

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON**

ARIEL MUHL

**SISTEMAS PRODUTIVOS E SEUS IMPACTOS NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO
E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PARANÁ

2024

ARIEL MUHL

**SISTEMAS PRODUTIVOS E SEUS IMPACTOS NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO
E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Magister Scientiae.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Rabello de Oliveira.

MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PARANÁ

2024

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Muhl, Ariel

Sistemas produtivos e seus impactos na qualidade física do solo e produtividade das culturas na região oeste do Paraná / Ariel Muhl; orientador Paulo Sérgio Rabello de Oliveira; coorientador Emerson Fey. -- Marechal Cândido Rondon, 2024. 51 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Marechal Cândido Rondon) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2024.

1. Sistemas. 2. Manejo. 3. Soja/Milho. I. Rabello de Oliveira, Paulo Sérgio, orient. II. Fey, Emerson, coorient. III. Título.



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46

Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>

Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000

Marechal Cândido Rondon - PR.



ARIEL MUHL

Sistemas produtivos e seus impactos na qualidade física do solo e produtividade das culturas na região Oeste do Paraná

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal, linha de pesquisa Manejo de Culturas, APROVADA pela seguinte banca examinadora:

Orientador - Paulo Sérgio Rabello de Oliveira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

Eduardo Eustáquio Mesquita

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

Jean-Sérgio Rosset

Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS)

Marechal Cândido Rondon, 21 de agosto de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me deu saúde e sabedoria para lutar pelos meus sonhos e objetivos.

A Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE Campus Marechal Cândido Rondon, pelo apoio. Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela disponibilidade da vaga.

À Copacol Cooperativa que me deu a oportunidade de conduzir o experimento e todos os recursos para o melhor desempenho do trabalho.

Aos meus pais (Eliane Maria Muhl e Nilton Muhl) e meus irmãos, e a todos os meus parentes e amigos, por sempre torcerem pelo meu sucesso, nos estudos e na vida.

A minha noiva e parceira Tainara Estela Kopper, pelo carinho e ajuda durante todo o período percorrido.

À Assistente de Coordenação do PPGA, Leila Dirlene Allievi Werlang por todo suporte dados nos processos burocráticos do programa durante todo período.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Sérgio Rabello de Oliveira pela orientação, paciência, disposição, incentivo, apoio e críticas sempre que necessário. A todos os professores do programa de Pós-graduação em Agronomia da UNIOESTE, por transmitirem seus conhecimentos vindo a contribuir com minha formação.

RESUMO

MUHL, Ariel. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, julho de 2024. **Sistemas produtivos e seus impactos na qualidade física do solo e produtividade das culturas na região Oeste do Paraná.** Orientador: Paulo Sérgio Rabello de Oliveira.

O estado Paraná consolidou-se como uma grande potência na agricultura brasileira e mundial, especialmente no que diz respeito à produção de grãos. O substancial aumento é fruto do crescimento da área cultivada, juntamente com aprimoramentos na eficiência produtiva e intensificação dos sistemas de produção. Entretanto, a prática contínua da sucessão milho 2ª safra e soja têm acarretado uma série de desafios, como a perda da qualidade do solo, e produtividades aquém do potencial genético das variedades e híbridos disponíveis. O experimento foi desenvolvido durante três anos (2020/21, 2021/22 e 2022/23) no Centro de Pesquisa Agrícola da Cooperativa Agroindustrial Consolata (CPA Copacol), no município de Cafelândia - PR, região Oeste do Estado do Paraná. O objetivo do trabalho foi estudar como um solo reage a diferentes abordagens, realizando o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES), e verificando a Taxa de Infiltração Estável (TIE), além de avaliar a viabilidade técnica de introduzir uma 3ª safra de grãos com base na produtividade média das culturas e apresentar os benefícios da diversificação dos sistemas de produção, especialmente na sucessão milho 2ª safra/soja na região Oeste do Paraná. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso (DBC), com 5 sistemas de produção, identificados como S1 (Milho 2ª safra/soja), S2 (Milho 2ª safra/Trigo 3ª safra/Soja), S3 (Milho + *braquiária ruziziensis*/Soja), S4 (Trigo/Soja) e S5 (Aveia preta/Soja). Cada parcela experimental contou com 5m de largura por 24m de comprimento, totalizando 120 m². No que se refere aos IQEs (Índice de qualidade estrutural do solo), concluiu-se que a qualidade estrutural do solo estudado teve uma melhora com a diversificação dos sistemas de cultivo, em destaque para o sistema milho/soja. Além disso, a TIE apresentou melhorias significativas após três anos de estudo nos sistemas alternativos. Na soma das produtividades todos os tratamentos superaram o sistema tradicional (S1) adotado pela região. Verificou-se também que o cultivo de trigo na 3ª safra não interferiu na produtividade das culturas principais (Milho e Soja). Os resultados ressaltam a viabilidade técnica de utilizar a janela entre a colheita do milho 2ª safra e o plantio da soja para o cultivo de cereais de inverno, como trigo e aveia preta, visando uma 3ª safra de grãos ou para cobertura do solo. Este estudo evidencia que a diversificação nos sistemas de produção traz vantagens, como o aumento na produtividade de soja e milho em comparação com o sistema de sucessão comumente adotado na região.

Palavras-chave: Sucessão. Diversificação. Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES). Taxa de Infiltração Estável (TIE).

ABSTRACT

MUHL, Ariel. State University of Western Paraná, July 2024. **Study of production systems and their impacts on soil physical quality and crop productivity in the Western region of Paraná.** Advisor: Paulo Sérgio Rabello de Oliveira.

The state of Paraná has established itself as a major power in Brazilian and global agriculture, especially with regard to grain production. The substantial increase is the result of the growth in cultivated area, together with improvements in production efficiency and intensification of production systems. However, the continuous practice of second-crop corn and soybean succession has led to a series of challenges, such as loss of soil quality and productivity below the genetic potential of the available varieties and hybrids. The experiment was developed over three years (2020/21, 2021/22 and 2022/23) at the Agricultural Research Center of the Consolata Agroindustrial Cooperative (CPA Copacol), in the municipality of Cafelândia - PR, western region of the state of Paraná. The objective of this study was to study how soil reacts to different approaches, performing the Rapid Soil Structure Diagnosis (DRES) and verifying the Stable Infiltration Rate (TIE), in addition to evaluating the technical feasibility of introducing a 3rd grain harvest based on the average crop productivity and presenting the benefits of diversifying production systems, especially in the 2nd corn/soybean succession in the western region of Paraná. The experimental design was randomized blocks (RBD), with 5 production systems, identified as S1 (2nd corn/soybean), S2 (2nd corn/3rd wheat/soybean), S3 (Corn + brachiaria ruziziensis/soybean), S4 (Wheat/soybean) and S5 (Black oats/soybean). Each experimental plot was 5 m wide by 24 m long, totaling 120 m². Regarding the SQIs (Soil Structural Quality Index), it was concluded that the structural quality of the studied soil improved with the diversification of cropping systems, especially the corn/soybean system. In addition, the TIE showed significant improvements after three years of study in the alternative systems. In the sum of productivity, all treatments surpassed the traditional system (S1) adopted by the region. It was also found that the cultivation of wheat in the 3rd harvest did not interfere with the productivity of the main crops (corn and soybean). The results highlight the technical feasibility of using the window between the harvest of the 2nd corn harvest and the planting of soybeans for the cultivation of winter cereals, such as wheat and black oats, aiming at a 3rd grain harvest or for soil cover. This study shows that diversification in production systems brings advantages, such as increased productivity of soybeans and corn compared to the succession system commonly adopted in the region.

Keywords: Succession. Diversification. Rapid Diagnosis of Soil Structure (DRES). Stable Infiltration Rate (TIE). Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Notas atribuídas ao Índice de Qualidade Estrutural do Solo (IQEs).....	30
Figura 2 - Processo de determinação da estrutura do solo através do diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES).	31
Figura 3 - Determinação do ES e da infiltração com infiltrômetro modelo Cornell.	322
Figura 4 - Temperaturas média, média das máximas, médias das mínimas e balanço hídrico sequencial (método de Thornthwaite; Mather, 1955) por decêndio, para a 2ª Safra de 2020 (A), 2021 (C) e 2022 (E), e para as safras de verão 2020/21 (B), 2021/22 (D) e 2022/23	344
Figura 5 - Estrutura do solo coletados por meio do diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES) para os cinco sistemas investigados.	355
Figura 6 – Resultados da Taxa de Infiltração Estável (TIE) (mm/h) coletados a partir da determinação do ES e da infiltração de água no solo para os cinco sistemas investigados.....	366
Figura 7 - Imagem do experimento mostrando as culturas em diversas épocas com as diferentes culturas implantadas ao longo do ano agrícola.	42
Figura 8 – Imagem aérea do experimento na entre safra com os sistemas de cobertura e as culturas de inverno estabelecidas além do sistema convencional em pousio.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais atributos do solo utilizados como indicadores para monitorar a qualidade do solo e metodologias para a sua obtenção.....	21
Tabela 2 - Sequência de culturas nos sistemas de cultivo avaliados no experimento, nas safras 2020/21, 2021/22 e 2022/23	266
Tabela 3 - Descrição dos sistemas de cultivos, bem como a data de semeadura, colheita/manejo, fórmula e dosagem de adubação utilizada.....	277
Tabela 4 - Produtividade média de grãos de soja nas safras 2020/21, 2021/22 e 2022/23 em kg/ha....	39
Tabela 5 - Produtividade média de grãos de milho nas safras 2020/21, 2021/22 e 2022/23 em kg/ha .	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO DE LITERATURA	13
2.2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO	14
2.2.1 Sistemas no cenário agropecuário.....	14
2.2.2 Sistemas de manejo do solo	17
2.2.3 Sistema de rotação de culturas.....	19
2.4 INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO	20
2.4.1 Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES).....	22
2.4.2 Taxa de Infiltração Estável (TIE)	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	255
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	344
5 CONCLUSÕES	466
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 20 anos a área destinada à produção de grãos no Brasil aumentou 40%, enquanto o expressivo crescimento na produção de grãos neste período foi de 70%, sendo que esse acréscimo em área e produtividade pode ser atribuído à intensificação dos sistemas de produção, sobretudo pelo aumento das áreas de soja que antecedem o cultivo do milho 2ª safra (CONAB, 2023).

A cultura de milho é de extrema importância econômica para o Brasil e, portanto, a demanda crescente, tanto nacional quanto global por esse cereal torna essencial identificar sistemas de produção com potencial para expandir sua produção. Por motivos econômicos, nos últimos anos, a maior tendência de aumento na produção de milho no país tem sido durante a chamada época da "safrinha" ou segunda safra agrícola (LANDAU et al., 2015).

De acordo com a Conab (2023), no período da safra 2023/2024, o Brasil teve cerca de 16,4 milhões de hectares plantados com milho segunda safra, sendo a maioria desses plantios realizados em sequência ao cultivo de soja. Esse método resultou em avanços significativos em comparação com sistemas menos intensivos, como o aumento da produção de alimentos por área e uma utilização mais eficiente dos recursos da terra, da mão de obra e dos insumos.

No Paraná, os últimos anos reforçaram sua posição como uma potência significativa na agricultura brasileira e global, principalmente em relação à produção de grãos. A safra de grãos do estado aumentou de cerca de 29 milhões de toneladas em 2002/2003 para 46,5 milhões de toneladas em 2022/2023, registrando um crescimento médio de 60%. Nesse intervalo, os destaques de crescimento foram a soja (de 10,9 para 22,4 milhões de toneladas) e o milho (de 13,6 para 18,5 milhões de toneladas), com este último impulsionado pela expansão na produção da segunda safra (CONAB, 2023).

O considerável aumento na produção de grãos no estado do Paraná é resultado do aumento da área plantada, bem como da melhoria na produtividade e da intensificação dos sistemas de produção. Essa tendência é evidenciada pela expansão do cultivo do milho na 2ª safra. Grande parte da produção de grãos do Paraná vem das áreas localizadas no Oeste e Centro-Oeste do estado. Na safra 2022/23, essas regiões foram responsáveis por cerca de 29%, 21% e 47% da produção de soja, trigo e milho 2ª safra, respectivamente (DERAL, 2023).

No entanto, a repetição frequente desse ciclo tem acarretado em questões adicionais, tais como o adensamento superficial do solo em Sistema Plantio Direto, escassa cobertura do solo entre a colheita do milho e o plantio da soja, e um aumento na proliferação de plantas daninhas e fitonematoides (DEBIASI et al., 2021; GARBELINI et al., 2022). Adicionalmente,

o emprego de sistemas de produção com limitada diversificação de espécies cultivadas e produção reduzida de biomassa radicular e aérea tem contribuído para a deterioração da estrutura do solo e para a diminuição das Taxas de Infiltração Estável de água (TIE), indicativos de solos altamente compactados (DEBIASI et al., 2021). Paralelamente, há necessidade de diversificar a matriz produtiva de grãos, reduzindo os riscos associados a flutuações de mercado e quebras de produtividade na soja e no milho, que afetam toda a cadeia produtiva de grãos e carnes.

Assim sendo, para manter o equilíbrio e elevadas produtividades em diversas culturas, é fundamental que a diversificação, rotação, consorciação ou sucessão das atividades agrícolas e pecuárias dentro da propriedade rural ocorram de maneira harmônica. Isso cria um sistema que traz benefícios para ambas as atividades, proporcionando vantagens como aumento da renda por área, maior diversificação de atividades, redução do risco econômico e menor custo de produção para o produtor (ALVARENGA et al., 2006; BALBINOT JÚNIOR et al., 2009).

Além disso, a prática promove a melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, diminui a incidência de doenças, pragas e plantas invasoras, aumenta a produtividade e diminui os riscos através da diversificação de atividades (VILELA et al., 2011). Logo, considerando que os sistemas de produção devem buscar um equilíbrio entre o aumento da produtividade ao longo do tempo, juntamente com a preservação e melhoria da qualidade do solo e o aumento da rentabilidade para os agricultores. Esse desafio requer uma pesquisa intensa, uma vez que envolve o cultivo de diversas culturas ao longo de vários anos, além de demandar uma visão abrangente de todo o sistema de produção.

Diante desse cenário, é crucial que os produtores adotem tecnologias que possam elevar a produtividade, minimizar as perdas provocadas por eventos climáticos, visando assegurar a sustentabilidade do negócio a longo prazo. É válido ressaltar que a produtividade média da soja e do milho 2ª safra, as principais culturas de grãos na região Oeste do Paraná, ainda não alcança seu máximo potencial genético (NÓIA JUNIOR; SENTELHAS, 2019).

