pelo revolvimento, pode ser percebida pelos menores valores de K_s em superfície no tratamento APoAsp-cr, pois a ação de revolver o solo periodicamente causa a quebra da continuidade dos poros, não permitindo que desempenhem suas funções de maneira adequada. O pisoteio também é capaz de alterar a estrutura dos poros devido à compressão; assim, os valores de K_s na camada superficial para o

sistema Pc4A-sd reduziram ao longo do tempo, indicando que, por esse sistema ser pastejado continuamente, a porosidade pode estar sendo alterada negativamente e reduziu a condutividade nas duas últimas épocas. Nos sistemas pastejados, há também uma possível obstrução da porosidade pelo intenso desenvolvimento de raízes nos períodos em que os sistemas são cultivados com forrageiras, com redução do espaço útil para a translocação de água e solutos (NGUYEN; ISHIKAWA; MURAKAMI, 2020). As raízes também desenvolvem a aproximação das partículas, por ciclos diferenciados de umedecimento e secagem e liberação de compostos orgânicos transitórios na rizosfera. Se considerarmos que os solos de textura franca, como o deste estudo, tendem a possuir um menor volume de macroporos (PÖHLITZ *et al.*, 2020), pequenas alterações nos poros de maior diâmetro podem acarretar em redução da condutividade de água. Contudo, a principal alteração foi apenas para o pastejo contínuo, o que pode ser mitigado com o ajuste/redução da carga animal nesse sistema.

Os sistemas sem revolvimento e com introdução de pastagem, geralmente, conservam a estrutura do solo com uma porosidade mais contínua e conectada, devido à não perturbação, manejo da cobertura e, principalmente, intenso aporte de material orgânico proveniente de raízes (HAO *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2020). Embora a K_s não tenha indicado variação entre os tratamentos quanto à qualidade estrutural do solo, é importante destacar que, em termos de sustentabilidade e produtividade, os sistemas integrados de produção são considerados superiores ao sistema convencional de monocultivo e com revolvimento do solo (HOMANN-KEE TUI *et al.*, 2020; SARKAR *et al.*, 2020; SNEESSENS *et al.*, 2019; SZYMCZAK *et al.*, 2020). O fato de não haver diferença entre os tratamentos para uma propriedade do solo chave como o fluxo de água, sugere que o revolvimento não foi capaz de melhorar a estrutura do solo em comparação com os tratamentos pastejados; assim, a sua adoção não se justificaria.

Assim como a K_s , a K_a é uma importante variável a ser considerada na avaliação da qualidade estrutural dos solos, neste estudo ela foi determinada em diferentes Ψ_m com a intenção de explorar a relação da retenção de água no solo com a sua capacidade de permitir o movimento de gases, além de ser uma propriedade intimamente ligada a conectividade do sistema poroso (HOLTHUSEN *et al.*, 2018; MARTÍNEZ *et al.*, 2016). Os resultados indicaram não só uma superioridade de um dos sistemas pastejados em relação ao manejo com preparo, mas também evolução dessa propriedade ao longo das estações observadas. No Ψ_m -1 kPa, os sistemas não diferiam, provavelmente pelo fato da maioria dos poros estarem preenchidos por água e o espaço livre para o fluxo do ar estar reduzido (MENTGES *et al.*, 2016). Entretanto, a partir do Ψ_m -6 kPa (camada 0,0-0,10 m), o sistema pastejado AAzApi-sd passou a se destacar positivamente, o que indica uma melhor qualidade estrutural na camada superficial do solo.

A evolução da permeabilidade do solo ao ar ao longo das épocas fica evidente na determinação da K_a no Ψ_m -10 kPa, o qual é uma das tensões de água mais usadas em solos brasileiros para estimar a capacidade de campo (TUREK; DE JONG VAN LIER; ARMINDO, 2020) e capacidade de aeração. Nesse ponto, o sistema AAzApi-sd evoluiu gradativamente, e superou os demais na terceira época, o que indica que os tratamentos pastejados, embora tenham semelhanças quanto ao manejo, diferem quanto à funcionalidade do sistema poroso. A integração de animais aos sistemas agrícolas pode acarretar em compactação superficial do solo, diminuição do espaço poroso e, conseqüentemente, piora a funcionalidade do mesmo. Porém, existem formas de mitigar os efeitos nocivos do pisoteio animal, como o controle da lotação (DE FACCIO CARVALHO *et al.*, 2010; DE MORAES *et al.*, 2014) e o cultivo de forragens de alta produção de biomassa tanto de parte aérea quanto de raízes, afim de absorver e dissipar a pressão aplicada pelos animais (REICHERT *et al.*, 2016a, 2016b), e evitar que os animais tenham que se deslocar muito em busca de alimento, aumentando a compactação (BAGGIO *et al.*, 2009).

Em termos de lotação, todos os sistemas testados possuem a mesma durante o inverno, mas o Pc4A-sd é pastejado de maneira continuada no inverno e no verão, o que causa um acúmulo de carga que pode fazer com que a porosidade seja afetada independentemente da cobertura vegetal (VANDERBURG *et al.*, 2020). Em relação à cobertura do solo, entre os tratamentos AAzApi-sd e AAzSAzApi-sd há uma diferença que pode ser a chave para compreendermos o motivo pelo qual a K_a não foi semelhante entre eles, embora ambos sejam pastejados durante o mesmo período e com a mesma lotação animal. O sistema AAzSAzApi-sd é cultivado com soja em uma das estações, e esta cultura produz menor biomassa aérea e de raízes; além disso, a composição química do material orgânico de uma planta leguminosa possui uma relação C/N inferior às gramíneas, o que acelera sua decomposição (GREGORUTTI; CAVIGLIA, 2019; MATHEW *et al.*, 2020). Também possuem sistema radicular axial com raízes de maior diâmetro, e menor capacidade de se desenvolver em solos adensados em comparação com gramíneas (SILVA *et al.*, 2021). Dessa forma, o tratamento que é cultivado com soja possivelmente possui uma menor conectividade dos poros e resistência ao pisoteio animal.

O sistema AAzApi-sd, além de possuir maior resistência à compactação por ser cultivado somente com espécies gramíneas de alta produção de biomassa e resíduos ricos em compostos recalcitrantes, com lenta decomposição, também caracteriza-se pelo intenso desenvolvimento de raízes finas e agressivas; Esse tipo de raízes são um dos principais fatores de estruturação do solo, pois são capazes de ocupar espaços ao crescerem, e após a sua morte e

decomposição auxiliam na descompactação (CUI *et al.*, 2019; HAO *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019). A produção de exsudatos radiculares influencia positivamente a biota edáfica (SHEN *et al.*, 2020) e as raízes que se desenvolvem em uma estação são decompostas na estação seguinte, e deixam espaços vazios altamente conectados, capazes de auxiliar na translocação dos gases (LUCAS *et al.*, 2019; VILLARREAL *et al.*, 2020) e servem de caminho para o desenvolvimento de novas raízes (WAHLSTRÖM *et al.*, 2021).

