

**MATHEUS RODRIGUES SAVIOLI**

**IMPACTOS DE MEIOS DE EXPLORAÇÃO NOS ATRIBUTOS FÍSICOS E  
QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ**

**CASCABEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO - 2025**

**MATHEUS RODRIGUES SAVIOLI**

**IMPACTOS DE MEIOS DE EXPLORAÇÃO NOS ATRIBUTOS FÍSICOS E  
QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior

Coorientador: Dr. Douglas Bassegio

**CASCADEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO - 2025**

Rodrigues Savioli, Matheus

IMPACTOS DE MEIOS DE EXPLORAÇÃO NOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ / Matheus Rodrigues Savioli; orientadora Luiz Antônio Zanão Junior ; coorientadora Douglas Bassegio. -- Cascavel, 2025.  
47 p.

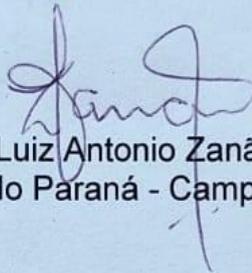
Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2025.

1. Manejo e conservação do solo. 2. Meios de exploração agropecuários . 3. Física e química do solo . 4. Correlação entre os fenômenos físicos-químicos do solo . I. Antônio Zanão Junior , Luiz , orient. II. Bassegio, Douglas , coorient. III. Título.

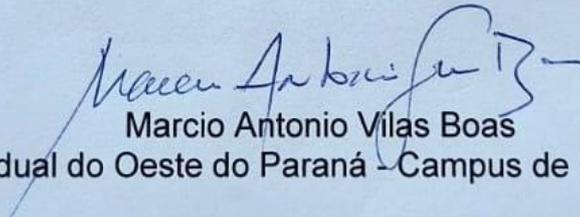
**MATHEUS RODRIGUES SAVIOLI**

Impactos de meios de exploração nos atributos físicos e químicos de um latossolo argiloso na região Oeste do Paraná

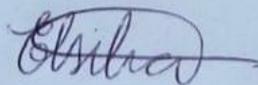
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biomassa e culturas energéticas, APROVADO pela seguinte banca examinadora:



Orientador - Luiz Antonio Zanão Júnior  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Marcio Antonio Vilas Boas  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Ellen Lemes Silva

Cascavel, 17 de fevereiro de 2025

*Dedico aos que abriram caminhos para  
que eu pudesse trilhar o meu, com  
gratidão eterna pela inspiração e pelo  
legado.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força e resiliência que me permitiram alcançar mais esta etapa da minha vida acadêmica. Aos meus pais, pela base sólida e pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha trajetória. À minha família e amigos, que compreenderam as ausências e celebraram comigo cada conquista.

Ao Prof. Dr. Deonir Secco (*In memoriam*), que foi membro fundamental para a concepção e desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação, paciência e compromisso com o ensino e a pesquisa deixaram um legado que jamais será esquecido. Sua orientação foi muito mais do que técnica, foi um exemplo de ética, generosidade e amor pelo ensino e pela ciência. Que sua memória seja sempre uma inspiração para todos que tiveram a sorte de aprender com ele. Além de orientador, foi um grande amigo.

Minha gratidão ao Prof. Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior, que assumiu a orientação deste projeto em um momento desafiador, trazendo não apenas sua experiência e conhecimento, mas também sua sensibilidade e apoio inestimáveis. Sua força e incentivo foram fundamentais para que este trabalho pudesse ser concluído com sucesso.

Agradeço também ao Dr. Douglas Bassegio, pela colaboração essencial, pelas contribuições críticas e pela confiança no desenvolvimento deste projeto; à Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), pelo suporte e pela estrutura oferecida para a realização desta pesquisa; ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura; e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro que foi imprescindível para a concretização deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Física do Solo (LAFIS), pela convivência enriquecedora, pelas trocas de ideias e pelo espírito de colaboração. Aos amigos, que foram um alicerce emocional durante os momentos mais desafiadores.

Aos técnicos e funcionários do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR – Paraná), pela assistência essencial em diversos momentos do desenvolvimento deste trabalho, sempre com muita disposição e cordialidade.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação, deixo aqui meu mais sincero agradecimento.

SAVIOLI, Matheus Rodrigues. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro, 2025. **Impactos de meios de exploração nos atributos físicos e químicos de um latossolo argiloso na Região Oeste do Paraná.** Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior. Coorientador: Dr. Douglas Bassegio.

## RESUMO

Os meios de exploração do solo, principalmente para atividade agrícola, têm desempenhado papel fundamental para o desenvolvimento humano. No entanto, o uso intensivo do solo, a destruição das matas nativas e a utilização irresponsável dos recursos naturais tem gerado problemas significativos para a qualidade do solo e do meio ambiente. O objetivo desse trabalho foi avaliar os impactos de meios de exploração do solo nos atributos físicos e químicos de um Latossolo argiloso na Região Oeste do Paraná. Os meios de exploração do solo foram avaliados no Instituto do Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná), em Santa Tereza do Oeste, Paraná, Brasil. Seis meios de exploração do solo foram avaliados [Sistema de plantio direto com rotação (SPD C/ROT), sistema de plantio direto sem rotação (SPD S/ROT), fruticultura, pastagem, integração lavoura-pecuária (ILP) e mata nativa], com quatro repetições. Foram realizadas análises físicas (densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, condutividade hidráulica do solo saturado e diâmetro médio geométrico (DMG)) e químicas do solo [pH (CaCl<sub>2</sub>) e teores de potássio, fósforo, cálcio, magnésio e matéria orgânica], nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 50-60 cm. Os dados foram submetidos ao teste não paramétrico de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade e análise de correlação. O SPD com rotação de culturas apresentou condições similares a condição de mata nativa para as propriedades químicas do solo, seguido por ILP e fruticultura. A pastagem apresentou alterações intermediárias nos atributos químicos do solo. Já o SPD sem rotação apresentou indícios de possível lixiviação e esgotamento de nutrientes, assim como baixa reposição de matéria orgânica. A densidade na superfície do solo foi menor nos meios de exploração com SPD em relação aos meios perenes, como ILP, pastagem e fruticultura. A macroporosidade do solo em profundidade nos meios de exploração com fruticultura e pastagem foram semelhantes à mata nativa. Com relação ao diâmetro médio geométrico na camada superficial do solo, o SPD com rotação foi semelhante à mata nativa. Em geral, foram observadas correlações positivas de pH, Ca, K, SB, CTC e V com macroporosidade e Ksat e negativas da densidade do solo com os atributos químicos do solo. Encontrou-se correlação entre a macroporosidade do solo e a Ksat, tendo em vista que são variáveis dependentes: quanto maior a porcentagem de macroporos maior será a infiltração de água no solo.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001"

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistemas agrícolas; uso do solo; preservação do solo.

SAVIOLI, Matheus Rodrigues. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, February, 2025. **Impacts of Exploitation Methods on the Physical and Chemical Attributes of a Clayey Oxisol in the Western Region of Paraná.** Advisor: Prof. Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior. Co-advisor: Dr. Douglas Bassegio.

## ABSTRACT

Soil exploitation methods, especially for agricultural activities, have played a fundamental role in human development. However, intensive soil use, destruction of native forests, and irresponsible use of natural resources have caused significant problems for soil quality and the environment. The objective of this study was to evaluate the impacts of soil exploitation methods on the physical and chemical attributes of a clayey Oxisol in the western region of Paraná. The soil exploitation methods were evaluated at the Institute for Rural Development of Paraná (IDR-Paraná), located at Santa Tereza do Oeste, Paraná, Brazil. Six soil exploitation methods were evaluated [No-tillage system with crop rotation (NT C/ROT), no-tillage system without rotation (NT W/ROT), fruit cultivation, pasture, crop-livestock integration (CLI), and native forest], with four replications. Physical analyses (soil bulk density, macroporosity, microporosity, total porosity, saturated hydraulic conductivity, and geometric mean diameter (GMD)) and chemical analyses [pH (CaCl<sub>2</sub>) and levels of potassium, phosphorus, calcium, magnesium, and organic matter] were performed at depths of 0-10, 10-20, 20-30, and 50-60 cm. The data were subjected to the non-parametric Kruskal-Wallis test at a 5% significance level and correlation analysis. The no-tillage system with crop rotation showed chemical soil conditions similar to those of native forest, followed by CLI and fruit cultivation. Pasture showed intermediate changes in soil chemical attributes. The no-tillage system without rotation showed signs of possible nutrient leaching and depletion, as well as low organic matter replenishment. Surface soil density was lower in no-tillage systems compared to perennial systems such as CLI, pasture, and fruit cultivation. Deep soil macroporosity in fruit cultivation and pasture systems was similar to native forest. Regarding the geometric mean diameter in the soil surface layer, the no-tillage system with rotation was similar to native forest. In general, positive correlations were observed between pH, Ca, K, base saturation (BS), cation exchange capacity (CEC), and base saturation percentage (V) with macroporosity and saturated hydraulic conductivity (K<sub>sat</sub>), and negative correlations between soil density and chemical soil attributes. A correlation was found between soil macroporosity and K<sub>sat</sub>, given that they are dependent variables: the greater the percentage of macropores, the higher the water infiltration in the soil.

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

**KEYWORDS:** Agricultural systems; Land use; Soil conservation.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1. Meios de exploração do solo</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2. Impactos dos meios de exploração agrícola nas propriedades químicas do solo</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3. Impactos dos meios de exploração agrícola nas propriedades físicas do solo</b> .....	<b>19</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>23</b>
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>32</b>
<b>4.1 Propriedades químicas do solo</b> .....	<b>32</b>
<b>4.2 Propriedades físicas do solo</b> .....	<b>34</b>
<b>4.3 Análise de correlação</b> .....	<b>38</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>39</b>
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>41</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A Região Oeste do Paraná, caracterizada por suas terras férteis, principalmente por conta do tipo de solo e do clima favorável, destaca-se como uma região de intensas atividades agropecuárias. Na região, é predominante o sistema de plantio direto (SPD) devido a sua eficácia em melhorar as condições físico-químicas do solo e aumentar a produtividade dos cultivos agrícolas. Entretanto, apesar da predominância do SPD, nota-se outros meios de exploração do solo, como a pecuária, destinada tanto para a produção de leite quanto para gado de corte, assim como a presença pequena de áreas destinadas à fruticultura.

Os distintos meios de exploração afetam de formas diferentes os componentes físico-químicos do solo, ocorrendo principalmente por conta da susceptibilidade do solo da região a alterações físicas relacionadas a estrutura, por conta da elevada presença de argilominerais, predominantemente do tipo 1:1. O uso e manejo incorreto do solo pode resultar em problemas como erosão, compactação e escoamento superficial de água, culminando em perdas de nutrientes e solo e resultando na diminuição do potencial produtivo.

O solo com mata nativa apresenta condição de autossuficiência, com um ciclo natural, em que a presença de espécies nativas desempenha papel fundamental, responsáveis pela nutrição do solo e melhoria estrutural. Além disto, o aporte recorrente de matéria orgânica mantém a microbiota no solo que melhora as relações bioquímicas do solo e mantém o componente estrutural em perfeito estado (MÜLLER *et al.*, 2019).

Entretanto, devido à necessidade de ampliação das áreas de produção agropecuárias, ocorreu a diminuição significativa da mata nativa. Com isso, o solo do meio natural para exploração passou a ser destinado para uso no SPD para produção de grãos, pecuária, fruticultura, dentre outros.