Portanto, é primordial avaliar os sistemas de produção para diversificar a produção de grãos, aumentar a produtividade e diminuir os custos, riscos financeiros e impactos ambientais. No contexto desta pesquisa, o conceito de modelo de produção refere-se ao arranjo temporal e espacial das espécies vegetais que compõem os sistemas agrícolas (DENARDIN; KOCHHANN, 2006; HIRAKURI et al., 2012).

Diferentes sistemas podem ser considerados como alternativas para diversificação da sequência soja/milho 2ª safra, visando atender produtores com diferentes perfis e objetivos, que tenham interesse em fortalecer o sistema de produção. Dentro desse cenário, o aproveitamento

do período entre a colheita do milho 2^a safra e o plantio da soja com culturas voltadas para produção de grãos (3^a safra) ou para cobertura do solo surge como uma possibilidade interessante para aumentar a quantidade de biomassa da parte aérea e das raízes, ao mesmo tempo em que se diversifica e aumenta a produção de grãos por unidade de área cultivada. Isso pode ser alcançado tanto pela intensificação do sistema quanto pelo incremento da produtividade das culturas principais (soja e milho 2^a safra).

Considerando que nos últimos anos a viabilidade de implantar uma 3^a safra de grãos tem se fortalecido devido à ampla variedade de cultivares e híbridos de ciclo mais curto disponíveis, assim como ao avanço e disponibilidade de máquinas e equipamentos mais eficientes e com maior capacidade operacional, o objetivo deste estudo foi analisar como um solo reage a diferentes abordagens, realizando o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) e verificando a Taxa de Infiltração Estável (TIE), além de avaliar a viabilidade técnica de introduzir uma 3^a safra de grãos com base na produtividade média das culturas e apresentar os benefícios da diversificação dos sistemas de produção, especialmente na sucessão milho 2^a safra/soja na região Oeste do Paraná.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PRODUÇÃO DE GRÃOS NO BRASIL

Nos últimos 20 anos, houve um aumento significativo de 40% na área dedicada à produção de grãos no Brasil, passando de 47,2 para 78,5 milhões de hectares. Além disso, a produção de grãos também teve um crescimento expressivo de 70% nesse período (CONAB, 2023). Esse aumento tanto em área quanto em produtividade pode ser atribuído à maior intensificação dos sistemas de produção, especialmente pelo incremento das áreas de plantio de soja seguidas pela cultura do milho na segunda safra.

No entanto, a prática contínua da sucessão milho segunda safra/soja tem acarretado uma série de problemas, como a deterioração da qualidade estrutural e biológica do solo, o agravamento dos processos erosivos, o aumento da incidência de plantas invasoras e a intensificação dos danos causados por doenças radiculares ocasionadas por fungos, nematoides e outros organismos. Essa situação resulta em custos mais elevados e em produtividades de grãos aquém do potencial genético das variedades e híbridos disponíveis (DEBIASI; FRANCHINI, 2012). Ao mesmo tempo, torna-se necessário ampliar a variedade de culturas agrícolas, visando diminuir os riscos ligados às oscilações do mercado e às quedas de produtividade na produção de soja e milho, as quais impactam todo o setor de grãos e carnes.

É relevante compreender que o incentivo à produção de soja no Brasil aconteceu a partir da implementação do programa oficial de apoio à triticultura nos anos 50, estabelecendo o cultivo de soja em rotação com trigo, um padrão de cultivo típico de inverno. Essa estratégia se mostrou a melhor alternativa tanto em termos técnicos, ao promover o cultivo de oleaginosas após gramíneas, quanto em termos econômicos, ao otimizar a utilização da terra, equipamentos, infraestrutura e mão de obra disponíveis (WESZ JÚNIOR, 2014).

O crescimento real da indústria da soja (grãos, farelo e óleo) começou nos anos 1970, impulsionado principalmente pelo aumento dos preços no mercado internacional e pela vantagem competitiva do Brasil em relação a outros países produtores. O escoamento da safra brasileira ocorre durante a entressafra nos EUA, quando os preços atingem seu pico (MONTROYA et al., 2019).

Para a cultura do milho, as duas primeiras décadas do século XXI tiveram um papel crucial no mercado brasileiro, devido à significativa influência que exerceram. Além da cultura convencional, a prática da "safrinha", que atualmente representa a maior parte da área de plantio de milho no Brasil - teve um impacto significativo no aumento da produção. Os benefícios

advindos da maior produtividade por área e da mudança na época de plantio para após a colheita da soja contribuíram para uma maior disponibilidade do produto (CONAB, 2018).

Assim como em outras partes do mundo, o milho é vital para o Brasil. Por meio de diferentes técnicas de cultivo, como rotação, sucessão e consórcio, e devido à grande flexibilidade e adaptabilidade dos híbridos disponíveis, o milho apresenta altas produtividades na safrinha, muitas vezes até superiores às obtidas durante o cultivo de verão (CONTINI et al., 2019).

Diante do exposto, vale ressaltar que as práticas intensivas de manejo do solo têm gerado alterações na composição do mesmo, o que pode prejudicar o crescimento das plantas de maneira negativa (SILVA et al., 2017). Logo, para manter o equilíbrio e altos níveis de produtividade em diversas culturas, é essencial realizar a diversificação, rotação, consorciação ou sucessão das atividades agrícolas e pecuárias dentro da propriedade rural de forma integrada.

Essa abordagem, que configura um sistema, traz uma série de benefícios para o produtor, tais como aumento da receita por área cultivada, ampla diversificação de atividades, redução do risco econômico e diminuição dos custos de produção. Ademais, essa prática contribui para a melhoria das características químicas, físicas e biológicas do solo, redução de doenças, pragas e plantas invasoras, maior produtividade das lavouras e criações, bem como redução de riscos pela variedade de atividades (ALVARENGA, 2022; BALBINOT JÚNIOR et al., 2009; VILELA et al., 2011).

2.2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO

2.2.1 Sistemas no cenário agropecuário

A região Oeste do Paraná apresenta ampla variação de clima, tipo de solo e altitude, o que proporciona grande diversidade de ambientes e determina a composição dos sistemas de cultivo, o potencial produtivo das culturas e a estabilidade de produção ao longo do tempo. A elevação dos custos de produção e a volatilidade dos preços das *commodities* agrícolas tem aumentado os riscos inerentes à agricultura brasileira e paranaense (DEBIASI et al., 2023).

Portanto, o cenário atual exige do produtor a adoção de tecnologias capazes de aumentar a produtividade e reduzir as perdas de produção por estresses climáticos, de forma a garantir a sustentabilidade do negócio no longo prazo. Porém, a produtividade média das duas principais espécies graníferas cultivadas na região Oeste do Paraná (soja e milho 2ª safra) encontra-se aquém do potencial genético (NÓIA JUNIOR; SENTELHAS, 2019).

Conforme Sentelhas et al. (2015), aproximadamente 85% da diferença entre a produtividade potencial e a observada deve-se ao não atendimento pleno das necessidades hídricas das plantas. Isso significa que, mesmo em safras consideradas “normais” do ponto vista climático, a produtividade das culturas de grãos tem sido limitada pela ocorrência de déficit hídrico.

Conforme Hirakuri et al. (2012), foram estabelecidas as seguintes definições de sistemas no contexto agropecuário, com base em uma classificação de escala geográfica: sistema de cultivo, que corresponde ao subsistema; sistema de produção, que engloba o sistema em si; sistema agrícola, que trata do supersistema; e bioma, que está relacionado ao hipersistema.

Para tanto, o contexto de sistema de cultivo refere-se às práticas comuns de manejo associadas a uma determinada espécie vegetal, visando sua produção a partir da combinação lógica e ordenada de um conjunto de atividades e operações (HIRAKURI et al., 2012). Essas atividades e operações são: o planejamento, que engloba capital, mão de obra, insumos, etc.; o manejo da área, que trata da calagem, gessagem e dessecação; a semeadura, que refere-se as sementes e seu tratamento, a inoculação e adubação de base; o controle fitossanitário, que inclui as plantas daninhas, insetos-praga e as doenças; a colheita, que engloba a colheita e o transporte externo; e a pós colheita, que trata da secagem, armazenagem e transporte.

Quanto ao sistema de produção, este é composto pelo conjunto de sistemas de cultivo e/ou de criação no âmbito de uma propriedade rural, definidos a partir dos fatores de produção (terra, capital e mão-de-obra) e interligados por um processo de gestão. A partir dos conceitos de interação e complexidade, base da Teoria Geral de Sistemas (TGS) (BERTALANFFY, 1973; CHIAVENATO, 1993), os sistemas de produção foram classificados pela complexidade e pelo grau de interação entre os sistemas de cultivo e/ou de criação, que formam tais sistemas de produção.

Em relação a sua complexidade, os sistemas de produção podem ser classificados como: sistema em monocultura ou produção isolada, sistema em sucessão de culturas, sistema em rotação de culturas, sistema em consorciação de culturas ou policultivo e sistema em integração.

O sistema em monocultura ou produção isolada, ocorre quando, em uma determinada área, a produção vegetal ou animal se dá de forma isolada em um período específico, que normalmente é categorizado por um ano agrícola. Como exemplo de monocultura, tem-se o cultivo de soja intercalado por períodos de pousio, durante vários anos, na mesma gleba (HIRAKURI et al., 2012).

Já o sistema em sucessão de culturas, ocorre quando se tem a repetição sazonal de uma sequência de duas espécies vegetais no mesmo espaço produtivo, por vários anos. Por exemplo,

em uma determinada gleba, pode ser adotado um sistema de sucessão soja-trigo, sendo o cultivo da soja na primavera/verão e do trigo no outono/inverno, por vários anos (HIRAKURI et al., 2012).

Quanto ao sistema em rotação de culturas, este ocorre por meio da alternância ordenada, cíclica (temporal) e sazonal de diferentes espécies vegetais em um espaço produtivo específico. Por exemplo, em uma gleba podem ser adotados durante seis anos, três ciclos de um sistema de rotação de culturas de dois anos, em que, no primeiro ano tem-se soja na primavera/verão e trigo no outono/inverno, enquanto no segundo ano tem-se milho na primavera/verão e aveia ou girassol no outono/inverno (HIRAKURI et al., 2012). Já o sistema em consorciação de culturas ou policultivo, ocorre quando duas ou mais culturas ocupam a mesma área agrícola em um mesmo período de tempo. Como exemplo, o produtor pode adotar um sistema consorciado com o feijão cultivado nas entrelinhas do milho, mais comum em áreas de agricultura familiar (HIRAKURI et al., 2012).

No que diz respeito ao sistema em integração, salienta-se que este ocorre quando sistemas de cultivo/criação de diferentes finalidades (agricultura ou lavoura, pecuária e floresta) são integrados entre si, em uma mesma gleba, com o intuito de maximizar o uso da área e dos meios de produção, e ainda diversificar a renda. Nesse contexto, destacam-se quatro possíveis tipos de sistemas integrados: lavoura-pecuária (Ex.: milho e braquiária ou girassol e braquiária); lavoura-floresta (Ex.: soja nas entrelinhas do eucalipto); pecuária-floresta (Ex.: gado sobre pastagem em reflorestamento de eucalipto); lavoura-pecuária-floresta (Ex.: cultivo de milho seguido de pastagem com entrada de bovinos em área de eucalipto) (HIRAKURI et al., 2012).

Diante do exposto, é importante salientar que sistemas agrícolas são os conjuntos de técnicas e práticas de manejo e cultivo do solo. Assim, considerando características como as tecnologias empregadas no processo produtivo, a escala de produção e a mão de obra, classificam-se os sistemas agrícolas em duas categorias principais: intensivo e extensivo.

O sistema intensivo, é aquele em que há a aplicação intensiva de técnicas modernas de produção e alto teor de mecanização em todas as etapas da cadeia produtiva, o que engloba desde a seleção de sementes, utilizando-se dos avanços da biotecnologia e da ciência genética, até a colheita, o armazenamento e o transporte. A agricultura intensiva, como é também chamada, é caracterizada pelo amplo investimento de capital (dinheiro), e está diretamente associada à agroindústria e ao circuito superior da economia, inserindo-se nas cadeias de produção global (GUITARRARA, 2024). De acordo com Guitarrara (2024) a agricultura intensiva se utiliza de fertilizantes químicos e outros defensivos agrícolas para garantir o desenvolvimento da lavoura, marcada pelos elevados índices de produtividade.

Já o sistema agrícola extensivo é caracterizado pela aplicação de técnicas tradicionais de manejo do solo e de plantio e colheita, com menor taxa de adoção de defensivos agrícolas, maquinários e outras tecnologias modernas, em oposição ao que acontece no sistema intensivo. Por causa disso, a produtividade desse sistema é menor, e ele se torna mais suscetível às intempéries climáticas e a outros fatores externos que possam atrasar ou prejudicar o desenvolvimento da lavoura (GUITARRARA, 2024).

2.2.2 Sistemas de manejo do solo

O manejo, a proteção e uso do solo devem basear-se, primeiramente, no seu potencial produtivo. Sendo que para um manejo adequado do solo é necessário considerar suas propriedades físicas (aeração, retenção de água, compactação, estruturação), químicas (reação do solo, disponibilidade de nutrientes, interações entre estes) e biológicas (teor de matéria orgânica, respiração, biomassa de carbono, biomassa de nitrogênio, taxa de colonização e espécies de microrganismos). Um bom manejo do solo é aquele que propicia boa produtividade no tempo presente e que, também, possibilita a manutenção de sua fertilidade, garantindo a produção agrícola no futuro. Entre os fatores a considerar na escolha do sistema de manejo do solo estão a conservação ou o aumento do teor e qualidade da matéria orgânica, a proteção do solo contra o impacto das gotas de chuva e a economia da água nele armazenada (PETRERE; CUNHA, 2010).

Ao se discutir a sustentabilidade da produção agropecuária chamam a atenção o uso do solo com a agricultura tradicional, com preparo contínuo do solo. Dos componentes do manejo, o preparo do solo talvez seja a atividade que mais exerce influência nos atributos dos indicadores da degradação física do solo, pois atua diretamente na sua estrutura, como também a degradação química e biológica (STEFANOSK et al., 2013).

