



GILMAR GONÇALVES DE OLIVEIRA

**INTEGRATED CONSERVATION MANAGEMENT
STRATEGIES FOR IMPROVING SOIL STRUCTURE AND
CARBON IN GRAIN PRODUCTION SYSTEMS**

**LAVRAS – MG
2025**

GILMAR GONÇALVES DE OLIVEIRA

**INTEGRATED CONSERVATION MANAGEMENT STRATEGIES FOR
IMPROVING SOIL STRUTURE AND CARBON IN GRAIN PRODUCTION
SYSTEMS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos ambientais e uso da terra, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador
Prof. Dr. Bruno Montoani Silva

**LAVRAS – MG
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA,
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Oliveira, Gilmar Gonçalves de.

Integrated conservation management strategies for improving
soil structure and carbon in grain production systems / Gilmar
Gonçalves de Oliveira. – 2025.

97 p. : il.

Orientador: Bruno Montoani Silva.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. Sistemas integrados de produção. 2. Compactação do solo.
3. Plantas de cobertura. I. Silva, Bruno Montoani. II. Título.

GILMAR GONÇALVES DE OLIVEIRA

**ESTRATÉGIAS INTEGRADAS DE MANEJO CONSERVACIONISTA PARA A
MELHORIA DA ESTRUTURA E CARBONO NO SOLO EM SISTEMAS DE
PRODUÇÃO DE GRÃOS**

**INTEGRATED CONSERVATION MANAGEMENT STRATEGIES FOR
IMPROVING SOIL STRUTURE AND CARBON IN GRAIN PRODUCTION
SYSTEMS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos ambientais e uso da terra, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 26 de fevereiro de 2025.

Dr. Diego Tassinari	UFLA
Dr. Eduardo da Costa Severiano	IF Goiano
Dr. Junior Cesar Avanzi	UFLA
Dr. Miguel Marques Gontijo Neto	EMBRAPA

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Orientador

**LAVRAS – MG
2025**

A todos que carregam a responsabilidade de seus sonhos, enfrentam dificuldades e seguem em frente, mesmo quando o caminho parece longo demais. Aos que sabem que conquistar um objetivo exige mais que talento: exige persistência.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, tanto de sangue quanto do coração, pelo apoio incondicional, e aos amigos, especialmente aqueles que estiveram presentes nesta jornada. À equipe da Física do Solo, profissionais do laboratório e a todos que dedicaram esforço e atenção para a realização deste estudo, meu reconhecimento e gratidão.

À minha grande amiga Vanessa Lopes, a quem carinhosamente chamo de Vanessinha, por ter estado ao meu lado em todos os momentos, dividindo desafios, apoio e resiliência. Sua companhia tornou essa jornada menos árdua, e suas palavras sempre me lembraram que, no final, tudo dá certo - e, se ainda não deu, é porque o final não chegou.

À UFLA/Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de crescimento. Ao Prof. Bruno Montoani, por ter acreditado em mim e aceito o desafio de me orientar, diante da complexidade de conciliar o doutorado acadêmico com a rotina de trabalho.

À EMATER-MG, pelo suporte institucional ao longo dessa trajetória, e aos meus gestores diretos, pela compreensão e flexibilização sempre que possível, tornando essa conciliação menos desafiadora.

Às instituições de fomento à pesquisa que contribuíram diretamente e indiretamente com o financiamento desse trabalho, CAPES, CNPq, FAPEMIG e Fundação Agrisus.

E, acima de tudo, a Deus, por me sustentar nos momentos mais difíceis; por colocar as pessoas certas em meu caminho e por cumprir Sua promessa fielmente de que sempre estará em todos os dias de minha vida. Essa certeza me enche de esperança, força e persistência.

MUITO OBRIGADO!!!

“Quanto mais eu aprendo, mais percebo o quanto eu não sei.”

(Albert Einstein)

“Eis que estou convosco todos os dias, até o fim dos tempos”

(Mt 28,20)

O impossível só existe até que alguém com coragem e sacrifício o transforme em conquista.

(Gilmar Oliveira)

RESUMO GERAL

O uso de sistemas conservacionistas, como o plantio direto (PD) e a diversificação de cultivos, tem se mostrado promissores na recuperação de áreas degradadas ou de baixa produtividade. Apesar dos benefícios comprovados do PD em relação ao preparo convencional, o uso intensivo de máquinas aliado à baixa diversificação de cultivos neste sistema tem contribuído para a compactação do solo – que pode reduzir em até 75% a produtividade dos cultivos e comprometer a resiliência ambiental do solo. O preparo ocasional (ou estratégico), associado a sistemas diversificados de cultivo, surgem como alternativas viáveis não só para mitigar esse problema, como também potencializar a capacidade produtiva dos sistemas de produção e estocar carbono no solo. Assim, este trabalho explora dois aspectos interligados para melhoria do ambiente de produção: os impactos de sistemas de produção diversificados e a eficácia de métodos combinados no manejo da compactação do solo. O primeiro estudo se baseou em um experimento de longa duração sobre sistemas de manejo de grãos e forragens no Cerrado sob PD. O experimento, conduzido ao longo de 10 anos, investigou a dinâmica do carbono orgânico e a qualidade física do solo em sistemas de manejo que incluíram rotações com Capim Piatã (*Brachiaria brizantha*) na safra de milho comparada a monocultivos. Os resultados evidenciaram que sistemas diversificados, especialmente aqueles que integraram o Capim Piatã em rotações, promovem melhorias na qualidade física do solo e aumento no estoque de carbono orgânico, apresentando desempenho semelhante ao da vegetação nativa. Por outro lado, monocultivos como o de soja reduziram até 25% no estoque de carbono, reforçando a necessidade de práticas mais sustentáveis. O segundo estudo avaliou a eficiência de métodos de manejo biológico e mecânico, aplicados isoladamente ou de forma combinada, para mitigar a compactação do solo em sistemas de PD. O experimento foi conduzido em condições de sequeiro, empregando diferentes níveis de compactação inicial causada pelo tráfego de máquinas agrícolas. Os tratamentos incluíram o uso de subsolagem, plantas de cobertura e a combinação de ambos os métodos na safra de inverno, com o objetivo de verificar os impactos deste manejo na qualidade física do solo e no estoque de carbono, além da produtividade de grãos ao longo do tempo de dois anos. Os resultados mostraram que a adoção de plantas de cobertura - braquiária (*Brachiaria ruziziensis*) e crotalária (*Crotalaria spectabilis*) - associadas à subsolagem é uma estratégia promissora para mitigar os impactos da compactação do solo em sistemas de plantio direto. A integração desses aspectos interligados permitiu uma abordagem abrangente, destacando tanto os benefícios de práticas já consolidadas quanto a necessidade de desenvolver e validar estratégias inovadoras para o manejo sustentável do solo. Espera-se que os resultados contribuam

para o avanço científico e tecnológico no manejo de solos compactados, promovendo maior sustentabilidade na produção agrícola.

Palavras-chave: sistemas integrados de produção; compactação do solo; plantas de cobertura; qualidade física do solo; estoque de carbono no solo; gramíneas; subsolagem.

GENERAL ABSTRACT

The use of conservationist systems, such as no-tillage (NT) and crop diversification, has proven to be a promising strategy for restoring degraded or low-productivity areas. Despite the well-documented benefits of NT compared to conventional tillage, intensive machinery use combined with low crop diversification in this system has contributed to soil compaction—capable of reducing crop yields by up to 75% and compromising soil environmental resilience. Occasional (or strategic) tillage, combined with diversified cropping systems, emerges as a viable alternative not only to mitigate this issue but also to enhance the productive capacity of agricultural systems and sequester carbon in the soil. Thus, this study explores two interconnected aspects aimed at improving the production environment: the impacts of diversified production systems and the effectiveness of combined methods in managing soil compaction. The first aspect is based on a long-term study of grain and forage cropping systems under NT in the Cerrado biome. The experiment, conducted over 10 years, investigated the dynamics of soil organic carbon and physical quality in cropping systems that included rotations with Piatã grass (*Brachiaria brizantha*) during the maize season, compared to monocultures. The results showed that diversified systems, especially those integrating Piatã grass in rotations, improved soil physical quality and increased organic carbon storage, performing similarly to native vegetation. On the other hand, monocultures such as soybean reduced carbon stocks by up to 25%, reinforcing the need for more sustainable practices. The second aspect evaluates the efficiency of biological and mechanical management methods, applied either individually or in combination, to mitigate soil compaction in NT systems. The study was conducted under rainfed conditions, employing different levels of initial compaction caused by agricultural machinery traffic. Treatments included subsoiling, cover crops, and the combination of both methods during the winter season, aiming to assess the impacts of these management practices on soil physical quality, carbon storage, and grain yield over two years. The results showed that the adoption of cover crops - ruzigrass (*Brachiaria ruziziensis*) and sunn hemp (*Crotalaria juncea*) - in combination with subsoiling is a promising strategy for mitigating the impacts of soil compaction in NT systems. The integration of these interconnected aspects provides a comprehensive approach, highlighting both the benefits of well-established practices and the need to develop and validate innovative strategies for sustainable soil management. It is expected that the results will contribute to scientific and technological advancements in compacted soil management, promoting greater sustainability in agricultural production.

Keywords: integrated production systems; soil compaction; cover crops; soil physical quality; soil carbon storage; grasses; subsoiling.

INDICADORES DE IMPACTO

A pesquisa gera impactos nas dimensões sociais, tecnológicas, econômicas e ambientais, contribuindo para a sustentabilidade da produção agropecuária. Seus resultados fornecem diretrizes técnicas para mitigar a compactação do solo e melhorar o manejo conservacionista, de forma a promover maior eficiência produtiva e redução de custos operacionais. O caráter extensionista do estudo é evidenciado na integração com a EMATER-MG, permitindo a socialização das práticas recomendadas junto aos produtores e técnicos, com potencial de influenciar a promoção de políticas públicas e programas institucionais específicos à conservação do solo e da água. A pesquisa também impulsionou a adoção de inovações tecnológicas, ao demonstrar a eficácia de sistemas diversificados e de técnicas de manejo conjugadas na melhoria da estrutura física e na retenção de carbono orgânico no solo, reforçando sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas. O impacto econômico se reflete no aumento da produtividade de grãos, na redução de perdas produtivas e na valorização de sistemas agrícolas sustentáveis, beneficiando diretamente agricultores. No aspecto ambiental, os resultados apontam para a recuperação da qualidade estrutural do solo e o aumento da sua capacidade produtiva, contribuindo para a redução da degradação de áreas agrícolas e para a preservação dos recursos naturais. O trabalho afeta diretamente agricultores e extensionistas, promovendo qualificação profissional e incentivando a adoção de estratégias de manejo sustentável. Inserido nas áreas temáticas de meio ambiente, tecnologia e produção e trabalho, seus impactos se alinham aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, destacando-se no incentivo à agricultura sustentável, na redução da fome, no consumo responsável, na mitigação das mudanças climáticas e na preservação da vida terrestre. Assim, os resultados desta pesquisa transcendem o meio acadêmico, consolidando-se como referência para a formulação de estratégias que aliam produtividade e conservação, promovendo a sustentabilidade da agropecuária e fortalecendo a interação entre ciência, extensão rural e sociedade.

IMPACT INDICATORS

This research generates impacts across social, technological, economic, and environmental dimensions, contributing to the sustainability of agricultural production. Its results provide technical guidelines for mitigating soil compaction and improving conservation management, promoting greater production efficiency and reducing operational costs. The extension-oriented nature of the study is evident in its integration with EMATER-MG, enabling the dissemination of recommended practices among farmers and technicians, with the potential to influence the development of public policies and institutional programs focused on soil and water conservation. The research has also driven the adoption of technological innovations by demonstrating the effectiveness of diversified systems and combined management techniques in improving soil physical structure and enhancing organic carbon retention, reinforcing its contribution to climate change mitigation. The economic impact is reflected in increased grain productivity, reduced production losses, and the added value of sustainable agricultural systems, directly benefiting farmers. From an environmental perspective, the results indicate improvements in soil structural quality and productive capacity, contributing to the reduction of agricultural land degradation and the preservation of natural resources. The study directly impacts farmers and extensionists by promoting professional training and encouraging the adoption of sustainable management strategies. Positioned within the thematic areas of environment, technology, production, and labor, its impacts align with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly in fostering sustainable agriculture, reducing hunger, promoting responsible consumption, mitigating climate change, and preserving terrestrial ecosystems. Thus, the findings of this research extend beyond the academic sphere, establishing a reference framework for formulating strategies that integrate productivity and conservation, advancing agricultural sustainability, and strengthening the interaction between science, rural extension, and society.

LISTA DE FIGURAS

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1

- Figure 1.** Image of the state of Minas Gerais, highlighting the geographical location of the experimental area in the municipality/county of Sete Lagoas, MG, Brazil.....33
- Figure 2.** Soil water retention curve in the 0.00-0.05 m and 0.15-0.20 m layer by cropping systems in the Cerrado region. M: monoculture maize; MP: monoculture Santa Fé (maize intercropped with Piatã grass); S: monoculture soybean; P: monoculture Piatã grass pasture; S-MP: annual rotation of soybean and Santa Fé; P-MP: annual rotation of Piatã grass pasture and Santa Fé; P-P-MP: pasture for 2 years followed by Santa Fé; P-S-MP: annual rotation of pasture, soybean, and Santa Fé; P-P-S-MP: pasture for 2 years followed by soybean and Santa Fé; CE: native Cerrado vegetation..... 39
- Figure 3.** Changes in the values of soil bulk density (Bd), total porosity (TP), macroporosity (Ma), and microporsity (Mi) in the 0.00 to 0.20 m layers in the period from 2017 to 2020. M: monoculture maize; MP: monoculture Santa Fé (maize intercropped with Piatã grass); S: monoculture soybean; P: monoculture Piatã grass pasture; S-MP: annual rotation of soybean and Santa Fé; P-MP: annual rotation of Piatã grass pasture and Santa Fé; P-P-MP: pasture for 2 years followed by Santa Fé; P-S-MP: annual rotation of pasture, soybean, and Santa Fé; P-P-S-MP: pasture for 2 years followed by soybean and Santa Fé; CE: native Cerrado vegetation.42
- Figure 4.** Soil quality indicators in the 0.00 to 0.20 m soil layers.45
- Figure 5.** Weighted relative yield (R-Yield) and relative yield for soybean, maize, and grass crops in the cropping systems for integrated production.....46
- Figure 6.** Principal component analysis (PCA) of soil properties at a 0.0-0.20 m depth under different production systems.47

ARTIGO 2

- Figura 1 - Imagem do Estado de Minas Gerais, com destaque na localização geográfica da área experimental, situada no município de Lavras MG.62
- Figura 2 - Distribuição das frações granulométricas argila, areia e silte em função da profundidade do solo para os três blocos da área experimental.62

Figura 3 - Componentes do balanço hídrico da cultura do feijoeiro no período de cultivo do experimento para as safras 2022/23 e 2023/24 destacando o déficit e excedente hídrico bem como os estágios de pré-floração (R5) e formação de vagens (R7) do feijoeiro (INMET, 2025).	66
Figura 4 - Análise de componentes principais dos atributos físicos do solo na profundidade 0,15-0,20 m e da produtividade de feijão sob diferentes sistemas de manejos do solo em três condições de compactação para as safras 2022/2023 e 2023/2024.	68
Figura 5 - Produtividade médias das safras 2022/23 e 2023/24 dos sistemas de manejo: M - milho solteiro em monocultivo; MS - milho e subsolagem; MBC - milho, braquiária e crotalária; MSBC - milho, subsolagem, braquiária e crotalária, sob diferentes condições de compactação do solo: SCA – sem compactação adicional; CA6 – compactação adicional com 6 passadas e trator; CA12 – compactação adicional com 12 passadas de trator.	76

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1

- Table 1.** Description and representation of the treatments with crop sequence in each treatment from the 2010/2011 to the 2019/2020 crop season.....34
- Table 2.** Soil bulk density (Bd), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), and total porosity (TP), field capacity (FC), relative field capacity (RFC), permanent wilting point (PWP), aeration capacity (AC), plant available water capacity (PAWC), and soil penetration resistance (PR) in the 0.0-0.05 and 0.15-0.20 m layers.....40
- Table 3.** Active acidity in water (pH in water), total organic carbon (OC), cation exchange capacity (CEC), base saturation (V), and carbon stock (Cstock) in the 0-0.05 and 0.15-0.20 m soil layers.43

ARTIGO 2

- Tabela 1 - Densidade (Ds), Microporosidade (Mi), Macroporosidade (Ma), Capacidade de Água Disponível (CAD), Capacidade de Aeração (CA), Resistência do solo à Penetração (RP) e carbono orgânico (CO) na camada de 0,00-0,05 m para as condições de solo sem compactação adicional (SCA), com compactação adicional de 6 passadas (CA6) e com compactação adicional de 12 passadas (CA12).72
- Tabela 2 - Densidade (Ds), Microporosidade (Mi), Macroporosidade (Ma), Capacidade de Água Disponível (CAD), Capacidade de Aeração (CA), Resistência do solo à Penetração (RP) e carbono orgânico (CO) na camada de 0,15-0,20 m para as condições de solo sem compactação adicional (SCA), com compactação adicional de 6 passadas (CA6) e com compactação adicional de 12 passadas (CA12).73

Tabela 3 - Densidade (Ds), Microporosidade (Mi), Macroporosidade (Ma), Capacidade de Água Disponível (CAD), Capacidade de Aeração (CA), Resistência do solo à Penetração (RP) e carbono orgânico (CO) na camada de 0,25-0,30 m para as condições de solo sem compactação adicional (SCA), com compactação adicional de 6 passadas (CA6) e com compactação adicional de 12 passadas (CA12).....	74
--	----

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE.....	17
1	INTRODUÇÃO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Sistemas de plantio direto	19
2.2	Compactação do solo	20
2.2.1	Fatores que influenciam na compactação do solo em áreas agrícolas	21
2.3	Identificação da compactação	22
2.4	Propriedades físicas do solo associadas à compactação	24
2.5	Manejo da compactação e seus efeitos na produtividade agrícola.....	26
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS.....	28
	ARTIGO 1 - Long-term cropping system diversification under no-till improves soil structure, carbon stocks, and crop yield in tropical environments	29
	ARTIGO 2 - Estratégias de descompactação do solo em plantio direto: efeitos de plantas de cobertura e subsolagem na estrutura do solo, carbono orgânico e produtividade de grãos	57
	TERCEIRA PARTE	90
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
	REFERÊNCIAS	92

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A compactação do solo é um dos principais desafios enfrentados em sistemas de plantio direto (SPD) de longa duração, especialmente em solos argilosos do Cerrado brasileiro. Apesar dos benefícios agrônômicos e ambientais desse sistema, a compactação pode comprometer a qualidade física do solo ao longo do tempo (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Blanco-Canqui; Wortmann, 2020; Peixoto *et al.*, 2019a, 2019b, 2020), reduzindo a infiltração de água, limitando o crescimento radicular e afetando benefícios na produtividade das culturas. Diante desse cenário, torna-se essencial aprimorar estratégias de manejo que mitiguem esses impactos e garantam a sustentabilidade do sistema a longo prazo.