O aumento da K_a na camada subsuperficial ao longo das épocas no Ψ_m -10 kPa indica que a estrutura do solo, nessa camada, está melhorando lentamente. As cargas aplicadas na superfície pelo pisoteio, nos sistemas com pastejo, acabam sendo pouco transmitidas em profundidade devido à atenuação/dissipação gerada pelo material orgânico em superfície (BRAIDA *et al.*, 2006; REICHERT *et al.*, 2016a, 2016b). Isso leva à menor perturbação nessa camada, visto que a magnitude das cargas aplicadas é o principal fator de transmissão em profundidade (NAVEED *et al.*, 2016). Assim, permite que haja uma manutenção da porosidade e desenvolvimento de raízes que paulatinamente melhoram a estrutura do solo (KELLER *et al.*, 2021). No sistema com preparo também há pouca perturbação em subsuperfície e o solo dessa camada beneficia-se do material orgânico que é incorporado no momento do preparo (SCHLÜTER *et al.*, 2018). A menor perturbação em profundidade também fica evidente para os fluxos de água no solo, onde os sistemas tiveram valores ligeiramente maiores na camada mais profunda, com menor influência tanto do pisoteio quanto do revolvimento. A camada mais profunda está mais protegida dos efeitos negativos do manejo, mas também está mais distante dos efeitos positivos, a exemplo do tratamento AAzApi-sd que melhorou os fluxos de ar apenas na superfície do solo. Isso decorre, possivelmente, pela maior concentração de raízes em superfície comum em cultivos de arroz (MONDAL *et al.*, 2019), e é impulsionada pela menor porosidade natural dos solos de textura franca (PÖHLITZ *et al.*, 2020).

8.6 CONECTIVIDADE E CONTINUIDADE DE POROS

Existem diferenças importantes entre fluxos de água e ar neste estudo, comportamentos distintos entre propriedades do solo que expressam a qualidade estrutural representada pela continuidade e conectividade do sistema poroso. A complexidade das propriedades de funcionalidade do solo nos levam a fazer uso de diferentes estratégias para compreender a sua dinâmica, e a tomografia computadorizada (TC) é uma ferramenta importante que vem sendo utilizada na ciência do solo para auxiliar no entendimento da influência que o arranjo das

partículas têm sobre a capacidade do solo em desempenhar suas funções (FENG *et al.*, 2019; PIRES *et al.*, 2020; VOGEL, 2008; ZHANG *et al.*, 2019).

Dado que a funcionalidade do solo depende principalmente da conectividade dos poros, a separação da porosidade por volume é uma estratégia importante usada em ensaios de tomografia (ZHAO; HU; LI, 2020), entendendo que quanto maior o volume ocupado por um mesmo poro, mais ramificado e conectado ele pode ser. Partindo desse pressuposto, definimos como porosidade conectada do solo (C_p) todos os poros que ultrapassassem um volume de 10 mm^3 e, assim, o estudo revela que a grande maioria dos poros considerados contínuos estão na camada mais superficial do solo, e reduzem em profundidade e com pouca diferença entre os tratamentos. O desenvolvimento radicular intenso na camada superficial do solo e a ciclagem dos resíduos culturais são fatores importantes que auxiliam na estruturação e formação de uma porosidade mais conectada, com poros de maior volume (PATRA *et al.*, 2019; SOTO-GÓMEZ *et al.*, 2018). Contudo, o revolvimento do solo também pode gerar poros volumosos, tanto pelo processo de descompactação quanto pela incorporação de material orgânico (SCHLÜTER *et al.*, 2018), mas esses são predominantemente descontínuos.

O índice de conectividade (C_i) expressa quanto da porosidade considerada conectada representa do total de poros definidos por TC e, da mesma forma que a C_p , essa variável teve comportamento decrescente em profundidade e revela que os sistemas APoAsp-cr e AAzApi-sd tiveram maior C_i em subsuperfície, mesmo com manejos extremamente distintos. O fato de haver semelhanças entre o sistema com preparo e os pastejados está na contramão do que se conhece sobre manejo do solo, pois sistemas com revolvimento tentam a romper a estrutura do solo e desarranjar o espaço poroso (EZE *et al.*, 2020). No entanto, é importante destacar que um poro de grande volume pode não ser realmente contínuo, há a possibilidade de ser apenas um orifício ou uma rachadura, algo bastante comum nos solos que são preparados com máquinas agrícolas; logo, apenas o volume pode não ser suficiente para indicar a conectividade.

Uma estratégia para relacionar o volume do poro e seu formato é a esfericidade dos poros (P_s), pois quanto mais o volume do poro se assemelha ao de uma esfera, menos ramificado e contínuo ele tende a ser. A P_s teve um comportamento crescente da superfície às camadas mais profundas, indicando que poros mais contínuos e ramificados se encontram na superfície, em concordância com a C_p e C_i , podendo ser considerado um bom indicador das características estruturais dos poros do solo. As diferenças observadas para a P_s foram apenas na camada intermediária, uma faixa de solo que não sofre os impactos do manejo de forma intensa como a camada superficial (AMBUS *et al.*, 2018; PATRA *et al.*, 2019). Na primeira época, fica evidente a influência negativa do revolvimento do solo, com aumento da

esfericidade dos poros para o sistema revolvido, e a influência positiva dos sistemas pastejados, principalmente o AAzApi-sd com a menor Ps. Esse resultado corrobora com os demais dados do estudo que sugerem que este sistema tem a menor suscetibilidade à compactação, associada possivelmente ao intenso aporte da material orgânico das espécies gramíneas (REICHERT *et al.*, 2016a, 2016b). Ao longo dos ciclos, todos os sistemas se mantiveram ou reduziram ainda mais a Ps, inclusive o APoAsp-cr, o que provavelmente decorre da constante incorporação de material orgânico ao solo, seja por raízes nos tratamentos pastejados ou pelo revolvimento no semidireto.

Além do volume e do formato, a probabilidade de ocorrência de poros conectados em uma massa de solo pode ser definida pelo Γ – Indicador, um importante parâmetro utilizado em TC (LUCAS; VOGEL, 2020; RENARD; ALLARD, 2013). Em total concordância com os demais dados, fica evidente que a maior concentração de poros contínuos está na superfície do solo e, a exemplo da Ps, os tratamentos diferiram somente na camada intermediária, com destaque para o sistema AAzApi-sd na primeira época e para o APoAsp-cr na segunda e terceira épocas. Os tratamentos pastejados podem ter diminuído a quantidade de poros contínuos nessa camada devido à obstrução dos poros pelo crescimento das raízes, tanto das culturas de verão quanto das espécies forrageiras (NGUYEN; ISHIKAWA; MURAKAMI, 2020; NI; NG, 2019). Para o solo com revolvimento, a fragmentação e a incorporação na camada superficial fazem com que os resíduos da superfície sejam levados para as camadas mais profundas, e a porosidade conectada presente nesse sistema está intimamente ligada aos resíduos incorporados. Portanto, uma porosidade interconectada não necessariamente é fruto de um processo complexo de estruturação do solo (DOS REIS *et al.*, 2021), e é necessário que se faça essa separação.