Nesse contexto, discute-se as particularidades dos métodos de manejo do solo, em relação ao preparo convencional, destaca-se que este procedimento envolve aração seguida de nivelamento com grade, permitindo a integração dos resíduos da cultura no solo. Uma das razões fundamentais para adotar essa abordagem de preparação do solo é a erradicação de plantas daninhas e, em certos casos, pragas, como por exemplo, o bicudo (*Anthonomus grandis*) na plantação de algodão; Já no preparo reduzido, o foco é reduzir a perturbação do solo em comparação com o preparo convencional. Isso resulta em menor mistura de resíduos vegetais, menor reviramento do solo, menor custo de preparo e diminuição da erosão do solo e perdas de água; No que diz respeito ao Cultivo Mínimo, trata-se de um método de plantio posicionado

entre o sistema convencional e o plantio direto. Esta abordagem destaca-se por minimizar o uso de maquinário agrícola no solo, com o propósito de reduzir a perturbação e compactação; Ao passo que o plantio direto, por sua vez, configura-se como uma técnica de manejo do solo que busca mitigar os impactos da agricultura e das máquinas agrícolas sobre o terreno. A preferência pelo plantio direto em substituição aos métodos tradicionais tem crescido de forma expressiva nos últimos anos (SEIXAS, 2020).

Percebe-se, portanto, que os métodos de manejo do solo englobam as diversas técnicas disponíveis para preparar o solo visando o plantio de diferentes culturas. Durante muito tempo, a prática convencional foi a mais comum na agricultura do sul do Brasil, envolvendo uma intensa movimentação do solo. Com o tempo, devido especialmente aos problemas de erosão causados por esse método, houve uma transição para técnicas de preparo reduzido, cultivo mínimo e, mais recentemente, plantio direto. Para tanto, o plantio direto é a técnica predominante nas áreas agrícolas do Brasil, enquanto as outras opções são utilizadas apenas em culturas que não se adaptam a esse modelo (ARAUJO, 2022).

De acordo com Seixas (2020), no rol de ferramentas disponíveis para preparação do solo e implementação de diversos manejos, é possível citar os seguintes: arado de aivecas, arado de discos, grade de discos, grade de dentes, enxada rotativa, escarificadores, subsolador, semeadoras para plantio direto e rolo-faca.

Na área da agricultura, é essencial que o homem saiba como cuidar do solo para promover o crescimento saudável das plantas em diferentes cultivos. O solo reage de maneira específica dependendo das práticas de manejo adotadas. Portanto, para utilizar o solo de forma sustentável e inteligente, é crucial compreender o impacto dos diversos métodos de manejo na qualidade do solo, visando assim reduzir danos físicos, químicos e biológicos (SEIXAS, 2020).

No que diz respeito às características físicas do solo, é importante destacar que elas são fortemente influenciadas pelos diversos métodos de manejo, incluindo os aspectos químicos e biológicos. O intenso preparo do solo, comum na agricultura convencional, tem o potencial de impactar negativamente as propriedades físicas, causando questões como erosão, compactação, redução da porosidade, desagregação, diminuição na infiltração de água, entre outros problemas. Por outro lado, o plantio direto, por não envolver a mobilização do solo, pode preservar as condições existentes no momento da implantação e até mesmo melhorá-las ao longo do tempo, influenciando aspectos como densidade e porosidade do solo, umidade do solo, temperatura do solo e estabilidade dos agregados do solo (SEIXAS, 2020). Dessa maneira, o texto a seguir aborda a física do solo.

2.2.3 Sistema de rotação de culturas

Do ponto de vista conceitual, a rotação de culturas se baseia na alternância de espécies vegetais cultivadas em um determinado local ao longo do tempo, de preferência com plantas que tenham raízes diferentes (como gramíneas e leguminosas), de forma que cada planta deixe um efeito benéfico residual no solo, beneficiando a cultura subsequente. Nas áreas onde a soja é predominante, ela é a cultura principal e a escolhida para gerar renda, conforme apontado por Gaudencio et al. (1986), Calegari (1990), Broch et al. (1997), Santos e Reis (2003).

No entanto, é essencial ter outras espécies cultivadas para diminuir a vulnerabilidade do monocultivo. Ao longo do tempo, essas espécies tornam o sistema mais eficiente e ecologicamente sustentável. Chamadas de adubos verdes ou plantas de cobertura, o desenvolvimento delas depende das características do solo, clima e época de cultivo. Indispensáveis em qualquer cultura e região, essas plantas são fundamentais para produzir palhada e controlar a erosão, aumentar o carbono no solo, reduzir ervas daninhas, fertilizar o solo e reciclar nutrientes. Comumente, elas geram muita biomassa e podem ser cultivadas sozinhas ou em conjunto com outras culturas, o que favorece condições ideais para altas produtividades ou para recuperar áreas degradadas (GARCIA et al., 1996; CATELLAN, 1997; AITA; GIACOMINI, 2006).

A presença destas espécies em um sistema agrícola que utiliza rotação de culturas varia de acordo com o ambiente de cada região. Enquanto algumas se adaptam melhor a climas frios, outras prosperam em regiões mais quentes. Dentre as espécies comumente usadas como adubos verdes estão a aveia, o milho, diversas variedades de pastagens, o tremoço, o girassol, entre outras. Destaca-se o tremoço, uma leguminosa que possui a importante habilidade de fixar nitrogênio do ar. Já a aveia não tem essa capacidade, mas quando plantada em consórcio com a ervilhaca, proporciona excelentes condições de solo para as plantas subsequentes. Os benefícios trazidos por essas plantas de cobertura incluem o aumento do carbono no solo e a redução das perdas de nutrientes solúveis por lixiviação, como o nitrato. Para o sucesso desse processo, é essencial utilizar o plantio direto, visando a produção de palha e resíduos para o sistema produtivo. A técnica de plantio direto é uma abordagem conservacionista que consiste em semear diretamente sobre a cobertura vegetal deixada pela cultura anterior. Essa prática ajuda a diminuir os efeitos das gotas de chuva, controlar a temperatura do solo, preservar a umidade e aprimorar o manejo de plantas daninhas (TORRES; SARAIVA, 1999; SANTOS et al., 2005).

Dessa forma, ao selecionar as espécies para a cobertura do solo no sistema de rotação, é fundamental optar pelas mais adequadas a cada região. Estas devem possuir ciclos em

harmonia com os períodos entre as safras dos cultivos comerciais, serem resistentes às principais pragas e doenças das plantações, ter raízes profundas para romper as camadas compactadas do solo e gerar uma quantidade significativa de biomassa para uma cobertura eficaz. Além disso, seria vantajoso que não se tornassem invasivas e ainda tivessem valor como forrageiras e/ou produtoras de grãos (GONÇALVES et al., 2007).

2.4 INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

Segundo Doran e Parkin (1994), os atributos físicos do solo são divididos em duas categorias: intermediários e permanentes. Os primeiros podem ser modificados com o tipo de manejo do solo e incluem densidade, resistência à penetração, permeabilidade, aeração, agregações, porosidade e umidade. Já os atributos físicos permanentes, como textura, mineralogia, densidade de partículas e cor, são inerentes às propriedades de cada solo e auxiliam na sua classificação pedológica. Geralmente, os atributos físicos intermediários são mais utilizados como indicadores da Qualidade Física do Solo, pois estão mais sujeitos a mudanças significativas devido aos sistemas de manejo.

Além dos critérios de qualidade do solo considerados quantitativos, existem também aspectos qualitativos que podem ser diretamente observados na propriedade. A avaliação desses elementos deve ser feita em momentos estratégicos ao longo do ciclo das culturas, sendo alguns deles observados continuamente (REINERT et al., 2006). Segundo Reichert et al. (2003), um indicador de qualidade fundamental é a avaliação da interação das raízes com o solo abaixo da superfície, também conhecida como análise do perfil radicular.

Nos últimos anos, um grande esforço tem sido dedicado à criação de indicadores para avaliar a QFS. De acordo com Karlen et al. (1997), um índice eficaz para a avaliação de um processo ou característica deve: (a) influenciar de alguma forma o processo em questão; (b) permitir comparações com um padrão estabelecido; e (c) ser sensível o suficiente para detectar variações precisas no tempo e no espaço. No entanto, a maior dificuldade enfrentada tem sido a busca por um índice que incorpore os atributos físicos do solo e que estejam diretamente relacionados ao crescimento, desenvolvimento e produção das plantas (SANTOS, 2010).

Considerando que as características físicas do solo estão interligadas e, portanto, a alteração de uma delas normalmente acarreta a mudança de todas as outras, propõe-se uma classificação hierárquica dos indicadores de qualidade física do solo com base no nível relativo de dificuldade de obtenção de seus valores. Esses indicadores são divididos em duas categorias: (I) primários, que são mais facilmente mensuráveis e obtidos por meio de medições diretas em

campo ou laboratório, e (II) secundários, que geralmente são derivados de dados coletados em campo e/ou laboratório (indicadores primários), mas exigem algum tipo de tratamento estatístico ou modelagem, sendo de interpretação mais complexa (STEFANOSKI et al., 2013).

No entanto, ao buscar avaliar os atributos relacionados à estabilidade estrutural como indicadores da qualidade física do solo em diferentes sistemas de manejo, a eficácia da avaliação dependerá da monitorização ao longo do tempo (SECCO et al., 2005).

São apresentados na Tabela 1 logo abaixo os principais atributos do solo utilizados como indicadores para monitorar a qualidade do solo e metodologias para a sua obtenção. É essencial que os indicadores básicos de IQS se relacionem com as funções do ecossistema, tais como ciclagem de carbono e nitrogênio, e devem ser propriedades mensuráveis, holísticas e acessíveis para usuários nos diferentes níveis.

Tabela 1 - Principais atributos do solo utilizados como indicadores para monitorar a qualidade do solo e metodologias para a sua obtenção.

ATRIBUTO DO SOLO	METODOLOGIA
Densidade do solo	Método do anel volumétrico
Resistência à penetração	Método do penetrômetro (índice de cone)
Agregação (>2mm)	Separação por peneiramento úmido
Textura	Método da pipeta ou densimétrico
Porosidade total	Determinada por meio da umidade do solo e da densidade de partículas
Infiltração	Método de infiltrômetro de anéis
Condutividade hidráulica saturada	Método do pemeâmetro de Ghelph (campo)

Fonte: STEFANOSKI et al. (2013).

Há uma tendência em classificar os indicadores em químicos, físicos e microbiológicos (DORAN; PARKIN, 1996; FLOWERS; LAL, 1998). Esses indicadores visam explicar a natureza complexa de um solo de uma forma simplificada e avaliar os impactos causados pela atividade humana sobre a qualidade e sustentabilidade. Para obter uma boa precisão dos indicadores uma opção é comparar áreas antropizadas com valores de referências, que podem ser obtidos em solos sob condição natural (solo de mata) e a partir daí estabelecer desvios obtendo o grau de sustentabilidade dos sistemas (DORAN; PARKIN, 1996; KARLEN et al., 1997). Na prática, o indicador ideal deve representar fidedignamente o status de uma ou várias funções do solo, além disso, ele deve ser reprodutível, sensível às modificações no solo, de fácil avaliação e de baixo custo (DONAGEMMA et al., 2010).

Assim, a alternativa é associar indicadores precisos (análises de laboratório), com indicadores de baixo custo (indicadores de campo), nos quais se relacionam a percepção do agricultor e do técnico em avaliações visuais. As determinações de campo podem apresentar

como vantagens a exigência de poucos equipamentos e os resultados facilmente interpretáveis (GIAROLA et al., 2010).

Os indicadores, como o Índice de Qualidade Estrutural do Solo (IQES), que é determinado por meio do Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) e A Taxa de Infiltração Estável de água no solo (TIE), são apontados como um método que pode ser reproduzido por cooperativas, órgãos de assistência técnica e empresas para fazer uma análise ampla da qualidade do solo, identificando gargalos que dificultam o aumento da produtividade, da estabilidade de produção face à ocorrência de adversidades climáticas e da rentabilidade nas diferentes regiões (LANDGRAF, 2021).

2.4.1 Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES)

O método DRES (Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo) consiste em uma técnica de campo que avalia a estrutura do solo por meio de observações visuais em amostras retiradas dos primeiros 25 cm da superfície. Essa avaliação considera critérios como tamanho, forma e resistência à ruptura dos agregados e torrões, bem como características como orientação, rugosidade e distribuição das faces de ruptura (RALISCH et al., 2017).

O DRES foi criado inspirado em métodos utilizados em outras abordagens, como o VESS (GUIMARÃES et al., 2011) e o Método do Perfil Cultural (TAVARES FILHO et al., 1999), com o objetivo de ser simples de usar, permitir o acompanhamento ao longo do tempo e espaço e a comparação entre regiões com variações de práticas de gestão, além de avaliar os impactos dessas práticas na formação ou deterioração da estrutura do solo. No entanto, é uma abordagem diferente do VESS, uma vez que, além das evidências habituais de compactação encontradas na amostra, o DRES também leva em consideração outros efeitos dos processos de degradação, como a maior presença de estruturas desagregadas, associadas à compactação e erosão, bem como sinais de recuperação da estrutura do solo. Além disso, o DRES utiliza como evidência adicional para qualificar a amostra as características visuais de degradação do solo ao redor da área recolhida (RALISCH et al., 2017).

É importante destacar que os conceitos adotados no DRES foram desenvolvidos com base nos parâmetros de qualidade estrutural identificados por meio de diversas avaliações realizadas com o método do Perfil Cultural (TAVARES FILHO et al., 1999), que é adequado para avaliar solos tropicais, definindo práticas de manejo apropriadas e, conseqüentemente, podendo guiar a implementação de sistemas de produção sustentáveis, como apresentado por Baquero et al. (2012). Esse método é extremamente eficiente, pois sua aplicação requer apenas

uma intervenção leve, consistindo na abertura de uma pequena vala para avaliar os primeiros 25 centímetros da terra, os quais são frequentemente impactados pelas práticas de manejo.

Portanto, o DRES foi elaborado levando em consideração a simplicidade de entendimento e aplicação, o que o torna acessível tanto para especialistas quanto para agricultores, sendo também adequado para uso acadêmico. Além disso, é uma ferramenta valiosa para a disseminação de tecnologias relacionadas ao manejo do solo, pois ajuda os interessados a compreender a qualidade estrutural do solo, a relação entre as práticas de manejo e os resultados obtidos no campo, assim como a comparabilidade desses resultados em diferentes situações de campo. Dessa forma, torna-se viável analisar como um determinado solo reage a distintas práticas de manejo, a uma mesma abordagem ao longo do tempo, bem como aos efeitos imediatos das atividades agrícolas e sua evolução ao longo do tempo. Assim sendo, esse recurso possibilita a detecção de áreas ou contextos que demandem investigações mais detalhadas ou intervenções para ajustes no manejo (RALISCH et al., 2017).