Uma das alternativas adotadas para minimizar a compactação em SPD contínuo é o preparo ocasional do solo (Blanco-Canqui; Wortmann, 2020; Peixoto *et al.*, 2019a, 2020), que consiste no uso pontual de implementos agrícolas para descompactação do solo. No entanto, Peixoto *et al.* (2020), em uma meta-análise, verificaram que, embora essa prática melhore as propriedades físicas do solo e reduza as perdas de solo por erosão, seu efeito sobre a produtividade das culturas é incerto. Além disso, dependendo da forma como é realizado, pode contribuir para a redução dos teores de matéria orgânica do solo, reforçando a necessidade de um planejamento criterioso de sua aplicação.

Outra estratégia para mitigar a compactação do solo é o uso de plantas de cobertura em áreas de produção de grãos, prática que pode favorecer a estrutura do solo e aumentar a produtividade agrícola (Bertollo *et al.*, 2021; Calonego *et al.*, 2017; Nouri *et al.*, 2019). A diversificação e a distribuição de culturas, além de melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, promovem um ambiente mais equilibrado e produtivo. Comparando métodos mecânicos e biológicos para mitigação da compactação, observou-se que a subsolagem tem efeito imediato, porém de curto prazo, enquanto o uso de plantas de cobertura apresenta maior eficiência a médio e longo prazo (Bertollo *et al.*, 2021; Calonego *et al.*, 2017). No entanto, há poucos estudos avaliando a interação entre o preparo ocasional e as plantas de cobertura na recuperação de solos compactados, especialmente com o uso de subsoladores.

Nesse contexto, a integração de plantas de cobertura e intervenções mecânicas, como a subsolagem, surge como uma abordagem promissora para a mitigação da compactação, favorecendo a estrutura do solo e potencializando a retenção de carbono orgânico. No entanto, os efeitos dessas práticas podem variar conforme a severidade da compactação, o tipo de solo e as

condições climáticas, exigindo estudos detalhados para avaliar sua eficiência. Assim, esta pesquisa teve como objetivo avaliar os impactos de diferentes estratégias de manejo do solo na qualidade estrutural, no estoque de carbono e na produtividade agrícola em SPD. O estudo foi conduzido em dois experimentos, em que cada um foi redigido um artigo científico: sendo um estudo de longa duração, instalado há mais de 10 anos na Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas-MG, e outro mais recente, localizado na Fazenda Experimental Muquém da Universidade Federal de Lavras, em Lavras-MG. No primeiro experimento, foram analisadas a diversificação e a rotação de culturas sob SPD, com foco na integração de grãos e forrageiras. No segundo, foram avaliadas diferentes estratégias de descompactação do solo, incluindo o uso de plantas de cobertura, subsolagem e a combinação dessas técnicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistemas de plantio direto

O Sistema de Plantio Direto (SPD) foi lançado no Brasil na década de 1970, inspirado na experiência de agricultores dos Estados Unidos e da Europa. O pioneirismo coube ao produtor Herbert Bartz, que realizou os primeiros testes na região de Rolândia, no Paraná, utilizando maquinário adaptado para semeadura direta (Derpsch, 1991). Nos anos seguintes, o SPD se expandiu rapidamente no Sul do Brasil, impulsionado pela necessidade de reduzir a erosão em áreas de relevo acidentado e pelo envolvimento de instituições de pesquisa, como a Embrapa e universidades. Nas décadas de 1980 e 1990, houve avanços na mecanização, na adaptação de cultivos e na consolidação dos princípios técnicos do sistema (Hernani *et al.*, 2002). Atualmente, o Brasil possui uma das maiores áreas cultivadas sob SPD no mundo, sendo um modelo de referência para outros países tropicais (Kassam; Friedrich; Derpsch, 2019). Segundo o Censo Agropecuário de 2017 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2017), o Brasil possui aproximadamente 553,4 mil estabelecimentos que utilizam o SPD, cobrindo uma área total de 33,1 milhões de hectares. Esses números refletem o reconhecimento da importância do SPD na conservação do solo e na sustentabilidade da produção agropecuária.

A conservação do solo e da água na propriedade rural são fundamentais para a sustentabilidade ambiental da produção agrícola. Entre as práticas conservacionistas, o SPD se destaca quando executado em conformidade com seus princípios básicos: mínimo revolvimento do solo, cobertura permanente e rotação de culturas (Franchini *et al.*, 2016).

De acordo com Stone e Silveira (2001), o SPD promove maior cobertura vegetal, favorecendo o acúmulo de matéria orgânica e estimulando a atividade biológica do solo, contribuindo positivamente para que ocorram alterações estruturais no solo. Essas mudanças estruturais melhoram a porosidade, a retenção de água e o transporte de nutrientes. Diversos estudos destacam os benefícios do SPD, incluindo o aumento da agregação e da estabilidade dos agregados do solo (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Devine *et al.*, 2014; Fiorini *et al.*, 2020; Kassam; Friedrich; Derpsch, 2019), maior capacidade de retenção hídrica (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Daigh *et al.*, 2018; Kassam; Friedrich; Derpsch, 2019), aumento da infiltração de água e redução da erosão (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Kassam; Friedrich; Derpsch, 2019; Kurothe *et al.*, 2014). Além disso, o SPD contribui para o sequestro de carbono e redução dos custos de produção

(Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Kassam; Friedrich; Derpsch, 2019) e melhora a atividade microbiana do solo (Zhang *et al.*, 2015), proporcionando maior disponibilidade de matéria orgânica nas camadas superficiais (Devine *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2014).

No entanto, Franchini *et al.* (2016) alertaram que a adoção do SPD, caracterizada pela mobilização periódica do solo e pela ausência de diversificação de culturas, pode comprometer sua eficácia. Essas falhas resultam na perda da qualidade física do solo, promovendo a compactação, diminuindo a capacidade de armazenamento e infiltração de água e aumentando o escoamento superficial e a erosão.

2.2 Compactação do solo

O processo de compactação consiste na redução do volume total de poros do solo, aumentando sua densidade e a resistência mecânica à penetração (Keller *et al.*, 2019; Soil Science Glossary Terms Committee, 2008). Esse processo restringe o crescimento radicular, reduzindo a absorção de nutrientes (Correa *et al.*, 2019; Lipiec; Stepniewski, 1995; Szatanik-Kloc *et al.*, 2018). Além disso, compromete o fluxo de água e sua disponibilidade para as plantas, resultando em déficit nutricional das culturas e consequentes prejuízos econômicos (Keller *et al.*, 2019). A compactação do solo é um dos principais fatores de degradação física dos solos agrícolas (Hamza; Anderson, 2005; Keller *et al.*, 2019; Nawaz; Bourrié; Trolard, 2013), podendo reduzir em até 75% a produtividade agrícola (Correa *et al.*, 2019).

A compactação do solo é um fator limitante ao desenvolvimento sustentável da agricultura. Esse fenômeno pode ocorrer naturalmente ou como resultado de manejo inadequado (Martins, 2012). Segundo Machado (2003), é essencial diferenciar compactação de adensamento. O autor define compactação como a redução do volume não saturado do solo devido à compressão por cargas externas, como o peso de máquinas e implementos, o que causa expulsão de ar, rearranjo de partículas (areia, silte e argila) e aumento da densidade. Já o adensamento, segundo Dias Júnior (2000), ocorre quando a redução do volume do solo se dá pela expulsão de água dos poros. Além dessa, é importante considerar a perspectiva da pedogênese, em que o adensamento se manifesta como um processo inerente à gênese e evolução dos solos. Ao longo do tempo, a reorganização natural das partículas minerais, a cimentação por compostos como óxidos de ferro, alumínio e sílica, ou mesmo carbonatos, juntamente com a pressão exercida pelas camadas superiores, levam a uma redução gradual do volume do solo (Weil; Brady, 2017). Essa forma de adensamento, distinta da compactação causada por forças externas como o tráfego de

máquinas, é um resultado direto das características do material de origem e dos processos pedogenéticos que moldam o perfil do solo.

A compactação do solo aumenta sua massa por unidade de volume, elevando a microporosidade relativa e reduzindo a macroporosidade total (Beutler *et al.*, 2001). Isso impacta a retenção de água no solo, devido a alterações na distribuição do diâmetro dos poros (Figueiredo *et al.*, 2009). Horn *et al.* (1995) destacaram que solos compactados também contribuem para o aquecimento global, aumentando as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O. Isso ocorre devido à redução da aeração e ao aumento da anaerobiose, condições que favorecem a produção desses gases (Roque *et al.*, 2011).

O grau de compactação depende do tipo de manejo adotado e pode modificar os fatores físicos que determinam condições ideais ou limitantes para o crescimento vegetal (Collares *et al.*, 2008). Considera-se que um solo está compactado quando a severidade da compactação ultrapassa um nível crítico, restringindo o desenvolvimento das plantas (Debiasi; Franchini; Gonçalves, 2008). A suscetibilidade do solo à compactação é fortemente influenciada pelo seu teor de água, interagindo com a textura do solo. Solos argilosos, por exemplo, podem suportar maiores tensões sob teores iniciais de água mais elevados sem apresentar compactação severa, conforme apontam Saffih-Hdadi *et al.* (2009). De forma geral, a textura do solo é um fator importante, sendo que solos argilosos são mais propensos à compactação (Horn *et al.*, 1995). Adicionalmente, solos com maior teor de matéria orgânica (MO) tendem a ser mais resilientes à compactação (Hamza; Anderson, 2005). Para esses autores, uma maneira eficaz de reduzir a compactação é aumentar a porosidade do solo. No entanto, Debiasi, Franchini e Gonçalves (2008) defendem que a melhor estratégia é a prevenção, através da redução da pressão aplicada ao solo e do aumento de sua resistência à deformação.

2.2.1 Fatores que influenciam na compactação do solo em áreas agrícolas

A compactação do solo é influenciada pela umidade e por forças externas, como o tráfego de animais, máquinas e implementos agrícolas (Lima, 2004). Com a ampliação das áreas agrícolas, observou-se um aumento no peso e na potência dos tratores, sem um aumento proporcional na largura dos pneus, o que intensificou os problemas de compactação (Streck *et al.*, 2004).

Roque *et al.* (2011) avaliaram o efeito do controle de tráfego em áreas de cana-de-açúcar colhida mecanicamente sem queima e constataram que o tráfego de máquinas reduziu a macroporosidade do solo e aumentou sua densidade e microporosidade na linha de rodado, em relação

à linha de planta, demonstrando o impacto do maquinário na qualidade física do solo. Streck *et al.* (2004) também observaram que, em áreas sob plantio direto, houve redução na porosidade total e macroporosidade, sem alteração significativa na microporosidade. Nesse estudo, a resistência à penetração foi a propriedade que melhor evidenciou os efeitos do tráfego de máquinas sobre o solo.

Com a adoção do sistema de plantio direto, o solo deixou de ser revolvido periodicamente, o que eliminou o alívio mecânico da compactação presente nos cultivos sucessivos (Machado, 2003). Esse sistema pode apresentar compactação superficial devido ao tráfego de máquinas durante semeadura, aplicação de defensivos e colheita. Já no plantio convencional, a compactação ocorre na camada imediatamente abaixo da profundidade de operação dos implementos. Como resultado, as raízes das plantas têm seu crescimento limitado, tornando as culturas mais vulneráveis a períodos de estiagem curta ('veranicos'), pois não conseguem acessar água em camadas mais profundas do solo. Além disso, a compactação pode contribuir para erosão hídrica, pois a camada compactada dificulta a infiltração da água, aumentando o escoamento superficial e a perda de solo.

Além do tráfego de máquinas, outros fatores indiretos também influenciam a compactação do solo em áreas agrícolas, geralmente associadas a manejos inadequados. A redução do teor de matéria orgânica no solo, por exemplo, diminui a estabilidade estrutural e a resistência do solo à compactação, tornando-o mais suscetível à degradação física (Hamza; Anderson, 2005). Além disso, a ausência de cobertura vegetal e a monocultura prolongada favorecem a alteração na estrutura do solo, intensificando os efeitos da compactação ao reduzir a atividade biológica e a agregação do solo, tornando-o mais vulnerável ao adensamento sob a ação de cargas externas (Keller *et al.*, 2019).

2.3 Identificação da compactação

Segundo Machado (2003), a severidade da compactação do solo pode ser identificada por três abordagens principais:

- a) **Visualização no solo:** sinais como empoçamento de água, formação de "pé de arado" e aumento da necessidade de potência para o cultivo indicam compactação.
- b) **Visualização na planta:** dificuldades na emergência, crescimento lateral das raízes devido ao selamento superficial, amarelecimento na fase vegetativa e redução da produtividade.

- c) **Investigação no solo:** métodos quantitativos, como determinação da densidade do solo e resistência à penetração com uso de penetrômetros, e método alternativo, como a análise morfológica do perfil do solo em minitrincheiras, que permite a identificação visual de camadas compactadas e a avaliação do desenvolvimento radicular (Aurélio *et al.*, 2005).

O diagnóstico preciso é fundamental antes da preparação do solo em sistemas agropecuários. Métodos qualitativos, como o perfil cultural do solo, permitem uma avaliação morfológica em trincheiras, proporcionando uma visão geral da estrutura e das camadas compactadas (Mattos, 2016). Outra abordagem semiquantitativa é o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES), onde atributos como cor, coesão, porosidade e presença de raízes avaliadas e classificadas em uma escala de 1 a 6, auxiliando na identificação de camadas degradadas (Ralisch *et al.*, 2017).

Embora úteis, esses métodos qualitativos e semiquantitativos têm limitações na definição precisa de medidas corretivas. Assim, são recomendadas análises quantitativas, com uso de penetrômetro para medir a resistência do solo à penetração. Existem dois tipos principais: i) dinâmico: haste com ponta cônica introduzida por impacto de um peso de 4 kg; ii) estático: haste introduzida lentamente com registro contínuo da resistência do solo (Stolf *et al.*, 2014).

As propriedades físicas do solo podem ser utilizadas para caracterizar a compactação e auxiliar na determinação da qualidade estrutural do solo em relação ao crescimento e produtividade das plantas (Dias Júnior; Tassinari; Martins, 2019; Peixoto *et al.*, 2019a). Peixoto *et al.* (2019a) propuseram um método quantitativo que minimiza os efeitos da umidade do solo, ao comparar a resistência à penetração (RP) em uma área de alta produtividade. Essa abordagem permite a criação de modelos para tomada de decisão sobre a necessidade de intervenção mecânica.

Recentemente, métodos baseados em propriedades elétricas do solo têm sido explorados como alternativa promissória para delimitar zonas de manejo e auxiliar no planejamento do preparo do solo. A mensuração da condutividade elétrica aparente e da suscetibilidade magnética permite identificar variações estruturais associadas à compactação do solo, fornecendo um diagnóstico detalhado e menos invasivo (Pentos; Pieczarka; Serwata, 2021).

O diagnóstico preciso da compactação do solo é essencial para evitar perdas na produtividade e melhorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. A combinação de diferentes métodos – qualitativos, semiquantitativos e quantitativos – possibilita uma abordagem integrada e eficiente, permitindo decisões embasadas para o manejo adequado do solo.

2.4 Propriedades físicas do solo associadas à compactação

O solo é um recurso limitado, e alguns de seus componentes, quando degradados, requerem longos períodos para serem restaurados. Assim, torna-se essencial prever o grau das perturbações ambientais provocadas pelo manejo inadequado das atividades agropecuárias. Ainda há uma demanda por técnicas simples e confiáveis para avaliar a qualidade do solo. Os indicadores disponíveis, apesar de permitirem a gestão segura dos recursos naturais, apresentam desafios como complexidade de execução e custos elevados, o que abre espaço para o desenvolvimento de novos parâmetros de qualidade física do solo (Stefanoski *et al.*, 2013).

As alterações na qualidade física do solo em função do manejo podem ser quantificadas por diferentes atributos físicos, especialmente aqueles relacionados à estabilidade estrutural, como porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (Beutler *et al.*, 2001). O impacto do uso e manejo do solo em sua qualidade física tem sido medido por meio de diversas propriedades, tais como compactação do solo (Hakansson; Voorhees; Riley, 1988), resistência do solo à penetração das raízes (Beutler *et al.*, 2001; Tormena; Roloff, 1996), infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento radicular (Arvidsson, 2001; Ishaq *et al.*, 2001), densidade do solo (Drescher *et al.*, 2011; Stone; Silveira, 2001) e estrutura do solo (Ribeiro, 1999).

Entre esses atributos, a porosidade e a densidade do solo se destacam por sua relação direta com a compactação do solo (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007). Drescher *et al.* (2011) apontam que essas duas variáveis são frequentemente usadas como indicadoras eficientes de compactação, uma vez que são sensíveis aos efeitos do manejo sobre a estrutura do solo, apresentam determinação relativamente simples e são pouco influenciadas pela umidade no momento da coleta.

A resistência mecânica do solo também é um parâmetro relevante para a avaliação da qualidade física do solo, pois influencia diretamente o crescimento radicular, a dinâmica do fluxo de água, a estabilidade estrutural e até mesmo o desempenho de fundações rasas em pequenas obras. A determinação dessa resistência pode ser feita com penetrômetros de diferentes tipos: estáticos (medem a resistência à penetração por unidade de área), sonoros ou de impacto (medem por unidade de profundidade) e eletrônicos (utilizam resistência elétrica do solo) (Romão *et al.*, 2010).

A infiltração de água no solo e a resistência à penetração são afetadas pelo tipo de manejo empregado. Ao comparar diferentes sistemas de uso, Martins e Santos (2017) observaram que a rotação de culturas no plantio direto aumentou a infiltração de água e reduziu a resistência à penetração, quando comparado ao plantio direto sem rotação. As alterações físico-hídricas do

solo decorrentes do manejo impactam diretamente o crescimento das raízes (Stone; Silveira, 1999). Schuler *et al.* (2003) destacaram que a compactação reduziu significativamente a condutividade hidráulica do solo saturado, devido à diminuição da macroporosidade. Assim, a determinação da condutividade hidráulica é uma ferramenta importante para avaliar o movimento da água no solo e subsidiar o dimensionamento de sistemas de drenagem. O aumento da intensidade das atividades agrícolas tem afetado a dinâmica da água no solo, principalmente em sistemas de produção de baixa sustentabilidade. Shah *et al.* (2017) identificaram que práticas como uso excessivo de maquinário, pisoteio animal, uso de métodos de irrigação poucos eficientes e baixa adição de matéria orgânica, tem contribuído para o aumento da densidade do solo, maior resistência à penetração e redução da porosidade e estabilidade dos agregados.