O uso da TC possibilitou gerar diversos parâmetros relacionadas à porosidade do solo que dizem respeito à continuidade do sistema poroso, com a intenção de relacionar a continuidade dos poros com a sua funcionalidade. Contudo, não foi observada correlação significativa entre esses os parâmetros, o que destoia da maioria dos estudos que são desenvolvidos com esta temática (SCHLÜTER; SAMMARTINO; KOESTEL, 2020). Porém, destaca-se que alguns desses trabalhos são realizados em solo de terras altas e de estrutura forte (PICCOLI *et al.*, 2019; SCHLÜTER *et al.*, 2020), o que nos leva a pensar que o comportamento do solo em estudo pode ser diferente. Outro fato diz respeito à resolução das imagens do nosso estudo (aproximadamente 40 μm); nessa resolução seguramente não são contemplados todos os poros do solo, apenas os macro e mesoporos. No entanto, essas classes de poros são consideradas as mais importantes para o movimento de água e ar no solo (BORGES *et al.*, 2019;

HU *et al.*, 2018; KATUWAL *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2019), o que mais uma vez indica o comportamento diferenciado dos solos de textura franca do nosso estudo. Contudo, o fato de não haver correlação significativa não indica que, para este solo, a CT não seja suficiente para explicar as relações entre manejo e funcionalidade do solo.

Para os solos de textura franca, a exemplo do solo deste estudo, há um predomínio de poros de menor diâmetro (microporos) (DA SILVA *et al.*, 2019; PINTO, LUIZ; PAULETTO, ELOY; NETO, 2004). Além disso, esses solos possuem uma menor estabilidade de agregados, muito em função da sua granulometria com predomínio de areia (DE ORO *et al.*, 2019; GE *et al.*, 2019; REICHERT *et al.*, 2006). Solos com menor agregação tendem a possuir uma porosidade, embora mais tortuosa, mais interconectada e com mais espaço livre para o fluxo (DOS REIS *et al.*, 2021; PIRES *et al.*, 2017). O movimento de água no solo em regime saturado ($\Psi_m = 0$) ocorre em todo o espaço poroso e é beneficiado pela presença de poros grandes e contínuos. Contudo, um solo de baixa agregação, onde a maioria dos poros tem diâmetro menor que 40 μm , a porosidade determinada por TC é menor que a porosidade total do solo e, como nesse caso o fluxo de água não depende apenas dos macroporos mas sim da conectividade de todos os poros, não foi possível estabelecer uma correlação entre os parâmetros de fluxo e a TC.

Apesar de os solos de textura franca facilitar o movimento da água nos poros de menor diâmetro, não significa que o manejo de plantas de cobertura e sistemas conservacionistas de produção não sejam capazes de melhorar qualidade estrutural desses solos. Pelo contrário, esse solo necessita de um manejo que estimule a adição de matéria orgânica e aumente a estabilidade dos agregados, com melhorias no sistema poroso (DE ORO *et al.*, 2019; MENON *et al.*, 2020b).

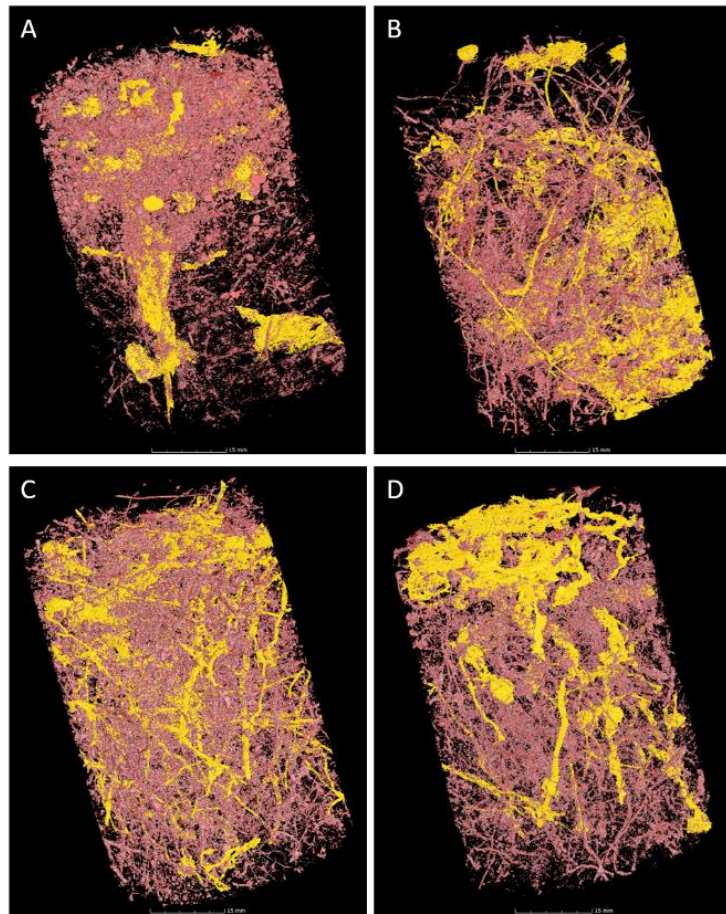
A K_a tem uma relação mais próxima com a macroporosidade, pois o movimento dos gases no solo depende da existência de poros que não estejam preenchidos com água e que sejam conectados (CAVALLI *et al.*, 2020; HOLTHUSEN *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2019). Por esse motivo, o tratamento AAzApi-sd sem revolvimento e com intensa produção de raízes destacou-se à medida que o conteúdo de água o solo foi reduzido, pois possui a maior quantidade de poros longos e contínuos, algo que não foi possível detectar por meio dos parâmetros de CT. A estrutura de um poro é extremamente complexa e o software não é capaz de diferenciar um poro de uma rachadura em mesmo um buraco; além disso, a orientação dos poros é um fator preponderante, um poro conectado pode estar no sentido transversal ao fluxo, fazendo com que o caminho percorrido pela água ou ar seja maior. Portanto, o uso de imagens tridimensionais pode ser útil para avaliar essas diferenças e estabelecer relações com a funcionalidade do solo.

8.7 ANÁLISE QUALITATIVA DE IMAGENS TRIDIMENSIONAIS

Existem diversas complexidades que são percebidas somente quando as imagens são analisadas qualitativamente. Assim, na figura 25, são expostas as imagens extraídas da camada superficial do solo na terceira época de coleta (seis anos e seis meses após a implantação do experimento), momento em que possivelmente há maior efeito do manejo. Mesmo todos os sistemas nessa camada tendo sido considerados com alta conectividade e não diferiram significativamente, é perceptível a diferença da estrutura da porosidade de cada um. O sistema com preparo (Figura 25A), como já mencionado anteriormente, possui poros grandes e pouco conectados, como orifícios, diretamente relacionados com o revolvimento (SOTO-GÓMEZ *et al.*, 2018). Os sistemas pastejados são semelhantes, nos quais a porosidade conectada está totalmente ligada ao desenvolvimento e decomposição das raízes, mas as diferenças do manejo geram alterações sutis que podem ajudar a compreender as diferenças entre os sistemas.