2.4.2 Taxa de Infiltração Estável (TIE)

O conhecimento da taxa de infiltração estável (TIE) de água, conforme descrita por Brandão et al. (2006), representa o fluxo contínuo de entrada de água no solo. A relação desse fator com atributos físicos do solo, como porosidade total, macroporosidade e densidade do solo, é de extrema importância na avaliação da degradação física nas áreas de mineração e na busca por soluções para atenuar seus impactos, visando a restauração da qualidade tanto do solo quanto da água. A capacidade de infiltração é um dos atributos primordiais dos solos, pois indica a quantidade máxima de água que o solo pode absorver, em condições específicas, embora sua determinação seja desafiadora devido à variação espacial e temporal (GUADAGNIN et al., 2007).

Dentre os elementos que influenciam o processo de infiltração, podemos destacar as características da superfície do solo, a quantidade inicial de água presente no perfil do solo, a duração da infiltração, a presença de camadas menos permeáveis ao longo do perfil, a topografia do terreno e os aspectos físicos do solo (HILLEL, 1998; REICHARDT; TIMM, 2004).

O TIE está associado às taxas reais de infiltração e escoamento superficial, desempenhando um papel crucial nos processos erosivos do solo. Essa grandeza também pode ser vista como uma medida relativa da permeabilidade do ar nos macroporos. Em estudos hidrológicos, as técnicas mais comuns para determinar o TIE são o infiltrômetro de anel e o

simulador de chuva (BRANDÃO et al., 2006). O infiltrômetro de anel é a ferramenta preferida devido à sua praticidade e custo acessível (SIMÕES et al., 2005).

Contudo, salienta-se que a TIE está intimamente ligada aos fenômenos dinâmicos que ocorrem nos espaços vazios do solo, influenciando a condutividade hidráulica saturada na camada superficial (BOUWER, 1986; HILLEL, 1998), assim como a permeabilidade dos macroporos no perfil, visto que a condutividade hidráulica não saturada diminui consideravelmente após a saturação, devido à redução do potencial matricial e do tamanho dos poros que retêm água, especialmente em níveis de pressão logo abaixo do ponto de entrada do ar (HILLEL, 1998).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido durante três anos (2020/21, 2021/22 e 2022/23) no Centro de Pesquisa Agrícola da Cooperativa Agroindustrial Consolata (CPA Copacol), no município de Cafelândia - PR, região Oeste do Estado do Paraná. As coordenadas geográficas do experimento são 24°37'12.64"S de latitude e 53°18'14.39"O de longitude, a 581 m de altitude. O clima é descrito como subtropical (Cfa), de acordo com a classificação de Köppen (Nitsche et al, 2019), sendo os dados de temperatura e balanço hídrico das três safras apresentados na Figura 3. O solo da área experimental foi classificado como latossolo vermelho distroférico, segundo as orientações do manual de classificação de solos (SANTOS et al.,2018), de textura muita argilosa, com teores médios de 770 g kg⁻¹ de argila, 131 g kg⁻¹ silte e 99 g kg⁻¹ de areia na camada de 0-40 cm. A caracterização química do solo anteriormente a implantação do ensaio, apontou os seguintes atributos químicos médios na camada de 0-20 cm: pH CaCl₂ = 5,1; H+Al (SMP) = 4,16 cmol_c dm⁻³; carbono orgânico total (Walkley-Black) = 18,6 g kg⁻¹; P (Mehlich-1) = 19 mg dm⁻³; K⁺ (Mehlich-1) = 0,46 cmol_c dm⁻³; Ca²⁺ (KCl) = 3,91 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺ (KCl) = 1,56 cmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 0,09 cmol_c dm⁻³; CTC pH 7,0 = 10,08 cmol_c dm⁻³; e saturação por bases (V%) = 58%.

Salienta-se que no período de pousio foram empregados outros sistemas para diversificar a produção. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso (DBC) com quatro blocos e quatro repetições por bloco, com 5 sistemas de cultivo estabelecidos a partir do período de outono-inverno de 2020, caracterizados pela sequência de culturas detalhada na Tabela 2. Cada parcela experimental contou com 5m de largura por 24m de comprimento um total de 120 m².

Tabela 2 - Sequência de culturas nos sistemas de cultivo avaliados no experimento, nas safras 2020/21, 2021/22 e 2022/23

Sistema de cultivo	2020/2021		2021/2022		2022/2023	
	Outono/inverno	Primavera/verão	Outono/inverno	Primavera/verão	Outono/inverno	Primavera/verão
S1	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja
S2	Milho/Trigo	Soja	Milho	Soja	Milho/Trigo	Soja
S3	Milho + <i>braquiária ruziziensis</i>	Soja	Milho + <i>braquiária ruziziensis</i>	Soja	Milho + <i>braquiária ruziziensis</i>	Soja
S4	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja
S5	Aveia preta	Soja	Aveia preta	Soja	Aveia preta	Soja

Diante da sequência de culturas apresentadas para cada sistema destaca-se que até a implantação do experimento, a área experimental vinha sendo conduzida sob a sucessão soja-milho 2ª safra em semeadura direta desde 2015, conforme S1. O S2 e S3 são modelos avaliados no quesito diversificação e o S4 e S5 são sistemas que se diferem do empregado comumente da região, integrando a sucessão trigo/soja (S4) e utilizando a aveia preta para cobertura de solo antecedendo a safra soja (S5).

Para tanto, na Tabela 3 são apresentadas algumas informações sobre a implantação e condução das culturas nas três safras, englobando data de semeadura, colheita ou manejo (dessecação), adubação de base e de cobertura (fertilizante empregado e dose).

Tabela 3 - Descrição dos sistemas de cultivos, a data de semeadura, colheita/manejo, fórmula e dosagem de adubação utilizada.

DESCRIÇÃO DOS TRATAMENTOS					
Anos/Safras				Adubação de base	Adubação de
Cultura	Semeadura	Colheita/manejo	Cultivar	Fórmula NPK / Dose kg ha ⁻¹	cobertura Fertilizante / Dose kg ha ⁻¹
SOJA					
2020/21	07/10/2020	08/03/2021	M5705 IPRO	04-24-16 / 310 ha -1	-
2021/22	06/10/2021	20/01/2022	BMX Lança	02-20-18 / 300 ha -1	-
2022/23	17/10/2022	05/03/2023	BMX Zeus	02-20-18 / 300 ha -1	-
MILHO 2^a SAFRA⁽¹⁾					
2020/21	21/01/2020	27/05/2020	AG 9050 PRO3	10-15-15 / 300 ha -1	Ureia ⁽²⁾ / 200 ha ⁻¹
2021/22	10/03/2021	20/07/2021	AG 9000 PRO3	10-15-15 / 310 ha -1	Nitrato de amônio ⁽³⁾ / 150 ha -1
2022/23	24/01/2022	31/05/2022	AG 9000 PRO3	10-15-15 / 300 ha -1	Ureia / 150 ha ⁻¹
TRIGO					
2020/21	10/05/2020	05/09/2020	TBIO Sonic	10-15-15 / 300 ha ⁻¹	Ureia / 200 ha -1
2021/22	13/05/2021	- ⁽⁴⁾	TBIO Audaz	10-15-15 / 300 ha ⁻¹	Ureia / 200 ha -1
2022/23	29/04/2022	10/09/2022	TBIO Ponteiro	10-15-15 / 300 ha ⁻¹	Ureia / 200 ha -1
AVEIA PRETA					
2020/21	29/05/2020	10/09/2020 ⁽⁵⁾	Embrapa 139	-	-
2021/22	-	-	-	-	-
2022/23	29/04/2022	20/08/2022	Embrapa 139	-	-

⁽¹⁾ Refere-se ao milho 2^a safra em cultivo solteiro ou consorciado com *braquiária ruziziensis*. No cultivo consorciado, a braquiária foi semeada a lanço imediatamente antes da semeadura do milho, no mesmo dia; ⁽²⁾ 45% de nitrogênio (N); ⁽³⁾ 27% de N; ⁽⁴⁾ Safra perdida devido à ocorrência de geada na fase reprodutiva da cultura; ⁽⁵⁾ Refere-se à data da 1^a dessecação.

A soja verão e o milho 2^a safra foram semeados por meio de semeadora-adubadora tratorizada com linhas espaçadas 50 cm entre si, equipada com mecanismos sulcadores e dosadores do tipo facão guilhotina e rosca sem-fim para os fertilizantes, e discos duplos defasados e discos perfurados para as sementes, respectivamente. No caso da soja, a taxa de semeadura foi definida buscando-se uma população final de aproximadamente 260 mil plantas na safra 2020/21 e 360 mil plantas nas demais safras. As sementes foram previamente tratadas

com piraclostrobina (2,5 g i.a 100 kg⁻¹ de sementes), tiofanato metílico (22,5 g i.a 100 kg⁻¹ de sementes), fipronil (25 g i.a 100 kg⁻¹ de sementes), tiametoxan (70 g i.a 100 kg⁻¹ de sementes), carboxina (60 g i.a 100 kg⁻¹ de sementes), tiram (60 g i.a 100 kg⁻¹ de sementes) e inoculante líquido contendo *Bradyrhizobium elkanii*.

No milho 2^a safra, a semeadora foi regulada para atingir uma população de cerca de 60 mil plantas em todas as safras. As sementes de milho foram tratadas com clotianidina (48 g i.a. 60.000 sementes⁻¹) e fludioxonil (3,75 g i.a. 100 kg⁻¹ de sementes). Para ambas as culturas, a profundidade média de semeadura foi de 4 cm, sendo o fertilizante aplicado 5 cm abaixo das sementes, nas doses indicadas na Tabela 2. No consórcio milho + *braquiária ruziziensis* (*Urochloa ruziziensis* R.) as práticas de implantação, adubação e tratos culturais foram idênticas às utilizadas no cultivo solteiro, com exceção do controle de plantas daninhas em pós-emergência da cultura.

A forrageira foi semeada a lanço imediatamente antes da operação de semeadura do milho, no mesmo dia. Foram utilizadas sementes de braquiária com recobrimento e valor cultural próximo a 80%, com uma taxa de semeadura equivalente a 10 kg ha⁻¹, 8 kg ha⁻¹ e 12 kg ha⁻¹ na 2^a safra 2020, 2021 e 2022, respectivamente.

As culturas do trigo e da aveia preta foram semeadas em linhas espaçadas 17 cm entre si, por meio de semeadora-adubadora tratorizada equipada com dosadores do tipo rolo acanalado e rosca sem-fim para as sementes e fertilizantes, que foram depositados em sulcos abertos por discos duplos defasados, a uma profundidade de 5 cm. A semeadora foi regulada visando a obtenção de uma população de 300 plantas por m² para o trigo e aveia preta semeadas na época normal (MP 2, 3, 6 e 8). As sementes de trigo foram tratadas com imidacloprido (50 g i.a 100 kg⁻¹ de sementes) e difenoconazol (30 g i.a 100 kg⁻¹ de sementes). Quando os cereais de inverno foram implantados na janela entre a colheita do milho 2^a safra e a semeadura da soja, a quantidade de sementes por hectare foi ajustada visando o estabelecimento de 350 plantas por m², em função da maior dificuldade de deposição das sementes na profundidade adequada pela elevada quantidade de milho presente no momento da semeadura. O N em cobertura foi aplicado cerca de 28 dias após a emergência do trigo (2020 e 2021) ou da aveia (2020). A adubação nitrogenada de cobertura não foi realizada na aveia preta para cobertura do solo em todas as safras, bem como no trigo na safra 2022.

O manejo de plantas daninhas em pré e pós-emergência das culturas variou conforme o efeito dos modelos de produção na infestação e as culturas componentes. Os demais tratos culturais, incluindo o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, foi realizado conforme as indicações técnicas para as culturas na região.

Não foi realizada dessecação após a colheita da soja e antes da semeadura do milho 2ª safra, solteiro ou consorciado. No manejo pré-semeadura da soja implantada após milho 2ª safra solteiro, foram realizadas duas aplicações sequenciais de herbicidas, sendo a primeira cerca de 45 dias antes da semeadura da oleaginosa, composta por glifosato potássico (1.000 g ha⁻¹ de equivalente ácido – e.a.) + triclopir (1.020 g e.a. ha⁻¹) + óleo mineral (400 ml ha⁻¹), e a segunda, por glufosinato de amônio (500 g ha⁻¹ de ingrediente ativo – i.a.) + óleo vegetal (400 ml ha⁻¹), 15 dias depois da primeira. Nas safras 2021 e 2022, o manejo de plantas daninhas pré-semeadura da soja a ser implantada após o milho consorciado com braquiária foi igual ao milho 2ª safra solteiro.

Entretanto, na safra 2020, a dessecação visando a implantação da soja após o consórcio foi realizado por meio de uma aplicação de glifosato potássico, na dose de 2.500 g e.a. ha⁻¹. Nas safras e tratamentos onde a soja foi semeada após trigo, as parcelas foram dessecadas por meio de uma aplicação de glifosato potássico (1.000 g e.a. ha⁻¹) em todas as safras, enquanto após aveia preta, foram realizadas duas aplicações do mesmo herbicida, uma para dessecar a cultura de cobertura e outra para controle de plantas daninhas em pré-semeadura da soja, nas doses de 1.250 e 1.000 g e.a. ha⁻¹, respectivamente. Antecedendo à implantação do trigo ou da aveia preta, tanto após a soja quanto após o milho 2ª safra, em todos os tratamentos e safras, a dessecação foi realizada por meio dos herbicidas glifosato potássico + 2,4-D, ambos na dose de 1.000 g e. a. ha⁻¹.

No milho solteiro, independente da safra e do sistema de produção, o controle de plantas daninhas em pós-emergência (V4) envolveu a aplicação dos herbicidas atrazina (2.000 g i.a ha⁻¹), mesotriona (72 g i.a ha⁻¹) e glifosato potássico (1.000 g e.a. ha⁻¹), em todas as safras. No milho consorciado (sistema 3), o manejo das plantas daninhas e da competição da braquiária foi realizado por meio da aplicação, no início do perfilhamento da forrageira, dos herbicidas atrazina e mesotriona, nas doses de 1.500 e 72 g i.a ha⁻¹, em todas as safras. Na soja, o controle de plantas daninhas em pós-emergência da cultura foi igual para todos os tratamentos e safras, envolvendo a aplicação de glifosato potássico (1.000 g e.a. ha⁻¹) + cletodim (360 g i.a. ha⁻¹) + óleo mineral (400 ml ha⁻¹). O controle de plantas daninhas em pós-emergência no trigo e nas aveias preta e branca envolveu a aplicação de 2,4-D (400 g e.a. ha⁻¹) + metsulfurom metílico (3 g i.a. ha⁻¹) + óleo mineral (300 ml ha⁻¹), exceto na safra 2020, onde apenas a primeira aplicação (clodinafope-propargil + adjuvante) foi realizada. Para a aveia preta, foram aplicados, em pós-emergência da cultura, 2,4-D (400 g e.a. ha⁻¹) + metsulfurom metílico (3 g i.a. ha⁻¹) + óleo mineral (300 ml ha⁻¹), em uma única operação.