Além disso, a resistência à penetração e a aeração do solo também podem restringir o crescimento vegetal, mesmo quando a umidade está dentro do intervalo de disponibilidade hídrica. Para integrar as propriedades físicas dos solos determinantes para o crescimento vegetal, Silva *et al.* (1994), baseando-se em Letey (1985), desenvolveram o conceito de Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). Esse indicador considera simultaneamente os efeitos do teor de água no solo sobre potencial mátrico, aeração e resistência mecânica. Lima *et al.* (2009) descobriram que o IHO é uma ferramenta confiável para quantificar alterações na disponibilidade hídrica em solos sob diferentes usos e manejos, uma vez que, representa a faixa de conteúdo de água no solo, em que as limitações para o crescimento das plantas em função do potencial mátrico, aeração e resistência do solo são nulas, expressando em uma única variável, as condições físicas restritivas ao adequado desenvolvimento das plantas. Segundo Shah *et al.* (2017), a dinâmica de água no solo tem sido afetada pelo aumento intensivo de atividades agrícolas em sistemas de produção de baixa sustentabilidade. Isso ocorre em razão do aumento da densidade do solo, resistência do solo à penetração e da redução da porosidade e estabilidade de agregados, como resultado da redução da diversificação de culturas, do aumento do tráfego de máquinas, uso de métodos de irrigação pouco eficientes, pisoteio animal e baixos teores de matéria orgânica.

A densidade do solo na qual o IHO se reduz a zero é denominada densidade crítica (Dsc) (Silva *et al.*, 1994). Quando a densidade do solo ultrapassa esse limite, há indicações de severa degradação estrutural do solo, restringindo o crescimento das plantas. Desta forma, o IHO é um indicador promissor da qualidade física do solo, permitindo a avaliação dos processos de perda ou recuperação estrutural resultantes do manejo adotado.

2.5 Manejo da compactação e seus efeitos na produtividade agrícola

O manejo da compactação do solo é essencial para garantir a sustentabilidade dos sistemas produtivos, especialmente sob plantio direto. Quando a compactação é diagnosticada, a recomendação é adotar estratégias que rompam essa camada sem comprometer a cobertura do solo. O uso de escarificadores ou subsoladores equipados com discos de corte é uma abordagem comumente utilizada para minimizar a incorporação da palha ao solo (Seki *et al.*, 2015). No entanto, a escolha do implemento e o momento da intervenção impactam diretamente a conservação da cobertura vegetal, influenciando na proteção contra a erosão e na estruturação do solo.

A manutenção de uma camada superficial rica em matéria orgânica é fundamental para a melhoria da estrutura do solo, reduzindo sua suscetibilidade à compactação. Gonçalves *et al.* (2006) destacaram que o aporte contínuo de resíduos vegetais, tanto da parte aérea quanto do sistema radicular das plantas de cobertura, favorece a formação de agregados estáveis, promovendo a infiltração de água e o desenvolvimento radicular. Assim, a integração de estratégias mecânicas com práticas de manejo biológico se mostra essencial para a recuperação e a manutenção da qualidade do solo.

Nesse contexto, o preparo ocasional do solo tem sido adotado para mitigar os efeitos da compactação em sistemas de plantio direto contínuo (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Nunes *et al.*, 2014, 2015). Essa técnica consiste no uso intermitente de escarificadores ou subsoladores para restaurar a porosidade do solo. No entanto, estudos indicam que os efeitos benéficos dessa prática são temporários, uma vez que o solo tende a se reconsolidar rapidamente após a operação (Busscher; Bauer; Frederick, 2002).

A fertilidade do solo também desempenha um papel fundamental na prevenção da compactação. A construção da fertilidade, por meio da correção com calcário e a adubação equilibrada, associada à rotação de culturas e ao uso de plantas de cobertura, pode eliminar a necessidade de intervenções mecânicas frequentes (Blanco-Canqui; Wortmann, 2020). Além disso, a seleção de espécies vegetais com sistemas radiculares agressivos contribui para a descompactação biológica, promovendo a infiltração de água e a estabilidade estrutural do solo.

Embora o uso de implementos mecânicos seja uma alternativa para alívio imediato da compactação, seu efeito é transitório e precisa ser complementado por estratégias que garantam a sustentabilidade do solo a longo prazo. Estudos apontam que a escarificação, isoladamente, pode até reduzir a resistência à penetração e melhorar a porosidade do solo, mas não resulta necessariamente em incrementos na produtividade (Collares *et al.*, 2008; Gubiani *et al.*, 2013). Em Latossolos sob plantio direto contínuo, por exemplo, a escarificação mostrou-se eficaz na

redução da compactação, mas sem impacto significativo sobre a produtividade do feijoeiro e do trigo cultivado em sucessão.

Para que a melhoria da estrutura do solo seja duradoura, é necessário manter uma elevada atividade biológica, associada a um aporte contínuo de matéria orgânica (Cubilla *et al.*, 2002). A adoção de sistemas de rotação de culturas com espécies de alto potencial de biomassa e sistemas radiculares vigorosos é uma estratégia eficiente para reduzir os impactos da compactação ao longo do tempo. Nesse sentido, Nunes *et al.* (2015) demonstraram que os efeitos positivos da escarificação sobre a estrutura do solo desaparecem após três safras, reforçando a necessidade de práticas complementares para assegurar a longevidade dos benefícios estruturais.

Em regiões de clima árido e semiárido, o manejo da compactação requer abordagens combinadas, incluindo a retenção de resíduos vegetais, o controle do tráfego de máquinas e a seleção de espécies vegetais adaptadas às condições locais (Hamza; Anderson, 2005). O uso de plantas de cobertura, em particular, tem se mostrado uma solução eficaz para a melhoria da estrutura do solo e alívio da compactação em sistemas de produção de grãos em diversas condições climáticas (Calonego *et al.*, 2017; Williams; Weil, 2004). A interação entre práticas mecânicas e biológicas permite a construção de solos mais resilientes, promovendo maior estabilidade estrutural e sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

Artigo 1 - Redigido conforme norma do periódico científico - Versão preliminar submetida e sob revisão	
Título do artigo:	Long-term cropping system diversification under no-till improves soil structure, carbon stocks, and crop yield in tropical environments
Autores:	Gilmar Gonçalves Oliveira Miguel Marques Gontijo Neto Pedro Henrique de Paula Silva Leandro Campos Pinto Vanessa Lopes de Faria Eduardo da Costa Severiano Márcio Renato Nunes Bruno Montoani Silva
Periódico:	Agriculture, Ecosystems & Environment
ISSN	
DOI	

ARTIGO 1 - LONG-TERM CROPPING SYSTEM DIVERSIFICATION UNDER NO-TILL IMPROVES SOIL STRUCTURE, CARBON STOCKS, AND CROP YIELD IN TROPICAL ENVIRONMENTS

**Gilmar Gonçalves Oliveira^a; Miguel Marques Gontijo Neto^b; Pedro Henrique de Paula Silva^a;
Leandro Campos Pinto^a; Vanessa Lopes de Faria^a; Eduardo da Costa Severiano^c; Márcio
Renato Nunes^d, Bruno Montoani Silva^a**

^a Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil

^b Embrapa Milho e Sorgo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Sete Lagoas, MG, Brasil

^c Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, Brasil

^d Soil, Water, and Ecosystem Sciences Department, University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA

Highlights

Diversified cropping systems improve both soil quality and agricultural productivity

Long-term no-till soybean monoculture showed the lowest soil quality indices

Combining no-till with cropping diversification enhanced soil quality

Inclusion of *Brachiaria* grass improved carbon stock and soil structure

Two years of grass plus maize-grass consortium system stood out

ABSTRACT

Conservation agriculture has been promoted as a set of management practices that can restore soil quality, sustain crop production, and mitigate climate change. Yet, long-term controlled trials quantifying the impact of conservation agriculture on soil properties, carbon (C) accrual, and crop yields in tropical environments are still a research gap. In this study, we quantified the effect of 10 years of cropping system diversification combined with no-till on dynamic soil properties, C stocks, and crop and forage productivity in a Brazilian Oxisol. Cropping system diversification included ten levels: maize monoculture (M), maize intercropped with Piatã grass (MP), soybean monoculture (S), Piatã grass pasture (P), annual rotation of soybean and MP (S-MP), annual rotation of Piatã grass pasture and MP (P-MP), pasture for two years followed by MP (P-P-MP), annual rotation of pasture, soybean, and MP (P-S-MP), pasture for two years followed by soybean and MP (P-P-S-MP), and a reference area with native Cerrado (CE). The maize and Piatã grass consortium demonstrated higher productivity and improved soil quality compared to monoculture maize. When combined with two years of pasture (P-P-MP), carbon stocks increased. In the surface layer, the MP and P-P-MP systems maintained carbon levels similar to those of CE, while the soybean cultivation system exhibited lower soil physical quality and a limited carbon retention capacity. Overall, the inclusion of Piatã grass improved soil physical quality and carbon stocks. The P-P-MP production system stood out for its improved soil structure and higher organic carbon accumulation, indicating its potential for long-term sustainability.

Keywords: conservation agriculture, ecosystem services, soil management, clayey soils, *Brachiaria* sp.

1 INTRODUCTION

Conservation agriculture (CA) is being promoted to improve and sustain soil quality and crop production while mitigating climate change and providing positive environmental benefits. CA is based on three principles: permanent soil cover, minimal soil disturbance, and diversified crop rotations (FAO, 2013). No-till (NT) and cropping system diversification are key management practices associated with these principles. Adopting NT combined with extended crop rotation, including grasses, legumes, cover crops, and crop residues return, is expected to improve overall soil health, water conservation, and nutrient use efficiency by mitigating soil erosion runoff and improving nutrient and water cycling, nutrient and water retention and biological activity (Nunes et al., 2020). Combined, this set of agricultural practices has the potential to improve agricultural productivity and reduce the negative environmental impacts associated with conventional agriculture (Lal et al., 2019).

The cultivated area under no-till farming in Brazil increased by 84.9% between 2006 and 2017, growing from 17.9 million to 33.0 million hectares (Fuentes-Llanillo et al., 2021). In the Brazilian cerrado, NT combined with other regenerative practices allowed farmers to overcome edaphoclimatic challenges to local agriculture, which transformed the region into one of the largest food producers in the world. Despite the progress, NT in the region faces challenges. For instance, farmers lack knowledge about the CA principles. As a consequence, farmers have been practicing NT without adopting any other CA principles, which has led the system to fail. Soil compaction, erosion, nutrient loss as runoff, and crop yield losses are often found in these areas. Soil compaction under NT associated with monocropping results from the intensive machinery traffic during management operations (Peixoto et al., 2019a; Reichert et al., 2016), low crop diversity, limited soil cover throughout the year with residues and/or live plants, and insufficient biomass production to sustain or improve soil organic carbon. Keeping the soil cover in the region is challenging, especially due to high temperatures and dry periods, which hinder the establishment of cover crops or winter crops (Collier et al., 2018; Carlos et al., 2019; Oliveira et al., 2023).

Soil compaction has compromised soil structure, reducing porosity, and limiting water infiltration, aeration, and crop root development (Nunes et al., 2019), finally decreasing agricultural yield and the sustainability of the system as a whole (Shaheb et al., 2021). Diversifying the cropping system via rotation, cover cropping, and intercropping including tropical grasses in the system, emerges as an alternative to mitigate the soil compaction without soil tillage. Besides the high biomass production associated with tropical grasses and improved soil cover, the deep and vigorous root systems of these grasses can potentially overcome compacted soil layers, add C in the soil profile, and stimulate soil biological activity finally improving soil structure under NT (Rahman, 2021; Bharti and Saha, 2021; Souza et al., 2024). Therefore, identifying the most appropriate species and management to be used is essential to maximize their benefits in tropical environments (Sena et al., 2020).

Several forage species have been used in rotation and or intercropping systems aiming to produce feed during the off-season and/or provide mulch for the soil (straw). Studies have shown the

potential of forage grasses of the *Urochloa* genus (e.g., *Urochloa brizantha*) to improve biomass production within the cropping system, especially during drought periods (Gagna et al., 2023; Correia and Gomes, 2016; Sodr  Filho et al., 2021), which can keep the soil covered for an extended period, increasing root diversity and the soil volume explored by these plants (Santos et al., 2016; Silva et al., 2020). In addition, perennial forage species in the production system are also alternatives to improve nutrient cycling and soil structure, improving soil physical, chemical, and biological properties and processes, which may improve the yield of the subsequent crops (Gagna et al., 2023; Mirzavand et al., 2022; Serafim et al., 2023). A widespread practice for establishing and maintaining soil cover in the Brazilian Cerrado region is the "Santa F  System a technology that integrates intercropping of annual grain crops - such as maize, sorghum, or millet - with forage grasses, predominantly of the *Urochloa* genus. Compatible with conventional tillage and no-till systems, this technology reduces production costs by maximizing land use throughout the year. During the summer growing season, grains are cultivated, and forage grasses are sown simultaneously or shortly after the emergence of the main crop (Kluthcouski and Yokoyama, 2003). The initial vigor of annual crops minimizes competition with forage grasses, ensuring stable grain production while providing straw for the no-till system in the following season (Kluthcouski et al., 2000). The use of forage grasses also increases the addition of organic matter to the soil, promoting greater water retention and contributing to the resilience of agricultural systems (Lal, 2020).

Conservation agriculture has been driven by ongoing efforts to improve soil quality, seeking to promote sustainability of the production system while maintaining or even increasing grain and forage yield (Shrestha et al., 2020). In this context, it is essential to understand the response of soil physical properties in the different growing systems to propose management strategies that may be more suitable. It is important to monitor the response of soil physical properties to the adoption of these practices, assisting with technical recommendations to mitigate soil compaction and promote the sustainability of production systems (Verhulst et al., 2010; Valani et al., 2020). The interaction between the quantity, quality, and frequency of organic matter (OM) inputs into the soil plays a crucial role in its physical structure (Bronick and Lal, 2005; Tisdall, 2020; Voltr et al., 2021), particularly in the aggregation process (Bettiol et al., 2023). Soil aggregation constitutes a critical physical attribute that directly impacts the movement and storage of water and air, root penetration resistance, and soil resilience to anthropogenic stress. An increase in organic matter content reduces particle and bulk density, positively affecting the pore system. This leads to improvements in the water and air dynamics within the soil-plant-atmosphere system, fostering biological activity, root growth, and plant access to water and nutrients (Bettiol et al., 2023). Additionally, the impact of OM on soil structure is more pronounced in macropores, enhancing water infiltration and air permeability, while its effects on micropores, which are responsible for water retention, are less significant (Minasny and McBratney, 2018).

Considering the edaphic and climatic challenges posed by the Cerrado region, which include very clayey soils with oxidic mineralogy that have low water availability for plants and are highly

susceptible to compaction (Ajayi et al., 2010; Severiano et al., 2013; Silva et al., 2015; Silva et al., 2022), it is essential to evaluate the soil physical environment. This evaluation is crucial to test and propose appropriate management strategies - such as crop selection, conservation practices, irrigation, and others - for efficient and sustainable plant production. Our central hypothesis is that, in the long term, diversifying the cropping system with extended crop rotation and intercropping in combination with no-till improves soil physical, chemical, and biological properties and processes leading to higher crop yield and C accrual in tropical environments. The study aimed to evaluate the impact of these diversified production systems on soil quality, carbon dynamics, and agricultural productivity, focusing on the challenges and potential of very clayey soils in the Cerrado of Minas Gerais.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Description of the site and history of the area

The experiment was conducted in an experimental area of Embrapa Milho e Sorgo in the municipality of Sete Lagoas, state of Minas Gerais, Brazil, at 19°27'22" S and 44°10'50" W and altitude of 771 m (Fig. 1). The predominant climate in the region according to the Köppen classification is humid subtropical (Cwa), with a mean annual temperature of 22.1 °C and mean annual rainfall of 1,382.7 mm. Rainfall is irregular and poorly distributed over the year and is concentrated in the period from October to April.



















































































Figure 1. Image of the state of Minas Gerais, highlighting the geographical location of the experimental area in the municipality/county of Sete Lagoas, MG, Brazil.

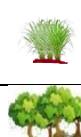


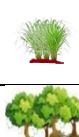
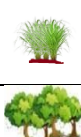
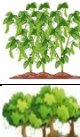

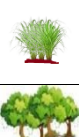
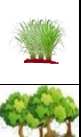











The soil of the experimental area was classified as a *Latossolo Vermelho Distrófico típico* in the Brazilian System of Soil Classification (Santos et al., 2018), with a very clayey texture, semi-deciduous Cerrado phase, and slightly rolling topography, and as an Acrustox in Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014). Particle size distribution showed 773 g/kg⁻¹ clay, 112 g/kg silt, and 115 g/kg sand (Silva, 2020). Mean slope in the area is 9%. Before setting up the experiment, a no-till system had been used in the area since 1995, with maize-soybean rotation in the summer and fallow in autumn-winter. However, it had low crop yield; and production of plant residue (straw) as soil cover for the no-till system was difficult, both as a direct result of the low biomass produced and an indirect result of the high rate of residue decomposition and impossibility of a second crop in the fall, due to the climate conditions in the region. The area also exhibited signs of soil compaction, such as bare patches, with previous crops displaying stunted growth and shallow root systems.

2.2 Treatments and experimental design

Ten treatments were tested consisting of nine levels of diversification including different plant species in rotation or intercropped in combination with no-till and the native cerrado, used as control (Table 1). A completely randomized block experimental design was used, with three replications (Fig. 1). Plot dimensions were 12 m in width and 14 m in length (168 m²) with pathways of 2.5 m width between plots and between blocks. The experiment was set up in the 2010/11 crop season and conducted for ten years. The sequence of crops within each treatment is shown in Table 1.

Table 1. Description and representation of the treatments with crop sequence in each treatment from the 2010/2011 to the 2019/2020 crop season.

TREATMENT	CROP YEARS									
	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20
Monoculture maize (M)										
Maize intercropped with Piatã grass (MP)*										
Monoculture soybean (S)										
Monoculture Piatã grass pasture (P)										
Annual rotation of soybean and maize intercropped with Piatã grass (S-MP)										
Annual rotation of Piatã grass pasture and maize intercropped with Piatã grass (P-MP)										
Pasture for 2 years followed by maize intercropped with Piatã grass (P-P-MP)										
Annual rotation of pasture followed by soybean and then maize intercropped with Piatã grass (P-S-MP)										

Pasture for 2 years, followed by soybean and maize intercropped with Piatã grass (P-P-S-MP)										
Native Cerrado vegetation - control (CE)										

* The cropping system in which maize is intercropped with *Urochloa brizantha* (Syn. *Brachiaria brizantha*) cv Piatã in the summer is known in Brazil as the “Santa Fé” system.

2.3 Management of the experimental area

As described above, the area has been managed under no-till since 1995 with clear evidence of soil compaction within the subsurface layer (approximately 10-20 cm depth). When the trials were implemented in 2010, the soil was not tilled; therefore, at the sampling event, the area was NT for 25 years. Within the treatments, crops and forage species were sown mechanically using a no-till seed drill, except for system Monoculture Piatã grass pasture (*Urochloa brizantha* (Syn. *Brachiaria brizantha*) cv Piatã). Soybean and maize were sown at a between-row spacing of 0.5 m. For soybean, 15 seeds were distributed per meter, with fertilization in the plant furrow ranging from 280 to 350 kg ha⁻¹ of the NPK formulation 06-30-16; in the maize plots, 3.5 seeds were distributed per meter and the NPK formulation 08-28-16 was used at rates ranging from 350 to 400 kg ha⁻¹.