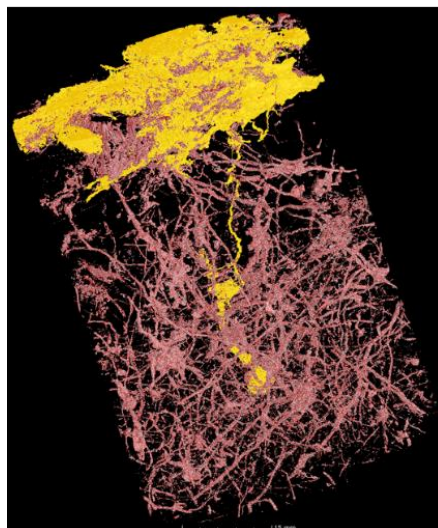
Dos sistemas pastejados, o Pc4A-sd (Figura 25B) é o que mais destoa, pois possui poros conectados com diâmetro aparentemente maior que os demais, possivelmente em função de uma atividade biológica mais intensa, pois esse sistema é o que sofre a menor perturbação no solo. Há grande volume de poros na superfície dispostos transversalmente, resultado do intenso pisoteio animal que promove o cisalhamento da superfície do solo (Figura 26). Portanto, não se trata de poros e sim de rachaduras, que embora sejam consideradas importantes para o aumento da porosidade, principalmente quando formadas por ciclos de umedecimento e secagem, dificilmente cumprem a função ambiental de um poro estruturado, formado por agentes biológicos. Além disso, rachaduras travessais são tão nocivas ao fluxo de água e ar quanto a própria compactação do solo, pois interrompem a continuidade dos poros (BERISSO *et al.*, 2013); por esse motivo, a K_a para esse tratamento esteve próxima dos valores do sistema com preparo.

Figura 25. Imagem tridimensional dos poros totais, em amarelo poros de volume $> 10 \text{ mm}^3$ (A) APoAsp-cr, (B) AAzApi-sd, (C) AAzSAzApi-sd, (D) Pc4A-sd, camada 0,0-0,06 m, terceira época de coleta. Dimensões das amostras: Aproximadamente 50 mm de diâmetro e 60 mm de altura.



Fonte: Autor.

Figura 26. Imagem tridimensional de um poro de grande volume (amarelo), representa a superfície do solo cisalhada após o pisoteio animal (Pc4A-sd camada 0,0-0,10 m). Dimensões da amostra: Aproximadamente 50 mm de diâmetro e 60 mm de altura.



Fonte: Autor.

Os sistemas AAzApi-sd e AAzSAzApi-sd (Figura 25 B e C, respectivamente) têm uma diferença ainda mais sutil, onde ambos possuem poros finos e abundantes. No entanto, o sistema AAzApi-sd aparenta ter poros mais longos e retilíneos que conectam o topo da amostra até o limite inferior da mesma. Como mencionado anteriormente, a orientação da rede de poros é um fator muito importante a ser considerado na funcionalidade do sistema poroso (ZHANG *et al.*, 2019). Além disso, o AAzSAzApi-sd possui poros mais tortuosos e, de forma semelhante ao Pc4A-sd, possui uma concentração de poros transversais no topo da amostra, mostrando o efeito negativo do pisoteio animal e maior suscetibilidade à compactação nesse tratamento. O sistema AAzApi-sd é beneficiado pelo desenvolvimento intenso das gramíneas tanto no verão quanto no inverno, protegendo o solo dos efeitos nocivos do pisoteio e melhora a estrutura da porosidade pelo efeito direto das raízes finas e agressivas, que influencia de forma positiva os fluxos, principalmente de ar (HAO *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2020).

Os parâmetros quantitativos são frequentemente usados para descrever a qualidade do solo. Porém, é necessário que as propriedades do solo sejam vistas com a complexidade que o próprio solo possui, pois, devido à dinâmica da sua estrutura, um mesmo parâmetro pode indicar características distintas. Assim, o advento da TC pode auxiliar de forma importante, não só na geração de parâmetros, mas também na visualização da complexa dinâmica da matriz do solo.

8 CONCLUSÕES

As propriedades físicas do solo para os diferentes sistemas de manejo testados neste estudo tiveram pouca variação, o que poderia indicar que os sistemas integrados não foram capazes de melhorar a qualidade do solo quando comparado ao sistema onde o solo é revolvido periodicamente. Contudo, algumas considerações a respeito dos sistemas de manejo, dos resultados alcançados e da qualidade estrutural do solo devem ser feitas.

Inicialmente, quando avaliamos as propriedades físicas de composição e funcionalidade do solo, o fato de não haver diferença entre os sistemas já indica que o solo, mesmo sem revolvimento e sendo pastejado durante o inverno, manteve os mesmos indicadores que o sistema que é mecanicamente descompactado. O não revolvimento de um solo de textura franca pode facilmente acarretar no seu adensamento natural, e o pastejo animal é reconhecidamente uma fonte de compactação superficial em vários sistemas integrados ao redor do mundo. Nesse

caso, nenhum desses fatores foi capaz de piorar as propriedades físicas do solo nos sistemas integrados em Terras Baixas.

O sistema semidireto com revolvimento do solo não foi superior aos sistemas com pastejo animal em nenhuma das propriedades físicas avaliadas neste estudo, o que indica que para o solo em estudo o revolvimento não foi capaz de melhorar a qualidade estrutural do solo. Assim, esta prática como forma de redução do adensamento e melhoria da estrutura da porosidade não se justifica.

Quanto as propriedades de funcionalidade, que são consideradas mais complexas e que dão maior inferência sobre a qualidade estrutural do solo, as diferentes configurações de pastejo e cobertura alteraram a resposta da estrutura e funcionalidade do solo. Os sistemas integrados de produção agropecuária com predomínio de gramíneas (arroz-azevém) melhoraram a estrutura do solo e mitigaram os efeitos nocivos do pisoteio, com aumento da conectividade e funcionalidade do sistema poroso com maior água disponível. Os sistemas com cultivo de soja em uma das estações ou pastejo contínuo no inverno e verão, alteram a estrutura da porosidade do solo o que resultou em menor permeabilidade.

O uso da tomografia computadorizada neste estudo foi de extrema importância. Por meio dela foi possível identificar que respostas semelhantes entre parâmetros físicos não significam mesma qualidade estrutural. Pelas imagens tridimensionais foi possível visualizar que o volume similar de macroporos no sistema com revolvimento em relação aos sistemas pastejados diferia de maneira muito importante quanto à geometria desses poros. O revolvimento em sistema com preparo formou poros esféricos e pouco conectados, enquanto o crescimento de raízes nos sistemas pastejados e sem preparo criou uma porosidade contínua e conectada.