Para todas as culturas de grãos, a produtividade foi determinada pela colheita mecânica

(colhedora de parcelas) dos grãos da área útil da parcela (2 x 24 m) área útil (1,5 x 20 m), sendo os valores corrigidos para 13% de umidade e extrapolados para kg ha⁻¹.

Contudo, salienta-se que a área onde o experimento foi conduzido apresentava-se sob sistema de plantio direto consolidado. Em 2018 realizou-se uma calagem em superfície com aplicação de 3t ha⁻¹ de calcário dolomítico e em 2019 uma adubação orgânica com aplicação de 4 t ha⁻¹ de cama de frango. Antes da implantação do experimento foi realizada análise de solo para parte química, além de análises que contemplam os parâmetros físicos do solo que são apresentadas no início desta metodologia. As culturas sempre foram implantadas no início das janelas de semeadura utilizando cultivares e híbridos de ciclo precoce para viabilizar os tratamentos onde haverá terceira safra.

Foram analisados os seguintes indicadores de qualidade do solo, ambos com duas amostras por parcela:

Qualidade estrutural do solo por meio da aplicação do Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) e após a análise atribuindo notas indicando o Índice de Qualidade Estrutural do Solo (IQEs) da camada de 0-25 cm de profundidade, (RALISCH et al., 2017) e Avaliação por parcela da taxa de infiltração estável de água no solo (TIE), com mini simulador de chuva (OGDEN; van ES; SCHINDELBECK, 1997).

ATRIBUIÇÃO DAS NOTAS DE QUALIDADE ESTRUTURAL DE CADA CAMADA DA AMOSTRA DE SOLO (Q_{ec})

Condição inicial	Camadas da amostra com evidências de conservação/recuperação			Camadas da amostra com evidências de degradação		
	Q _{ec} = 6	Q _{ec} = 5	Q _{ec} = 4	Q _{ec} = 3	Q _{ec} = 2	Q _{ec} = 1
Tamanho do agregado e % na amostra	Mais de 70% de agregados com 1 a 4 cm	50 a 70% de agregados de 1 a 4 cm	Menos de 50% de agregados de 1 a 4 cm	Menos de 50% de agregados menores que 1 cm e maiores que 7 cm	50 a 70 % de agregados menores que 1 cm e maiores que 7 cm	Mais de 70% de agregados menores que 1 cm e maiores que 7 cm
Características da estrutura	Estrutura frível, agregados muito grumosos e porosos, com atividade biológica alta. Raízes abundantes e bem distribuídas na camada avaliada, sem deformações ocasionadas por impedimentos físicos, crescendo através dos agregados.	Estrutura frível, agregados grumosos e porosos, com mediana atividade biológica. Raízes bem distribuídas na camada avaliada, podendo apresentar poucos sinais de restrição ao crescimento. As raízes crescem predominantemente através dos agregados.	Estrutura frível, pouco grumosa, pouco poros e fraca atividade biológica. Raízes podem apresentar algum impedimento ao desenvolvimento.	Estrutura coesa nos agregados grandes, e muito solta entre os agregados menores que 1 cm. Predomínio de agregados com faces planas, com poucos poros e atividade biológica. Pode apresentar raízes achatadas com dificuldade para desenvolvimento pleno na camada avaliada.	Estrutura coesa nos agregados grandes, e muito solta entre os agregados menores que 1 cm. Predomínio de agregados com faces planas, com alguns poros e pouca atividade biológica. Desenvolvimento radicular limitado, com predomínio de raízes achatadas com dificuldade para penetração no interior dos agregados.	Estrutura coesa nos agregados grandes, e muito solta entre os agregados menores que 1 cm. Predomínio de agregados com faces planas, sem poros visíveis e atividade biológica. Forte restrição ao desenvolvimento radicular, com predomínio de raízes achatadas, crescendo preferencialmente nas fissuras entre os agregados.
	grumosidade, atividade biológica, porosidade, raízes bem desenvolvidas			superfícies planas, raízes achatadas, solo desagregado ou compactado		

Figura 1. Notas atribuídas ao Índice de Qualidade Estrutural do Solo (IQEs) (RALISCH et al., 2017)

Para determinação da estrutura do solo através do diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES), iniciou-se com a retirada da cobertura vegetal, em seguida foi aberta uma trincheira de aproximadamente 40 cm de comprimento, 30 cm de largura e 30 cm de profundidade. Dessa trincheira foi retirado um bloco de solo para avaliação da estrutura com dimensões de 10 cm de espessura, largura de 20 cm e profundidade de 25 cm (Figura 1).

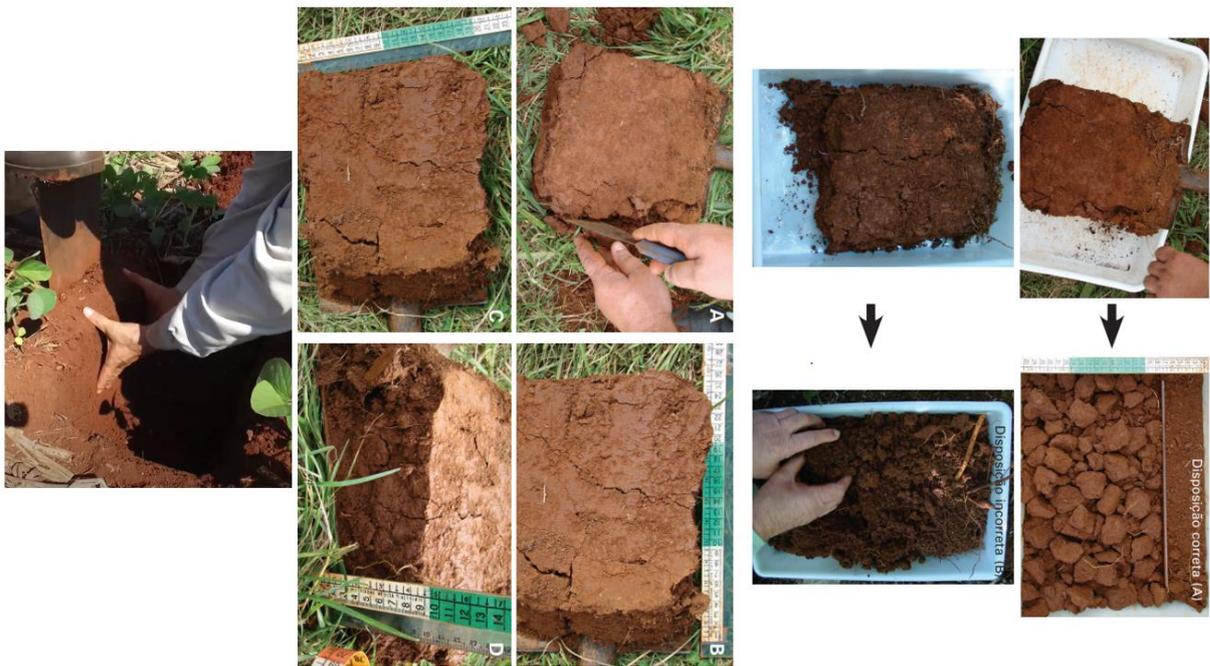


Figura 2 - Processo de determinação da estrutura do solo através do diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES) (Imagens do Livro Diagnóstico rápido da estrutura do solo – DRES).

Culturas com espaçamento entre linhas maior de 20 cm a amostra foi retirada de forma a evitar a linha de plantio, em culturas com espaçamento entre linhas menores de 20 cm sendo as culturas de inverno uma linha de semeadura foi coletada junto ao bloco de solo. Na sequência o solo foi colocado em uma bandeja de 25 cm de largura de forma que as amostras não sofreram deformação no tamanho da sua profundidade.

Em seguida foi efetuada a fragmentação do bloco. Esse processo ocorreu no sentido horizontal, do centro da amostra para as extremidades, evitando a mistura de material para camadas distintas de acordo com os agregados. Os fragmentos oriundos desse processo podem originar microagregados, macroagregados e até mesmo torrões, estes maiores de 7 cm de diâmetro. Esta amostra foi dividida em camadas, estas podendo ter uma única camada ou mais. Para determinação das camadas foi levado em conta o diâmetro dos agregados. O tamanho da camada foi considerado de acordo de maior similaridade dos agregados.

Segundo Ralisch et al. (2017) com base nas variações desses aspectos, é possível identificar de uma a três camadas distintas em cada amostra de solo de forma simples e rápida. Cada camada recebe notas de qualidade estrutural, que variam de "1" (estrutura completamente deteriorada) a "6" (melhor condição estrutural). Essas notas baseiam-se em dois critérios: a presença de sinais de degradação ou preservação/recuperação da estrutura no solo; e a proporção visual (em volume) dos diferentes tamanhos de agregados após a manipulação da amostra. Com base nas notas de cada camada, calcula-se a qualidade estrutural do solo tanto da

amostra quanto da área em questão. Cada nota de qualidade estrutural do solo em uma gleba agrícola sugere práticas de manejo para preservar e/ou aprimorar a estrutura do solo.

Diante disso, a determinação da nota de cada camada levou em conta alguns fatores como: evidência de agregação do solo ou conservação/degradação do solo e proporção visual do volume e tamanho dos agregados sendo que quanto maior a nota atribuída melhor a estrutura do solo.

Para a determinação da infiltração foi utilizado um infiltrômetro modelo Cornell (VAN ES; SCHINDELBECK, 2003). O equipamento simula uma chuva de alta intensidade e o escoamento superficial de água no solo (ES) é determinado a partir da coleta do excesso de água em uma mangueira instalada na parte inferior do anel. Para a determinação do ES com este equipamento foi utilizada uma intensidade média de chuva em torno de 280 mm h^{-1} , pois a elevada intensidade de chuva aplicada, é necessária para que haja uma rápida saturação do solo, conseqüentemente ocasionando o ES com posterior estabilização da TIE (Figura 2).



Figura 3 - Determinação do ES e da infiltração com infiltrômetro modelo Cornell. (Imagens do Livro Diagnóstico rápido da estrutura do solo – DRES).

A intensidade de chuva foi controlada pela entrada de ar no reservatório de água através da abertura da coluna de vidro disposta na parte superior do equipamento, e calculada através das diferenças de leituras do volume de água no reservatório em uma régua localizada na lateral do equipamento, a cada 2 minutos. As leituras da intensidade da chuva e as medições do ES

foram realizadas simultaneamente. A TIE foi calculada pela diferença entre a chuva aplicada e o ES. O aumento da intensidade da chuva provoca uma redução no tempo para que ocorra início do ES, ocasionando aumento das perdas, independente das condições da superfície do solo (CARLESSO et al., 2011).

Os dados obtidos das qualidades físicas do solo no experimento foram submetidos à análise de variância, pelo teste F. As médias, quando significativas em relação aos atributos físicos do solo foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro, pelo programa de análises estatísticas R Core Team (2016).

A colheita do ensaio foi realizada com colhedora de parcelas experimentais WinterSteiger, modelo Classic. Para o rendimento de grãos (kg/ha), foi corrigindo a umidade para 13% e as variáveis analisadas foram submetidas à análise de variância pelo teste F e as médias comparadas pelo teste Scott-Knott, à 5% de probabilidade de erro pelo programa de análises estatísticas R Core Team (2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As condições climáticas foram diversas durante os três anos de estudo, impactando diretamente nos resultados. Para tanto, tem-se na Figura 4 as temperaturas médias, média das máximas, médias das mínimas e balanço hídrico sequencial no estado do Paraná (método de Thornthwaite; Mather, 1955) por decêndio, para a 2ª safra de 2020 (A), 2021 (C) e 2022 (E), e para as safras de verão 2020/21 (B), 2021/22 (D) e 2022/23 (E).

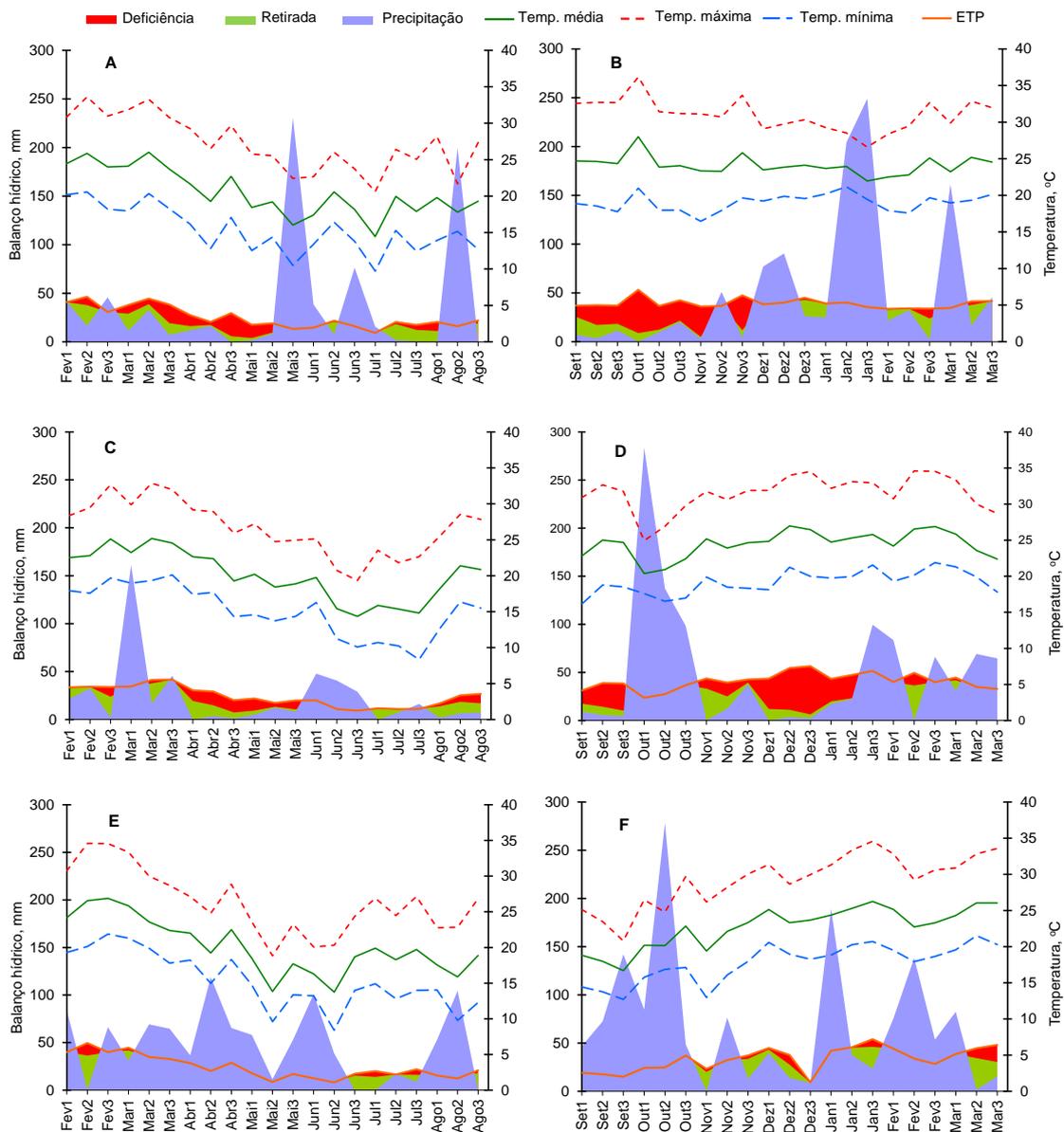


Figura 4 - Temperaturas média, média das máximas, médias das mínimas e balanço hídrico sequencial (método de Thornthwaite; Mather, 1955) por decêndio, para a 2ª safra de 2020 (A), 2021 (C) e 2022 (E), e para as safras de verão 2020/21 (B), 2021/22 (D) e 2022/23 (E).