In the plots of maize intercropped with grasses, 4.0 kg ha⁻¹ of pure viable Piatã grass seeds were used. As intercropping maize with Piatã grass can lead to competition for resources, especially light and nutrients, and affect the initial development of maize, a management strategy was adopted to minimize these negative effects. The technique consisted of mixing the Piatã grass seeds with the fertilizer and depositing them at a slightly greater depth than that of the maize during sowing. In the V2-V4 maize development stage, fertilizer was topdressed using 112.5 kg ha⁻¹ N urea. Fertilizer doses were adjusted annually based on soil analyses, nutrient export by the crops in the previous crop season, and expected yield for the crop that year.

Cropping practices in each treatment were carried out according to need and to recommendations in effect for chemical pesticides considering seed treatments for initial pests, insect control, weeds, and fungal diseases over the crop cycle following product recommendations in Phytosanitary Pesticide System (Agrofit). Each year in the soybean and maize treatments, the plots were harvested manually when the crops reached physiological maturity. Over the years, in the plots with Piatã grass, management practices simulated hay production; that is, when most plants reached 0.5 m height, they were cut at a height of 0.2 m, and the material was then removed from the area.

2.4 Soil sampling and physical analyses

In the 2020/2021 crop season, undisturbed soil samples were collected at the depths of 0-0.05 and 0.15-0.20 m. A Uhland soil sampler was employed using volumetric rings of 6.40 cm diameter and 2.50 cm height. In the laboratory, the samples were gradually saturated with water, weighed, and transferred to suction units composed of Buchner funnels. They were then placed under matric potentials (ψ) of -6 and -10 kPa. At more negative potentials, -100, -500, and -1500 kPa, Richards Chambers were

used (Soil Moisture, USA), following Klute (2018). After reaching equilibrium at each ψ , the samples were weighed, and then dried in a laboratory oven at 105 °C for 48 h to determine dry soil weight and calculate moisture content (θ) at each ψ and at saturation, as well as to determine soil bulk density (Bd) (Blake and Hartge, 1986). After reaching equilibrium at $\psi = 100$ kPa, the soil penetration resistance test (PR) was carried out on each sample using a benchtop penetrometer (Marconi MA933/30 - Marconi, Brazil) at a constant speed of 10 mm/min, according to Peixoto et al. (2019b).

The water retention curves for each replication were fitted to the model proposed by Van Genuchten (1980) with the Mualem (1976) restriction for estimating the empirical parameters m , n , α . The following soil physical properties were determined: total porosity (TP), estimated by θ at saturation ($\psi = 0$ kPa); microporosity (Mi) with pores of diameter < 50 μm , obtained by θ at $\psi = 6$ kPa; macroporosity (Ma) with pores of diameter > 50 μm , obtained by the difference between TP and Mi; field capacity (FC), estimated by θ at $\psi = 10$ kPa; permanent wilting point (PWP), estimated by θ at $\psi = 1500$ kPa; plant available water capacity (PAWC), calculated by the difference between FC and PWP; aeration capacity (AC), calculated by the difference between TP and FC; and relative field capacity, calculated by the quotient of FC and TP, according to Reynolds et al. (2009).

In the 2017/2018 crop season, Silva (2020) collected data on TP, Mi, Ma, and Bd, which was used herein to follow the evolution of changes in soil structure by the proposed production systems. Thus, the mean percentage increases or decreases will be calculated using the data obtained in this study and results will be expressed as relative percentages.

2.5 Determination of soil chemical properties

Disturbed samples for soil chemical analyses were collected at the same time and depths as those for the soil physical analysis. Disturbed samples were collected, air dried, and sieved to 2 mm diameter. Soil chemical properties determined included organic carbon (OC), subsequently converted to soil organic matter (SOM) using the factor of 1.724, pH in water, and base saturation, following the methodology of Teixeira et al. (2017).

2.6 Evaluation of soil quality indices

To evaluate soil quality in the different management systems, we used an approach based on multiple soil physicochemical and biological properties, including total porosity (TP), aeration capacity (AC), soil bulk density (Bd), plant available water capacity (PAWC), penetration resistance (PR), organic carbon (OC), and base saturation (V%). These properties were selected based on their relevance in determining soil health and functionality, in terms of both physical and chemical properties. To calculate soil quality indices, higher values of the properties TP, AC, PAWC, OC, and V%, which indicate better quality, were normalized by dividing the value obtained by the highest value observed among the treatments. In contrast, for the properties in which lower values indicate better conditions, such as Bd and PR, the inverse procedure was adopted, dividing the best value by the observed value.

This procedure allowed for the development of a comparative index between the different management systems, using treatment M as a reference for direct comparison with the others, due to its intermediate values across the various parameters analyzed.

2.7 Soil carbon stock

Knowing the OC value in the soil, the equation proposed by Sisti et al. (2004) was used to determine the soil carbon stock (Equation 2):

$$C_{stock} = (OC \times Bd \times ((Bd_{ref}/Bd) \times e))/10 \quad (2)$$

where:

C_{stock} = stock of organic C at a determined depth ($Mg \cdot ha^{-1}$);

OC = total organic C content at the depth shown ($g \cdot kg^{-1}$);

Bd = soil bulk density at the depth shown ($kg \cdot dm^{-3}$);

e = thickness of the physically sampled layer considered (cm);

Bd_{ref} = bulk density of a reference layer ($kg \cdot dm^{-3}$) representative of the native Cerrado (control).

The layer thickness ('e') used in the calculations corresponds to the physical thickness of the soil layer sampled in each treatment and depth. The correction for soil bulk density is performed through the term (Bd_{ref}/Bd) in the equation, following the methodology proposed by Sisti et al. (2004). The reference bulk density (Bd_{ref}) used in this study was based on the values reported by (Carvalho et al., 2009) for soils under native Cerrado vegetation. Specifically, a value of 0.78 kg dm^{-3} was adopted as Bd_{ref} for the 0.00-0.05 m layer and 0.80 kg dm^{-3} for the 0.15-0.20 m layer. The use of a Bd_{ref} derived from native Cerrado areas allows for a more appropriate comparison of the accumulated carbon stock in the different management systems in relation to the reference condition of the biome.

2.8 Weighted relative yield

Soybean and maize grain yields in each plot in the 2019/2020 crop season were obtained in an area of 15 m^2 and corrected to 13% moisture, and grass production was derived from the total dry matter of the aerial part of the plant. From the production results from each plot for each treatment, the relative yield of each crop was calculated. This measurement was determined by comparing the yield obtained in each experimental plot of each treatment with the mean yield of each treatment under monoculture, whether for maize, soybean, or grass. Therefore, as the treatments had different products (grain and dry matter), the relative yield of each crop was used to calculate the weighted relative yield (R-Yield) of the crop in the experiment. That way, it was possible to evaluate the results obtained in each cropping system tested. In the end, the R-Yield results were normalized considering the mean yield of the monoculture maize treatment (M), which represents traditional growing in the region. In the treatments with 1 or 2 crops, the R-Yield was calculated by assigning zero to the crops not present in the production system.

$$R\text{-Yield} = 0.33 \text{ SR-Y} + 0.33 \text{ MR-Y} + 0.33\text{PR-Y}$$

where:

R-Yield is the yield of the production system weighted by the crops, which received equal weight, and this was then normalized by the mean value obtained for the monoculture maize treatment;

SR-Y is the relative soybean yield of the plot, that is, normalized by the mean value obtained for the monoculture soybean treatment;

MR-Y is the relative maize yield of the plot, that is, normalized by the mean value obtained for the monoculture maize treatment;

PR-Y is the relative grass dry matter yield of the plot, that is, normalized by the mean value obtained for the monoculture pasture treatment;

This approach was used so that each crop in each cropping system is considered, allowing a more comprehensive and representative evaluation. In addition, the weighted relative yield is a useful tool to identify treatments that stand out positively in terms of yield and efficacy, providing valuable information for guiding decisions concerning cropping systems.

2.9 Statistical analysis

The statistical analysis was performed separately for each sampled soil depth. Analysis of variance (ANOVA) was performed on the data and the means were compared using the Tukey test at a 5% probability of error, for each soil depth, assisted by the statistical program SISVAR® (Ferreira, 2019). The R software, version 3.5.2 (R Core Team, 2018), was used for principal component analysis (PCA). Prior to the analysis, the data were standardized to ensure that all variables were on the same scale. PCA was performed to reduce data dimensionality and identify the main sources of variation among treatments. The interpretation of the principal components was based on loading and score plots, providing a detailed visualization of the relationships between variables and treatments.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Physical soil properties and processes

3.1.1 Water retention

Within the cultivated area, soil water retention curves were similar among treatments (crop rotation or intercropping systems) in both soil layers (Fig. 2). However, specifically within the topsoil layer, water retention was lower for the native Cerrado vegetation (CE). Overall, the monoculture systems had lower water retention in both soil layers. These results suggest that diversified production systems improved soil structure (Cavaliere-Polizeli et al., 2022), resulting in greater water retention, which is crucial for agricultural sustainability in regions prone to dry periods.

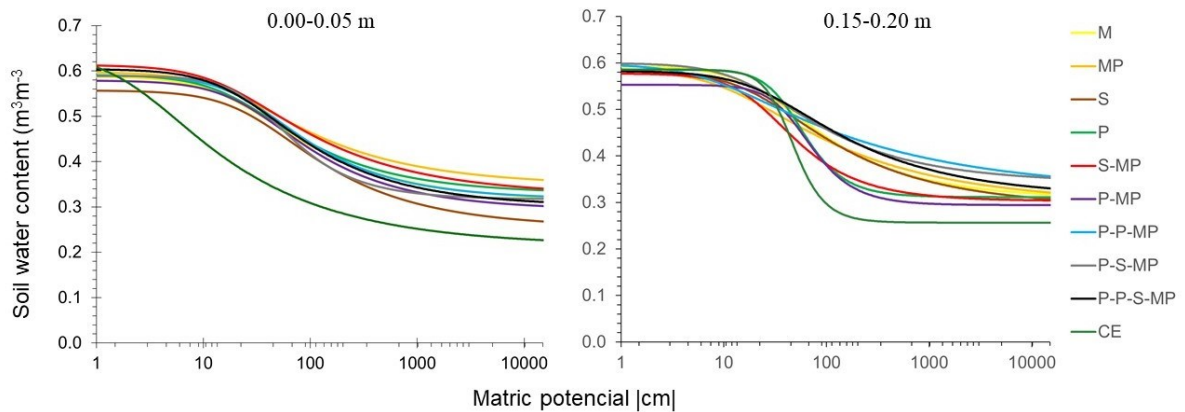


Figure 2. Soil water retention curve in the 0.00-0.05 m and 0.15-0.20 m layer by cropping systems in the Cerrado region. M: monoculture maize; MP: monoculture Santa Fé (maize intercropped with Piatã grass); S: monoculture soybean; P: monoculture Piatã grass pasture; S-MP: annual rotation of soybean and Santa Fé; P-MP: annual rotation of Piatã grass pasture and Santa Fé; P-P-MP: pasture for 2 years followed by Santa Fé; P-S-MP: annual rotation of pasture, soybean, and Santa Fé; P-P-S-MP: pasture for 2 years followed by soybean and Santa Fé; CE: native Cerrado vegetation.

In the 0–0.05 m layer, diversified cropping systems, such as P-P-MP and P-P-S-MP, showed higher water retention under low matric potential ($|\text{cm}|$) conditions compared to monocropping systems, such as M and S. This suggests a long-term positive impact of cropping system diversification on the soil physical properties in the surface layer. However, in the 0.15–0.20 m layer, systems like P-P-S-MP and P-MP also exhibit greater water retention under low matric potentials, indicating that the effects of soil management extend to deeper layers and influence water dynamics in the subsoil.

In clayey soils (as studied soil), water retention tends to be higher in the subsurface layers, reflecting high adsorption capacity and microporosity. While this high retention in deeper layers represents a significant water reservoir, it can indirectly compromise water availability in the surface layers, where plant roots are often more concentrated, if water percolation and redistribution upwards are limited. This phenomenon intensifies in periods of water deficit, as the roots in the upper layers may not be able to access the water retained at depth due to slow movement or physical barriers within the soil profile. That can limit water availability to plants during critical growth periods, negatively affecting their health and yield. Therefore, adopting appropriate management practices is crucial to optimize water availability in clayey soils – *e.g.*, using efficient irrigation techniques and implementing crop rotation to enhance soil structure and improve its water-holding capacity facilitating better water movement throughout the profile and root access to deeper reserves.

3.1.2 Other dynamic soil physical properties

Independent of the soil layer (0-0.05 m and 0.15-0.20 m), most of the physical soil properties were significantly affected by treatments as compared with the native system (Table 2). Long-term cultivation increased soil bulk density (Bd) and penetration resistance (PR), decreased total porosity

(TP), macroporosity (Ma), and microporosity (Mi), as well as relative field capacity (RFC) and aeration capacity (AC) as compared to the control (native cerrado). These changes reflect soil structure degradation with agricultural practices even before the experiment was implemented and possible machine traffic in addition to the compaction resulting from intensive land use over the years can affect soil bulk density and porosity. Such structural modifications can impact plant development (Dexter, 2004; Blanco-Canqui and Ruis, 2020). These results highlight the importance of considering and monitoring changes in soil physical properties upon implementing agricultural practices, focusing on optimizing conditions for crop growth and sustainability of the production system.

Table 2. Soil bulk density (Bd), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), and total porosity (TP), field capacity (FC), relative field capacity (RFC), permanent wilting point (PWP), aeration capacity (AC), plant available water capacity (PAWC), and soil penetration resistance (PR) in the 0.0-0.05 and 0.15-0.20 m layers.

Production system	Bd Mg m ⁻³	Ma	Mi	TP	m ³ m ⁻³					
					FC	RFC	PWP	AC	PAWC	PR MPa
0.00 to 0.05 m										
M ¹	1.11 a	0.11 b	0.47 a	0.59 bc	0.43 a	0.74 a	0.31 a	0.15 b	0.12 a	1.57 ab
MP	1.11 a	0.11 b	0.48 a	0.59 bc	0.47 a	0.78 a	0.34 a	0.13 b	0.12 a	2.20 a
S	1.11 a	0.09 b	0.46 a	0.55 d	0.40 a	0.72 a	0.26 ab	0.15 b	0.14 a	1.19 bc
P	1.07 a	0.12 b	0.46 a	0.59 bc	0.43 a	0.74 a	0.33 a	0.15 b	0.11 a	1.73 ab
S-MP	1.04 a	0.12 b	0.48 a	0.61 ab	0.45 a	0.74 a	0.32 a	0.15 b	0.13 a	2.26 a
P-MP	1.07 a	0.11 b	0.46 a	0.58 cd	0.42 a	0.73 a	0.29 ab	0.15 b	0.13 a	1.82 ab
P-P-MP	1.08 a	0.11 b	0.47 a	0.59 bc	0.44 a	0.74 a	0.31 a	0.15 b	0.12 a	1.17 bc
P-S-MP	1.06 a	0.11 b	0.47 a	0.59 bc	0.41 a	0.69 a	0.31 a	0.18 b	0.09 a	1.39 b
P-P-S-MP	1.10 a	0.12 b	0.47 a	0.60 bc	0.41 a	0.69 a	0.30 a	0.19 b	0.11 a	1.59 ab
CE	0.78 b	0.30 a	0.33 b	0.64 a	0.30 b	0.46 b	0.21 b	0.34 a	0.08 a	0.58 c
C.V. (%) ²	2.38	9.67	1.79	1.79	7.01	7.04	9.79	17.15	21.55	16.02
0.15 to 0.20 m										
M ¹	1.08 ab	0.11 bc	0.48 ab	0.59 a	0.43 a	0.72 a	0.31 a	0.16 b	0.12 a	1.37 ab
MP	1.05 abc	0.13 bc	0.46 cd	0.58 ab	0.41 ab	0.70 a	0.30 a	0.17 b	0.11 a	1.77 a
S	1.05 abc	0.11 bc	0.47 bc	0.58 ab	0.42 ab	0.71 a	0.29 a	0.17 b	0.13 a	1.50 a
P	1.05 abc	0.13 bc	0.46 cd	0.59 a	0.39 ab	0.67 ab	0.31 a	0.20 ab	0.08 a	1.89 a
S-MP	1.01 bc	0.14 b	0.43 e	0.57 ab	0.38 ab	0.65 ab	0.30 a	0.20 ab	0.07 a	1.38 ab
P-MP	1.09 a	0.10 c	0.45 d	0.55 b	0.40 ab	0.72 a	0.29 a	0.15 b	0.10 a	2.02 a
P-P-MP	1.02 abc	0.13 bc	0.47 bcd	0.60 a	0.43 a	0.72 a	0.32 a	0.17 b	0.11 a	1.47 ab
P-S-MP	1.01 c	0.11 bc	0.48 ab	0.59 a	0.45 a	0.75 a	0.34 a	0.15 b	0.11 a	2.07 a
P-P-S-MP	1.09 a	0.11 bc	0.49 a	0.59 a	0.45 a	0.75 a	0.31 a	0.15 b	0.12 a	1.73 a
CE	0.80 d	0.26 a	0.32 f	0.58 ab	0.32 c	0.55 b	0.25 a	0.26 a	0.07 a	0.73 b
C.V. (%) ²	2.65	10.78	1.49	2.31	8.25	7.30	15.83	16.28	35.21	15.99

Mean values followed by the same letter in the column within the same layer do not differ from each other by Tukey's test ($p < 0.05$).

¹M: monoculture maize; MP: monoculture Santa Fé (maize intercropped with Piatã grass); S: monoculture soybean; P: monoculture Piatã grass pasture; S-MP: annual rotation of soybean and Santa Fé; P-MP: annual rotation of Piatã grass pasture and Santa Fé; P-P-MP: pasture for 2 years followed by Santa Fé; P-S-MP: annual rotation of pasture, soybean, and Santa Fé; P-P-S-MP: pasture for 2 years followed by soybean and Santa Fé; CE: native Cerrado vegetation.² ANOVA: C.V. (%) – coefficient of variation.

In general, cropping system diversification (*i.e.*, crop rotation, intercropping, and cover cropping) increases root diversity and nutrient cycling, improving porosity, and plant available water capacity. The management practices evaluated improved soil water infiltration and maintained water in soil pores at adequate levels, resulting in greater resilience of crops to periods of water stress. Water holding capacity and soil structure are fundamental for the sustainability of land ecosystems. Soils under agricultural management exhibited lower TP compared to native Cerrado soil, with more pronounced reductions in Ma. The greatest reduction in Ma was observed in the soybean monoculture system, in the 0.0–0.05 m

layer, reaching 70% compared to the CE. Although the other agricultural treatments showed Ma values above the critical threshold for root growth ($0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), there was an average reduction of 62% compared to CE. Simultaneously, there was an increase in medium-sized pores, associated with PAWC, which can be favorable to water availability to plants (Dexter and Richard, 2009). This increase in medium-sized pores, common in conservationist management systems, may indicate beneficial adaptation for water retention, which favors the yield of crops in environments under water stress.