A utilização do SPD com rotação como um meio para minimizar as perdas de solo, água e nutrientes é considerada um meio de exploração conservacionista na agricultura. Esse sistema adota práticas como a cobertura vegetal, que reduz o impacto da gota de chuva no solo, evitando problemas de erosão (ROMDHANE *et al.*, 2019;

ADETUNJI *et al.*, 2020). Além do mais, a cobertura vegetal constante preserva as propriedades do solo, melhorando a estrutura e resiliência do solo, possibilitando melhor infiltração de água e aeração do solo.

O SPD com rotação desempenha, também, um papel importante na retenção de carbono no solo. A matéria orgânica, resultante da decomposição da palhada superficial, enriquece o solo com o carbono, um elemento essencial para a resiliência e fertilidade do solo. A fixação de nitrogênio, promovida por atividades microbianas em um ambiente de plantio direto, é fundamental para a nutrição das plantas, aumentando a eficiência do uso de fertilizantes e reduzindo a necessidade de insumos químicos (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2020). Essas melhorias são fundamentais e garantem acesso a água e ar para o sistema radicular, conferindo à planta melhor nutrição, crescimento e desenvolvimento (JIAN *et al.*, 2020; BLANCO-CANQUI *et al.*, 2020).

Todavia, a utilização errônea do SPD sem rotação de culturas resulta em um sistema falho, seguindo com uma sequência única de culturas, caracterizada como monocultura. A falta de rotação de culturas é prejudicial para as propriedades do solo. O SPD sem rotação tornou-se um sistema amplamente aplicado no Oeste do Paraná. A sequência de culturas, de forma indiscriminada, pode trazer problemas significativos para as condições físicas e químicas do solo, muito por conta da não preservação da cobertura vegetal, tendo em vista que o manejo não prevê a utilização de plantas de cobertura. Logo, essa prática acaba propiciando desestruturação e compactação do solo. Além disto, a ausência de plantas de cobertura diminuiu a ciclagem de nutrientes para o solo reduz o teor de matéria orgânica.

O meio de exploração ligado à fruticultura é uma das mais antigas e relevantes, envolvendo técnicas de manejo que afetam não só a produção das plantas, mas também influenciam significativamente a nutrição do solo. Em contraste com as culturas anuais, o cuidado perene exige das árvores frutíferas durante todo o seu ciclo torna o gerenciamento adequado do solo um elemento crucial para garantir tanto o sucesso quanto a sustentabilidade desses sistemas produtivos.

A fruticultura se distingue de outros meios de exploração pela necessidade de adubação constante e manejo cuidadoso, que tem um impacto direto nos níveis de nutrientes e pH do solo. Para garantir a produtividade e qualidade dos frutos é

fundamental escolher rigorosamente os fertilizantes, além das práticas adequadas de irrigação e controle de pragas e doenças. No entanto, o uso inadequado desses insumos pode desequilibrar os nutrientes no solo ou torná-lo muito ácido, comprometendo sua capacidade sustentável para culturas futuras (ZHANG *et al.*, 2022; HARUNA; NKONGOLO, 2020). Além disso, a adição de resíduos orgânicos de frutas desempenha papel fundamental na melhoria das condições do solo. Composto-se por folhas, frutos caídos e podas, esses resíduos fornecem fonte adicional de matéria orgânica no solo, melhorando a relação físico-químico e a microbiologia (ÇERCIOGLU *et al.*, 2019).

Como uma atividade fundamental na produção de alimentos, a pecuária apresenta desafios e oportunidades únicas para o manejo sustentável do solo. O pisoteio de animais pode levar à compactação do solo, reduzindo sua porosidade e capacidade de infiltração de água. No entanto, a prática de rotações de animais em talhões e controle do número de animais por talhão pode ajudar a minimizar esses impactos negativos e até mesmo promover melhora na estrutura e aeração do solo. Em contrapartida, a ciclagem de nutrientes pelas raízes das gramíneas e a utilização dos dejetos bovinos podem melhorar a nutrição do solo (BLANCO-CANQUI; RUIS 2020; MUHAMMAD *et al.*, 2021).

A integração lavoura-pecuária (ILP) surge como uma abordagem promissora para melhorar e aprimorar os benefícios da pecuária, minimizando seus impactos no solo. Por meio da ILP, é realizada a integração de culturas de cobertura, principalmente no inverno, trazendo benefícios como a cobertura vegetal, evitando a erosão, e a disponibilidade de nutrientes e matéria orgânica no solo (DE BAETS *et al.*, 2011). Essa prática visa tornar sustentável ainda mais a utilização do solo para produção bovina, visando equilibrar a produtividade com o meio ambiente.

Entretanto, deve-se enfatizar que a aplicação de qualquer sistema deve se adequar à realidade da região, atendo-se ao tipo do solo e produção de grãos locais. Medidas inadequadas podem trazer problemas para a produção, sendo assim, é interessante realizar uma seleção adequada de grãos que serão integrados e a aplicação consciente de fertilizantes minerais (SCHMIDT *et al.*, 2018; HUNTER *et al.*, 2021).

O objetivo desse trabalho foi avaliar os impactos de meios de exploração do solo nos atributos físicos e químicos de um Latossolo argiloso na Região Oeste do Paraná.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Meios de exploração do solo**

A exploração do solo é um dos meios de extração de recursos e alimentos mais antigos. O ser humano vem se adaptando e evoluindo nessas práticas, resultando em um conglomerado de empresas e áreas de negócios que visam a exploração do solo, como a mineração e o uso do solo para a agricultura e a pecuária. O aumento da demanda por matérias-primas e mantimentos, acaba degradando o solo.

Com a intensificação dessas atividades, seja mineração ou agricultura, surgem inúmeras dificuldades para manter a preservação do meio ambiente e a qualidade do solo para plantio. Essa intensificação de demandas por recursos e alimentos vem resultando cada vez mais na abertura de áreas de produção por meio do desmatamento de matas nativas (SANTOS *et al.*, 2019).

Essa demanda pelo uso do solo resultando em áreas desmatadas, seja Mata Atlântica, Cerrado ou Floresta Amazônica, acabam influenciando nas alterações físico-químicas e climatológicas, afetando a biodiversidade local e a capacidade de autossuficiência do solo, principalmente na reposição de matéria orgânica e nutrientes (SANTOS *et al.*, 2019).

Aproximadamente 1,8 milhões de hectares (Mha) da Mata Atlântica foram substituídas por pastagem e outros meios agrícolas de plantio entre 1994 e 2002, com esse valor sendo ampliado para 2,8 Mha entre os anos de 2002 e 2010, com a pastagem ocupando um total de 40 Mha, registrados em 2010 (SANTOS *et al.*, 2019).

Na agricultura brasileira, o SPD é o sistema mais utilizado, por conta das condições climáticas favoráveis e principais grãos produzidos (ZORTEA; MACIEL; PASSUELLO, 2018). Segundo o IBGE, a estimativa de maio de 2024 para a safra nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas alcançou 296,8 milhões de toneladas. Para a soja, a estimativa de produção foi de 146,7 milhões de toneladas. Quanto ao

milho, a estimativa foi de 114,5 milhões de toneladas (23,7 milhões de toneladas na 1ª safra e 90,8 milhões de toneladas na 2ª safra). A produção do arroz foi estimada em 10,5 milhões de toneladas e a do trigo em 9,6 milhões de toneladas.

O Brasil é um grande produtor de grãos, sendo a soja uma das *comodities* mais importantes para a economia nacional, tendo grande relevância no comércio mundial. O Brasil é o segundo maior produtor e o principal exportador desse importante grão. Seu uso é diversificado, como na alimentação animal, na indústria química, na produção de óleos e na integração com o biocombustível (EMBRAPA, 2018). Isso explica a expansão do SPD no Brasil, entretanto, tal sistema, se implantado e manejado de forma incorreta e irresponsável, pode causar sérios problemas ambientais e econômicos.

A agricultura conservacionista, que é baseada na ideia do SPD com rotação de culturas e a cobertura vegetal do solo, é necessária para promover a qualidade do solo. Esse sistema minimiza a perturbação do solo, mantendo a estrutura e aumentando o teor de matéria orgânica, e sua prática é responsável pelo equilíbrio correto da ciclagem de nutrientes e diminuição da dependência de fertilizantes químicos. A cobertura vegetal protege o solo da erosão e é uma das melhores maneiras de manter o teor de umidade (SITHOLE; MAGWAZA; MAFONGOYA, 2016).

Já os meios de exploração mais agressivos, como as práticas de SPD sem rotação, reduzem a matéria orgânica, pois não incluem plantas de cobertura no sistema. Destaca-se que o SPD sem rotação de culturas, ou seja, com a utilização de monoculturas como soja e milho, é prejudicial para as propriedades físicas e químicas do solo (YANG; SIDDIQUE; LIU, 2020).

Todavia, a adoção de medidas sustentáveis focadas na manutenção da cobertura vegetal, é fundamental para o aumento do sequestro de carbono no solo, melhorando a fertilidade e reduzindo a erosão. Tais medidas ajudam a manter a propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, promovendo uma agricultura mais sustentável a longo prazo (PAGE; DANG; DALAL, 2020).

Ao contrário dos cultivos anuais, a fruticultura é um meio de exploração perene que depende de manejos apropriados a longo prazo para ser sustentável. Destaca-se como um dos meios de exploração de maior importância, com um papel fundamental

na agricultura, oferecendo uma vasta gama de espécies cultiváveis, importantes para a nutrição, alimentação e com uma contribuição significativa para a economia agrícola (ESPINOZA-MEZA *et al.*, 2023).

É importante destacar que a qualidade do plantio associada ao gerenciamento das áreas de fruticultura e à saúde do solo devem ser integradas como um único componente. Os meios de cultivo que adotam práticas conservacionistas e sustentáveis, acabam resultando na preservação da condição estrutural do solo e da matéria orgânica. Essas práticas não apenas beneficiam o solo, mas também aumentam a capacidade produtiva e a qualidade dos frutos. Contudo, práticas inadequadas, como o uso excessivo de fertilizantes químicos e irrigação ineficiente, podem levar à degradação do solo, incluindo salinização e contaminação do solo (MINAS; TANOU; MOLASSITIS, 2018).

Outro meio de exploração em destaque é a pecuária, representando um setor fundamental, responsável pela produção animal destinada para carne, leite, couro e outros produtos. Tradicionalmente, a pecuária tem sido uma fonte importante de sustento econômico e nutricional para muitas populações ao redor do mundo. No entanto, a prática tem enfrentado desafios significativos relacionados ao impacto ambiental, eficiência de produção e bem-estar animal. Dentre os métodos de criação pecuária destaca-se a pecuária extensiva, pecuária de confinamento, e a nova pecuária de precisão.

A pecuária extensiva é caracterizada pela criação de animais em grandes áreas de pastagem, onde eles têm liberdade para moverem-se e alimentarem-se de pastagens. Esse método é geralmente menos intensivo em termos de manejo e insumos, o que pode resultar em menos custos operacionais. No entanto, a pecuária extensiva pode levar à degradação do solo e à perda de biodiversidade se não for adequadamente manejada. Além disso, a eficiência produtiva pode ser significativamente menor em comparação com outros métodos mais intensivos (SAATH; FACHINELLO, 2018).

Enfim, a pecuária de precisão é uma abordagem moderna que utiliza tecnologias avançadas para monitorar e gerenciar a produção animal de maneira mais eficiente e sustentável. A pecuária digital integra sensores, dispositivos de monitoramento e

análise de dados para otimizar a saúde e o bem-estar dos animais, bem como a eficiência produtiva (NEETHINRAJAN; KEMP, 2021). É uma estratégia eficaz para mitigar o impacto ambiental da pecuária, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e tornando mais eficiente o uso dos recursos (TULLO; FINZI; GUARINO, 2019). A implantação de tecnologias associadas à pecuária baseadas em sistemas de pastagem pode aumentar a sustentabilidade e a produtividade ao menos mesmo tempo em que preserva o meio ambiente (AQUILANI *et al.*, 2022).