ETP = evapotranspiração potencial (mm), método de Thornthwaite (1948); Retirada: consumo de água real (mm). Balanço hídrico sequencial calculado para uma capacidade de água disponível no solo de 75 mm.

Foram detectadas diferenças significativas entre os sistemas, sendo que o S2, S3 e S4 obtiveram maiores notas da sua IQEs quando comparados ao S1, sistema que vem sendo comumente empregado na região. Quanto ao S5 pode-se salientar que este não se diferiu estaticamente do S1 (Figura 5).

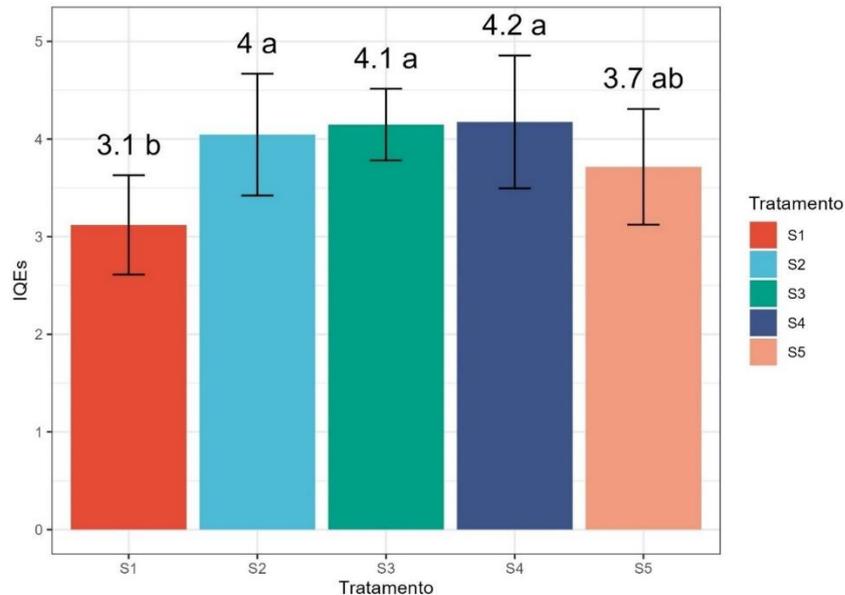


Figura 5 - Resultados da determinação da estrutura do solo coletados por meio do diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES) para os cinco sistemas investigados (S1 Milho/Soja; S2 Milho/Trigo/Soja; S3 Milho + Braquiaria/Soja; S4: Trigo/Soja; S5 Aveia/Soja.

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Além de limitar a produtividade potencial, a ocorrência de secas tem frequentemente levado a reduções drásticas na produtividade das culturas em relação à média das safras consideradas “normais” no Paraná. Para tanto, os resultados para a análise de IQEs, comparando os sistemas de cultivo estão representados na Figura 5.

Essas diferenças mostraram que ao integrar diferentes culturas nos sistemas de cultivo, como no S2 (Trigo como terceira cultura na entressafra do milho e soja), S3 (adição de uma planta consorciada junto com o milho, neste caso a braquiária), S4 (Trigo substituindo o milho como cultura de inverno) e S5 (aveia como planta de cobertura) melhoram a estrutura do solo.

Resultado similar foi observado por Stumpf et al. (2014), quando adicionado espécies de Poáceas aos sistemas de cultivo, houve uma melhora na qualidade estrutural do solo na camada de 0-10 cm. Possivelmente, este resultado seja um reflexo da atividade biológica das

diferentes plantas. Estes dois fatores, segundo Horn (1990), podem alterar agregados formados naturalmente e/ou antropogênicamente.

Assim, a partir do observado, entende-se que aderir o método de rotação de culturas, ou então, incluir novas culturas no sistema de produção tradicional pode gerar uma melhora significativa na estrutura do solo. Nesse contexto, Franchin et al. (2011) destacam que a prática de rotação de culturas traz vantagens a longo prazo para a qualidade do solo e influencia positivamente o controle de pragas, doenças e plantas invasoras, o que resulta em aumentos na produtividade de todas as culturas de grãos envolvidas no sistema de cultivo.

Como evidenciado nesta pesquisa, o uso de diferentes espécies vegetais na produção de cereais ou forragens possibilita a diversificação dos ganhos, contribuindo para a redução dos riscos climáticos e de mercado associados à atividade agrícola (FRANCHIN et al., 2011). Para tanto, na Figura 5 são apresentados os resultados da TIE.

O S1 (soja/milho 2ª safra) e o S3 (soja/milho + braquiária) não tiveram diferenças significativas entre si, porém, a taxa de infiltração quando adicionamos a braquiária no sistema foi de 6,6 mm/h a mais se comparado com o padrão sem braquiária. O S2 (milho/trigo e soja) caracterizado por 3 safras durante o ano agrícola, teve a menor TIE, enquanto o S5 (soja/aveia preta), demonstrou que a cobertura de solo faz muita diferença no quesito infiltração de água no solo. Contudo, o tratamento S4 (soja/trigo) durante as três safras, foi o com maior TIE dentre os sistemas avaliados na Figura 6.

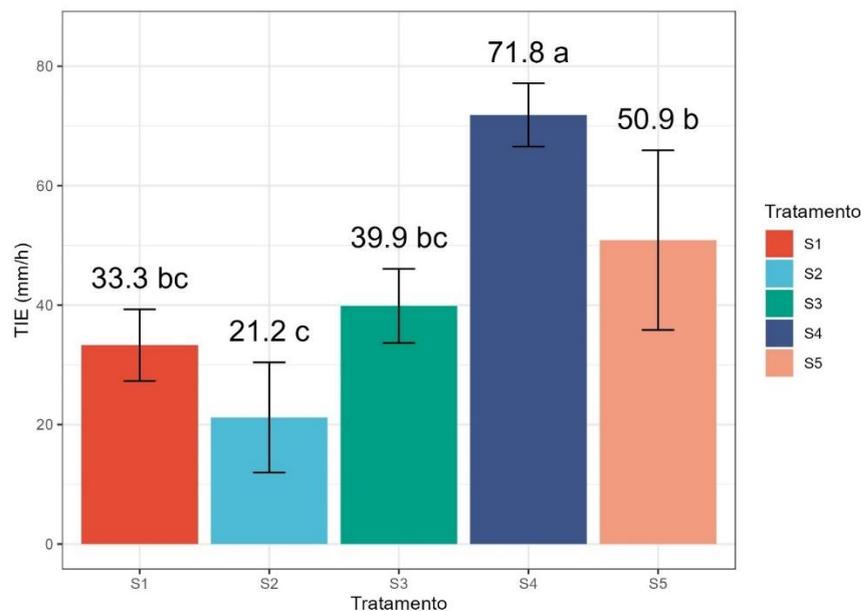


Figura 6 – Resultados da TIE (mm/h) coletados a partir da determinação do ES e da infiltração de água no solo para os cinco sistemas investigados. S1 Milho/Soja; S2 Milho/Trigo/Soja; S3 Milho + Braquiaria/Soja; S4: Trigo/Soja; S5 Aveia/Soja. Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A partir dos dados, é importante destacar que neste trabalho o foco não foi estudar os sistemas de rotação de culturas, e sim os sistemas de cultivo como um todo, porém foram alternadas espécies vegetais no decorrer do tempo, numa mesma área agrícola e, portanto, pode-se dizer que foi utilizado o sistema de rotação. Neste sentido, salienta-se que a prática da rotação de culturas possibilita a diversificação de sistemas radiculares e sua ação sobre o solo, inclusive aumentando a velocidade de infiltração de água no solo, pelo aumento do número de bioporos (PRANDO et al., 2010).

Diante disto, uma possibilidade para o S2 ter a menor TIE em relação ao S4 e S5, se dá pelo fato de a análise ter sido realizada muito próximo a colheita da cultura onde esses bioporos ainda estavam ocupados por raízes da cultura diminuindo a TIE. Quanto a isso, é válido ressaltar que a avaliação dos bioporos no perfil do solo é um indicador de qualidade, no entanto, mesmo com baixa TIE, o IQEs do S2 foi positivo.

Além do exposto, é importante observar que os bioporos são canais de diversos tamanhos formados no solo devido às raízes de culturas anteriores, adubos verdes e macrofauna do solo (conhecidos como engenheiros do ecossistema). Esses canais desempenham um papel fundamental ao permitir a infiltração de água, as trocas de calor e gases com a atmosfera, assim como facilitar o crescimento do sistema radicular das plantas, viabilizando o acesso a nutrientes e água (ZANELLA, 2019).

Quanto ao fato de o S4 e S5 apresentar um TIE mais alto que o S1, S2 e S3, é interessante notar que as principais vantagens de cultivar aveia preta como cultura de cobertura incluem a redução da erosão e do escoamento superficial, o aumento da infiltração de água e do teor de carbono orgânico no solo, a reciclagem de nutrientes, a mobilização de cátions no solo, o controle de ervas daninhas, além de outros benefícios para o solo e as culturas comerciais cultivadas em sequência (SANTI; AMADO; ACOSTA, 2003).

Ao analisar o S4, que obteve o maior TIE ao longo das três safras, é relevante destacar que o trigo é uma cultura que faz parte de sistemas de cultivo com soja, sendo uma excelente opção para aprimorar o sistema como um todo, já que proporciona uma boa cobertura do solo, auxilia no controle de nematóides, apresenta raízes profundas e matéria orgânica, e facilita a infiltração da água no solo (CENCI, 2018).

Sendo assim, existem diversas combinações de culturas que podem ser utilizadas para melhorar a qualidade do solo e aumentar a produção agrícola. Logo, a diversificação de culturas é essencial, pois Debiasi et al., (2023) destacam que o uso contínuo do mesmo sistema já tem apresentado desafios ao produtor. No caso específico da região Oeste do Estado, dos dados disponibilizados pelo Deral (2023), mostra as perdas de produtividade da soja em média de 27,5

sacos por hectare em safras com ocorrência comprovada de secas entre 2008/09 e 2022/23 essa perda de produtividade pode estar associada além das secas a má preservação dos solos pelo uso de sistemas intensivos de produção como por exemplo o sistema soja/milho.

Os dados citados pelos autores acima corroboram com a dificuldade de manter o potencial produtivo em sistemas intensivos observando-se que, de 15 safras observadas quatro (aproximadamente 25%) houve perdas significativas por seca. As perdas absolutas de produtividade variaram de 1.121 a 2.795 kg ha⁻¹ na região Oeste. Isso representa uma perda média nas quatro safras de aproximadamente 48%. As maiores perdas de produtividade na região Oeste podem ser atribuídas, em parte, a maior frequência de áreas com baixa altitude (<500 m), onde as maiores temperaturas e maior irregularidade das chuvas aumentam a intensidade de ocorrência do déficit hídrico.

Diante do exposto, fica evidente que o aumento da produtividade e da estabilidade de produção está associado, em grande parte, à adoção de tecnologias que aumentem a disponibilidade de água às plantas. Isso envolve a construção de um perfil de solo sem impedimentos físicos (compactação), químicos (acidez excessiva, com baixos teores de cálcio e presença de alumínio tóxico) e/ou biológicos (nematoides e fungos fitopatogênicos) ao crescimento radicular, possibilitando assim um maior volume de solo explorado em busca de água, sobretudo nas camadas mais profundas. A melhoria da estrutura do solo, além de favorecer o crescimento radicular (BERTOLLO et al., 2021), proporciona maior taxa de infiltração e armazenamento de água disponível às plantas, bem como otimiza os fluxos de água, oxigênio e nutrientes do solo para as raízes (MORAES et al., 2016; MORAES et al., 2018).

Um outro aspecto que tem preocupado produtores e técnicos de todo o Paraná é a intensificação da erosão hídrica, o que tem levado ao aumento das perdas de solo e água com consequência negativas para a produção agrícola e o ambiente. Em alguns casos, a magnitude das perdas de água e solo por erosão é comparável à observada nas décadas de 70 e 80, quando predominavam sistemas de preparo com intenso revolvimento convencional do solo (FRANCHINI et al., 2018). A perda da camada mais fértil do solo diminui a produtividade das culturas (GAERTNER et al., 2003) e, considerando apenas a reposição dos nutrientes perdidos, representa prejuízos financeiros de até US\$ 108 ha⁻¹ ano⁻¹ (DECHEN et al., 2015). Além disso, a erosão gera impactos negativos sobre o ambiente, como a poluição e alteração do regime de cursos de água superficiais (LIPIEC et al., 2003).

Assim, salienta-se que o sistema plantio direto (SPD), quando corretamente implantado e manejado, sobretudo no que se refere ao atendimento de suas premissas (mínimo

revolvimento, cobertura permanente do solo e adoção de sistemas de produção com elevada diversidade de culturas e aporte de palha e raízes), é uma das chaves para a construção de um perfil de solo com alta fertilidade física, química e biológica, que reduza a erosão hídrica, favoreça o crescimento das raízes e resulte em maior disponibilidade de água, nutrientes e oxigênio às plantas (DEBIASI et al., 2022), o que conseqüentemente eleva a produtividade das culturas.

Na Tabela 4 pode-se observar as produtividades médias de grãos de soja nas safras 2020/21, 2021/22 e 2022/23 em kg ha⁻¹ para os sistemas de produção empregados neste experimento.