Os parâmetros de conectividade de poros gerados por meio da TC tiveram menor capacidade de diferenciar os tratamentos, principalmente pelo fato do revolvimento e incorporação de material orgânico no sistema semidireto ter a capacidade aumentar o volume dos poros e até mesmo a conectividade entre eles. Contudo, para que conectividade dos poros se manifeste em funcionalidade é necessário que, além de conectados estes poros sejam contínuos. Não obstante, a avaliação qualitativa das imagens tridimensionais revelou que o revolvimento do solo cria poros volumosos e menos contínuos.

Os sistemas pastejados e com intensa atividade biológica propiciaram a formação de poros além de conectados, longos e contínuos capazes de ligar o topo à base da amostra; assim, a orientação dos poros de forma longitudinal ao fluxo aumentou a capacidade do solo de

conduzir principalmente gases. Todavia, o pastejo prolongado ou menor cobertura do solo podem levar à interrupção da continuidade dos poros pelo cisalhamento superficial.

A presença de material orgânico no solo, raízes ou restos culturais foi de extrema importância para a manutenção da porosidade em todos os sistemas. A ausência de diferença para biomassa entre os sistemas integrados e o solo com revolvimento indicou que a dinâmica de decomposição de resíduos é afetada pela estrutura e funcionalidade do solo e que, provavelmente, as condições de drenagem do solo em sistema com preparo não favorecem a decomposição dos resíduos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 519–531, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832004000300013>
- ADETUNJI, Adewole Tomiwa *et al.* Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 204, n. May 2019, p. 104717, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104717>
- AJAYI, Ayodele Ebenezer *et al.* Changes in soil structure and pore functions under long term/continuous grassland management. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 314, n. January, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107407>
- AMBUS, Jordano Vaz *et al.* Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. **Geoderma**, [S. l.], v. 330, n. March, p. 232–243, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.005>
- ANDERSON, S. H. *et al.* Rapid Nondestructive Bulk Density and Soil-Water Content Determination by Computed Tomography. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 52, n. 1, p. 35–40, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010006x>
- ANGHINONI, Ibanor *et al.* Abordagem sistêmica do solo em Sistemas Integrados de Produção Agrícola e Pecuária no subtropical brasileiro. In: **Tópicos em Ciência do Solo**. [S. l.: s. n.]. v. 8p. 325–380. *E-book*.
- ASSMANN, Joice Mari *et al.* Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop-livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 190, p. 52–59, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.003>
- BACQ-LABREUIL, Aurelie *et al.* Effects of cropping systems upon the three-dimensional architecture of soil systems are modulated by texture. **Geoderma**, [S. l.], v. 332, n. February, p. 73–83, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.002>
- BAGGIO, Carolina *et al.* Padrões de deslocamento e captura de forragem por novilhos em pastagem de azevém-anual e aveia-preta manejada sob diferentes alturas em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 215–222, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000200001>
- BERISSO, F. E. *et al.* Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 131, p. 36–46, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.005>
- BILSON, Peter; UGARTE, Carmen M. Soil & Tillage Research A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield. **Soil & Tillage Research**, [S. l.], v. 211, n. August 2020, p. 105019, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105019>
- BORGES, Jaqueline A. R. *et al.* X-ray computed tomography for assessing the effect of tillage systems on topsoil morphological attributes. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 189, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.019>

- BRAIDA, João Alfredo *et al.* Mulch and soil organic carbon content and their relationship with the maximum soil density obtained in the proctor test. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 30, n. 4, p. 605–614, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832006000400001>
- BREWER, Kelsey M.; GAUDIN, Amélie CM. Potential of crop-livestock integration to enhance carbon sequestration and agroecosystem functioning in semi-arid croplands. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], p. 107936, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107936>
- CARLOS, Filipe Selau *et al.* Integrated crop–livestock systems in lowlands increase the availability of nutrients to irrigated rice. **Land Degradation and Development**, [S. l.], v. 31, n. 18, p. 2962–2972, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ldr.3653>
- CARVALHO, Juliana dos Santos *et al.* Evolução de atributos físicos, químicos e biológicos em solo hidromórfico sob sistemas de integração lavoura-pecuária no bioma Pampa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 51, n. 9, p. 1131–1139, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900012>
- CAVALLI, Jean Pierre *et al.* Composition and functional soil properties of arenosols and acrisols: Effects on eucalyptus growth and productivity. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 196, n. October 2019, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104439>
- CUI, Zeng *et al.* Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 578, n. 26, p. 124023, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124023>
- DA ROCHA, Thiago Schmitz Marques *et al.* Performance of soybean in hydromorphic and nonhydromorphic soil under irrigated or rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 52, n. 5, p. 293–302, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000500002>
- DA SILVA, Luís Fernando *et al.* Genesis, morphology and mineralogy of Planosols developed from different parent materials in southern Brazil. **Geoderma**, [S. l.], v. 341, n. November 2018, p. 46–58, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.010>
- DE ANDRADE BONETTI, João *et al.* Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 186, n. November 2018, p. 280–291, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.003>
- DE FACCIO CARVALHO, Paulo César *et al.* Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [S. l.], v. 88, n. 2, p. 259–273, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9360-x>
- DE MORAES, Anibal *et al.* Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, [S. l.], v. 57, p. 4–9, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.004>
- DE ORO, Laura A. *et al.* Relative soil water content as a factor for wind erodibility in soils with different texture and aggregation. **Aeolian Research**, [S. l.], v. 37, n. October 2018, p. 25–31, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2019.02.001>
- DENARDIN, Luiz Gustavo de O. *et al.* No-tillage increases irrigated rice yield through soil

quality improvement along time. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 186, n. July 2018, p. 64–69, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.006>

DOS REIS, Aline M. Hu. *et al.* Micromorphological analysis of soil porosity under integrated crop-livestock management systems. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 205, n. August 2020, p. 104783, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104783>

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. [S. l.: s. n.]. v. 2E-book.

EZE, Samuel *et al.* Impacts of conservation agriculture on soil structure and hydraulic properties of Malawian agricultural systems. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 201, n. April, p. 104639, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104639>

FANG, Huan *et al.* Impact of soil puddling intensity on the root system architecture of rice (*Oryza sativa* L.)seedlings. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 193, n. May, p. 1–7, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.022>

FENG, Yu *et al.* Using computed tomography images to characterize the effects of soil compaction resulting from large machinery on three-dimensional pore characteristics in an opencast coal mine dump. **Journal of Soils and Sediments**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 1467–1478, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2130-0>

FERNÁNDEZ, P. L.; ALVAREZ, C. R.; TABOADA, M. A. Topsoil compaction and recovery in integrated no-tilled crop-livestock systems of Argentina. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 153, p. 86–94, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.05.008>

GAO, Lili *et al.* Soil wet aggregate distribution and pore size distribution under different tillage systems after 16 years in the Loess Plateau of China. **Catena**, [S. l.], v. 173, n. August 2017, p. 38–47, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.043>

GAO, Wei *et al.* A shape-based method for automatic and rapid segmentation of roots in soil from X-ray computed tomography images: Routine. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 441, n. 1–2, p. 643–655, 2019 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04053-6>