Outro método que visa melhorar as condições ambientais da pecuária é a Integração Lavoura-Pecuária (ILP). Esse meio combina a produção agrícola com a pecuária em um sistema único e integrado. Esse modelo de produção oferece vários benefícios, promovendo uma agricultura mais sustentável e resiliente (ASAI *et al.*, 2022). A ILP pode reduzir significativamente os resíduos e otimizar o uso dos recursos, contribuindo para um sistema de produção mais sustentável. Ao reciclar nutrientes e matéria orgânica, a ILP melhora a fertilidade do solo e reduz a dependência de fertilizantes químicos, o que, por sua vez, diminui a poluição ambiental e os custos de produção (HAN *et al.*, 2023). Além disso, pode reduzir a pressão sobre o desmatamento, melhorando a gestão do solo e da água. Estes benefícios são essenciais para a sustentabilidade a longo prazo dos sistemas agrícolas (PAUL *et al.*, 2022).

Portanto, estudar os impactos de meios de exploração é de fundamental importância para garantir a sustentabilidade e a produtividade a longo prazo na agricultura. Compreender as consequências ambientais das diferentes práticas agrícolas permite desenvolver estratégias que minimizem os efeitos negativos, promovam a saúde do solo e assegurem a viabilidade dos sistemas de produção. A análise detalhada dos métodos de exploração, como SPD com e sem rotação, fruticultura, pecuária e ILP, fornece informações importantes para aprimorar o manejo agrícola.

## **2.2. Impactos dos meios de exploração agrícola nas propriedades químicas do solo**

O uso irresponsável do solo na agricultura pode resultar em uma série de impactos negativos no seu componente químico, afetando a sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas. Práticas inadequadas, como a aplicação excessiva de fertilizantes químicos e a má gestão de resíduos orgânicos, têm sido associadas a várias consequências adversas, incluindo a lixiviação de nutrientes e a degradação da qualidade do solo (LI *et al.*, 2019).

A adição descontrolada de fertilizantes nitrogenados tanto no SPD sem rotação quanto nas áreas de pastagem, por meio da adição de dejetos bovinos, pode alterar significativamente a composição química do solo. A longo prazo, essa prática pode levar ao acúmulo de nitrogênio no solo, o que, por conseguinte, provoca mudanças na microbiota e na atividade enzimática do solo. Essas alterações podem comprometer a ciclagem de nutrientes e a decomposição da matéria orgânica, resultando em solos menos férteis e produtivos (LI *et al.*, 2019).

Tal uso indiscriminado de insumos químicos em meios de exploração intensivos com o SPD sem rotação e a pastagem também pode alterar o pH do solo, tornando-o mais ácido ou alcalino, dependendo dos compostos aplicados. A acidez excessiva do solo disponibiliza alumínio, que é tóxico para as plantas. Por outro lado, solos alcalinos podem limitar a disponibilidade de micronutrientes, como manganês, zinco e ferro, prejudicando o crescimento e desenvolvimento das culturas (SPARKS; SINGH; SIEBECKER, 2022).

Um dos meios de exploração do solo de maior destaque é o SPD com rotação de culturas e práticas conservacionistas. Esse meio de exploração causa impactos químicos positivos no solo, promovendo melhorias na fertilidade e na qualidade do solo a longo prazo. Esse sistema é fundamental para a reestruturação do solo e a restauração da matéria orgânica, o que, por sua vez, melhora as propriedades físicas e químicas do solo. A decomposição da camada de cobertura superficial libera nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, aumentando a disponibilidade desses nutrientes para as plantas. Além disso, a matéria orgânica atua como agente quelante, facilitando a absorção de micronutrientes pelas plantas (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018; SALOMÃO *et al.*, 2020). Além de aumentar a capacidade de troca catiônica

(CTC) do solo, melhora a capacidade de reter e disponibilizar nutrientes para as plantas (EZE *et al.*, 2020).

O SPD com rotação prevê uma maior ciclagem dos nutrientes por meio da utilização de plantas de cobertura, como a braquiária, crotalária, entre outras. Essas plantas detêm raízes profundas, que podem absorver nutrientes de camadas profundas do solo e disponibilizar na superfície do solo, fornecendo nutrientes para cultivos subsequentes (BYRNES *et al.*, 2017; SHEKINAH; STUTE, 2018).

Com relação à fruticultura, os impactos químicos no solo são gerados pelo uso intensivo dos fertilizantes químicos. A aplicação excessiva de fertilizantes pode levar ao acúmulo de nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio em concentrações que excedem a capacidade de absorção das plantas. Esse excesso pode resultar na lixiviação de nutrientes para camadas mais profundas do solo, contaminando corpos d'água (MINAS; TANOU; MOLASSITIS, 2018).

A fruticultura também pode impactar a composição orgânica do solo. A remoção contínua de biomassa, como frutas e podas, sem a reposição adequada de matéria orgânica, pode levar à diminuição dos níveis de carbono orgânico do solo. A matéria orgânica é crucial para a saúde do solo, pois melhora sua estrutura, aumenta a retenção de água e nutrientes e sustenta a atividade microbiana benéfica. A redução da matéria orgânica pode, portanto, resultar em solos menos férteis e menos produtivos a longo prazo (ESPINOZA-MEZA *et al.*, 2023).

Contudo, a fruticultura também pode ter efeitos positivos na química do solo quando práticas sustentáveis são adotadas. A utilização de práticas de adubação verde e aplicação de compostagem, podem aumentar a matéria orgânica presente no solo. (MINAS; TANOU; MOLASSITIS, 2018).

Já a pecuária, além de causar impactos físicos no solo, também tem efeitos significativos na química do solo. Esses impactos variam de acordo com o método de criação utilizado, seja ele extensivo, confinamento ou de precisão. Na pecuária extensiva, o manejo inadequado pode levar a um desequilíbrio nos nutrientes do solo. O pastoreio excessivo e a deposição irregular de esterco podem resultar em áreas do solo com excesso de nutrientes e outras com deficiência. O acúmulo de nitrogênio e fósforo em locais específicos pode causar eutrofização e contaminação dos recursos

hídricos próximos. Além disso, o pisoteio intensivo dos animais podem compactar o solo, reduzindo sua capacidade de retenção de nutrientes e água, e levando à lixiviação de nutrientes essenciais para camadas mais profundas do solo (SAATH; FACHINELLO, 2018).

Já no sistema de confinamento, em que os animais são mantidos em áreas restritas, a produção de esterco é significativa. Esse esterco, se não manejado adequadamente, pode resultar em alta concentração de nutrientes no solo, principalmente nitrogênio e fósforo. A aplicação excessiva de esterco pode levar à saturação do solo com nutrientes, aumentando o risco de lixiviação e escoamento superficial, o que pode contaminar corpos d'água adjacentes (MEE; BOYLE, 2020).

A pecuária de precisão utiliza tecnologias para o monitoramento e otimização do manejo dos animais, oferecendo uma abordagem mais sustentável para a gestão dos impactos químicos no solo. Por meio do uso de sensores e sistemas de monitoramento, é possível ajustar a aplicação de nutrientes de forma precisa, evitando tanto a deficiência quanto o excesso. Isso não só melhora a eficiência do uso de fertilizantes e esterco, como também minimiza o risco de contaminação do solo e da água. A pecuária de precisão tem um controle mais rigoroso dos resíduos animais, facilitando práticas como a compostagem e a aplicação controlada de esterco, que melhoram a fertilidade do solo sem causar poluição (NEETHIRAJAN; KEMP, 2021; TULLO; FINZI; GUARINO, 2019).

Os impactos químicos da pecuária no solo variam amplamente de acordo com as práticas de manejo adotadas. Enquanto a pecuária extensiva e de confinamento apresentam desafios significativo relacionados à concentração e lixiviação de nutrientes, a pecuária de precisão oferece soluções promissoras para mitigar esses impactos.

A Integração Lavoura-Pecuária (ILP) é outro modelo que visa minimizar os impactos da pecuária, contribuindo para o aumento da fertilidade do solo ao reciclar nutrientes por meio da decomposição de resíduos de culturas e esterco. O retorno de matéria orgânica e nutrientes ao solo melhora a disponibilidade de macro e micronutrientes para o crescimento das plantas. Esse processo aumenta a capacidade

de troca catiônica (CTC) do solo, permitindo melhor retenção de nutrientes e diminuindo a necessidade de fertilizantes minerais (HAN *et al.*, 2023).

A adição contínua de resíduos orgânicos no meio de exploração ILP, como esterco e restos de culturas, enriquece o solo com matéria orgânica. A matéria orgânica é crucial para a saúde do solo, aumentando a capacidade do solo de retenção de umidade e melhorando as condições estruturais do solo. A presença de matéria orgânica também pode estabilizar o pH do solo, criando um ambiente mais favorável para o crescimento das plantas (PAUL *et al.*, 2022).

A integração de animais no sistema facilita a ciclagem de nutrientes. O esterco é uma fonte rica de nutrientes, incluindo o nitrogênio, fósforo e potássio, que são fundamentais para a produtividade das culturas. A aplicação de esterco ao solo libera esses nutrientes de forma gradual, o que pode melhorar a eficiência do uso de nutrientes e reduzindo a necessidade de insumos externos (ASAI *et al.*, 2022).

Entretanto, a má gestão do esterco pode resultar em contaminação do solo com nutrientes em excesso, como nitrogênio e fósforo. O excesso de nitrogênio pode levar a lixiviação de nitratos. O excesso de fósforo pode associado a saturação da camada superficial do solo, pode aumentar os riscos de escoamento superficial e poluição dos cursos d'água (PAUL *et al.*, 2022).

A adição constante de esterco e resíduos orgânicos podem alterar o pH do solo, enquanto a matéria orgânica geralmente estabiliza o pH, a decomposição de esterco pode liberar ácidos orgânicos, temporariamente acidificando o solo. Em solos já ácidos, essa adição pode agravar a acidez, necessitando a aplicação de corretivos, como calcário, para neutralizar o pH (ASAI *et al.*, 2022).

A adoção de estratégias sustentáveis, como a aplicação equilibrada de esterco, a rotação de culturas e a manutenção de uma cobertura vegetal adequada, é essencial para maximizar os benefícios e minimizar os impactos negativos. A ILP, quando bem manejada, tem o potencial de promover a saúde do solo, aumentando a eficiência do uso de recursos.

Dessa forma, o manejo responsável do solo é fundamental para manter a saúde química e assegurar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Estratégias de manejo integradas e práticas agrícolas sustentáveis são necessárias para minimizar os

impactos negativos e promover um uso mais equilibrado e eficiente dos recursos disponíveis.

Gazolla *et al.* (2015) avaliaram diferentes meios de exploração e seus impactos nas propriedades químicas do solo e observaram que o SPD apresentou maiores valores de índice de manejo do carbono (IMC) em comparação aos sistemas. Os autores salientaram que o SPD foi o sistema que mais aportou carbono no solo.

Assunção *et al.* (2019) analisaram a influência dos diferentes meios de exploração nas características químicas do solo, principalmente a matéria orgânica. De acordo com os autores, o SPD apresentou os melhores valores de aporte de carbono orgânico no solo em comparação com os demais meios de exploração (pastagem e plantio convencional).