For cultivated areas, in the 0.0-0.05 m soil layer, only total porosity and penetration resistance were significantly affected by the cropping systems. Soybean monoculture had the lowest total porosity while S-MP had the greatest. Meanwhile, S showed lower PR as compared to MP and S-MP. This highlights the importance of these variables (TP and PR) when assessing soil structure response to management. PR is a more sensitive variable for detecting soil compaction since it reflects the mechanical resistance encountered by roots, while TP offers valuable information regarding soil aeration and infiltration capacity (Lima et al., 2017).

In the 0.15-0.20 m layer, in turn, the maize monoculture (M) and the P-P-S-MP treatment had higher Bd as compared with CE. On the other hand, the S-MP and P-S-MP systems recorded the lowest Ds values, also in comparison to the CE treatment. Although Ma in the S-MP treatment was considerably lower than the CE condition, there were no statistically significant differences among most of the treatments. The greatest increase in microporosity occurred in the P-P-S-MP treatment, which differed from monoculture soybean, but not from monoculture maize. Aeration capacity (AC) under P and S-MP was statistically equal compared with native Cerrado, showing the ability of these systems to maintain soil porosity since the association of crops with these grasses as cover crops helps protect the soil. The roots of these grasses are vigorous, abundant, and deep, which assists in maintaining good soil porosity (Kluthcouski and Aidar, 2003). Meurer et al. (2020) highlight that in the surface layers, the total pore volume is often larger due to greater biological activity and accumulation of organic residues, resulting in a more porous structure favorable to root development and water storage.

Overall, the treatments that included maize intercropped with Piatã grass in rotation with monoculture soybean or maize improved soil physical quality and mitigated compaction. The observed differences between the cropping systems and the Cerrado area are linked to management practices, which, by incorporating crop diversification and cover crops like Piatã grass, enhance soil structure. This approach increases macroporosity without significantly compromising microporosity, promoting a sustainable balance. Crop diversification also fosters beneficial changes in soil structure, contributing to the development of pores and reduced bulk density, as highlighted by Rossetti and Centurion (2018). This interaction between plant and microbial biodiversity emphasizes the importance of conserving native plants to maintain soil quality and ensure agricultural sustainability.

3.1.3 Response of soil bulk density and porosity over time

The results of increases and reductions in soil bulk density and porosity in the period from 2017 (Silva, 2020) to 2020 are presented in Fig. 3. Percentage variations close to 2% were considered negligible, based on the native vegetation (CE), especially for the properties TP, Ma, and Mi. Therefore, variations exceeding this threshold are interpreted as significant, highlighting the treatments S-MP, P-MP, P-P-MP, and P-P-S-MP stood out, promoting increases in macroporosity above 4% over the evaluated period. This increase benefits rainwater infiltration, soil aeration, and root development, thus contributing to the sustainability of agricultural systems (Six et al., 2002; Pires et al., 2019). Among the treatments, the P-P-MP cropping system stood out from the others by reducing soil bulk density in a more pronounced way (1.5%) compared to the reference area. This reduction in Bd over time is associated with greater soil aggregation and structuring, which, as reported by Lal (2004) and Pires et al. (2019), facilitates plant root penetration, water infiltration, and nutrient movement.

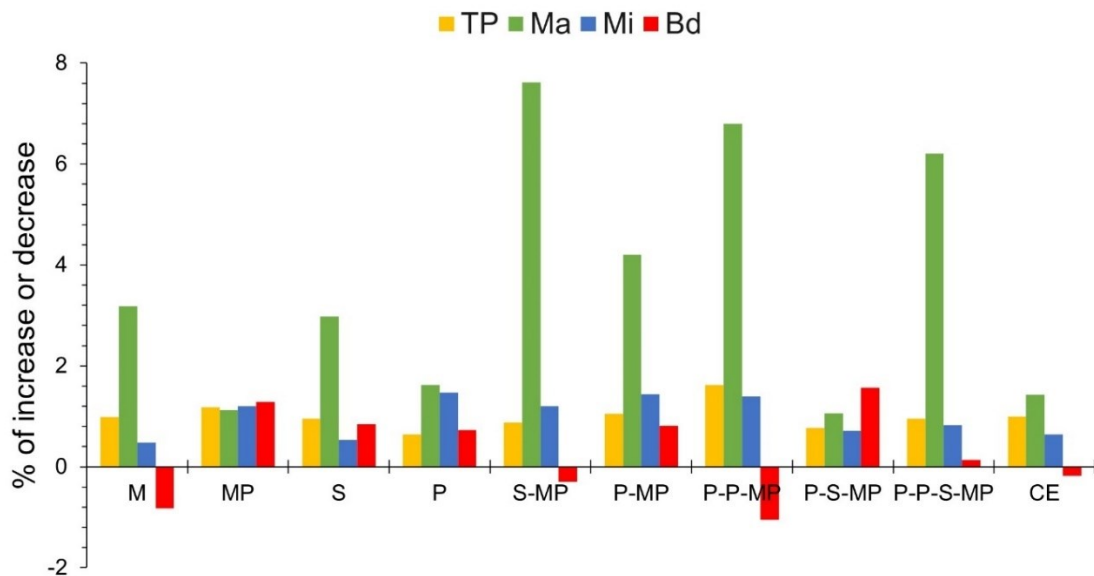


Figure 3. Changes in the values of soil bulk density (Bd), total porosity (TP), macroporosity (Ma), and microporosity (Mi) in the 0.00 to 0.20 m layers in the period from 2017 to 2020. M: monoculture maize; MP: monoculture Santa Fé (maize intercropped with Piatã grass); S: monoculture soybean; P: monoculture Piatã grass pasture; S-MP: annual rotation of soybean and Santa Fé; P-MP: annual rotation of Piatã grass pasture and Santa Fé; P-P-MP: pasture for 2 years followed by Santa Fé; P-S-MP: annual rotation of pasture, soybean, and Santa Fé; P-P-S-MP: pasture for 2 years followed by soybean and Santa Fé; CE: native Cerrado vegetation.

3.2 Chemical soil quality indicators

The effect of cropping systems on chemical soil properties was significant only in the topsoil layer (0-0.05 m). As compared to the native cerrado, most of the treatments had higher pH and base saturation values (Table 3). Better soil chemical conditions under cultivation reflect higher availability of nutrients due to the application of lime, gypsum, and fertilizers. Long-term soybean monoculture (S) also decreased soil organic carbon (OC) by 22% compared to CE. In contrast, long-term cropping system

diversification combined with NT, particularly MP, maintained carbon stocks to levels statistically similar to those found in native vegetation (CE). The lowest value for the carbon stock was observed in the S system, whereas the P-MP, P-S-MP and P-P-S-MP systems proved to be more efficient, with high carbon stocks values, approaching that of the CE.

Table 3. Active acidity in water (pH in water), total organic carbon (OC), cation exchange capacity (CEC), base saturation (V), and carbon stock (Cstock) in the 0-0.05 and 0.15-0.20 m soil layers.

Production system	pH _{H2O}	OC	CEC	V	Cstock
	-	dag/kg	cmolc/dm ³	%	Mg.ha ⁻¹
0.00 to 0.05 m					
M ¹	5.54 ab	2.17 ab	11.07 ab	57.00 a	8.47 abc
MP	5.94 a	2.32 a	11.33 a	64.33 a	9.06 a
S	5.59 ab	1.81 b	10.73 ab	56.67 a	7.05 d
P	5.84 a	2.08 ab	10.70 ab	67.67 a	8.10 abc
S-MP	5.84 a	2.04 ab	11.00 ab	60.67 a	7.97 bcd
P-MP	5.86 a	2.23 ab	8.60 b	59.33 a	8.70 ab
P-P-MP	6.08 a	1.96 ab	9.53 ab	68.00 a	7.64 cd
P-S-MP	5.95 a	2.28 a	10.63 ab	67.67 a	8.90 ab
P-P-S-MP	5.81 a	2.23 ab	11.23 a	61.33 a	8.68 ab
CE	5.02 b	2.32 a	10.80 ab	30.00 b	9.06 a
C.V. (%)²	3.97	7.61	8.18	12.28	7.16
0.15 to 0.20 m					
M	4.68 a	1.74 a	10.90 a	26.00 a	6.97 ab
MP	5.06 a	1.93 a	10.97 a	37.00 a	7.71 ab
S	4.91 a	1.66 a	10.27 a	28.33 a	6.64 b
P	5.20 a	1.73 a	9.13 a	43.33 a	6.92 b
S-MP	5.22 a	1.66 a	9.80 a	37.66 a	6.64 b
P-MP	5.12 a	1.80 a	10.47 a	41.67 a	7.21 ab
P-P-MP	5.16 a	1.67 a	10.10 a	39.33 a	6.68 b
P-S-MP	4.97 a	1.78 a	10.80 a	38.67 a	7.12 ab
P-P-S-MP	5.14 a	1.97 a	11.03 a	38.00 a	7.88 ab
CE	4.77 a	2.08 a	10.67 a	25.33 a	8.32 a
C.V. (%)²	6.84	12.42	10.10	22.23	11.00

Mean values followed by the same letter in the column do not differ from each other by the t-test (LSD) ($p \leq 0.05$).

¹ M: monoculture maize; MP: monoculture Santa Fé (maize intercropped with Piatã grass); S: monoculture soybean; P: monoculture Piatã grass pasture; S-MP: annual rotation of soybean and Santa Fé; P-MP: annual rotation of Piatã grass pasture and Santa Fé; P-P-MP: pasture for 2 years followed by Santa Fé; P-S-MP: annual rotation of pasture, soybean, and Santa Fé; P-P-S-MP: pasture for 2 years followed by soybean and Santa Fé; CE: native Cerrado vegetation.

²ANOVA: C.V. (%) – Coefficient of variation.

Crop rotation practices and grain and forage are effective strategies for maintaining or increasing soil carbon levels, especially in the surface layer. Diversified cropping systems, such as MP, proved to be better than soybean monoculture regarding chemical properties. Recent studies have shown the positive impact of combining cropping system diversification with NT on soil health, carbon stocks, and greenhouse gas mitigation in the Cerrado biome (Carvalho et al., 2023; Ribeiro et al., 2023). Our results

reinforce these findings, as carbon stock under diversified systems were up to 2 Mg ha⁻¹ higher than under S.

Costa et al. (2020) found increases in carbon content and carbon stocks in areas under no-till, especially in the soil surface layer (up to 10 cm), with increases greater than 1 Mg ha⁻¹. These findings corroborate the data of the present study, which also showed higher carbon stocks in the surface layer in rotation systems compared to native Cerrado. The lower carbon stock observed in the surface layer of the native Cerrado can be partially explained by its ecological equilibrium, where the decomposition of organic matter is balanced by its production. Furthermore, diversified agroecosystems under long-term no-till management and with high biomass input, often enhanced by the use of nitrogen fertilizers, tend to increase carbon stocks significantly. Nitrogen plays a key role in improving carbon accumulation, as carbon and nitrogen cycles are closely related in the soil. Additionally, the higher carbon stocks in the rotation systems analyzed are associated with their higher clay content. Clay particles help protect organic matter from rapid decomposition, further contributing to carbon retention (Zinn et al., 2007). Analysis limited to the surface layers does not allow conclusions to be drawn on how carbon responds in deeper layers, which could show a different carbon distribution. The above-ground biomass, which significantly contributes to the carbon cycle, is not directly accounted for in the soil surface carbon stock.

The rotation systems together with the practice of integrating grains and forages proved to be effective in maintaining and even increasing carbon stocks. The diversity of the crops, including soybean and pasture in different sequences, favors the addition of varied organic matter to the soil, improving soil biodiversity and promoting more efficient nutrient cycles. The monoculture MP system stood out with the best results in terms of carbon stock. Organic carbon plays a crucial role in improving soil structure, forming stable aggregates, and promoting ecosystem health (Lal, 2004; Six et al., 2002). The practice of integrating grains and forages between crop seasons allows the continuous addition of organic residues to the soil, improving soil structure and promoting microbial activity. The forage grasses used in the Santa Fé system have vigorous roots that contribute to the formation of stable aggregates in the soil, increasing carbon retaining capacity, as highlighted by the authors.

3.3 Integrated evaluation of soil quality

Diversified cropping systems, such as those that include pasture integration (MP, P-P-MP, P-S-MP), exhibited better soil physical quality indicators compared to the system M. These systems showed higher values of TP, AC, and PAWC compared to M (Fig. 4).

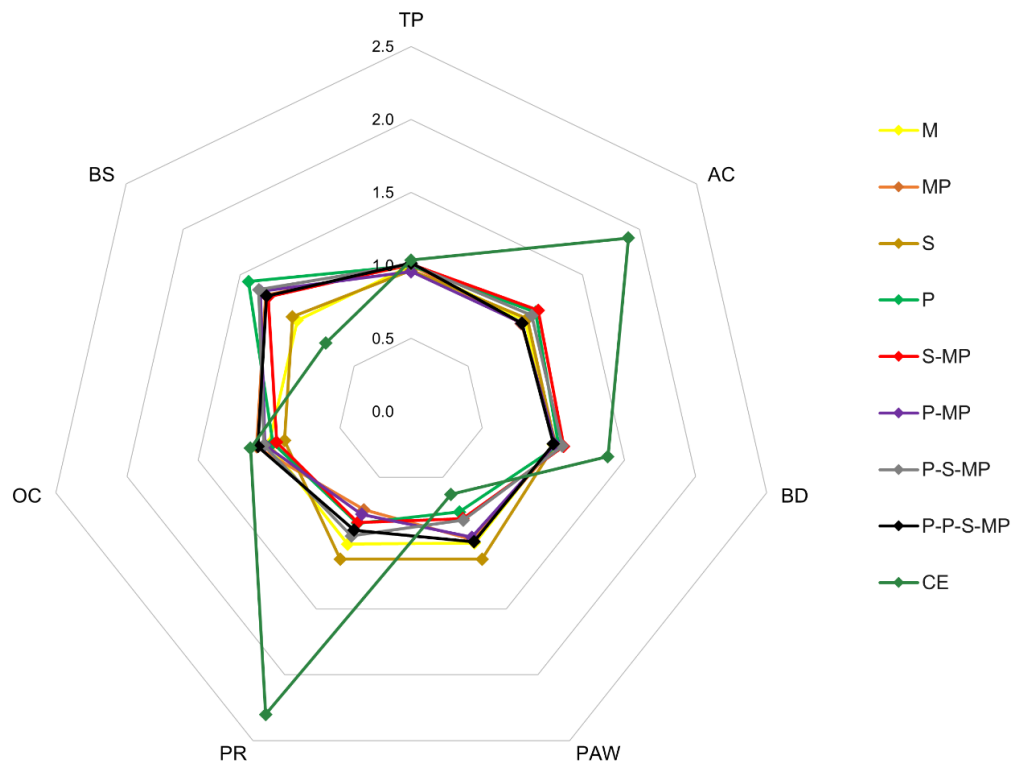


Figure 4. Soil quality indicators in the 0.00 to 0.20 m soil layers.

M: monoculture maize; MP: monoculture Santa Fé (maize intercropped with Piatã grass); S: monoculture soybean; P: monoculture Piatã grass pasture; S-MP: annual rotation of soybean and Santa Fé; P-MP: annual rotation of Piatã grass pasture and Santa Fé; P-P-MP: pasture for 2 years followed by Santa Fé; P-S-MP: annual rotation of pasture, soybean, and Santa Fé; P-P-S-MP: pasture for 2 years followed by soybean and Santa Fé; CE: native Cerrado vegetation. Properties: TP: total porosity; AC: aeration capacity; BD: soil bulk density; PAWC: plant available water capacity; PR: penetration resistance; OC: organic carbon; BS: base saturation.

Involving MP cropping in rotation with soybean or pasture were essential for improving soil physical quality over time. Adoption of these management practices led to positive changes in soil properties such as soil bulk BD and TP, but also in other physical quality indexes, such as AC, and PAWC. Crop rotation, in integration with pasture, significantly contributed to Bd decrease and organic matter increase. These effects underscore the importance of diversifying soil use to improve soil structure, increase water retention, and consequently ensure greater sustainability and resilience of production systems, especially in regions with a high risk of water deficit.

Compared to monoculture maize (M), more diversified cropping systems that involve crop rotation and integrated pasture, such as MP and the soybean, maize, and pasture sequences (P-P-MP), improved soil physical quality indexes. In addition to improving soil structure, these systems improved soil water holding capacity, a crucial factor for agricultural sustainability in drought-prone regions. Therefore, these results show the need to implement management practices that not only increase yield in the short term, but also promote conservation and continuous improvement in soil physical quality, aiming at longevity of the agricultural systems.

The S-MP and P-P-MP systems proved to be most effective in improving soil physical quality. These systems exceeded the reference values (M) in nearly all parameters, indicating that agricultural practices that integrate rotation and diversification are essential for recovering and maintaining soil quality in agricultural systems. These results underscore the importance of sustainable agricultural practices that promote crop rotation and integrated pasture. Such practices not only mitigate the negative impacts of continuous monoculture, but also improve soil physical quality, increasing long term soil resilience and yield.

3.4 Yield of cropping systems

The integrated cropping systems improved efficiency by enhancing land use and maximizing the production of soybean, maize, and Piatã grass while maintaining the sustainability of agricultural systems. The MP system had the highest weighted relative yield (118.6%) and relative maize yield of 100%, indicating that intercropping maize and forage is highly effective in optimizing land use, taking maximum advantage of available resources, without compromising the individual yield of the maize (Fig. 5). Santos et al. (2018) also observed that integrating maize with forages can increase agronomic yield and lead to more sustainable agricultural systems. In addition, crop rotation, as in the S-MP system, also yielded good results, with a weighted relative yield of 110.2%, confirming the benefits of rotation on maize and soybean productivity (Bowles et al., 2020).

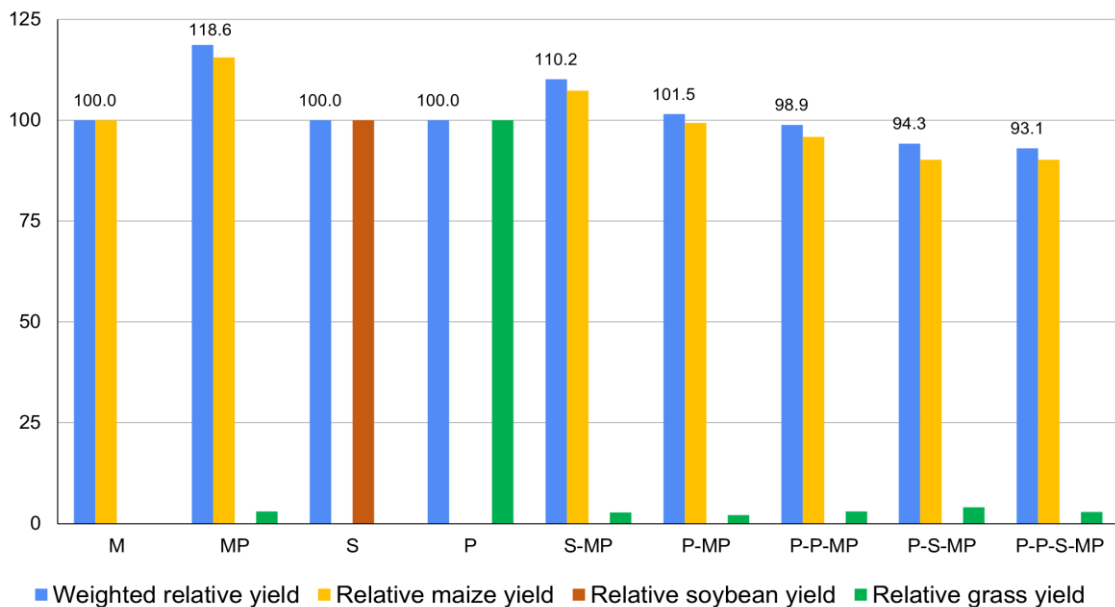


Figure 5. Weighted relative yield (R-Yield) and relative yield for soybean, maize, and grass crops in the cropping systems for integrated production.