GE, Nannan *et al.* Soil texture and phosphorous under two contrasting land use types in the Loess Plateau. **Catena**, [S. l.], v. 172, n. October 2017, p. 148–157, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.021>

GOMES, Algenor da Silva *et al.* Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase às áreas de várzea do Rio Grande do Sul. **Embrapa Clima ...**, [S. l.], v. 169, n. ISSN 1806-9193, p. 31, 2006. Disponível em: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BR20061746124%0Ahttps://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bits/tream/doc/746124/1/documento169.pdf>

GOULART, Rafael Ziani; REICHERT, José Miguel; RODRIGUES, Miriam Fernanda. Cropping poorly-drained lowland soils: Alternatives to rice monoculture, their challenges and management strategies. **Agricultural Systems**, [S. l.], v. 177, n. July 2018, p. 102715, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.102715>

GREGORUTTI, Viviana Carolina; CAVIGLIA, Octavio Pedro. Impact of crop aerial and root biomass inputs on soil nitrifiers and cellulolytic microorganisms. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 191, n. March, p. 85–97, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.018>

GUBIANI, Paulo Ivonir *et al.* Tensão e extração de água em mesa de tensão e coluna de areia,

em dois solos com elevada densidade. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 39, n. 8, p. 2535–2538, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-84782009005000199>

GUBIANI, Paulo Ivonir *et al.* Assessing Errors and Accuracy in Dew-Point Potentiometer and Pressure Plate Extractor Measurements. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 77, n. 1, p. 19–24, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0024>

GUBIANI, Paulo Ivonir; REINERT, Dalvan José; REICHERT, José Miguel. Alternative method to measure the soil particle density - Exactness, precision, and processing time. **Ciencia Rural**, [S. l.], v. 36, n. 2, p. 664–668, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-84782006000200049>

HAAS, Christoph; HORN, Rainer. Impact of small-scaled differences in micro-aggregation on physico-chemical parameters of macroscopic biopore walls. **Frontiers in Environmental Science**, [S. l.], v. 6, n. AUG, p. 1–12, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00090>

HAO, Hao xin *et al.* Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 198, n. October 2019, p. 104542, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104542>

HOLTHUSEN, Dörthe *et al.* Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 177, n. June 2017, p. 113–124, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.003>

HOMANN-KEE TUI, Sabine *et al.* **Crop-livestock integration to enhance ecosystem services in sustainable food systems**. [S. l.]: Elsevier Inc., 2020. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816436-5.00008-1>

HU, Xia *et al.* Soil Macropore Structure Characterized by X-Ray Computed Tomography Under Different Land Uses in the Qinghai Lake Watershed, Qinghai-Tibet Plateau. **Pedosphere**, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 478–487, 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60334-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60334-5)

HU, Xia *et al.* Influence of enclosure on CT-measured soil macropores and root architecture in a shrub-encroached grassland in northern China. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 187, n. 19, p. 21–30, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.020>

HUANG, Jingyi; HARTEMINK, Alfred E. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth-Science Reviews**, [S. l.], v. 208, n. July, p. 103295, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295>

IRGA. **Soja em áreas de arroz cresceu 205% em dez anos**. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/soja-em-areas-de-arroz-cresceu-205-em-dez-anos>.

KATUWAL, Sheela *et al.* Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography. **Geoderma**, [S. l.], v. 237–238, p. 9–20, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.006>

KELLER, Thomas *et al.* Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], n. February, p. 1–19, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/saj2.20240>

KLEIN, Vilson Antonio *et al.* Metodologias de controle de qualidade de análises granulométricas do solo. **Ciencia Rural**, [S. l.], v. 43, n. 5, p. 850–853, 2013. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000500015>

KOTTEK, Markus *et al.* World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>

KREISELMEIER, Janis *et al.* Temporal variations of the hydraulic conductivity characteristic under conventional and conservation tillage. **Geoderma**, [S. l.], v. 362, n. October 2019, p. 114127, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114127>

KUKA, Katrin *et al.* X-ray computed microtomography for the study of the soil-root relationship in grassland soils. **Vadose Zone Journal**, [S. l.], v. 12, n. 4, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/vzj2013.01.0014>

LATSCH, Annett; ANKEN, Thomas. Soil and crop responses to a “light” version of Controlled Traffic Farming in Switzerland. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 194, n. August, p. 104310, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104310>

LI, Qiang *et al.* Grass-legume ratio can change soil carbon and nitrogen storage in a temperate steppe grassland. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 157, p. 23–31, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.021>

LI, Yuan *et al.* Residue retention and minimum tillage improve physical environment of the soil in croplands: A global meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 194, n. June, p. 104292, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.06.009>

LIBARDI, Paulo Leonel. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. *E-book*.

LIU, Yu *et al.* Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. **Catena**, [S. l.], v. 182, n. January 2018, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104147>

LU, Jianrong *et al.* Root-induced changes of soil hydraulic properties – A review. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 589, n. February, p. 125203, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125203>

LUCAS, Maik *et al.* Soil structure formation along an agricultural chronosequence. **Geoderma**, [S. l.], v. 350, n. November 2018, p. 61–72, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.041>

LUCAS, Maik; VOGEL, Hans-jörg. Revealing pore connectivity across scales and resolutions with X-ray CT. [S. l.], n. December 2019, p. 1–15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.12961>

MARTÍNEZ, Ingrid *et al.* Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part II. Soil porosity and gas transport parameters. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 163, p. 130–140, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.020>

MATHEW, Isack *et al.* Crops for increasing soil organic carbon stocks – A global meta analysis. **Geoderma**, [S. l.], v. 367, n. February, p. 114230, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114230>

MENON, Manoj *et al.* Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability. **Geoderma**, [S. l.], v. 366, n. February, p. 114259, 2020 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114259>

- MENON, Manoj *et al.* Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability. **Geoderma**, [S. l.], v. 366, n. December 2019, p. 114259, 2020 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114259>
- MENTGES, Marcelo Ivan *et al.* Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. **Geoderma**, [S. l.], v. 263, p. 47–59, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.042>
- MONDAL, Surajit *et al.* Conservation agriculture had a strong impact on the sub-surface soil strength and root growth in wheat after a 7-year transition period. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 195, n. August, p. 104385, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104385>
- NAVEED, Muhammad *et al.* Quantifying vertical stress transmission and compaction-induced soil structure using sensor mat and X-ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 158, p. 110–122, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.12.006>
- NEGRÓN, Mary; LÓPEZ, Ignacio; DÖRNER, José. Consequences of intensive grazing by dairy cows of contrasting live weights on volcanic ash topsoil structure and pasture dynamics. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 189, n. December 2018, p. 88–97, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.025>
- NGUYEN, Binh T.; ISHIKAWA, Tatsuya; MURAKAMI, Takumi. Effects evaluation of grass age on hydraulic properties of coarse-grained soil. **Transportation Geotechnics**, [S. l.], v. 25, n. June, p. 100401, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100401>
- NI, Jun Jun; NG, Charles Wang Wai. Long-term effects of grass roots on gas permeability in unsaturated simulated landfill covers. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 666, p. 680–684, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.248>
- NUNES, Márcio R. *et al.* Biological soil health indicators respond to tillage intensity: A US meta-analysis. **Geoderma**, [S. l.], v. 369, n. February, p. 114335, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114335>
- PARFITT, José Maria Barbat *et al.* Soil and Water Management for Sprinkler Irrigated Rice in Southern Brazil. **Advances in International Rice Research**, [S. l.], 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/66024>
- PATRA, Sridhar *et al.* Soil hydraulic response to conservation agriculture under irrigated intensive cereal-based cropping systems in a semiarid climate. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 192, n. October 2018, p. 151–163, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.003>
- PEDROTTI, Alceu *et al.* Evaluation of bulk density of Albaqualf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computerized tomography methods. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 80, n. 1–2, p. 115–123, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.003>
- PICCOLI, I. *et al.* Coupling gas transport measurements and X-ray tomography scans for multiscale analysis in silty soils. **Geoderma**, [S. l.], v. 338, n. September, p. 576–584, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.029>
- PINTO, LUIZ; PAULETTO, ELOY; NETO, E. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: **Arroz Irrigado no Sul do Brasil. Brasília**. [S. l.: s. n.]. p. 75–96. E-