### **2.3. Impactos dos meios de exploração agrícola nas propriedades físicas do solo**

O SPD ideal, baseado no SPD com rotação de culturas é um meio de exploração do solo que visa a realização de plantio sem o revolvimento, mantendo a integridade estrutural do solo e, que, associado a práticas conservacionistas, pode resultar em melhorias consideráveis para o solo. As práticas conservacionistas, como rotação de culturas e cobertura vegetal no solo, melhoram significativamente a saúde do solo, diminuindo a perda de água e solo por erosão, mantendo a umidade no solo, melhorando a infiltração de água e trocas gasosas (SITHOLE; MAGWAZA; MAFONGOYA, 2016; YANG; SIDDIQUE; LIU, 2020).

Entretanto, com o intenso tráfego de máquinas agrícolas pesadas juntamente com SPD sem rotação ocorre a degradação rápida das propriedades do solo. Os problemas causados são compactação, erosão e perdas de produção nos solos agrícolas (BERTOLLO; LEVIEN, 2019).

A compactação é o aumento da densidade não natural do solo, ou seja, inferida pelo ser humano, restringindo o desenvolvimento de raízes na camada superficial (10-20 cm). Com isso, em momento de estresse hídrico, ou seja, em períodos de estiagem, a raiz fica limitada a uma camada seca, não conseguindo transpor a compactação para

alcançar umidade em áreas mais profundas. Já em períodos de excesso de chuva, ocorre a saturação da camada superficial, que é a condição em que a água não consegue infiltrar no perfil do solo devido à redução da macroporosidade, causando a superlotação dos microporos da camada de 10-20 cm. Isso ocasiona erosão do solo, levando consigo nutrientes e solo (GONGORA *et al.*, 2022).

A erosão é um dos problemas mais sérios relacionados diretamente com o SPD sem rotação e com a formação de camadas compactadas. O fenômeno está associado ao desprendimento das partículas de solo, essas sendo transportadas por água ou ar. No caso de transporte por água da chuva, as partículas são levadas no sentido de maior declive da área e em situações de solos compactos. Dessa forma, a erosão hídrica ocorre com o escoamento superficial de água e solo (GONGORA *et al.*, 2022).

Além disso, tais condições de estresse causam diversos danos diretos e indiretos na cultura, devido à resistência a penetração. A planta fica limitada a uma condição reduzida de nutrientes e umidade, resultando em uma diminuição na capacidade de produção total da cultura (SECCO *et al.*, 2021).

Com relação à fruticultura, caracteriza-se pelo uso excessivo de máquinas e implementos entre as linhas de plantio e por serem, em sua maioria, cultivadas plantas perenes. Nessa atividade, poucos produtores realizam uma rotação de culturas entre linhas, resultando em problemas físicos significativos, como a compactação, reduzindo, assim, a macroporosidade do solo. Além disso, influencia na infiltração de água no solo, nas trocas gasosas e no controle de temperatura, essenciais para respiração das raízes e dos organismos do solo (ESPINOZA-MEZA *et al.*, 2023).

Nos pomares, a erosão do solo é frequentemente causada pela remoção da cobertura vegetal para o estabelecimento. Com isso, a camada superficial do solo, rica em nutrientes e matéria orgânica, é perdida, influenciando as propriedades químicas do solo (MINAS; TANOU; MOLASSITIS, 2018). Para evitar tais problemas é fundamental a adoção de práticas de manejo conservacionistas e sustentáveis. Técnicas como o aporte de matéria orgânica, a manutenção da cobertura vegetal e o uso e adoção de meios de rotação de cultura de cobertura entre linha, são medidas para melhorar as condições físicas do solo (ESPINOZA-MEZA *et al.*, 2023).

A pecuária é outro meio de exploração que pode impactar negativamente as propriedades físicas do solo. Entre os métodos de criação, a pecuária extensiva é a que causa mais impactos negativos nas propriedades físicas do solo. A pecuária, caracterizada pela criação de animais em grandes áreas de pastagem, pode levar à degradação do solo devido ao pisoteio constante dos animais. Esse pisoteio compacta o solo nas camadas superficiais, reduzindo sua porosidade e capacidade de infiltração de água, o que pode resultar em erosão e perda de nutrientes. A degradação do solo é identificada em áreas de pastagem mal manejadas, com muitos animais em um único talhão, onde permanecem sem rotação, onde a vegetação não é adequadamente repostada e o solo fica exposto à erosão hídrica e eólica (SAATH; FACHINELLO, 2018).

Por outro lado, a pecuária de precisão, que utiliza tecnologias avançadas para monitoramento e gerenciamento da produção animal, pode minimizar alguns impactos negativos da pecuária extensiva e confinamento. Tal abordagem permite a utilização de sensores e dispositivos que podem ser usados para ajustar a alimentação e irrigação das pastagens, evitando a superexploração e a degradação do solo. Além disso, a pecuária de precisão pode ajudar a distribuir os animais de forma mais uniforme pelas pastagens, separadas e manejadas adequadamente entre os talhões, levando assim na rotação dos animais e evitando a sobrecarga do pasto e do solo, reduzindo a compactação do solo e promovendo a recuperação da vegetação (NEETHIRAJAN; KEMP, 2021; TULLO; FINZI; GUARINO, 2019).

No entanto, a implantação de tecnologias de pecuária de precisão em sistemas de pastagem requer investimento inicial significativo e a formação adequada dos indivíduos envolvidos na produção. Quando bem implementada, essa abordagem pode aumentar a sustentabilidade e a produtividade, preservando o meio ambiente e reduzindo os impactos nas propriedades físicas do solo, principalmente em sua estrutura. A utilização de tecnologias associadas a sistemas de pastagem pode melhorar a estrutura do solo, aumentando a retenção e infiltração de água e nutrientes e preservando a biodiversidade do solo, contribuindo para a resiliência dos ecossistemas agrícolas (AQUILANI *et al.*, 2022).

Outro sistema que visa minimizar os impactos da pecuária é a Integração Lavoura-Pecuária (ILP). Esse modelo de produção agrícola combina a produção de

cultivos e a criação de animais em um sistema único e integrado. Tal modelo oferece uma série de benefícios para a preservação da estrutura do solo, pois visa a utilização de plantas de cobertura, o que auxilia no aporte de matéria orgânica e de nutrientes. Além disso, diminui o risco de erosão e fornece barreira de resistência contra o pisoteio animal. A presença de raízes de diferentes tipos de plantas ajuda a criar uma rede de poros, conhecida como bioporos estáveis, que aumentam a infiltração de água no solo e a aeração do solo. Isso é particularmente benéfico em solos compactados, onde raízes das plantas forrageiras e de culturas anuais podem romper camadas compactadas e melhorar a estrutura do solo, minimizando o impacto do pisoteio dos animais (ASAI *et al.*, 2022). A cobertura vegetal permanente proporcionada pela ILP ajuda a proteger o solo contra a erosão hídrica (PAUL *et al.*, 2022).

Observa-se que os meios de exploração afetam as propriedades físicas do solo em pontos diferentes. Entretanto, o principal fator é a incorreta gestão e manejo do uso do solo, em que compreende-se que são necessários estudos e análises voltadas para a avaliação dos impactos físicos dos meios de exploração para melhor entendimento e desenvolvimento de práticas e técnicas sustentáveis de uso do solo, com o objetivo de melhorar as condições dos atributos físicos do solo.

Colombo *et al.* (2017), avaliando diferentes meios de exploração, verificaram menores valores de resistência à penetração nas camadas superficiais na área sob SPD em comparação à área de pastagem degradada. Ainda, segundo os autores, nas camadas subsuperficiais, foram observados valores críticos de resistência à penetração nos dois sistemas de manejo.

Em outro estudo, Custódio *et al.* (2015) analisando diferentes meios de exploração observaram que as densidades do solo nas camadas superficiais foram mais elevadas no ILP em comparação com a mata nativa.

Torres *et al.* (2018) verificaram em diferentes meios de exploração que os sistemas que mais beneficiam as propriedades físicas do solo foram o ILP e o SPD. Os autores salientam que áreas de pastagem extensivas são um dos meios de exploração mais danosos para as propriedades físicas do solo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no Instituto do Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR – Paraná), em Santa Tereza do Oeste – PR (Figura 1), com latitude 25°8' S, longitude de 53°58' W e altitude média de 607 metros. O solo é classificado como um Latossolo Vermelho Distroférico de textura argilosa a muito argilosa, com relevo suave-ondulado e substrato basalto (EMBRAPA, 2018). O clima da região é subtropical mesotérmico úmido, de acordo com a classificação de Köppen, apresentando precipitação média anual variando de 1800 a 2000 mm (WREGE, 2012).



**Figura 1.** Vista da área experimental do IDR-Paraná, constando as áreas de avaliação dos sistemas de exploração. Desenvolvido pelo autor, por meio do software QGIS 3.34, por meio da extensão Google Satellite

Os tratamentos foram compostos por meios de exploração, tais como: sistema de plantio direto com rotação (SPD C/ ROT), sistema de plantio direto sem rotação

(SPD S/ ROT), fruticultura, pastagem, integração lavoura-pecuária (ILP) e a testemunha sendo a mata nativa (Figura 1). Foram analisadas as propriedades químicas e físicas do solo nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 50-60 cm. A coleta das amostras físicas e químicas foram realizadas no dia 19 de maio de 2023. Foram coletadas 192 amostras físicas indeformadas do solo em quatro pontos de coleta em duplicata, totalizando 32 amostras por tratamento. Para as análises químicas do solo, foram coletadas 96 amostras em quatro pontos de coleta, totalizando 16 amostras por tratamento.

Tratamentos	Profundidades (cm)	Areia	Argila	Silte
		-----%-----		
<b>SPD C/Rotação</b>	0-10	5,11	41,59	53,30
	10-20	1,82	63,32	34,85
	20-30	1,46	72,99	25,54
	50-60	1,30	74,63	24,07
<b>SPD S/Rotação</b>	0-10	6,41	66,10	27,49
	10-20	5,81	71,76	22,42
	20-30	5,10	72,58	22,32
	50-60	4,69	76,45	18,86
<b>ILP</b>	0-10	7,11	53,52	39,37
	10-20	6,15	69,18	24,66
	20-30	5,90	72,65	21,45
	50-60	5,16	75,03	19,81
<b>Pastagem</b>	0-10	3,08	66,53	30,39
	10-20	3,00	64,19	32,80
	20-30	3,36	65,76	30,88
	50-60	3,41	60,02	36,57
<b>Fruticultura</b>	0-10	6,57	58,90	34,53
	10-20	7,03	62,71	30,26
	20-30	6,04	58,12	35,84
	50-60	6,84	53,49	39,67
<b>Mata Nativa</b>	0-10	9,24	56,03	34,72
	10-20	9,27	59,25	31,48

20-30	8,20	56,43	35,37
50-60	8,36	54,50	37,13

A caracterização física do solo foi realizada no Laboratório de Física do Solo (LAFIS), localizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Avaliou-se a densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, a estabilidade dos agregados em água (DMG e DMP), condutividade hidráulica do solo saturado, assim como, a caracterização textural do solo (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização textural do solo.

O volume de solo nas amostras foi ajustado ao anel volumétrico e foram saturadas em água por 48 horas em bandeja com lâmina de água a 2/3 de sua altura (Figura 2). Inicialmente, determinou-se a condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) utilizando permeâmetro de carga constante. Os cálculos da Ksat foram realizados conforme metodologia da Embrapa (2011).



**Figura 2.** Amostras passando pelo processo de saturação a 2/3 de água da altura do anel volumétrico. Foto do autor.

Posteriormente, as amostras saturadas foram pesadas e alocadas em coluna de areia e submetidas à tensão de 0,6 m.c.a na qual permaneceram por 72 horas drenando a água contida nos macroporos (REINERT; REICHERT, 2006) como apresentado na Figura 2. Em sequência, as amostras foram novamente pesadas e alocadas em estufa a 105 °C por 48 horas para determinação da microporosidade do

solo. Para determinação da densidade do solo, levou-se em consideração o volume (V) do anel volumétrico e massa de solo seco (MSS).