M: monoculture maize; MP: monoculture Santa Fé (maize intercropped with Piatã grass); S: monoculture soybean; P: monoculture Piatã grass pasture; S-MP: annual rotation of soybean and Santa Fé; P-MP: annual rotation of Piatã grass pasture and Santa Fé; P-P-MP: pasture for 2 years followed by Santa Fé; P-S-MP: annual rotation of pasture, soybean, and Santa Fé; P-P-S-MP: pasture for 2 years followed by soybean and Santa Fé; CE: native Cerrado vegetation.

²ANOVA: C.V. (%) – Coefficient of variation

More diversified agricultural systems (e.g., P-S-MP and P-P-S-MP) involving multiple years of pasture followed by grain cropping showed a slight reduction in weighted relative yield. This can be attributed to the longer time necessary for the establishment and recovery of the grain crops after prolonged pasture use, suggesting the need for adjustments in management practices to optimize the performance of these systems. Although there was this reduction, the intercropping and crop rotation systems still showed clear benefits, not only for agricultural yield but also for the sustainability of land use. The lower grass productivity was attributed to the forage being harvested during the maize harvest period, without considering the biomass accumulated after the desiccation period.

3.5 Principal component analysis

The principal component analysis (PCA) indicates that soil organic matter (SOM), cation exchange capacity (CEC), and carbon stock (Cstock) are the main differentiators of the management systems, while water properties were associated with the second component (Fig. 6). The first two principal components (PC1 and PC2) explained 69.1% of the total data variation, with PC1 primarily associated with soil pore-size distribution (macro- and microporosity) and fertility indicators (base saturation), while PC2 was related to cation exchange capacity and soil organic matter. Notably, the native Cerrado vegetation (CE) was distinct from the management systems, emphasizing the importance of preserving native vegetation as a reference for natural soil quality.

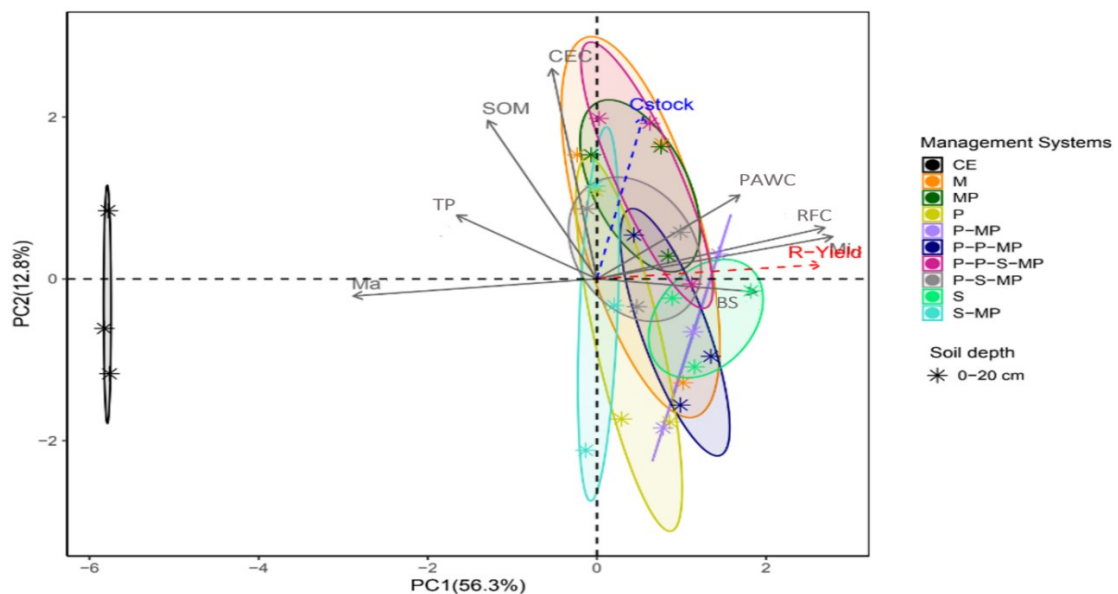


Figure 6. Principal component analysis (PCA) of soil properties at a 0.0-0.20 m depth under different production systems.

M: monoculture maize; MP: monoculture Santa Fé (maize intercropped with Piatã grass); S: monoculture soybean; P: monoculture Piatã grass pasture; S-MP: annual rotation of soybean and Santa Fé; P-MP: annual rotation of Piatã grass pasture and Santa Fé; P-P-MP: pasture for 2 years followed by Santa Fé; P-S-MP: annual rotation of pasture, soybean, and Santa Fé; P-P-S-MP: pasture for 2 years followed by soybean and Santa Fé; CE: native Cerrado vegetation. Properties: TP – total porosity, Ma - macroporosity, Mi - microporosity, RFC – relative field capacity, PAWC – plant available water capacity, SOM – soil organic matter, CEC – cation exchange capacity, BS – base saturation, R-Yield – weighted relative yield of the system, Cstock – carbon stock, PC1 and PC2 projections.

The crop rotation systems, especially those involving soybean and Piatã grass (S, S-MP, P-S-MP, P-P-S-MP), formed a relatively cohesive group in the biplot, suggesting that crop integration offers intermediate soil properties compared to monoculture systems. These systems were linked to increases in SOM and CEC, highlighting the potential benefits of rotation and intercropping in improving soil fertility. In contrast, systems involving pasture, such as P and P-MP, showed positive associations with water retention properties, suggesting that pasture management, whether in monoculture or rotation, enhances soil's ability to retain water, which is critical for areas with water variability.

Weighted relative yield (R-Yield) was strongly associated with soil water-related properties, such as PAWC and RFC. While there was also an association with soil chemical and organic properties, such as SOM, CEC, and Cstock, this reinforces the idea that improving soil quality through better management practices not only enhances productivity but also promotes sustainability. The positive relationship between R-Yield and carbon stock suggests that systems with higher yields also contribute to carbon sequestration, aligning with findings from other studies (Serafim et al., 2019) that show the benefits of sustainable practices like intercropping in increasing both soil quality and crop yields. However, while this correlation is noteworthy, further investigation is needed to fully understand the underlying mechanisms and the long-term impact of different management systems on carbon sequestration in relation to crop productivity. These results emphasize the importance of soil management strategies that enhance fertility, water retention, and carbon sequestration for long-term agricultural sustainability. Similarly, Oliveira et al. (2024) concluded that integrated systems improve overall soil health in the Brazilian Cerrado, with positive effects on chemical and biological indicators in most studies analyzed, further supporting the findings of this study.

4 CONCLUSION

Diversifying the cropping system under no-till significantly improved soil organic carbon stocks and enhanced soil physical properties in the surface layer. The inclusion of Piatã grass intercropped with maize had positive effects on yield and soil quality compared to the maize crop in monoculture. Two years of pastures (Piatã grass) followed by maize (P-P-MP) also lightly increased agricultural production, which reflected the higher organic carbon input and better soil structure under that system. In contrast, long-term NT monoculture soybean showed the lowest soil quality index compared to the other production systems.

Clayey soils, such as those found in the Brazilian Cerrado, challenge sustainable agriculture practices, such as long-term NT, due to their high susceptibility to compaction. However, our assessment proved that combining NT with cropping system diversification including grasses and pasture has great potential for overcoming that challenge. For instance, those systems improved soil structure (mitigated soil compaction under NT), consequently improving soil physical properties (*e.g.*, porosity) and

processes (e.g., water retention) leading to higher crop productivity in the long term. Adopting those systems also increased soil organic carbon stocks. Therefore, promoting management strategies that include crop rotation, diversification, and the integration of agricultural systems, is paramount to achieve sustainability and yield stability in that tropical agricultural environment.

This study reinforces the importance of tailoring agricultural strategies to specific soil conditions, such as those of the Cerrado, emphasizing integrated crop-pasture rotations, the selection of suitable plant species, and practices that enhance soil organic matter. These strategies are essential for balancing yield improvement with environmental sustainability in agro-ecosystems.

Acknowledgements

We acknowledge the financial support of Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa Milho e Sorgo), Coordination of Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) and Foundation for Research Support of the State of Minas Gerais (FAPEMIG) process APQ-01173-24. BMS also thank CNPq for grants number 311743/2021-8.

REFERENCES

- Ajayi, A.E., Dias Junior, M.S., Curi, N., Okunola, A., Souza, T.T.T., Pires, B.S., 2010. Assessment of Vulnerability of Oxisols to Compaction in the Cerrado Region of Brazil. *Pedosphere* 20, 252–260. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60013-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60013-6)
- Bettiol, W., Silva, C. A., Cerri, C. E. P., Martin Neto, L., Andrade, C. A. de. Understanding soil organic matter in tropical and subtropical environments. – *Portal Embrapa* [WWW Document], n.d. URL <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1153147/entendendo-a-materia-organica-do-solo-em-ambientes-tropical-e-subtropical> (accessed 12.27.24).
- Bharti, V., Scientist, S., Saha, I.A., Author, I.C., Saha, A., 2021. Role of cover crops and crop residues in conservation agriculture: A review. ~ 1445 ~ *The Pharma Innovation Journal*.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 2018. Bulk Density. *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods* 363–375. <https://doi.org/10.2136/SSSABOOKSER5.1.2ED.C13>
- Blanco-Canqui, H., Ruis, S.J., 2020. Cover crop impacts on soil physical properties: A review. *Soil Science Society of America Journal* 84, 1527–1576. <https://doi.org/10.1002/SAJ2.20129>
- Bowles, T.M., Mooshammer, M., Socolar, Y., Calderón, F., Cavigelli, M.A., Culman, S.W., Deen, W., Drury, C.F., Garcia y Garcia, A., Gaudin, A.C.M., Harkcom, W.S., Lehman, R.M., Osborne, S.L., Robertson, G.P., Salerno, J., Schmer, M.R., Strock, J., Grandy, A.S., 2020. Long-Term Evidence Shows that Crop-Rotation Diversification Increases Agricultural Resilience to Adverse Growing Conditions in North America. *One Earth* 2, 284–293. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2020.02.007>
- Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3–22. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2004.03.005>
- Carlos, J., Júnior, M., Luiz, J., Torres, R., Denner De Almeida Costa, D., Rodrigues E Silva, V., Menezes De Souza, Z., Lemes, E.M., 2019. Production and Decomposition of Cover Crop Residues and Associations With Soil Organic Fractions. *Journal of Agricultural Science* 11, p58. <https://doi.org/10.5539/JAS.V11N5P58>

- Carvalho, A.M., de Jesus, D.R., de Sousa, T.R., Ramos, M.L.G., de Figueiredo, C.C., de Oliveira, A.D., Marchão, R.L., Ribeiro, F.P., Dantas, R. de A., Borges, L. de A.B., 2023. Soil Carbon Stocks and Greenhouse Gas Mitigation of Agriculture in the Brazilian Cerrado—A Review. *Plants* 2023, Vol. 12, Page 2449 12, 2449. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12132449>
- Carvalho, J.L.N., Cerri, C.E.P., Feigl, B.J., Piccolo, M.C., Godinho, V.P., Cerri, C.C., 2009. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. *Soil Tillage Res* 103, 342–349. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2008.10.022>
- Cavaliere-Polizeli, K.M.V., Marcolino, F.C., Tormena, C.A., Keller, T., Moraes, A. de, 2022. Soil Structural Quality and Relationships With Root Properties in Single and Integrated Farming Systems. *Front Environ Sci* 10, 901302. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2022.901302/BIBTEX>
- Collier, L.S., Arruda, E.M., Campos, L.F.C., Nunes, J.N.V., 2018. SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES AND CORN PRODUCTIVITY GROWN ON LEGUME STUBBLE IN AGROFORESTRY SYSTEMS. *Revista Caatinga* 31, 279–289. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018V31N203RC>
- Correia, N.M., Gomes, L.J.P., 2016. Soybean oversowing with *Urochloa brizantha* and *Panicum maximum* and the straw formation in a no-tillage system.. *Semin Cienc Agrar* 37, 1209–1218. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n3p1209>
- Costa, A.A., Dias, B. de O., Fraga, V. da S., Santana, C.C., da Silva, N., 2020. Carbon and nitrogen stocks in soils under different forms of use in the Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 24, 528–533. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V24N8P528-533>
- de Lima, R.P., da Silva, A.P., Giarola, N.F.B., da Silva, A.R., Rolim, M.M., 2017. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosyst Eng* 162, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2017.07.002>
- Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201–214. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2003.09.004>
- Dexter, A.R., Richard, G., 2009. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. *Soil Tillage Res* 103, 113–118. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2008.10.001>
- Ferreira, D.F., 2019. SISVAR: A COMPUTER ANALYSIS SYSTEM TO FIXED EFFECTS SPLIT PLOT TYPE DESIGNS. *Brazilian Journal of Biometrics* 37, 529–535. <https://doi.org/10.28951/RBB.V37I4.450>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Save and grow A policymaker’s guide to the sustainable intensification of smallholder crop production FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS Rome, 2011.
- Fuentes-Llanillo, R., Telles, T.S., Soares Junior, D., de Melo, T.R., Friedrich, T., Kassam, A., 2021. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. *Soil Tillage Res* 208, 104877. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2020.104877>
- Gagna, C.P., Guedes Filho, O., Paschoal, M.C.G., Mazzini-Guedes, R.B., Siqueira, G.M., 2023. Soil structural quality and development of second-crop corn intercropping with forage grasses under no-tillage. *Bragantia* 82, e20230110. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20230110>
- Klute, A., 2018. Water Retention: Laboratory Methods. *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods* 635–662. <https://doi.org/10.2136/SSSABOOKSER5.1.2ED.C26>
- Kluthcouski, J., Cobucci, T., Aidar, H., Pacheco Yokoyama, L., Pereira De Oliveira, I., Luiz Da Silva Costa, J., Geraldo Da Silva, J., Vilela, L., De Oliveira Barcellos, A., De, C., Magnabosco, U., 2014. Santa Fé System – Embrapa Technology: Crop-Livestock Integration through Intercropping of Annual Crops with Forage Species in Agricultural Areas under No-Till and Conventional Systems. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 28 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Technical Circular, 38).
- Kluthcouski, J., Aidar, H. Implementation, management, and results obtained with the Santa Fé system. In: Kluthcouski, J., Stone, L.F., Aidar, H. (Eds.), 2003. *Crop-Livestock Integration*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, pp. 407-441.
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* (1979) 304, 1623–1627. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1097396/SUPPL_FILE/LAL.SOM.PDF
- Lal, R., 2020. Soil organic matter and water retention. *Agron J* 112, 3265–3277. <https://doi.org/10.1002/AGJ2.20282>

- Lal, R.; Shukla, M.; Snapp, S. S., 2019. PRINCIPLES OF SOIL PHYSICS. Boca Raton: CRC Press.
- Meurer, K., Barron, J., Chenu, C., Coucheney, E., Fielding, M., Hallett, P., Herrmann, A.M., Keller, T., Koestel, J., Larsbo, M., Lewan, E., Or, D., Parsons, D., Parvin, N., Taylor, A., Vereecken, H., Jarvis, N., 2020. A framework for modelling soil structure dynamics induced by biological activity. *Glob Chang Biol* 26, 5382–5403. <https://doi.org/10.1111/GCB.15289>
- Minasny, B., Mcbratney, A. B., 2018. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *Eur J Soil Sci* 69, 39–47. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>
- Mirzavand, J., Asadi-Rahmani, H., Moradi-Talebbeigi, R., 2020. Archives of Agronomy and Soil Science Biological indicators of soil quality under conventional, reduced, and no-tillage systems. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1832656>
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour Res* 12, 513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012I003P00513>
- Nunes, M.R., Karlen, D.L., Denardin, J.E., Cambardella, C.A., 2019. Corn root and soil health indicator response to no-till production practices. *Agric Ecosyst Environ* 285, 106607. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2019.106607>
- Nunes, M.R., Karlen, D.L., Moorman, T.B., Cambardella, C.A., 2020. How does tillage intensity affect chemical soil health indicators? A United States meta-analysis. *Agrosystems, Geosciences & Environment* 3, e20083. <https://doi.org/10.1002/AGG2.20083>
- Oliveira, D.M.S., Santos, R.S., Chizzotti, F.H.M., Bretas, I.L., Franco, A.L.C., Lima, R.P., Freitas, D.A.F., Cherubin, M.R., Cerri, C.E.P., 2024. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review. *Geoderma Regional* 37, e00796. <https://doi.org/10.1016/J.GEODRS.2024.E00796>
- Oliveira, V.A., Santos, G.G., Ker, J.C., Couto, E.G., Jacomine (in memoriam), P.K., Corrêa, G.R., Curi, N., Schaefer, C.E.G.R., 2023. Soils of Cerrados, the Brazilian Savannas 129–173. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19949-3_5
- Peixoto, D.S., Silva, B.M., de Oliveira, G.C., Moreira, S.G., da Silva, F., Curi, N., 2019a. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil Tillage Res* 194, 104307. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2019.104307>
- Peixoto, D.S., Montoani Silva, B., Henrique Godinho Silva, S., Karlen, D.L., Guimarães Moreira, S., Alvarenga Pereira da Silva, A., Vilela de Resende, Á., Darrell Norton, L., Curi, Nilton, Peixoto, D., Silva, B., Silva, S., Curi, N., Karlen, D., Moreira, S., Silva, A., Resende, A., 2019b. Diagnosing, Ameliorating, and Monitoring Soil Compaction in No-Till Brazilian Soils. *Agrosystems, Geosciences & Environment* 2, 1–14. <https://doi.org/10.2134/AGE2018.09.0035>
- Pires, L.F., Roque, W.L., Rosa, J.A., Mooney, S.J., 2019. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography. *Soil Tillage Res* 191, 197–206. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2019.02.018>
- R Core Team, 2019. R: a language and environment for statistical computing [WWW Document], n.d. URL <https://www.gbif.org/tool/81287/r-a-language-and-environment-for-statistical-computing> (accessed 1.30.25).
- Rahman, M.A., 2021. Cover Crops' Effect on Soil Quality and Soil Health. *Cover Crops and Sustainable Agriculture* 124–146. <https://doi.org/10.1201/9781003187301-9>
- Reichert, J.M., da Rosa, V.T., Vogelmann, E.S., da Rosa, D.P., Horn, R., Reinert, D.J., Sattler, A., Denardin, J.E., 2016. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil Tillage Res* 158, 123–136. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2015.11.010>
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152, 252–263. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2009.06.009>
- Ribeiro, D.O., Gonçalves, G.R., Rubio, G.O., Castoldi, G., Vendruscolo, E.P., de Souza, Z.H., 2023. Carbon stocks and lability in land use and management systems in southwestern Goiás, Brazil. *Pesqui Agropecu Trop* 53, e74416. <https://doi.org/10.1590/1983-40632023V5374416>