book.

PIRES, Luiz F. *et al.* Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 165, p. 66–79, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010>

PIRES, Luiz F. *et al.* X-ray microtomography analysis of soil pore structure dynamics under wetting and drying cycles. **Geoderma**, [S. l.], v. 362, n. November 2019, p. 114103, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114103>

PÖHLITZ, Julia *et al.* Computed tomography and soil physical measurements of compaction behaviour under strip tillage, mulch tillage and no tillage. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 175, n. August 2017, p. 205–216, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.007>

PÖHLITZ, Julia *et al.* Estimation of critical stress ranges to preserve soil functions for differently textured soils. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 200, n. September 2019, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104637>

RABOT, E. *et al.* Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, [S. l.], v. 314, n. November 2017, p. 122–137, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>

REICHERT, José M. *et al.* Load dissipation by corn residue on tilled soil in laboratory and field-wheeling conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [S. l.], v. 96, n. 8, p. 2705–2714, 2016 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsfa.7389>

REICHERT, José Miguel *et al.* Agregação de um planossolo sistematizado há um ano e sob cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 837–844, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000300017>

REICHERT, José Miguel *et al.* Compactação Do Solo Em Sistemas Agropecuários E Florestais: Identificação, Efeitos, Limites Críticos E Mitigação. **Tópicos Ci. Solo**, [S. l.], v. 5, p. 49–134, 2007.

REICHERT, José Miguel *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 and Tillage Research**, [S. l.], v. 158, p. 123–136, 2016 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.11.010>

REICHERT, José Miguel *et al.* Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage? **Geoderma**, [S. l.], v. 301, n. August 2016, p. 72–79, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.012>

REICHERT, José Miguel *et al.* Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. **Catena**, [S. l.], v. 165, n. February 2017, p. 345–357, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.014>

REINERT, Dalvan José; REICHERT, José Miguel. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 36, n. 6, p. 1931–1935, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-84782006000600044>

RENARD, Philippe; ALLARD, Denis. Connectivity metrics for subsurface flow and transport. **Advances in Water Resources**, [S. l.], v. 51, p. 168–196, 2013. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.12.001>

SADOWSKI, Arkadiusz; BAER-NAWROCKA, Agnieszka. Food and environmental function in world agriculture—Interdependence or competition? **Land Use Policy**, [S. l.], v. 71, n. July 2017, p. 578–583, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.11.005>

SANTOS, Humberto Gonçalves Dos. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [S. l.: s. n.]. *E-book*.

SARKAR, Deepranjan *et al.* Low input sustainable agriculture: A viable climate-smart option for boosting food production in a warming world. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 115, n. April, p. 106412, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106412>

SCHEFFER, Kamila *et al.* Enhancement of oil recovery by emulsion injection: A pore scale analysis from X-ray micro-tomography measurements. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [S. l.], v. 198, n. June 2020, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108134>

SCHLÜTER, Steffen *et al.* Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties. **Geoderma**, [S. l.], v. 332, n. June, p. 10–19, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.001>

SCHLÜTER, Steffen *et al.* Long-term effects of conventional tillage and no-tillage on saturated and near-saturated hydraulic conductivity – Can their prediction be improved by pore metrics obtained with X-ray CT? **Geoderma**, [S. l.], v. 361, n. May 2019, p. 114082, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114082>

SCHLÜTER, Steffen; SAMMARTINO, Stephane; KOESTEL, John. Exploring the relationship between soil structure and soil functions via pore-scale imaging. **Geoderma**, [S. l.], v. 370, n. April, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114370>

SHEN, Xing *et al.* Increased contribution of root exudates to soil carbon input during grassland degradation. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 146, n. April, p. 107817, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107817>

SILVA, Matheus Flavio da *et al.* Contribution of tillage systems and crop succession to soil structuring. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 209, n. December 2020, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104924>

ŠIMANSKÝ, Vladimír *et al.* How relationships between soil organic matter parameters and soil structure characteristics are affected by the long-term fertilization of a sandy soil. **Geoderma**, [S. l.], v. 342, n. August 2018, p. 75–84, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.020>

SLEUTEL, S. *et al.* Comparison of different nano- and micro-focus X-ray computed tomography set-ups for the visualization of the soil microstructure and soil organic matter. **Computers and Geosciences**, [S. l.], v. 34, n. 8, p. 931–938, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.10.006>

SNEESSENS, Inès *et al.* A framework to assess the economic vulnerability of farming systems: Application to mixed crop-livestock systems. **Agricultural Systems**, [S. l.], v. 176, n. June, p. 102658, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102658>

SOKOŁOWSKI, Ana Clara *et al.* Tillage and no-tillage effects on physical and chemical properties of an Argiaquoll soil under long-term crop rotation in Buenos Aires, Argentina.

International Soil and Water Conservation Research, [S. l.], v. 8, p. 185–194, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.02.002>

SOSBAI. **Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. [S. l.: s. n.]. E-book.

SOTO-GÓMEZ, Diego *et al.* Linking pore network characteristics extracted from CT images to the transport of solute and colloid tracers in soils under different tillage managements. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 177, n. November 2017, p. 145–154, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.007>

SZYMCZAK, Leonardo Silvestri *et al.* System diversification and grazing management as resilience-enhancing agricultural practices: The case of crop-livestock integration. **Agricultural Systems**, [S. l.], v. 184, n. July, p. 102904, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102904>

TAIZ, Lincoln *et al.* **Plant Physiology & Development**. Sunderland, MA: Sinauer Associates is an imprint of Oxford University Press; 6th edition, 2014. E-book.