Para determinação do diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), foram realizadas coletas de blocos indeformados nas camadas de 0-10 cm de profundidade do solo em quatro pontos de cada tratamento, totalizando 24 pontos e 24 subamostras totais de blocos indeformados (Figura 3).



**Figura 3.** Amostras passando pelo processo de extração da água presente nos macroporos em coluna de areia. Foto do autor.

Para determinação do DMG e DMP, utilizou-se a metodologia da distribuição dos tamanhos dos agregados estáveis em água (KEMPER; CHEPIL, 1965). Após a coleta dos blocos indeformados, realizou-se a separação dos agregados, em peneira de diâmetro de malha 8 mm e retidos em malha 4,76 mm, aplicando-se força no sentido de tração, formando assim os agregados posteriormente secados ao ar e utilizados para a análise (Figuras 4, 5 e 6).



**Figura 4.** Bloco indeformado coletado em camada de 0-10 cm de profundidade do solo, destinado para análise de DMG do solo. Foto do autor.



**Figura 5.** Blocos passando pelo processo de separação para formação dos agregados em peneira de diâmetro malha 8 mm. Foto do autor.



**Figura 6.** Agregados em processo de secagem ao ar, estes passando pela malha 8 mm e retidos em malha 4,76 mm. Foto do autor.

Após a secagem das amostras, realizou-se a pesagem de quatro subamostras de cada amostra composta inicial, que totalizou 24 subamostras de agregados, colocados em estufa para determinação da umidade e fator de correção.

Em seguida, tendo determinado a umidade e fator de correção, realizou-se a preparação do aparelho de oscilação vertical de amostras submersas em água, e instalação de quatro conjuntos de peneiras pela seguinte ordem de tamanho: 4,76; 2,00; 1,00 mm; 250 e 106  $\mu\text{m}$ . Adicionou-se água até a borda inferior da peneira de 4,76 mm com o aparelho de oscilação em sua posição mais elevada (Figura 7).



**Figura 7.** Aparelho de oscilação de agregados submersos em água, vista superior dos suportes do conjunto de peneiras. Foto do autor.

Após essa etapa, as quatro peneiras superiores (Figura 8), malha 4,76 mm, foram retiradas da água e realizou-se a distribuição uniforme das quatro subamostras nas quatro peneiras e reposicionou-se, lentamente junto as demais peneiras submersas, com os agregados submersos por 10 minutos para umedecimento antes da oscilação ser iniciada, com o aparelho sendo acionado aos os 10 minutos e oscilando por mais 10 minutos. Após os 10 minutos de oscilação, retirou-se os conjuntos de peneiras e transferiu-se o material retido em cada uma das peneiras para cápsulas de alumínio previamente identificadas e pesadas. Em seguida, com o material já transferido, passou-se para o processo de secagem em estufa a 105°C até peso constante e posteriormente pesadas.



**Figura 8.** Conjunto de peneiras utilizado para análise, compondo-se peneiras da parte superior para inferior: 4,76; 2,00; 1,00 mm; 250 e 206  $\mu\text{m}$ . Foto do autor.

Com o material devidamente seco, realizou-se o processo de separação da fração areia do solo, utilizando-se peneira malha 250  $\mu\text{m}$  e solução de 1/3 de hidróxido de sódio (NaOH) a 6 % para 2/3 de água destilada, submergindo a peneira com a amostra de solo na solução por 1 minuto. Em seguida, realizou-se a lavagem com água e a areia foi transferida para as cápsulas de alumínio e enviadas para secar em estufa a 105°C até peso constante. Após a secagem, realizou-se a pesagem.

Para as análises químicas e de matéria orgânica, as amostras foram retiradas das camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 50-60 cm, com cada tratamento tendo quatro pontos de coleta, totalizando 96 amostras. A amostragem foi realizada com trado do tipo holandês.

A metodologia utilizada foi a descrita em Pavan *et al.* (1992).

Determinou-se o pH ( $\text{CaCl}_2$ ), teores de potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e matéria orgânica (MO). O pH- $\text{CaCl}_2$  foi medido, por potenciômetro imerso em solução solo/solução salina  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol  $\text{L}^{-1}$  na proporção 1:2,5. Para determinar Al, Ca e Mg foram extraídos por KCl 1 mol  $\text{L}^{-1}$ , titulando em fração do extrato, o Al com NaOH com presença de azul de bromotimol como indicador, o Ca e Mg por complexamétrico com emprego de EDTA através de titulação. O P e K (Mehlich-

1) foram analisados por meio de solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$  mais  $\text{HCl}$   $0,05 \text{ mol L}^{-1}$  seguida da determinação das concentrações de P por colorimetria e de K por fotometria de chama. O carbono orgânico foi determinado usando  $\text{CO}_2$  por íons dicromato em meio fortemente ácido e convertido em matéria orgânica.

Os dados foram analisados a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, devido à falta de normalidade e por não satisfazerem as pressuposições estatísticas. Apesar de todos os tratamentos estarem dentro do IDR-Paraná, apresentaram diferenças entre si. Além disso, foi realizada análise de correlação linear simples ao nível de 5% de probabilidade.

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software estatístico Minitab 17 (Minitab Inc., State College, PA).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Propriedades químicas do solo

O pH do solo foi afetado significativamente pelos meios de exploração em todas as camadas avaliadas. Os valores de pH do solo mostraram-se mais elevados nos sistemas SPD C/ROT, ILP e fruticultura, principalmente na camada de 0-10 cm, em relação ao SPD S/ROT e a pastagem. Tal resultado pode ser atribuído à rotação de culturas e ao aporte constante de matéria orgânica, que ajudam a tamponar a acidez (BREWER & GAUDIN, 2020). Na camada de 10-20 cm, os maiores valores foram observados para fruticultura (6,15) e na mata nativa (6,05) em relação aos SPDs e a pastagem. Já na camada de 20-30 cm, o SPD C/ROT (4,85) e a fruticultura (5,68) mantiveram os melhores resultados em comparação aos demais tratamentos. Na profundidade de 50-60 cm, o sistema ILP, SPD C/ROT e fruticultura apresentaram pH acima de 4,90, evidenciando menor acidificação em profundidade em relação ao SPD S/ROT. O SPD S/ROT exibiu os menores valores de pH em todas as camadas, destacando-se pela acidificação do solo (ALVES *et al.*, 2019; DINIZ *et al.*, 2021).

Para o fósforo (P), os maiores teores foram encontrados no SPD S/ROT, SPD C/ROT e ILP em comparação aos demais sistemas de exploração. Esses valores podem ser resultado do acúmulo superficial de fertilizantes aplicados nesses sistemas de manejo. Contudo, sistemas como pastagem, fruticultura e a mata nativa apresentaram menores valores de P. Esse padrão se manteve nas camadas mais profundas, indicando menor aplicação ou maior fixação de nutrientes (ALVES *et al.*, 2019).

Observou-se que os teores de potássio (K) foram elevados no SPD C/ROT (0,89  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) e ILP (0,56  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) para a camada de 0-10 cm, evidenciando boa ciclagem de nutrientes. Em contraste, o SPD S/ROT apresentou os menores valores em todas as camadas, com valores de 0,25 e 0,28  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  nas camadas de 10-20 cm e 20-30 cm, equiparando-se, estatisticamente, com a pastagem e fruticultura. Esses valores reduzidos devem-se, principalmente, à ausência de práticas conservacionistas como a rotação de culturas (DINIZ *et al.*, 2021).

**Tabela 2.** Propriedades químicas do solo em função dos meios de exploração (valores médios de quatro repetições).

Tratamento	pH CaCl <sub>2</sub>	P mg dm <sup>-3</sup>	K ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	Ca cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Mg cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	MO g dm <sup>-3</sup>
<b>Camada 0-10 cm</b>						
SPD c/rot	5,58 a	43,22 a	0,89 a	7,76 a	3,02 a	68,5 b
SPD s/rot	5,05 b	56,90 a	0,37 b	6,96 b	2,23 b	73,6 b
ILP	5,80 a	36,50 a	0,56 a	9,14 a	1,77 b	79,9 a
Pastagem	5,30 b	10,50 b	0,45 b	5,80 b	3,93 a	65,5 b
Fruticultura	5,78 a	21,47 b	0,37 b	6,24 b	2,94 a	70,5 b
Mata nativa	6,03 a	22,54 b	0,71 a	10,89 a	2,82 b	87,1 a
<b>Camada 10-20 cm</b>						
SPD c/rot	5,08 b	31,60 a	0,31 a	5,01 a	2,12 a	69,9 a
SPD s/rot	4,50 b	90,02 a	0,25 b	3,25 b	1,15 b	53,2 b
ILP	4,88 b	43,62 a	0,30 b	4,14 b	0,93 b	53,1 b
Pastagem	4,93 b	7,95 b	0,24 b	3,96 b	1,75 b	52,1 b
Fruticultura	6,15 a	11,69 b	0,27 b	6,21 a	3,42 a	53,7 b
Mata nativa	6,05 a	6,53 b	0,63 a	10,00 a	2,28 a	71,5 a
<b>Camada 20-30 cm</b>						
SPD c/rot	4,85 a	7,58 <sup>ns</sup>	0,25 b	3,39 b	1,70 a	49,7 <sup>ns</sup>
SPD s/rot	4,33 b	16,26	0,18 b	2,68 b	0,95 b	54,8
ILP	4,65 b	9,84	0,22 b	2,85 b	0,73 b	51,7
Pastagem	4,75 b	6,12	0,18 b	3,05 b	1,57 a	47,4
Fruticultura	5,68 a	10,26	0,15 b	4,41 a	2,68 a	51,0
Mata nativa	6,00 a	6,93	0,66 a	7,68 a	2,11 a	50,7
<b>Camada 50-60 cm</b>						
SPD c/rot	4,90 a	5,07 a	0,07 b	1,94 b	1,26 a	26,2 <sup>ns</sup>
SPD s/rot	4,45 b	7,34 a	0,10 b	2,05 b	0,86 b	30,0
ILP	5,03 a	3,75 b	0,13 b	2,05 b	0,80 b	31,9
Pastagem	4,75 b	3,49 b	0,08 b	1,29 b	0,81 b	31,6
Fruticultura	4,93 b	5,55 a	0,06 b	2,00 b	1,26 a	30,6
Mata nativa	5,80 a	7,06 a	0,81 a	5,50 a	1,71 a	39,6

Letras distintas indicam diferença significativa de acordo com o teste de Kruskal-Wallis ( $p < 0.05$ ). <sup>ns</sup> indica a não significância na camada. Sistema de plantio direto com rotação (SPD C/ ROT), sistema de plantio direto sem rotação (SPD S/ ROT), integração lavoura-pecuária (ILP).