Tabela 4 - Produtividade média de grãos de soja nas safras 2020/21, 2021/22 e 2022/23 em kg ha⁻¹

Rendimento de grãos de soja					
Sistema/Safra	20/21	21/22	22/23	Soma	Média 3 anos
S1 soja/milho	5012,4 ^{ns}	924,8 b	4153,0 c	10090,3 b	3363,4 ^{ns}
S2 soja/milho/trigo	5020,0	1055,7 b	5009,2 a	11085,0 a	3695,0
S3 soja/milho+braqui	5447,5	1413,3 a	4467,7 b	11328,5 a	3776,2
S4 soja/trigo	5295,6	1009,8 b	4776,4 a	11081,7 a	3693,9
S5 soja/aveia preta	5229,5	1174,2 b	4920,0 a	11323,7 a	3774,6
Média	5201,0	1115,6	4665,3	10981,83	3660,6
CV %	6,54	22,6	5,61	4,67	

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott Knot a 5% de probabilidade de erro.

Na safra 2020/21, a produtividade da soja foi superior nos sistemas envolvendo a utilização do consórcio milho + braquiária (S3), porém nesse primeiro ciclo ainda sem diferenças estatísticas.

No segundo ano de experimento a cultura foi fortemente afetada por restrições hídricas tendo o sistema de produção S3 Milho+Braquiaria/ Soja como o mais produtivo onde podemos observar as maiores produtividades não houve diferenças entre os demais tratamentos esse fato pode ser explicado pelos demais fatores avaliados no experimento como TIE e IQS que esse tratamento teve bons indicadores. Já a terceira e última safra onde foi avaliado a produtividade os sistemas S2, S4 e S4 obtiveram as melhores produtividades, entretanto o sistema S3 obteve melhor produtividade que S1, mais uma vez mostrando a importância da diversificação mesmo em sistemas intensivos de produção. Na soma de produtividades podemos observar que todos os tratamentos foram superiores ao padrão milho/soja indicando que a diversificação de sistemas ao longo dos anos é a melhor opção para altos tetos produtivos (Tabela 5).

Tabela 5 - Produtividade média de grãos de milho nas safras 2020, 2021 e 2022 em kg/ha

Rendimento de grãos de milho					
Sistema/Safra	20/21	21/22	22/23	Soma	Média 3 anos
S1 soja/milho	7144,8 a	3696,2 b	8277,6 ^{ns}	19118,6 a	6372,9 ^{ns}
S2 soja/milho/trigo	7379,8 a	4153,2 a	8425,4	19958,4 a	6652,8
S3 soja/milho/braqui	6488,6 b	3691,9 b	8051,4	18231,9 b	6077,3
Média	7004,4	3847,1	8251,4	19102,9	6367,6
CV %	7,82	7,43	5,98	5,55	

Médias seguidas de mesma letra na coluna não tiverem pelo teste de Scott Knot a 5% de probabilidade de erro.

Também foi avaliado o rendimento de milho (Tabela 5) onde nas safras onde a cultura era semeada sendo que o sistema com consorcio S3 sofreu perdas de produtividade no primeiro ano, pelo impacto da planta consorciada que competiu pelos nutrientes e água ainda sem um solo estruturado e sem apresentar seus benefícios, Já no segundo ano de estudo esse padrão não se repetiu sendo que o experimento foi fortemente comprometido por uma geada em pleno enchimento de grãos de milho assim comprometendo esse resultado, no terceiro ano do experimento não houve diferenças significativas de produtividade mostrando estabilidade e o consorcio ou rotação de sistemas mostrando os benefícios. Na soja de produção ainda tivemos impacto negativo das plantas de consorcio muito pelo resultado de seu primeiro ano, mas como tendência e que vimos no terceiro ano isso pode estabilizar.

O cultivo do milho 2^a safra consorciado a braquiária (S3) proporcionou um aumento de 412,8 kg ha⁻¹ na produtividade da soja, demonstrando assim o potencial destas alternativas para melhorar o desempenho do sistema de produção. Os demais sistemas também obtiveram incrementos na soma das produtividades.

Tal resultado é compreensível, pois o consórcio de milho 2^o safra com *B. ruziziensis* visa à produção de palha para cobertura do solo em plantio direto e evoluiu em lavouras de agricultores por causa dos resultados de pesquisa sobre sua viabilidade econômica, principalmente, pela identificação do consumo hídrico do consórcio (CECCON, 2007; FIETZ et al., 2009).

Além disso, o S4 (trigo/soja) também teve um acréscimo de 330,5 kg/ha na produtividade da soja quando comparado ao S1. Em um experimento de campo realizado ao longo de sete anos na Fazenda Experimental da Embrapa Soja, em Londrina/PR, Balbinot

Junior et al (2024) também constataram que a soja cultivada após o trigo obteve, em média, uma produtividade cerca de 10% superior àquela proveniente do cultivo sequencial com milho na segunda safra. Esse incremento foi atribuído pelos pesquisadores à maior cobertura do solo proporcionada pelo cultivo de inverno. Fato que pode assemelhar-se a este experimento, uma vez que não houve produtividade do trigo, mas as palhas contribuíram para a boa cobertura do solo.

Portanto, percebe-se que a sucessão soja/milho 2ª safra (S1) teve uma produtividade média de 371,5 kg ha^{-1} inferior quando se compara as médias dos demais sistemas de produção (Tabela 4). Considerando os valores acumulados das três safras, todos os sistemas de produção que incluíram trigo, aveia e/ou braquiária aumentaram a produtividade da soja em relação ao sistema de produção predominante na região Oeste do Paraná, a sucessão soja/milho 2ª safra (S1) (Tabela 4). Comparando os sistemas alternativos ao S1, observa-se que o S3 conferiu maiores produtividades de soja, seguido do S5, S2 e S4 (Tabela 4).

Esse resultado indica a resposta positiva da soja quando cultivada em sistemas de produção com maior aporte de palha e raiz e menor tempo sem culturas vivas, sobretudo quando em sucessão a coberturas do solo com aveia na terceira safra e braquiária consorciada com o milho 2ª safra.

De acordo com Balbinot Junior et al. (2020) semear aveia-preta e trigo, durante o outono/inverno, pode aumentar em 54% a produtividade da soja, em comparação com áreas deixadas em poejo. Os autores observaram efeitos positivos e significativos da palha ou raízes de braquiárias e aveia preta sobre o desempenho da soja em sucessão, em SPD, salientando ainda que da mesma forma que a soja, houve variação expressiva da produtividade do milho 2ª safra entre as safras avaliadas.

Não são apresentados resultados dos cereais de inverno pois o objetivo principal do trabalho era ver o impacto na cultura da soja. Entretanto na produtividade do trigo, nas safras 2021/22 e 2022/23 não houve efeito significativo, corroborando com os resultados obtidos por Santos et al. (2016) e Garbelini et al. (2020), que também observaram que as diferenças de produtividade da cultura subsequente entre o milho 2ª safra solteiro e consorciado com braquiária diminuem ao longo do tempo.

Os resultados acima descritos demonstram a viabilidade técnica de uso da janela entre a colheita do milho 2ª safra e a semeadura da soja com cereais de inverno para produção de grãos como 3ª safra, no caso o trigo e a aveia preta para cobertura de solo.

A partir dos dados coletados foi possível identificar três sistemas que são mais benéficos, no que diz respeito à sucessão soja/milho 2ª safra, considerando as condições

edafoclimáticas da região Oeste do Paraná e baseando-se nas maiores produtividades médias de grãos de soja, sistemas demonstrados no experimento pela figura 7 e 8.

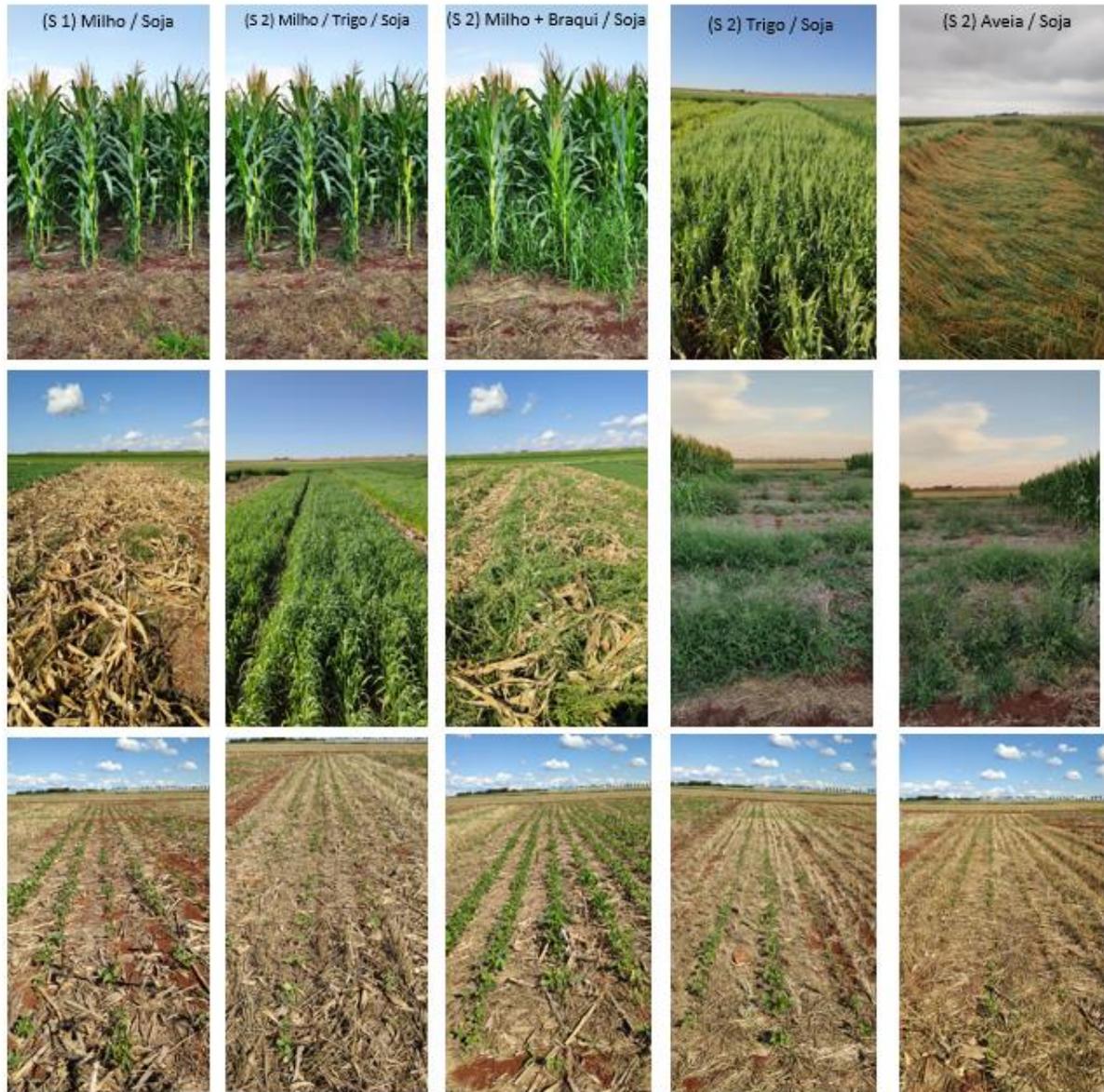


Figura 7 – Imagens do experimento mostrando as culturas em diversas épocas com as diferentes culturas implantadas ao longo do ano agrícola.



Figura 8 – Imagem aérea do experimento na entre safra com os sistemas de cobertura e as culturas de inverno estabelecidas além do sistema convencional em pousio.

De acordo com Balbinot Junior et al. (2020) a aveia preta tem grande capacidade de produção de matéria seca, resultando em cobertura adequada do solo sob plantio direto, alta ciclagem de nutrientes e supressão de plantas daninhas. Além disso, a grande produção de matéria seca da aveia preta a torna uma importante opção para a manutenção da cobertura vegetal sobre a superfície do solo, além de proporcionar a reciclagem de nutrientes da sub superfície e a vantagem de promover a descompactação do solo devido à alta profundidade e densidade populacional de seu sistema radicular (KUBO et al., 2007).

Diante disso, pode-se mencionar o fato de que S2, S3, S4 e S5 demonstraram a partir do DRES o potencial de melhorar a estrutura do solo e apresentou-se como o segundo sistema com melhor TIE, demonstrando que a cobertura de solo faz muita diferença no quesito infiltração de água no solo evidenciando, portanto, maiores produtividades de soja sob esse sistema.

Seguindo, tem-se o S2, (milho 2ª safra/trigo 3ª safra/soja) representado na Figura 6 e 7 dentro dos sistemas.

Quanto ao segundo sistema de produção em destaque (S2), pode-se salientar o entendimento de Silva et al. (2024) os quais ressaltam que o trigo representa uma alternativa viável para a produção na terceira safra, sendo um dos cereais mais relevantes e amplamente cultivados globalmente. Nesse sentido, o trigo pode e deve ser empregado na rotação de culturas, desempenhando um papel fundamental no manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas.

Além disso, devido às dificuldades práticas em semear milho 2ª safra em toda extensão da propriedade durante a época ideal, o que acaba por reduzir a produtividade dessa cultura,

uma alternativa viável é substituir o milho 2ª safra por trigo nas áreas onde o plantio está atrasado. Segundo Chagas (2023), o cultivo de trigo após a colheita da soja tem se tornado cada vez mais popular no cenário agrícola brasileiro. Esse cultivo tem sido adotado especialmente por agricultores que buscam diversificar suas plantações, resolver problemas e minimizar riscos, ou até mesmo para utilizar áreas que usualmente ficariam em pousio ou seriam plantadas com cobertura vegetal.

Para além destes benefícios, o S2 demonstrou significativos retornos no que diz respeito a estrutura do solo realizada por meio do DRES, destacando-se em 3º lugar entre os sistemas e evidenciando que integrar culturas nos sistemas de produção pode contribuir com a melhora da estrutura do solo. Assim, os sistemas que incorporam aveia preta ou trigo na terceira safra são considerados ativos tecnológicos inovadores no setor agropecuário, uma vez que contribuem para a diversificação da produção, o aumento da biomassa vegetal e a otimização do uso da terra entre a colheita do milho segunda safra e o plantio da soja.

Assim, destaca-se que a implantação da rotação de milho de segunda safra, seja em plantio solteiro ou consorciado com braquiária. Além de cereais de inverno como trigo, surge como uma opção para ampliar a diversificação na produção, trazendo vantagens como a redução de custos e o aumento da produtividade da soja em comparação ao sistema convencional tradicionalmente adotado na região. Para tanto o S3 (soja/milho 2ª safra consorciado com braquiária *ruziziesis*).