THEISEN, G. *et al.* The birth of a new cropping system: towards sustainability in the sub-tropical lowland agriculture. **Field Crops Research**, [S. l.], v. 212, n. May, p. 82–94, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.001>

TUCHTENHAGEN, Ivana Kruger *et al.* Visual evaluation of the soil structure under different management systems in lowlands in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [S. l.], v. 42, p. 1–13, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170270>

TUREK, Maria Eliza; DE JONG VAN LIER, Quirijn; ARMINDO, Robson André. Estimation and mapping of field capacity in Brazilian soils. **Geoderma**, [S. l.], v. 376, n. June, p. 114557, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114557>

TURMEL, Marie Soleil *et al.* Crop residue management and soil health: A systems analysis. **Agricultural Systems**, [S. l.], v. 134, p. 6–16, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.009>

VAN GENUCHTEN, M. Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

VAN LOO, Denis *et al.* Contrast agents for soil investigation with X-ray computed tomography. **Geoderma**, [S. l.], v. 213, p. 485–491, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.036>

VANDERBURG, Kathryn L. *et al.* Trampling and Cover Effects on Soil Compaction and Seedling Establishment in Reseeded Pasturelands Over Time. **Rangeland Ecology and Management**, [S. l.], v. 73, n. 3, p. 452–461, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.01.001>

VASQUES, Isabela C. F. *et al.* Improved management increases carrying capacity of Brazilian pastures. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 282, n. March, p. 30–39, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.017>

VEIGA, Milton Da *et al.* Effects on Soil and Crop Properties of Forms of Sowing, Deferral Intervals and Fertilisation of the Annual Winter Forage in a Crop-Livestock Integration System. **Journal of Agricultural Science**, [S. l.], v. 8, n. 5, p. 15, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5539/jas.v8n5p15>

- VILLARREAL, Rafael *et al.* Pore system configuration and hydraulic properties. Temporal variation during the crop cycle in different soil types of Argentinean Pampas Region. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 198, n. November 2019, p. 104528, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104528>
- VOGEL, Hans-Jörg. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections. **European Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 48, n. 3, p. 365–377, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00203.x>
- VOGELER, Iris *et al.* Estimation of soil subsurface hydraulic conductivity based on inverse modelling and soil morphology. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 574, n. April, p. 373–382, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.002>
- VON HADEN, Adam C.; DORNBUSH, Mathew E. Patterns of root decomposition in response to soil moisture best explain high soil organic carbon heterogeneity within a mesic, restored prairie. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 185, p. 188–196, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.027>
- VOSSBRINK, Jörg. Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren. [S. l.], v. 65, n. 65, 2005.
- WAHLSTRÖM, Ellen M. *et al.* Subsoil compaction effect on spatio-temporal root growth, reuse of biopores and crop yield of spring barley. **European Journal of Agronomy**, [S. l.], v. 123, n. December 2020, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126225>
- WALTER, Julia. Effects of changes in soil moisture and precipitation patterns on plant-mediated biotic interactions in terrestrial ecosystems. **Plant Ecology**, [S. l.], v. 219, n. 12, p. 1449–1462, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11258-018-0893-4>
- WRB. **World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.** [S. l.: s. n.]. *E-book*.
- YE, Yingying *et al.* Tillage induces rapid loss of organic carbon in large macroaggregates of calcareous soils. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 199, n. August 2019, p. 104549, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104549>
- ZHANG, Xinyue; WANG, Wei. The decomposition of fine and coarse roots: Their global patterns and controlling factors. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 5, p. 1–10, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep09940>
- ZHANG, Zhongbin *et al.* Linking saturated hydraulic conductivity and air permeability to the characteristics of biopores derived from X-ray computed tomography. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 571, n. October 2018, p. 1–10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.041>
- ZHAO, Yunduo; HU, Xia; LI, Xiaoyan. Analysis of the intra-aggregate pore structures in three soil types using X-ray computed tomography. **Catena**, [S. l.], v. 193, n. 19, p. 104622, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104622>

ANEXO A — ESCANEAMENTO DE UMA AMOSTRA: DISPOSIÇÕES GERAIS

O equipamento consiste de uma fonte de raios X direcionada para a amostra, e um detector posicionado após o objeto que se deseja escanear. Os raios atravessam a amostra e, com base na detecção do nível de atenuação dos materiais ao deslocamento de feixe de radiação, o computador cria uma imagem semelhante à foto. Após realizada essa primeira imagem, a amostra gira e uma nova imagem é capturada e, assim, sucessivas imagens são registradas ao passo que a amostra vai girando. A razão do giro da amostra define quantas imagens serão capturadas. Quando a amostra tiver girado 360°, o escaneamento estará finalizado.

ANEXO B — ETAPAS DO ESCANEAMENTO

- a) Posicionamento da amostra no interior do equipamento entre a fonte e o detector.
- b) Checagem da centralização da amostra, verifica-se se ao girar ela não irá sair do alcance do detector.
- c) Adequar os parâmetros de energia e potência para se obter a melhor imagem, podendo fazer uso de filtros para reduzir a intensidade do feixe.
- d) Determinar a razão do giro que a amostra irá fazer e quantas imagens serão capturadas por vez, assim é determinado o tempo de escaneamento.
- e) Iniciar o escaneamento e aquisição de imagens.

ANEXO C — RECONSTRUÇÃO DA IMAGEM

Após finalizado o processo de escaneamento de uma amostra de solo, centenas de imagens de diferentes ângulos são geradas. Essas imagens capturadas são utilizadas para formar uma imagem tridimensional (3D) a partir da junção de todas as imagens adquiridas. Essa etapa além de criar um modelo 3D da amostra de solo, também é importante para melhorar a qualidade da imagem que será regada, fazendo uso das ferramentas do software específico de

reconstrução de imagens. Nessa etapa já é possível visualizar a qualidade do escaneamento e, caso seja necessário, realizá-lo novamente.

ANEXO D — PROCESSAMENTO DAS IMAGENS 3D

Gerada a imagem 3D, pode-se extrair informações relevantes a respeito da estrutura da amostra que foi escaneada. Utiliza-se um software específico para ler o arquivo e efetuar as etapas seguem:

- a) Ajuste da área que se deseja analisar: Nessa etapa é feito um recorte das áreas que não são de interesse por parte do analisador; por exemplo, o cilindro onde a amostra de solo foi coletada, deixa-se apenas o solo a ser analisado.
- b) Determinação das principais fases da amostra: A exemplo de uma amostra de solo, é interessante fazer a separação entre as fases sólida, poros e material orgânico. Para tal procedimento, toma-se como base o histograma de escala de cinza gerado pelo software a partir dos níveis de atenuação de cada material, e também ferramentas específicas que auxiliam na detecção de áreas da amostra que possuem o mesmo grau dentro da escala de cinza.
- c) Extração dos volumes: Após a detecção das fases de interesse, deve-se fazer a extração do volume de cada uma delas, isso gera três imagens tridimensionais, uma para cada fase. Em posse dessas novas imagens de interesse, pode-se exportar arquivos numéricos de cada uma delas, contendo informações importantes com volume, superfície, número de voxels, entre outras.
- d) Edição das imagens: Com os volumes de interesse definidos, é possível editar as imagens 3D e utilizá-las de acordo com o desejo de quem está analisando, a exemplo das imagens utilizadas neste estudo.