Os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) foram superiores no SPD C/ROT e fruticultura em comparação à mata nativa em todas as camadas, demonstrando maior

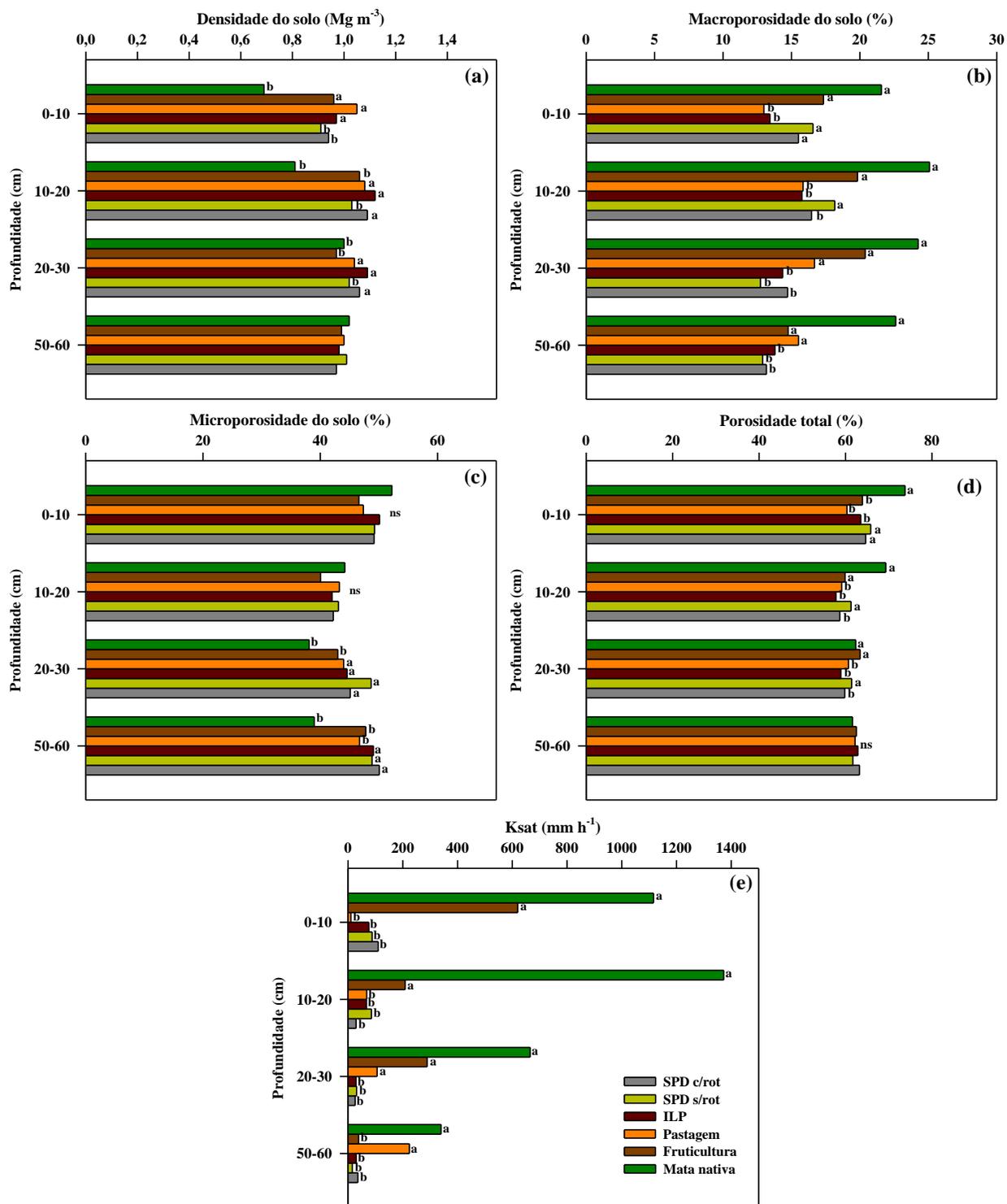
equilíbrio químico nesses sistemas. Por outro lado, o SPD S/ROT apresentou os menores teores, indicando menor quantidade de nutrientes para o crescimento das plantas (QASWAR *et al.*, 2020).

Quanto à matéria orgânica, observou-se efeito significativo quanto aos meios de exploração nas três primeiras camadas, sendo elas: 0-10, 10-20 e 20-30 cm. Os sistemas ILP e SPD C/ROT destacaram-se como os sistemas com maiores teores de MO registrados, especialmente na camada de 0-10 cm, com valores estatisticamente comparáveis à mata nativa. Entretanto, na camada de 10-20 cm, os teores foram de 69,9 g dm<sup>-3</sup> e 71,5 g dm<sup>-3</sup> para o SPD C/ROT e para mata nativa, valores que se equivalem estatisticamente, atribuídos à reposição constante de resíduos vegetais. Contudo, a pastagem apresentou os menores valores de MO, especialmente na camada de 0-10 cm, devido à ausência de práticas conservacionistas que promovam a reposição de matéria orgânica no solo (ALVES *et al.*, 2019; DINIZ *et al.*, 2021).

Logo, nesse cenário, pode-se afirmar que as práticas de manejo conservacionista, cujos exemplos são a rotação de culturas e do aporte de cobertura vegetal, têm grande potencial em melhorar as propriedades químicas do solo, ao passo que sistemas que não seguem tal prática, como o SPD S/ROT e a pastagem, apresentam elevados índices de degradação quando comparados aos demais meios de exploração.

## **4.2 Propriedades físicas do solo**

A densidade do solo foi afetada significativamente pelos meios de exploração nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm (Figura 09a). Em geral, maiores valores de densidade do solo foram observados nos meios de exploração com pastagem e ILP em comparação à mata nativa, nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm. Além disso, a densidade na superfície do solo (0-10 cm) foi menor nos meios de exploração com SPD em comparação aos meios perenes, como ILP, pastagem e fruticultura. Esse fato pode ser explicado pela reposição da matéria orgânica do solo, determinado pelo cultivo de plantas de cobertura, que auxilia na capacidade do solo de reestruturação. O revolvimento constante da camada superficial pelos componentes mecânicos da semeadora também deve ser levado em consideração (YANG; SIDDIQUE; LIU, 2020).



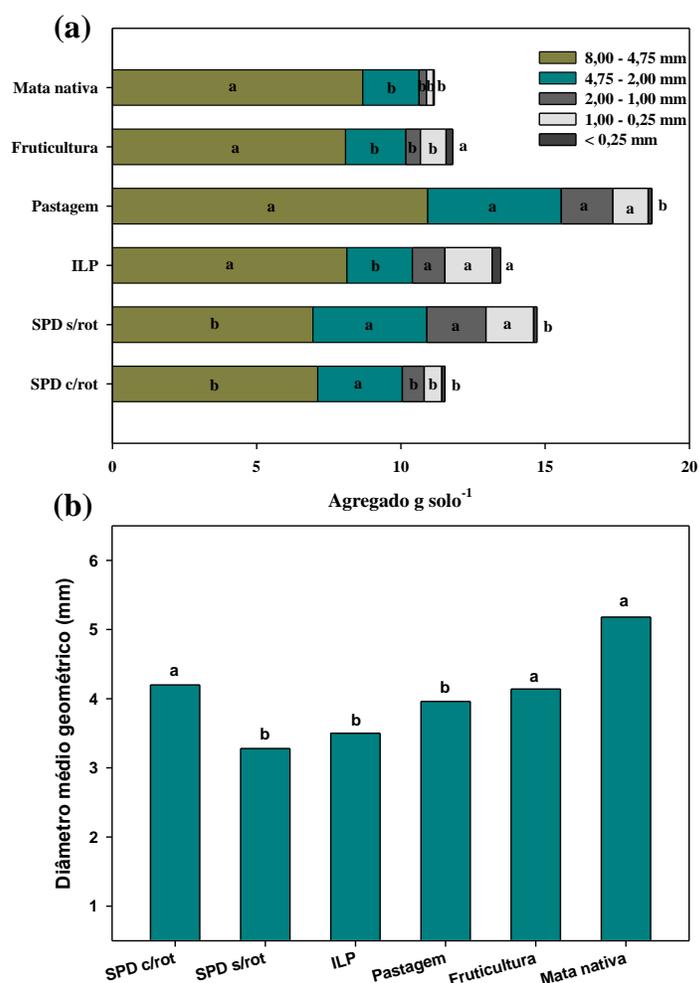
**Figura 09.** Propriedades físicas do solo em função dos meios de exploração. Letras distintas indicam diferença significativa de acordo com o teste de Kruskal-Wallis ( $p < 0.05$ ). ns indica a não significância na camada.

Em relação à Ksat, identificou-se elevados níveis de infiltração de água no solo nas camadas de 20-30 e 50-60 cm, principalmente na mata nativa e fruticultura em relação aos demais meios de exploração (Figura 09e). Isso pode ser explicado pela maior preservação da estrutura do solo e dos macroporos, que são responsáveis pela infiltração de água no solo, ambos apresentando valores acima de 15%, demonstrando a capacidade do sistema na preservação da integridade estrutural do solo (EZE *et al.*, 2020).

Já na camada de 20-30 cm, foi observado que a Ksat da pastagem foi semelhante aos meios de exploração de mata nativa e fruticultura (Figura 09e). Abaixo dessa camada, os efeitos do pisoteio já não são significativos, o que pode estar associado à elevada quantidade de raízes decompostas formando bioporos estáveis (BONETTI *et al.*, 2019).

A maior taxa de infiltração de água no solo do tratamento de pastagem na camada de 50-60 cm, observada no presente estudo, pode se dar devido ao crescimento radicular de algumas pastagens utilizadas para a alimentação bovina e à formação de bioporos estáveis em profundidade (BONETTI *et al.*, 2019).

Outro fator importante para determinar o estado estrutural do solo é o diâmetro médio geométrico (DMG). Quanto maior o DMG, melhor é a condição do agregado, ou seja, perante uma possibilidade de erosão, quanto maior o agregado mais resistente ele será, sendo menos suscetível à erosão (SOUZA *et al.*, 2021). Além disso, pode ser influenciado pelo tipo de manejo e uso do solo (Figura 10).



**Figura 10.** Classes de agregados do solo (a) e diâmetro médio geométrico (b) em função dos meios de exploração. Letras distintas indicam diferença significativa de acordo com o teste de Kruskal-Wallis ( $p < 0.05$ ).

Com relação aos agregados separados por classes (Figura 10a), nota-se que a pastagem, ILP e fruticultura apresentam maior proporção de macroagregados (8,00-4,75mm) em relação aos SPDs, igualando-se estatisticamente com a condição de mata nativa, preservando os agregados e evitando processos erosivos. No caso da ILP e fruticultura, isso se dá por conta da cobertura vegetal e reposição da matéria orgânica do solo (YU *et al.*, 2017). Já a pastagem, preserva essa condição pois suas raízes atuam como preservadoras, mantendo os agregados do solo unidos fortemente entre si (VICENTE *et al.*, 2019).