- Rossetti, K. de V., Centurion, J.F., 2018. USE OF S-INDEX AS A STRUCTURAL QUALITY INDICATOR FOR COMPACTED LATOSOLS CULTIVATED WITH MAIZE. *Revista Caatinga* 31, 455–465. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018V31N222RC>
- Santos, D. de C., Guimarães Júnior, R., Vilela, L., Pulrolnik, K., Bufon, V.B., França, A.F. de S., 2016. Forage dry mass accumulation and structural characteristics of Piatã grass in silvopastoral systems in the Brazilian savannah. *Agric Ecosyst Environ* 233, 16–24. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2016.08.026>
- Santos, H.G. dos, Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C. dos, Oliveira, V.A. de, Lumbreras, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A. de, Araujo Filho, J.C. de, Oliveira, J.B. de, Cunha, T.J.F., 2018. *Sistema Brasileiro de Ciência do Solo* 355.
- Santos, P.R.A. dos, Chioderoli, C.A., Silva, A.O. da, Nicolau, F.E. de A., Lopes, J.E.L., Amorim, M.Q., Mendonça, C. de A., 2018. Physical Attributes of the Soil and Maize Productivity Under an Intercrop System. *Journal of Agricultural Science* 10, p358. <https://doi.org/10.5539/JAS.V10N12P358>
- Sena, C.C.R., Silva, G.C. da, Evangelista, Z.R., Nunes, M.E., Pego, A.W.E., 2021. Physical-water attributes of Cerrado soils. *Agrotechnology Magazine - Agrotec* 12, 80–91.
- Serafim, M.E., Mendes, I.C., Wu, J., Ono, F.B., Zancanaro, L., Valendorff, J.D.P., Zeviani, W.M., Pierangeli, M.A.P., Fan, M., Lal, R., 2023. Soil physicochemical and biological properties in soybean areas under no-till Systems in the Brazilian Cerrado. *Science of The Total Environment* 862, 160674. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.160674>
- Serafim, M.E., Zeviani, W.M., Ono, F.B., Neves, L.G., Silva, B.M., Lal, R., 2019. Reference values and soil quality in areas of high soybean yield in Cerrado region, Brazil. *Soil Tillage Res* 195, 104362. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2019.104362>
- Severiano, E.D.C., César De Oliveira, G., Junior, M.D.S.D., Curi, N., Costa, K.A.D.P., Carducci, C.E., 2013. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. *Soil Research* 51, 193–202. <https://doi.org/10.1071/SR12366>
- Shaheb, R., Venkatesh, R., Shearer, S.A., n.d. A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production 1, 3. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>
- Shrestha, J. I. B. A. N., Subedi, S. U. B. A. S. H., Timsina, K. P., Chaudhary, A., Kandel, M., & Tripathi, S., 2020. Conservation agriculture as an approach towards sustainable crop production: A Review. *Farming & Management* 5. <https://doi.org/10.31830/2456-8724.2020.002>
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D., Curi, N., 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil Tillage Res* 154, 103–113. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2015.06.013>
- Silva, C.T.R., Bonfim-Silva, E.M., José De Araújo Da Silva, T., Alves, E., Pinheiro, R., Vieira José, J., Pereira, A., Ferraz, F., n.d., 2020. Yield Component Responses of the *Brachiaria brizantha* Forage Grass to Soil Water Availability in the Brazilian Cerrado. *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/agriculture10010013>
- Silva, J.F. da, 2020. Soil physics and organic matter in agricultural production systems of the Cerrado. <https://doi.org/10.17616/R31N39>
- Silva, L. de C.M. da, Peixoto, D.S., Gomes, J.B.V., Avanzi, J.C., Amorim, R.S.S., Borghi, E., Resende, Á.V. de, Silva, B.M., Mancini, M., Curi, N., 2022. Mineralogy and pore size distribution of clayey Oxisols with granular structure and the effect of management systems. *Soil Tillage Res* 223, 105479. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2022.105479>
- Sisti, C.P.J., Dos Santos, H.P., Kohhann, R., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M., 2004. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Tillage Res* 76, 39–58. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2003.08.007>
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S.M., De Moraes Sa, J.C., Albrecht, A., 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie* 22, 755–775. <https://doi.org/10.1051/AGRO:2002043>
- Sodré-Filho, J., Marchão, R.L., Carmona, R., de Carvalho, A.M., 2021. Intercropping sorghum and grasses during off-season in Brazilian Cerrado. *Sci Agric* 79, e20200284. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0284>
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to soil taxonomy. *Usda* 12, 410. <https://doi.org/10.1109/TIP.2005.854494>

- Souza, V.S., da Silva Vanolli, B., Schiebelbein, B.E., de Souza Bortolo, L., Carvalho, M.L., Mendes, I.C., Cherubin, M.R., 2024. Cover Crops and Soil Health in Brazilian Agricultural Systems. *Soil Health Series: Volume 3 Soil Health and Sustainable Agriculture in Brazil* 3, 103–144. <https://doi.org/10.1002/9780891187448.CH4>
- Teixeira, P.C., Donagemma, G. K., Fontana, A., Teixeira, W.G., 2017. *Manual of Soil Analysis Methods*. - Embrapa Portal [WWW Document], n.d. URL <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo> (accessed 10.27.24).
- Tisdall, J.M., 2020. Formation of Soil Aggregates and Accumulation of Soil Organic Matter. *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils* 57–96. <https://doi.org/10.1201/9781003075561-5>
- Valani, G.P., Vezzani, F.M., Cavalieri-Polizeli, K.M.V., 2020. Soil quality: Evaluation of on-farm assessments in relation to analytical index. *Soil Tillage Res* 198, 104565. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2019.104565>
- van Genuchten, M.Th., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892–898. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1980.03615995004400050002X>
- Verhulst, N., Govaerts, B., Verachtert, E., Castellanos-Navarrete, A., Mezzalama, M., Wall, P.C., Chocobar, A., Deckers, J., Sayre, K.D., 2010. Conservation Agriculture, Improving Soil Quality for Sustainable Production Systems? *Food Security and Soil Quality* 137–208. <https://doi.org/10.1201/EBK1439800577-7>
- Voltr, V., Menšík, L., Hlisenkovský, L., Hruška, M., Pokorný, E., Pospíšilová, L., 2021. The soil organic matter in connection with soil properties and soil inputs. *Agronomy* 11, 779. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11040779/S1>
- Zinn, Y.L., Lal, R., Bigham, J.M., Resck, D.V.S., 2007. Edaphic Controls on Soil Organic Carbon Retention in the Brazilian Cerrado: Texture and Mineralogy. *Soil Science Society of America Journal* 71, 1204–1214. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2006.0014>

Supplementary material

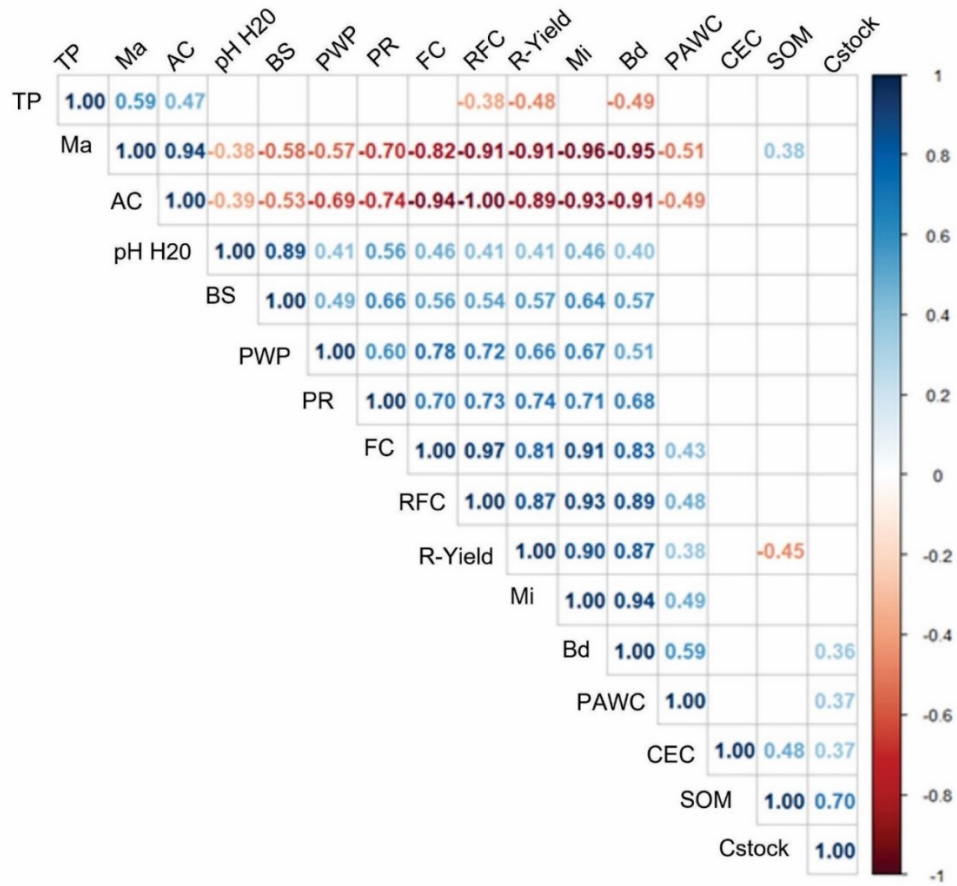


Figure A1. Significant linear correlations ($p < 0.05$) between weighted relative plant yield, carbon stocks, and soil properties for the 0-0.2 m soil layer across all the production systems and native vegetation area.

Eigenvalues and Eigenvectors

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14
Eigenvalues and Variance %;														
Eigenvalue	7.89	1.80	1.62	1.21	0.70	0.27	0.23	0.17	0.06	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00
Variance %	56.35	12.83	11.59	8.63	5.00	1.95	1.64	1.20	0.46	0.20	0.14	0.00	0.00	0.00
Accumulated variance %	56.35	69.18	80.77	89.40	94.41	96.36	97.99	99.20	99.66	99.86	100.00	100.00	100.00	100.00
Eigenvectors														
TP	0.15	-0.42	-0.36	0.12	-0.60	-0.19	0.13	-0.33	-0.03	0.08	0.14	0.08	0.00	0.32
Mi	-0.34	0.05	-0.06	0.04	-0.11	0.25	-0.05	-0.35	-0.03	-0.24	0.47	0.03	-0.49	-0.41
Ma	0.34	-0.16	-0.06	0.00	-0.09	-0.27	0.08	0.20	0.02	0.23	-0.36	0.00	-0.57	-0.48
FC	-0.33	-0.02	-0.21	0.14	-0.19	-0.11	0.18	0.20	0.10	0.28	0.13	-0.42	0.44	-0.47
PWP	-0.25	-0.28	-0.12	0.52	0.09	0.01	0.13	0.12	0.05	-0.61	-0.40	0.00	0.00	0.00
AC	0.34	-0.12	0.07	-0.09	-0.04	0.03	-0.11	-0.29	-0.10	-0.23	-0.07	0.41	0.50	-0.53
RFC	-0.34	0.08	-0.11	0.11	-0.02	-0.06	0.14	0.31	0.11	0.26	0.07	0.81	0.00	0.00
Bd	-0.33	0.15	0.03	-0.08	-0.04	0.13	0.28	-0.39	-0.54	0.25	-0.50	0.01	0.00	0.00
PAWC	-0.17	0.38	-0.07	-0.52	-0.46	-0.27	0.01	0.11	0.18	-0.42	-0.21	0.00	0.00	0.00
PR	-0.29	-0.15	-0.06	-0.09	0.41	-0.74	-0.27	-0.30	-0.02	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00
pH H2O	-0.20	-0.51	0.08	-0.35	-0.11	0.09	-0.27	0.44	-0.52	-0.08	0.10	0.00	0.00	0.00
SOM	0.12	-0.14	-0.52	-0.42	0.43	0.12	0.53	0.03	0.01	-0.13	0.12	0.00	0.00	0.00
CEC	0.04	0.22	-0.70	0.07	0.05	0.21	-0.59	0.02	-0.08	0.09	-0.20	0.00	0.00	0.00
BS	-0.25	-0.42	0.09	-0.30	0.01	0.33	-0.16	-0.21	0.59	0.20	-0.30	0.00	0.00	0.00

Figure A2. Explained variance and eigenvalue and eigenvector data of fourteen principal components carried out with all physical and chemical variables of soil from the 0-20 cm layer.

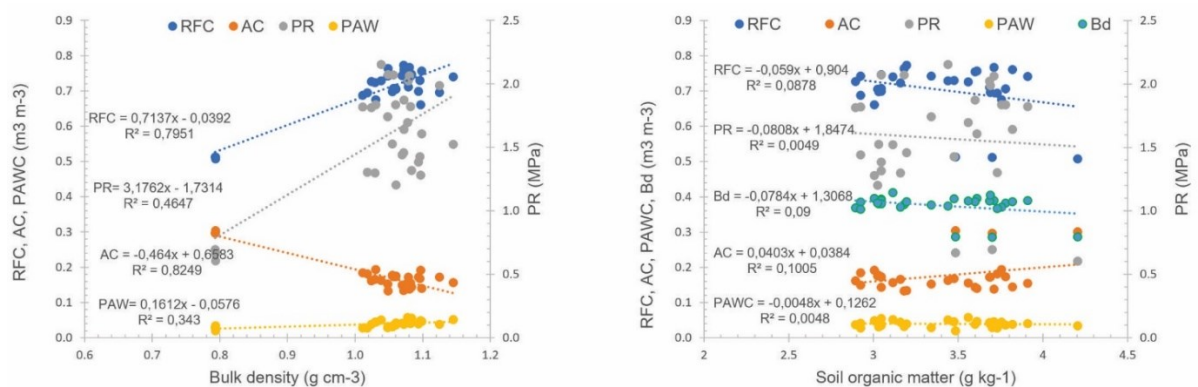


Figure A3. Relationships among indicators of air availability (AC), water availability (PAWC), balance between water and air availability (RFC), and mechanical resistance of the soil (PR) with soil bulk density and soil organic matter for the 0-20 cm layer.

Artigo 2 - Elaborado conforme a norma NBR 6022	
Título do artigo:	Estratégias de descompactação do solo em plantio direto: efeitos de plantas de cobertura e subsolagem na estrutura do solo, carbono orgânico e produtividade de grãos
Autores:	Gilmar Gonçalves Oliveira Dayane Saturnino de Santana Mateus Freitas Silva Eduardo Medeiros Severo Devison Souza Peixoto Antônio Henrique Fonseca de Carvalho Diego Tassinari Silvino Guimarães Moreira Felipe Schwerz Bruno Montoani Silva



ARTIGO 2 - ESTRATÉGIAS DE DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO EM PLANTIO DIRETO: EFEITOS DE PLANTAS DE COBERTURA E SUBSOLAGEM NA ESTRUTURA DO SOLO, CARBONO ORGÂNICO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS

SOIL DECOMPACTION STRATEGIES IN NO-TILL SYSTEMS: EFFECTS OF COVER CROPS AND SUBSOILING ON SOIL STRUCTURE, ORGANIC CARBON, AND GRAIN YIELD¹

Gilmar Gonçalves de Oliveira

<https://orcid.org/0000-0002-2743-8753>

Dayane Saturnino de Santana

<https://orcid.org/0009-0009-5992-2812>

Resumo: A compactação do solo é um dos principais desafios em sistemas agrícolas conservacionistas, como o plantio direto, comprometendo a estrutura do solo, a infiltração e o armazenamento de água e a produtividade agrícola. Este estudo avaliou a eficiência de diferentes sistemas de manejo na entressafra para mitigação da compactação do solo, considerando seus efeitos sobre a estrutura física, os teores de carbono orgânico e produtividade da cultura do feijão cultivado em sucessão. O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, em delineamento fatorial 3x4 em blocos casualizados com três repetições. Os tratamentos combinaram três níveis de compactação adicionais: sem compactação (SCA), compactação com seis passadas de trator (CA6) e compactação com 12 passadas de trator (CA12), e quatro sistemas de manejo na entressafra: milho em monocultivo – controle (M); milho com subsolagem (MS); milho consorciado com braquiária e crotalária (MBC); milho com subsolagem, braquiária e crotalária (MSBC). Os resultados indicaram que a subsolagem isolada gerou efeitos pontuais, enquanto os sistemas com plantas de cobertura promoveram melhorias significativas nos atributos físicos do solo e maior produtividade do feijão em solos menos compactados. A combinação de subsolagem e consórcio resultou em efeito sinérgico, especialmente em condições de compactação severa, com aumento de 26% na macroporosidade e redução de 55% na resistência do solo à penetração na camada superficial. Os teores de carbono orgânico não apresentaram variação significativa entre os tratamentos no período avaliado. Os dados reforçam o potencial das plantas de cobertura na mitigação da compactação, com maior estabilidade dos efeitos em comparação à descompactação mecânica isolada.

Palavra-chave: qualidade física do solo; compactação do solo; sucessão de culturas; bioescarificação; sistemas conservacionistas.

¹ Artigo científico apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos ambientais e uso da terra.

Abstract: Soil compaction is one of the main challenges in conservation agriculture systems, such as no-tillage, as it impairs soil structure, water infiltration and storage, and crop productivity. This study evaluated the effectiveness of different off-season management systems in mitigating soil compaction, considering their effects on soil physical structure, organic carbon content, and the yield of common bean cultivated in succession. The experiment was conducted on a dystrophic Red-Yellow Latosol using a 3×4 factorial design in randomized blocks with three replicates. Treatments combined three levels of additional compaction: no compaction (SCA), compaction with six tractor passes (CA6), and compaction with 12 passes (CA12), and four off-season management systems: maize in monoculture – control (M); maize with subsoiling (MS); maize intercropped with brachiaria and sunn hemp (MBC); and maize with subsoiling, brachiaria, and sunn hemp (MSBC). Results showed that subsoiling alone led to localized effects, while systems with cover crops significantly improved soil physical attributes and increased bean productivity in less compacted soils. The combination of subsoiling and intercropping produced a synergistic effect, especially under severe compaction conditions, with a 26% increase in macroporosity and a 55% reduction in soil penetration resistance in the surface layer. Organic carbon content did not differ significantly among treatments during the evaluated period. These findings reinforce the potential of cover crops in mitigating soil compaction, with more consistent effects compared to mechanical loosening alone.

Keywords: Soil physical quality; soil compaction; crop succession; bioescarification; conservation systems.