Quanto ao S3, salienta-se conforme apontado por Kluthcouski et al. (2013), que o destaque da braquiária *ruziziesis* está em sua capacidade de persistir em solos ácidos e pouco férteis, transmitindo a ideia de uma perpetuidade produtiva, em razão dessa característica tornou-se uma opção de diversificação pela maioria dos pecuaristas brasileiros.

Neste estudo, o S3 se destaca pelas altas produtividades médias de grãos de soja ao longo de 3 anos/safras. Além disso, o sistema obteve a segunda melhor classificação no DRES, evidenciando sua eficiência na preservação da qualidade do solo. Esses resultados corroboram com a pesquisa de Miriam (2022), a qual enfatiza que a integração milho-braquiária promove melhorias na qualidade do solo, valoriza a terra e aumenta a renda na propriedade. A utilização da braquiária como cobertura do solo proporciona proteção e controle de plantas invasoras, enquanto o cultivo de milho garante a rentabilidade da atividade agrícola. Dessa forma, esse consórcio revela-se eficaz na formação de pastagens e na manutenção da cobertura do solo. Essa prática contribui para aprimorar os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, favorecendo a formação de raízes para a estruturação do solo, o aumento da matéria orgânica e a fixação do carbono atmosférico na forma de CO₂.

Considerando o que foi mencionado até agora sobre os benefícios dos três sistemas em destaque (S5, S2 e S3) na produtividade média da soja, é relevante destacar que, ao analisar as médias de produtividade de grãos de milho 2ª safra, o S4 (trigo/soja) se sobressai, seguido pelo S2 (soja/milho 2ª safra/trigo 3ª safra).

Sendo assim, é importante destacar que durante as três safras o S4 obteve a melhor nota do DRES e teve maior TIE dentre os sistemas avaliados, fato que pode estar associado a alta produtividade do milho, uma vez que segundo Bergamashi e Matzenauer (2009), o estresse hídrico pode causar grande redução no rendimento do milho. Além disso, de acordo com as observações de Chagas (2023), a introdução do trigo em sistemas rotacionais tem trazido inúmeros benefícios agronômicos, tais como a interrupção do ciclo de pragas e doenças na área, em particular fungos de solo, plantas daninhas e nematoides.

Assim sendo, a cultura do trigo inserida em sistemas que promovem a diversificação das culturas tem um impacto positivo na preservação e/ou melhoria do solo, no combate a doenças, pragas e plantas invasoras, e no aumento da produtividade do milho segunda safra, revelando-se crucial para a sustentabilidade da atividade agrícola na região Oeste do Paraná.

5 CONCLUSÕES

A que se refere aos IQEs, é possível notar que a qualidade estrutural do solo estudado teve melhoras dos tratamentos S2, S3 e S4 com a diversificação dos sistemas de cultivo, em contraste com o sistema S1 soja/milho 2ª safra. A TIE, apresenta melhorias significativas no tratamento 4 ao longo dos três anos de estudo.

Considerando os valores acumulados das três safras, todos os sistemas de produção que incluíram trigo, aveia e/ou braquiária apresentaram maior eficiência na produtividade da soja em comparação com o sistema de produção predominante na região Oeste do Paraná.

Ao analisar os sistemas alternativos ao S1, nota-se que o S3 obteve os melhores resultados em termos de produtividade da soja, não diferindo de S2, S4 e S4 (com médias semelhantes ao longo das três safras) todos com produtividades superiores a S1. Além disso, foi observado que os sistemas sem consórcio obtiveram maiores produtividades nas primeiras safras e na soma, entretanto a uma tendência de estabilidade com o passar dos anos representado pela terceira safra avaliada.

Também é possível concluir que a introdução do cultivo de milho 2ª safra, solteiro ou em consórcio com braquiária e cereais de inverno como trigo, surge como uma opção viável para fomentar a variedade nos sistemas de produção, gerando vantagens como o incremento da produtividade da soja quando comparado ao sistema de rotação usualmente adotado na região Oeste do Paraná.

Por fim, salienta-se que em função das particularidades climáticas de cada safra, é relevante avaliar os sistemas de produção alternativos à sucessão soja/milho 2ª safra em um maior número de anos, sobretudo considerando as frustrações de safra de trigo nos três anos de experimentação decorrentes de geadas no florescimento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 91 p. Dissertação de Mestrado. UFV, 2008.
- ALVARENGA, A. Origem do milho no Brasil e no mundo: cultura e histórico de cultivo. **Rehagro**. 2022. Disponível em: <https://rehagro.com.br/blog/origem-do-milho-no-brasil/> Acesso em: 15 out 2023.
- ARAÚJO, A. Técnicas sustentáveis de plantio preservam o solo e aumentam rendimento da produção. **Ministério da Agricultura e Pecuária. Gov.** 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/tecnicas-sustentaveis-de-plantio-preservam-o-solo-e-aumentam-rendimento-da-producao>. Acesso em: 15 fev. 2024.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* Contribution of roots and shoots of Brachiaria species to soybean performance in succession. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 592-598, 2017.
- BALBINOT JÚNIOR, A. A. *et al.* Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de área agrícolas. **Ciência Rural**, v. 39, n. 6, p.1925-1933. 2009.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* Performance of soybean grown in succession to black oat and wheat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. 1, 2020.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* Soybean yield, seed protein and oil concentration, and soil fertility affected by off-season crops. **European Journal of Agronomy**, v. 153, 127039, 2024.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* Soybean-maize off-season double cropping system as affected by maize intercropping with ruzigrass and nitrogen rate. **International Journal of Plant Production**, v. 17, p. 1, 2023.
- BERTALANFFY, L. V. The meaning of general system theory. **General system theory: Foundations, development, applications**, v. 30, p. 53, 1973.
- BORGES, W. L. B. *et al.* Supressão de plantas daninhas utilizando plantas de cobertura do solo. **Planta Daninha**, v. 32, p. 755-763, 2014.
- CECCON, G. **Consórcio milho-braquiária**. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 175 p.
- CECCON, G. Milho safrinha com solo protegido e retorno econômico em Mato Grosso do Sul. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, ano 17, n. 97, p. 17-20; jan./fev. 2007.
- CHAGAS, J. **Opção de diversificação, trigo safrinha começa a ser plantado no Cerrado do Brasil Central**. Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo, 2023.
- CHIAVENATO, I. **Iniciación a la planeación y el control de la producción**. 1993. p. 131-131.
- COELHO, A. *et al.* Maize-ruzigrass intercropping, nitrogen fertilization and plant density improve the performance of soybean grown in succession. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, p. 764-771, 2023.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries históricas das safras**. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 28 nov. 2023.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**. Safra 2023/24. v. 11. n. 2. 2023. Disponível em: https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/50041_d88c251198bcf179946b667d192dc1b5. Acesso em: 01 nov. 2023.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**. 2018. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos//BoletimZGraosZjunhoZ2018.pdf>. Acesso em: 27 out 2023.

CONTINI, E. *et al.* **Milho: caracterização e desafios tecnológicos**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), p. 45, 2019.

CORREIA, N. M. *et al.* Consórcio de milho com *Urochloa ruziziensis* e os efeitos na cultura da soja em rotação. **Biosciense Journal**, v. 29, p. 65-76, 2013.

DEBIASI, H. *et al.* **Níveis de manejo do solo para avaliação de riscos climáticos na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. 137 p.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, C, J. Atributos físicos do solo e produtividade da soja em sistema de integração lavoura e pecuária com braquiária e soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 7, p. 1180-1186, jul, 2012.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. **Desafios à caracterização de solo fértil em manejo e conservação do solo e da água**. In: REUNIÃO SULBRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., 2006, Passo Fundo. Fertilidade em solo... (re)emergindo sistêmica: resumos e palestras. Passo Fundo: Embrapa Trigo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2006. 8 p. 1 CD ROM.

DERAL - DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL. **Estimativa de safra**. 2023. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/system/files/publico/Safras/pss.xls>. Acesso em: 14 nov. 2023.

DONAGEMMA, G. K. *et al.* Índice de uniformidade de distribuição do amônio, nitrato, potássio e fósforo, em Latossolos sob condições de fertigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 575-581, 2010.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Definição e avaliação da qualidade do solo. **Definindo a qualidade do solo para um ambiente sustentável**, v. 35, p. 1-21, 1994.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema de Produção**. 2007. Disponível em <http://www.cnpso.embrapa.br/download/>. Acesso em: 15 out 2023.

FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, v. 6, p. 36-41, 2008.

FIETZ, C. R. *et al.* Demanda hídrica do consórcio milho e braquiária em Mato Grosso do Sul. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA*, 10., 2009, Rio Verde. Rio Verde: FESURV, 2009. p. 298-303.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, v. 48, p. 21-35, 1998.

GARBELINI, L. G. *et al.* Rentabilidade de modelos de produção de soja com culturas diversificadas no outono-inverno. **Revista Agronomia**, v. 112, n. 5, p. 4092-4103, 2020.

GARBELINI, L.G. *et al.* Diversified crop rotations increase the yield and economic efficiency of grain production systems. **European Journal of Agronomy**, v. 137, p. 126528, 2022.

GIAROLA, N. F. B. *et al.* Avaliação visual da qualidade da estrutura do solo em Latossolos sob sistema plantio direto. **Scientia Agrícola**, v. 67, p. 479-482, 2010.

GUIMARÃES, R. M. L. *et al.* The merits of the Visual Evaluation of Soil Structure method (VESS) for assessing soil physical quality in the remote, undeveloped regions of the Amazon basin. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 75–82, 2017.

GUITARRARA, P. Sistemas agrícolas. **Brasil Escola**. 2024. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/sistemas-agricolas.htm>. Acesso em: 20 fev. 2024.

HIRAKURI, M. H. *et al.* **Sistemas de produção: conceitos e definições no contexto agrícola**. Londrina: Embrapa Soja, 2012. 24 p.

HORN, R. Aggregate characterization as compared to bulk soil properties. **Soil and Tillage Research**, v.17, n.3, p.265-289, 1990.

KARLEN, D. L. *et al.* Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997.

KLUTHCOUSKI, J. *et al.* **Braquiária na Agropecuária Brasileira: uma História de Sucesso**. *In: CECCON, G. Consórcio milho-braquiária*. Brasília, DF: Embrapa, 2013. p. 17-23.

LANDAU, E. C. *et al.* **Expansão potencial da produção de milho 2ª safra no Brasil no sistema de sucessão soja-milho considerando o zoneamento de risco climático 2014/15**. *In: 2015*. LANDAU, E. C. *et al.* (Ed). **Expansão potencial da produção de milho 2ª safra no Brasil no sistema de sucessão soja-milho considerando o zoneamento de risco climático 2014/15**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015.

LANDGRAF, L. **Novo método de avaliação do solo identifica fatores que limitam a produtividade**. Brasília: Embrapa Soja, 2021.

MEA - Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystem and human well-being: Synthesis**. Washington: Island Press, 2005. 137 p.

- MONTEIRO, J. A. *et al.* **O zoneamento macroecológico.** In: CRUZ, J. C. *et al.* (Ed.). *Recomendações técnicas para o cultivo do milho.* 2. ed. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 1996. p. 11-31.
- MONTOYA, M. A. *et al.* Uma Nota Sobre Consumo Energético, Emissões, Renda e Emprego na Cadeia de Soja no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, v. 73, n. 3, p. 345-369, 2019.
- NITSCHKE, P. R. *et al.* **Atlas climático do Estado do Paraná.** Londrina (PR): Instituto Agrônômico do Paraná, 2019. 210 p.
- NÓIA JUNIOR, R. S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. **European Journal of Agronomy**, v. 103, p.140-151, 2019. p. 131-131, 1993.
- PETREIRE, V. G.; CUNHA, T. J. F. **Manejo e conservação do solo.** Brasília: Embrapa Semiárido. Sistemas de Produção, ed. 1 – 2a. Versão eletrônica, 2010.
- PRANDO, M. B.; OLIBONE, D.; OLIBONE, A. P. E.; ROSOLEM, C. A. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p. 693-700, 2010.
- B vx
- RALISCH, R.; *et al.* **Diagnóstico rápido da estrutura do solo – DRES.** Londrina, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), p. 64, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/soja/busca-de-publicacoes//publicacao/1071114/diagnostico-rapido-da-estrutura-do-solo---dres-livro>. Acesso em: 20 dez. 2022.
- REICHERT, J. M. *et al.* Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v. 27. p. 29-48, 2003.
- REINET, D. J. *et al.* Qualidade física dos solos. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 16, 2006. Aracaju, **Resumos.** Aracaju: SBCS, 2006.
- ROSOLEM, C. A.; PIVETTA, L. A. Mechanical and biological approaches to alleviate soil compaction in tropical soils: assessed by root growth and activity (Rb uptake) of soybean and maize grown in rotation with cover crops. **Soil Use and Management**, v. 33, p. 141-152, 2017.
- SANTI, A.; AMADO, T. J. C.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I- Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1075-1083, 2003.
- SANTOS, A. L. F. dos. *et al.* Produtividade do milho safrinha em função de anos consecutivos de consórcio milho-braquiária. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 31., 2016, Bento Gonçalves. Milho e sorgo: inovações, mercados e segurança alimentar. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2016.
- SANTOS, G. G. **Impacto de sistemas de integração lavoura-pecuária na qualidade física do solo.** 2010.122 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Goiás, 2010.

- SANTOS, H. G. dos. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.
- SECCO, D. *et al.* Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 407-414, 2005.
- SEIXAS, D. **Manejo e Conservação de Solos**. In: ZANELLA, C. O solo do Cerrado. AIBA RURAL. v. 18. p. 34-36. 2020.
- SILVA, E. *et al.* Qualidade física de um Latossolo estimada por estudos das curvas de retenção de água, indicadores de fácil determinação e “Índice S”. **Tecnologia & Ciências Agropecuária**, v. 11, n. 4, p. 49 – 54, 2017.
- STEFANOSKI, D. C. *et al.* Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 17, p. 1301-1309, 2013.
- TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effects of different management systems on porosity of oxisols in Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.899-906, 2010.
- TONON-DEBIASI, B. C. *et al.* Microbial attributes as structural quality index for physical health of an Oxisol under compaction levels. **Soil and Tillage Research**, v. 235, n. August 2023, 2024.
- VILELA, L. *et al.* Sistemas de integração lavoura pecuária na região do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Embrapa Cerrados: Brasília, v. 46, n. 10, p.1127-1138. 2011.
- WESZ-JUNIOR, V. J. **Dinâmicas e estratégias das agroindústrias de soja no Brasil**. Rio de Janeiro: E-papers, 2011.
- ZANELLA, A. G. **Avaliação de bioporos na vitrine tecnológica de agroecologia do Município de Cascavel-PR**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Agronomia, Universidade Federal da Fronteira Sul, 2019.