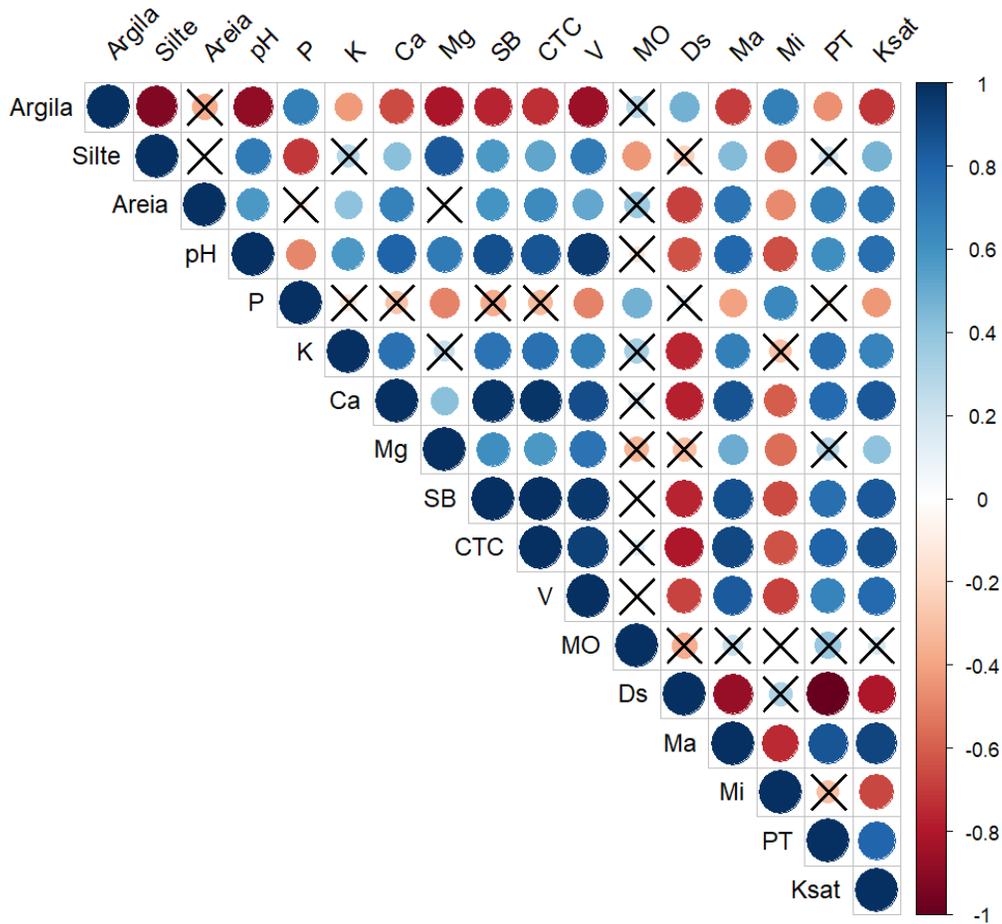
Os SPDs apresentam valores que se igualam estatisticamente para os macroagregados (8,00-4,75mm). Esse comportamento está associado ao revolvimento localizado na linha de plantio, realizado durante a semeadura. A abertura dos sulcos causa a ruptura de agregados maiores, favorecendo sua desagregação. Esse processo mecânico interfere diretamente na estrutura do solo, impactando a estabilidade dos macroagregados. Como consequência, áreas com maior revolvimento podem apresentar características estruturais distintas, mesmo em sistemas que, em geral, promovem a conservação do solo (LIU *et al.*, 2021).

Em geral, foi possível observar que os valores que mais se aproximaram da condição natural do solo não explorado (mata nativa) foram os do sistema de plantio direto com rotação de culturas e a fruticultura (Figura 10b). Esses meios de exploração preservaram a condição dos agregados no solo, com valores acima de 4 mm, condição essa que assegura o solo perante uma possível erosão. Isso posto, apenas o sistema de plantio direto sem rotação (SPD S/ROT) acabou apresentando o valor acima do determinado como ideal (ALMEIDA *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2021).

### **4.3 Análise de correlação**

Na Figura 11, encontra-se a análise de correlação entre as médias das variáveis estudadas, referente aos tratamentos, sistema de plantio direto com rotação (SPD C/ROT), sistema de plantio direto sem rotação (SPD S/ROT), integração lavoura-pecuária (ILP), pastagem, fruticultura e mata nativa. A coloração em azul indica correlação positiva entre os tratamentos, a coloração em vermelho indica correlação negativa entre os tratamentos e o símbolo em “X” indica não haver correlação, seja positiva ou negativa, entre os tratamentos.

Como era esperado, foram encontradas correlações positivas entre pH, Ca, K, SB, CTC e V com o espaço poroso do solo e Ksat. Em contrapartida, em geral, a densidade do solo teve correlação negativa com os atributos químicos do solo (Figura 11).



**Figura 11.** Análise de correlação da granulometria, propriedades químicas e propriedades físicas do solo.

Correlação positiva significativa ( $p < 0,05$ ) foi encontrada entre Ksat e macroporosidade do solo (Figura 11). Isso é importante, pois, quanto melhor a drenagem de um solo, menor o risco de erosão. O solo que não sofreu interferência humana de manejo (mata nativa) teve maior capacidade de infiltração do que os meios de exploração com intervenção humana como SPD, especialmente nas camadas superficiais do solo. Esse resultado pode ser atribuído à presença de elevadas quantidades de material orgânico no solo e um ciclo sustentável, o que não existe em terras de uso agrícola, onde realiza-se constante movimentação de máquinas e implementos pesados, pisoteamento e uma pequena quantidade de material orgânico sendo repostado (SIVARAJAN et al., 2018; ALMEIDA et al., 2018; OWUOR et al., 2018).

## 5. CONCLUSÃO

O SPD com rotação apresentou propriedades químicas do solo semelhantes às da mata nativa, seguido por ILP e fruticultura. A pastagem teve efeito intermediário, enquanto o SPD sem rotação indicou possível lixiviação e esgotamento de nutrientes, além de baixa reposição de matéria orgânica.

A densidade do solo foi menor nos sistemas com SPD em comparação aos perenes. A macroporosidade em profundidade na fruticultura e pastagem foi semelhante à da mata nativa.

O SPD com rotação também se assemelhou à mata nativa quanto ao diâmetro médio geométrico na superfície do solo.

Foram observadas correlações positivas entre atributos químicos e macroporosidade/ $K_{sat}$  e negativas com a densidade do solo. Assim, conclui-se que o SPD, especialmente com rotação, auxilia na conservação das propriedades físicas e químicas do solo, principalmente na superfície.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA DE NOTÍCIAS IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola Estatística da Produção Agrícola (maio de 2024)**. Disponível em: [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag\\_2024\\_maio.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag_2024_maio.pdf). Acesso em: 27 jun. 2024.

AGBOOLA, O.; BABATUNDE, D. E.; FAYOMI, O. S. I.; SADIKU, E. R.; POPOOLA, P.; MOROPENG, L.; MAMUDU, O. A. Uma revisão sobre o impacto da operação mineira: Monitorização, avaliação e gestão. **Resultados em Engenharia**, v. 8, p. 100181, 2020.

ADETUNJI, A. T.; NCUBE, B.; MULIDZI, R.; LEWU, F. B. Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 104717, 2020.

ALVES, L. A.; DE OLIVEIRA DENARDIN, L. G.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; DE FACCIÓ CARVALHO, P. C.; TIECHER, T. Soil acidification and P, K, Ca and Mg budget as affected by sheep grazing and crop rotation in a long-term integrated crop-livestock system in southern Brazil. **Geoderma**, v. 351, p. 197-208, 2019.

AQUILANI, C.; CONFESSORE, A.; BOZZI, R.; SIRTORI, F.; PUGLIESE, C. Tecnologias de pecuária de precisão em sistemas pecuários baseados em pastagens. **Animal**, v. 16, n. 1, p. 100429, 2022.

ASAI, M.; MORAINÉ, M.; RYSCHAWY, J.; DE WIT, J.; HOSCHIDE, A. K.; MARTIN, G. Fatores críticos para a integração lavoura-pecuária além do nível da fazenda: Uma análise cruzada de estudos de caso em todo o mundo. **Política de Uso da Terra**, v. 73, p. 184-194, 2018.

ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; BERBARA, R. L. L.; GARCÍA, A. C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region in Brazil. **Ciência do Ambiente Total**, v. 658, p. 901-911, 2019.

AZEVEDO, F. A. D.; ALMEIDA, R. F. D.; MARTINELLI, R.; PRÓSPERO, A. G.; LICERRE, R.; CONCEIÇÃO, P. M. D.; MATTOS JR., D. No-tillage and high-density planting for Tahiti acid lime grafted onto Flying Dragon trifoliolate orange. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 108, 2020.

BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 25, n. 3, p. 208-218, 2019.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. Plantio direto e ambiente físico do solo. **Geoderma**, v. 326, p. 164-200, 2018.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. Cover crop impacts on soil physical properties: A review. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 5, p. 1527-1576, 2020.

BREWER, K. M.; GAUDIN, A. C. M. Potential of crop-livestock integration to enhance carbon sequestration and agroecosystem functioning in semi-arid croplands. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 149, p. 107936, 2020.

BYRNES, R. C.; NÚÑEZ, J.; ARENAS, L.; RAO, I.; TRUJILLO, C.; ALVAREZ, C.; CHIRINDA, N. A inibição da nitrificação biológica por gramíneas *Brachiaria atenua* as emissões de óxido nitroso do solo a partir de manchas de urina bovina. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 107, p. 156-163, 2017.

ÇERÇIOĞLU, M.; ANDERSON, S. H.; UDAWATTA, R. P.; ALAGELE, S. Effect of cover crop management on soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 343, p. 247-253, 2019.

COLOMBO, G. A.; LOPES, M. B. S.; DOTTO, M. C.; CAMPESTRINI, R.; DE OLIVEIRA LIMA, S. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes sistemas de manejo no cerrado tocantinense. **Revista Campo Digital**, v. 12, n. 1, 2017.

CUSTÓDIO, G. D.; RIBON, A. A.; FERNANDES, K. L.; HERMÓGENES, V. T. L.; BARROS, L. R. Densidade do solo e densidade relativa-indicadores da qualidade física de um latossolo amarelo sob diferentes manejos de pastagens e mata nativa. **Revista Campo Digital**, v. 10, n. 1, 2015.

DARYANTO, S.; WANG, L.; JACINTHE, P. A. Meta-analysis of phosphorus loss from no-till soils. **Journal of Environmental Quality**, v. 46, n. 5, p. 1028-1037, 2017.

DE ALMEIDA, W. S.; PANACHUKI, E.; DE OLIVEIRA, P. T. S.; DA SILVA MENEZES, R.; SOBRINHO, T. A.; DE CARVALHO, D. F. Efeito do preparo do solo e da cobertura vegetal na infiltração de água no solo. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 130-138, 2018.

DE ANDRADE BONETTI, J.; ANGHINONI, I.; GUBIANI, P. I.; CECAGNO, D.; DE MORAES, M. T. Impacto de um sistema lavoura-pecuária de longo prazo nas propriedades físicas e hidráulicas de um Latossolo. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 280-291, 2019.

DE BAETS, S.; POESEN, J.; MEERSMANS, J.; SERLET, L. Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion. **Catena**, v. 85, n. 3, p. 237-244, 2011.

DE SOUZA, S. F. F.; DE ARAÚJO, M. D. S. B.; DA SILVA, M. S. L.; REIS, J. S. Estabilidade de agregados de solo em uma topossequência sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 7, p. 4066-4077, 2021.

DHALIWAL, J. K.; KUMAR, S. Visualização 3D e quantificação da estrutura porosa do solo usando varredura de microtomografia de raios X em pastagens nativas e sistemas de lavoura-pecuária. **Soil and Tillage Research**, v. 218, p. 105305, 2022.

DINIZ, A. P. M.; DA COSTA ARAGÃO, M.; EL-HUSNY, J. C.; PEREIRA, G. M.; DA HUNGRIA, L. C.; DA SILVA, B. S. N. Atributos químicos do solo sob sistema plantio direto como indicador de sustentabilidade ambiental. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 3130-3152, 2021.

DOS ANTOS, C. A.; REZENDE, C. D. P.; PINHEIRO, É. F. M.; PEREIRA, J. M.; ALVES, B. J.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Mudanças nos estoques de carbono do solo após mudança de uso da terra de vegetação nativa para pastagens na região da Mata Atlântica do Brasil. **Geoderma**, v. 337, p. 394-401, 2019.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação do solo, 2ª ed.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/sibcs>> Acesso em: 27 jun. 2024.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação do solo, 5ª ed.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/sibcs>> Acesso em: 27 jun. 2024.

ESPINOZA-MEZA, S.; ORTEGA-FARIAS, S.; LÓPEZ-OLIVARI, R.; ARAYA-ALMAN, M.; CARRASCO-BENAVIDES, M. Resposta da produção de frutos, qualidade dos frutos e produtividade da água a diferentes níveis de irrigação para um pomar de macieiras irrigado por microaspersão (cv. Fuji) crescendo em condições mediterrâneas. **Jornal Europeu de Agronomia**, v. 145, p. 126786, 2023.

EZE, S.; DOUGILL, A. J.; BANWART, S. A.; HERMANS, T. D.; LIGOWE, I. S.; THIERFELDER, C. Impactos da agricultura de conservação na estrutura do solo e nas propriedades hidráulicas dos sistemas agrícolas do Malawi. **Pesquisa de Solo e Preparo do Solo**, v. 201, p. 104639, 2020.

GAZOLLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, A.; PEREIRA, M. G.; ROSSI, C. Q. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 2, p. 693-704, 2015.

GONGORA, V. R. M.; SECCO, D.; BASSEGIO, D.; de MARINS, A. C.; CHANG, P.; SAVIOLI, M. R. Impacto das culturas de cobertura nas propriedades físicas do solo, perda de solo e escoamento superficial em Latossolos compactados do Sul do Brasil. **Geoderma Regional**, v. 31, p. e00577, 2022.

HAN, Z.; HAN, C.; SHI, Z.; LI, J.; LUO, E. Reconstruindo o sistema de integração agropecuária na China — Com base na perspectiva da economia circular. **Jornal de Produção Mais Limpa**, v. 393, p. 136347, 2023.

HARUNA, S. I.; NKONGOLO, N. V. Influence of cover crop, tillage, and crop rotation management on soil nutrients. **Agriculture**, v. 10, n. 6, p. 225, 2020.

HOLTHUSEN, D.; BRANDT, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Porosidade do solo, permeabilidade e parâmetros de resistência estática e dinâmica sob floresta nativa/pastagem em comparação com cultivo sem plantio direto. **Soil and Tillage Research**, v. 177, p. 113-124, 2018.

HUNTER, M. C.; KEMANIAN, A. R.; MORTENSEN, D. A. Efeitos da cultura de cobertura no estresse da seca e na produtividade do milho. **Agricultura, Ecossistemas e Meio Ambiente**, v. 311, p. 107294, 2021.

JIAN, J.; DU, X.; REITER, M. S.; STEWART, R. D. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 143, p. 107735, 2020.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Distribuição de tamanho de agregados. Métodos de análise de solo: Parte 1 propriedades físicas e mineralógicas, incluindo estatísticas de medição e amostragem, v. 9, p. 499-510, 1965.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

LADANIYA, M. S.; MARATHE, R. A.; DAS, A. K.; RAO, C. N.; HUCHCHE, A. D.; SHIRGURE, P. S.; MURKUTE, A. A. Estudos de plantio de alta densidade em cal ácida (*Citrus aurantifolia* Swingle). **Scientia Horticulturae**, v. 261, p. 108935, 2020.

LI, Y.; NIE, C.; LIU, Y.; DU, W.; HE, P. A composição da comunidade microbiana do solo está intimamente associada a atividades enzimáticas específicas e à química do carbono do solo em uma pastagem fertilizada com nitrogênio a longo prazo. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 264-274, 2019.

LIU, T.; CHEN, J.; WANG, Z.; WU, X.; WU, X.; DING, R.; et al. O padrão de plantio em camalhões e sulcos otimiza a estrutura da copa do milho de verão e obtém maior produtividade de grãos. **Pesquisa de Culturas de Campo**, v. 219, p. 242-249, 2018.

LIU, X.; WU, X.; LIANG, G.; ZHENG, F.; ZHANG, M.; LI, S. A global meta-analysis of the impacts of no-tillage on soil aggregation and aggregate-associated organic carbon. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 18, p. 5292-5305, 2021.

MINAS, I. S.; TANOU, G.; MOLASSIOTIS, A. Bases ambientais e pomares da qualidade do pêssego. **Scientia Horticulturae**, v. 235, p. 307-322, 2018.

MEE, J. F.; BOYLE, L. A. Avaliar se o bem-estar das vacas leiteiras é “melhor” em sistemas de manejo baseados em pastagens do que em sistemas de manejo baseados em confinamento. **Jornal Veterinário da Nova Zelândia**, v. 3, p. 168-177, 2020.

MONTANARO, G.; XILOYANNIS, C.; NUZZO, V.; DICHIO, B. Manejo de pomares, carbono orgânico do solo e serviços ecossistêmicos em culturas de árvores frutíferas mediterrâneas. **Scientia Horticulturae**, v. 217, p. 92-101, 2017.

MUHAMMAD, I.; WANG, J.; SAINJU, U. M.; ZHANG, S.; ZHAO, F.; KHAN, A. Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: A meta-analysis. **Geoderma**, v. 381, p. 114696, 2021.

MÜLLER, C. A.; DE MATTOS PEREIRA, L.; LOPES, C.; CARES, J.; DOS ANJOS BORGES, L. G.; GIONGO, A.; MORASSUTTI, A. L. Diversidade da meiofauna no solo da Mata Atlântica: uma busca por nematoides em uma reserva nativa usando análise de metabarcodificação eucariótica. **Forest Ecology and Management**, v. 453, p. 117591, 2019.

NEETHIRAJAN, S.; KEMP, B. Pecuária digital. Pesquisa de Sensoriamento e Bio-Sensor, v. 32, p. 100408, 2021.

OWUOR, S. O.; BUTTERBACH-BAHL, K.; GUZHA, A. C.; JACOBS, S.; MERBOLD, L.; RUFINO, M. C.; ... BREUER, L. A conversão de florestas naturais resulta em uma degradação significativa das propriedades hidráulicas do solo nas terras altas do Quênia. **Soil and Tillage Research**, v. 176, p. 36-44, 2018.

PAGE, K. L.; DANG, Y. P.; DALAL, R. C. A capacidade da agricultura de conservação de conservar o carbono orgânico do solo e o subsequente impacto nas propriedades físicas, químicas e biológicas e no rendimento do solo. **Fronteiras em Sistemas Alimentares Sustentáveis**, v. 4, p. 31, 2020.

PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M. & ZOCOLER, D.C. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, 1992. 38p. (Circular, 76)

PAUL, B. K.; EPPER, C. A.; TSCHOPP, D. J.; LONG, C. T. M.; TUNGANI, V.; BURRA, D.; DOUXCHAMPS, S. A integração agro-pecuária proporciona oportunidades para mitigar os compromissos ambientais na transição dos sistemas agrícolas de pequenos agricultores da sub-região do Grande Mekong. **Sistemas Agrícolas**, v. 195, p. 103285, 2022.

QASWAR, M.; JING, H.; AHMED, W.; DONGCHU, L.; SHUJUN, L.; LU, Z.; HUIMIN, Z. Yield sustainability, soil organic carbon sequestration and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 198, p. 104569, 2020.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. v. 5, p. 49-134.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Propriedades físicas do solo. Santa Maria, UFSM, 18p. 2006.

ROMDHANE, S.; SPOR, A.; BUSSET, H.; FALCHETTO, L.; MARTIN, J.; BIZOUARD, F.; CORDEAU, S. Práticas de manejo de culturas de cobertura em vez da composição de misturas de culturas de cobertura afetam comunidades bacterianas em agroecossistemas de plantio direto. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1618, 2019.

ROWE, H.; WITHERS, P. J.; BAAS, P.; CHAN, N. I.; DOODY, D.; HOLIMAN, J.; WEINTRAUB, M. N. Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 104, p. 393-412, 2016.

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, p. 195-212, 2018.

SALOMÃO, P. E. A.; KRIEBEL, W.; DOS SANTOS, A. A.; MARTINS, A. C. E. A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, p. e154911870-e154911870, 2020.

SCHMIDT, R.; GRAVUER, K.; BOSSANGE, A. V.; MITCHELL, J.; SCOW, K. Long-term use of cover crops and no-till shift soil microbial community life strategies in agricultural soil. **Plos One**, v. 13, n. 2, e0192953, 2018.

SECCO, D.; BASSEGIO, D.; de VILLA, B.; de MARINS, A. C.; JUNIOR, L. A. Z.; da SILVA, T. R. B.; de SOUZA, S. N. M. Respostas da produtividade de óleo de crambe e propriedades físicas do solo ao plantio direto, culturas de cobertura e escarificação. **Industrial Crops and Products**, v. 161, p. 113174, 2021.

SHEKINAH, D. E.; STUTE, J. K. Sunn hemp: uma leguminosa de cobertura com potencial para o Centro-Oeste?. **Sustainable Agriculture Research**, v. 7, n. 4, p. 63-69, 2018.

SITHOLE, N. J.; MAGWAZA, L. S.; MAFONGOYA, P. L. Agricultura de conservação e seu impacto na qualidade do solo e na produtividade do milho: uma perspectiva sul-africana. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 55-67, 2016.

SIVARAJAN, S.; MAHARLOOEI, M.; BAJWA, S. G.; NOWATZKI, J. Impacto da compactação do solo devido ao tráfego de rodas no crescimento, desenvolvimento e rendimento do milho e da soja. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 234-243, 2018.

SPARKS, D. L.; SINGH, B.; SIEBECKER, M. G. Química ambiental do solo. **Elsevier**,

TORRES, J. L. R.; ASSIS, R. L.; LOSS, A. Evolução entre os sistemas de produção agropecuária no Cerrado: Convencional, Barreirão, Santa Fé e Integração lavoura pecuária. **Informe Agropec**, v. 39, p. 7-17, 2018.

TULLO, E.; FINZI, A.; GUARINO, M. Impacto ambiental da pecuária e da pecuária de precisão como estratégia de mitigação. **Ciência do Meio Ambiente Total**, v. 650, p. 2751-2760, 2019.

VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MARCIANO, C. R. Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. **Catena**, v. 182, p. 104139, 2019.

WORLANYO, A. S.; JIANGFENG, L. Avaliando o impacto ambiental e económico da mineração para a restauração e uso da terra pós-mineração: Uma revisão. **Jornal de Gestão Ambiental**, v. 279, p. 111623, 2021.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIOR, C.; de ALMEIDA, I. R. **Atlas climático da região sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012, 336p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1045852/atlas-climatico-da-regiao-sul-do-brasil-estados-do-parana-santa-catarina-e-rio-grande-do-sul>> Acesso em: 02 jul. 2024.

YANG, T.; SIDDIQUE, K. H.; LIU, K. Sistemas de cultivo na agricultura e seu impacto na saúde do solo – Uma revisão. **Ecologia e Conservação Global**, v. 23, p. e01118, 2020.

YU, Z.; ZHANG, J.; ZHANG, C.; XIN, X.; LI, H. The coupling effects of soil organic matter and particle interaction forces on soil aggregate stability. **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 251-260, 2017.

ZHANG, X.; ZHU, J.; WENDROTH, O.; MATOCHA, C.; EDWARDS, D. Efeito da macroporosidade nas estimativas da função de pedotransferência na escala de campo. **Vadose Zone Journal**, v. 18, n. 1, p. 1-15, 2019.

ZHOU, H.; CHEN, C.; WANG, D.; ARTHUR, E.; ZHANG, Z.; GUO, Z.; MOONEY, S. J. Effect of long-term organic amendments on the full-range soil water retention characteristics of a Vertisol. **Soil and Tillage Research**, v. 202, p. 104663, 2020.

ZORTEA, R. B.; MACIEL, V. G.; PASSUELLO, A. Avaliação da sustentabilidade da produção de soja no Sul do Brasil: Uma abordagem de ciclo de vida. **Produção e Consumo Sustentáveis**, v. 13, p. 102-112, 2018.