1 INTRODUÇÃO

O sistema de plantio direto (SPD) tem se expandido de forma expressiva em escala global, especialmente em regiões tropicais, onde vem ganhando destaque pelo seu potencial em conservar o solo e tornar a produção agrícola mais sustentável. O Censo agropecuário de 2017 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2017), revela que houve aumento de 84,9% na área de plantio direto no Brasil entre o período de 2006 a 2017, passando de 17,9 milhões para 33,1 milhões de hectares. Em termos de números de estabelecimentos, a expansão foi de 9,2%, passando de 506,7 mil para 553,4 mil. Esse crescimento reflete o reconhecimento dos benefícios do SPD, como a conservação do solo e a sustentabilidade da produção agrícola. Para se ter uma ideia da sua representatividade, em 2017, o sistema plantio direto era utilizado em aproximadamente 11,1% da área total cultivada com grãos no país (IBGE, 2017). É fundamental ressaltar que o SPD é um sistema de produção que visa a integração de práticas conservacionistas como a manutenção da cobertura morta, o mínimo revolvimento do solo, a rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura, buscando otimização da produção agrícola e preservação dos recursos naturais.

O Brasil está entre os maiores produtores e exportadores mundiais de grãos. Os principais grãos produzidos no país são: algodão (caroço), arroz, feijão, soja, milho e trigo, sendo responsável por 7,8% da produção mundial. A safra 2022/2023 indicou uma produção de 322,8 milhões de toneladas, o que representou um aumento de 18,4% na produção, de 5,3% na área plantada e de 12,4% na produtividade, em relação à safra anterior (Brasil, 2023). Já a safra 2023/2024 encerrou com produção de grãos estimada em 298,4 milhões de toneladas, o que representou uma redução de 21,4 milhões de toneladas em relação ao volume obtido no ciclo anterior (Brasil, 2024). Essa diminuição se deve, principalmente, à demora na regularização de chuvas no início da janela de plantio, aliada às baixas precipitações durante parte do ciclo das lavouras. O agronegócio representa um dos principais setores da economia do país, sendo a produção de grãos, um dos setores agrícolas que mais contribuíram para crescimento do PIB.

A implantação de qualquer sistema de produção inevitavelmente induz alterações no ambiente original, especialmente no solo, o qual é manejado com o propósito de oferecer melhores condições para o estabelecimento e produção das plantas cultivadas. Essas alterações afetam as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, embora nem sempre de forma sustentável (Furquim *et al.*, 2020). Apesar dos inúmeros benefícios que o SPD proporciona em relação ao preparo convencional, como melhoria da agregação e estabilidade dos agregados do solo, maior capacidade de retenção e disponibilidade de água, aumento da infiltração de água, aumento do carbono orgânico e consequente redução da erosão, bem como redução dos custos de produção (Kassam; Friedrich; Derpsch, 2019), a ocorrência de compactação do solo tem sido cada vez mais relatada (Blanco-Canqui; Wortmann, 2020; Peixoto *et al.*, 2019, 2020). A compactação do solo é um processo gradual e complexo que envolve a redução do volume de poros e o aumento da densidade do solo, dificultando a infiltração de água, a aeração e o desenvolvimento radicular das plantas.

No SPD, a compactação do solo é frequentemente provocada pelo tráfego intensivo de máquinas agrícolas, muitas vezes em condições inadequadas de umidade do solo (Hamza; Anderson, 2005), pela baixa diversidade de culturas e pela falta ou uso insuficiente de plantas de cobertura, levando à produção limitada de resíduos vegetais e à baixa adição de matéria orgânica (Moreira, 2019). Segundo Franchini *et al.* (2016), com o tempo, passou a se criar a ideia de que o plantio direto unicamente seria capaz de responder pela proteção do solo contra a erosão o que conduziu a retirada parcial e até total de outras práticas de manejo conservacionistas, a exemplo dos terraços. Conseqüentemente, tem-se observado um aumento da densidade do solo devido à compactação, o que leva alguns agricultores a retornar a práticas de preparo convencional, que desestruturam o solo e aceleram a mineralização da matéria orgânica (Stone;

Silveira, 2001), contradizendo os princípios do SPD (Blanco-Canqui; Wortmann, 2020). A intensificação do uso de máquinas agrícolas, o aumento da área cultivada e a redução da diversidade de plantas podem intensificar a compactação do solo no SPD, comprometendo potencialmente a sustentabilidade do sistema.

Para Keller *et al.* (2019), a compactação do solo é o principal fator de degradação física dos solos agrícolas, podendo reduzir em até 75% a produtividade dos cultivos (Correa *et al.*, 2019). A fim de mitigar os problemas de compactação em SPD contínuo muitos produtores e pesquisadores tem adotado o preparo ocasional estratégico (Blanco-Canqui; Wortmann, 2020; Peixoto *et al.*, 2020), que consiste no uso de implementos agrícolas para mitigar a compactação do solo em SPD. No entanto, Peixoto *et al.* (2020), em uma meta-análise verificaram que, embora o preparo ocasional tenha melhorado as propriedades físicas do solo e reduzido as perdas de solo por erosão, de maneira geral, não promoveu aumento na produtividade dos cultivos, e, dependendo da forma como for realizado pode implicar em redução dos teores de matéria orgânica no solo. Estudos têm mostrado o alívio da compactação do solo pelo uso de plantas de cobertura em áreas de produção de grãos (Bertollo *et al.*, 2021), com consequente aumento na produtividade dos cultivos (Calonego *et al.*, 2017; Nouri *et al.*, 2019). O preparo ocasional do solo, apesar de ser uma alternativa para mitigar a compactação, pode gerar impactos negativos no sistema, como a perda de matéria orgânica e a interrupção dos benefícios do SPD.

Portanto, torna-se essencial identificar alternativas de manejo, utilizadas isoladamente ou associadas ao o preparo convencional, que atenuem eficazmente os efeitos da compactação do solo a curto, médio e longo prazo, melhorando a qualidade do solo e a produtividade das culturas. Segundo Furquim *et al.* (2020), a busca pela sustentabilidade dos processos produtivos, têm refletido na implantação de sistemas integrados de produção, os quais proporcionam benefícios, como a preservação da água e do solo. Quando o método biológico (plantas de cobertura) foi comparado com o método mecânico de mitigação da compactação do solo, observou-se efeito de curto prazo do mecânico e maior eficiência de médio e longo prazo com o método biológico (Bertollo *et al.*, 2021; Calonego *et al.*, 2017). No entanto, são escassos os estudos que avaliaram o efeito combinado de preparo ocasional e plantas de cobertura na mitigação da compactação e na produtividade das culturas, sobretudo utilizando subsoladores. A descompactação do solo com subsoladores geralmente tem efeitos temporários e pouca influência residual. No entanto, quando associado a métodos biológicos, como o uso de plantas de cobertura com sistemas radiculares fibrosos e alta produção de biomassa, sua persistência tende a ser maior. Essa combinação entre a descompactação mecânica e biológica não apenas contribui para a estabilidade da estrutura do solo, mas também mantém os efeitos do preparo por até

três anos após a aplicação dos tratamentos, aumentando a resiliência do sistema e resultando em maior produtividade de grãos de milho (Torres *et al.*, 2022). A combinação de diferentes estratégias de manejo, como o preparo mecânico do solo com subsoladores e o uso de plantas de cobertura, pode ser uma alternativa promissora para mitigar a compactação do solo e promover a sustentabilidade do SPD.

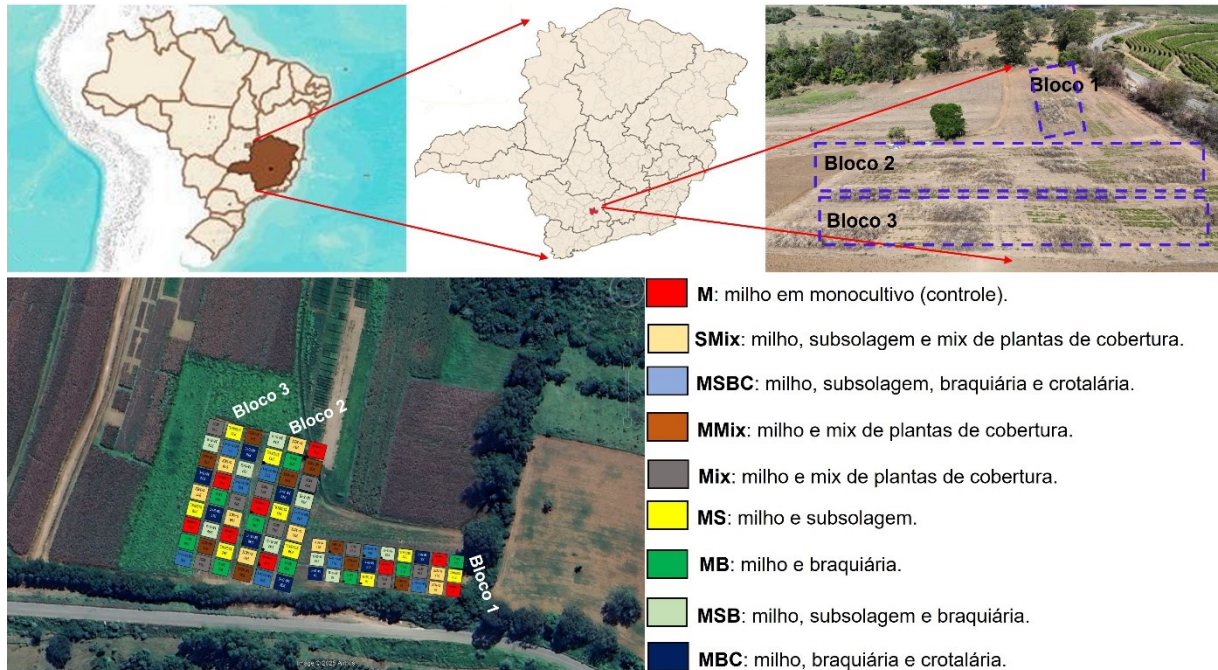
A pesquisa foi conduzida com base nas seguintes hipóteses: 1) em solos com compactação menos severa, as plantas de cobertura promoveriam melhorias mais significativas nas propriedades do solo e na produtividade das culturas em comparação com a subsolagem; 2) a aplicação combinada de subsolagem e plantas de cobertura resultaria em um efeito sinérgico, superando os benefícios obtidos com cada prática isoladamente; e 3) a consorciação de diferentes espécies de plantas de cobertura seria mais eficaz do que o monocultivo de plantas de cobertura e a subsolagem na otimização das propriedades do solo e da produtividade dos cultivos. Assim, este estudo avaliou a eficiência de diferentes estratégias de manejo na entressafra para a mitigação da compactação do solo e seus efeitos sobre a produtividade do feijão cultivado em sucessão, bem como suas implicações nos teores de carbono orgânico e na estrutura do solo em sistemas de plantio direto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido na Fazenda Muquém, unidade experimental da Universidade Federal de Lavras (UFLA), situada no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil, a 21°12'17.17"S e 44°58'43.34"O (Figura 1).

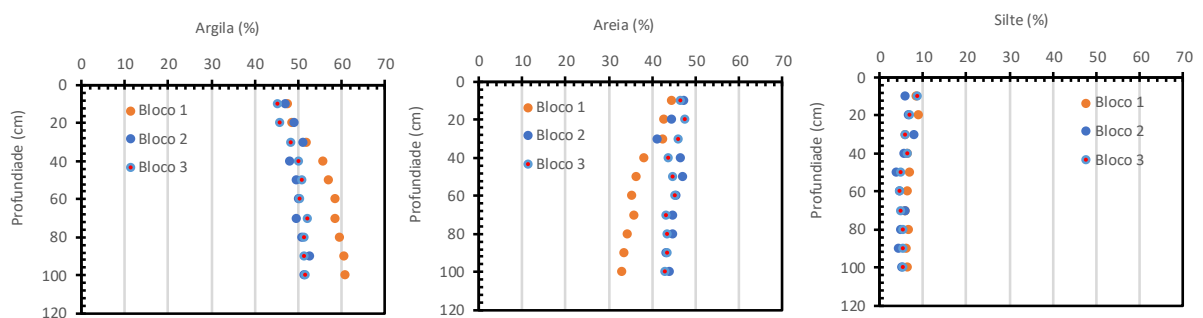
Figura 1 - Imagem do Estado de Minas Gerais, com destaque na localização geográfica da área experimental, situada no município de Lavras MG.



Fonte: elaboração própria.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, enquadrando-se como temperado chuvoso (mesotérmico) com inverno seco, subtropical. A temperatura média anual da região é de 19,4°C, conforme Dantas, Carvalho e Ferreira (2007). A altitude média da área experimental é de 918 metros, e a precipitação média anual registrada foi de 1.529,7 mm. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico com textura argilosa. A caracterização física detalhada do solo, obtida por meio de análise textural, é apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Distribuição das frações granulométricas argila, areia e silte em função da profundidade do solo para os três blocos da área experimental.



Fonte: elaboração própria.

2.2 Descrição dos tratamentos e histórico da área

Previamente à implantação dos tratamentos, em 2021/2022, realizou-se a aplicação de calcário, visando a correção da acidez do solo e elevação dos teores de Ca e Mg na camada de 0-40 cm. A incorporação do calcário foi realizada com grade pesada, aplicando-se 5 t ha⁻¹ a cada incorporação. Após a incorporação, realizou-se a subsolagem para mitigar eventuais problemas físicos em profundidade e, posteriormente, utilizou-se a grade niveladora. As culturas comerciais, manejo de adubação, pragas, doenças e plantas daninhas foram iguais para todas as parcelas experimentais e seguiram as recomendações regionais.

O experimento foi conduzido em condições de sequeiro, utilizando um delineamento experimental em blocos casualizados em esquema fatorial 3x9 com três repetições, como disposto na Figura 1. O primeiro fator consistiu na implementação de 3 níveis de compactação adicionais: I) sem compactação adicional (SCA); II) compactação adicional de 6 passadas de um trator (CA6); III) e compactação adicional de 12 passadas de um trator (CA12). A compactação foi realizada com trator agrícola Valtra BL88, 88 cv - 2300 (ISO/NBR 1585), pneus de construção diagonal 12,4-24 R1/18,4 - 30 R1, com massa total de 6000 kg, com umidade próxima da capacidade de campo, realizado em 21/02/2021. O segundo fator compreendeu nove sistemas de manejo do solo na segunda safra, visando a mitigação da compactação do solo e incorporação de carbono: i) milho em monocultivo – controle (M); ii) milho com subsolagem (MS); iii) milho consorciado com braquiária e crotalária (MBC); iv) milho com subsolagem, braquiária e crotalária (MSBC); v) milho com subsolagem e braquiária (MSB); vi) milho e braquiária (MB); vii) milho com mix de sementes (MMix); viii) mix de sementes (Mix); ix) milho com subsolagem e mix sementes (MSMix), em que, o mix foi composto por milheto, *Crotalaria spectabilis*, ervilhaca, trigo mourisco, nabo forrageiro, *Brachiaria ruziziensis*.

O planejamento de culturas inclui soja (*Glycine max* L.) ou feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) na primeira safra (verão), enquanto para a segunda safra (outono-inverno) as opções são milho (*Zea mays* L.), como prioridade, ou a cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L.) em anos com menor previsão de chuvas. As 81 parcelas experimentais tiveram dimensão de 10 × 10 m, com repetições distribuídas aleatoriamente no campo. As operações de subsolagem foram realizadas para atingir 40 cm de profundidade, em 18/03/2022, utilizando subsolador modelo Laser KS, versão com 5 hastes do tipo curva, com 38,0 cm de espaçamento entre as hastes. Com base nas análises exploratórias realizadas (conforme arquivo suplementar), optou-se por realizar um recorte do experimento, com o objetivo de evidenciar melhor as estratégias de mitigação da

compactação do solo. Foram avaliadas estratégias isoladas – mecânica (subsolagem) e biológica (consórcio com braquiária e crotalária) – além da estratégia combinada, que consistiu na subsolagem seguida do consórcio com as mesmas espécies vegetais. Incluiu-se também um tratamento controle, no qual nenhuma estratégia de descompactação foi adotada. Assim, o delineamento estatístico utilizado foi um esquema fatorial 3x4, com três níveis de compactação e quatro estratégias de descompactação: M, MS, MBC e MSBC (Figura 1). Quanto as culturas, nas safras avaliadas neste estudo, 2022/23 e 2023/24, em ambas foram cultivados feijão no verão e sorgo no outono-inverno.

2.3 Amostragem e análises físicas do solo

Nas safras 2022/2023 e 2023/2024, amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas nas profundidades de 0-0,05, 0,15-0,20 e 0,25-0,30 m com o amostrador de Uhland, em anéis volumétricos de 6,40 cm de diâmetro e 2,50 cm de altura. Em laboratório, as amostras foram gradativamente preenchidas com água até a saturação, pesadas, e então encaminhadas para as unidades de sucção, compostas por funis de Buchner, sendo submetidas aos potenciais matriciais (ψ) de -6 e -10 kPa. Em potenciais mais negativos, -100, -500 e -1500 kPa utilizou-se as Câmaras de Richards (Soil Moisture, EUA) conforme Klute (1986). Após o equilíbrio em cada ψ , amostras foram pesadas, e, ao final foram secas em estufa a 105 °C por 48 h para obtenção da massa de solo seco e cálculo do conteúdo de água (θ) em cada ψ e na saturação, bem como determinada a densidade do solo (D_s) (Blake; Hartge, 1986). Após atingir o equilíbrio em $\psi = 100$ kPa, cada amostra foi submetida ao teste de resistência do solo à penetração (RP), em penetrômetro de bancada MARCONI MA933/30 (Marconi, Brasil) sob velocidade constante 10 mm/min conforme Peixoto *et al.* (2019).

A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método do anel volumétrico (Teixeira *et al.*, 2017), assim como a porosidade total (PT), que foi determinada como o conteúdo de água do solo na saturação. A microporosidade (M_i) foi determinada pelo conteúdo de água no solo no potencial hídrico de -6 kPa. A macroporosidade (M_a) do solo foi calculada pela diferença entre a PT e M_i .

Para estimar a capacidade de água disponível (CAD), foi calculado a diferença entre o conteúdo de água na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP), estimados a -10 kPa e -1500 kPa, respectivamente (Silva *et al.*, 2014). A capacidade de aeração total do solo (CA) foi determinada segundo metodologia descrita por Reynolds *et al.* (2008), e calculadas conforme as seguintes equações 1 e 2, respectivamente (Reynolds *et al.*, 2009):

$$CA = \theta_{sat} - \theta_{10kPa} \quad (1)$$

$$CCrel = \left(\frac{\theta_{10kPa}}{\theta_{sat}} \right) = \left[1 - \left(\frac{CA}{\theta_{sat}} \right) \right] \quad (2)$$

onde θ_{10kPa} é conteúdo de água retido no potencial matricial de -10kPa ($m^3 m^{-3}$) e θ_{sat} é conteúdo de água retido na saturação do solo.

2.4 Determinação de carbono orgânico total do solo

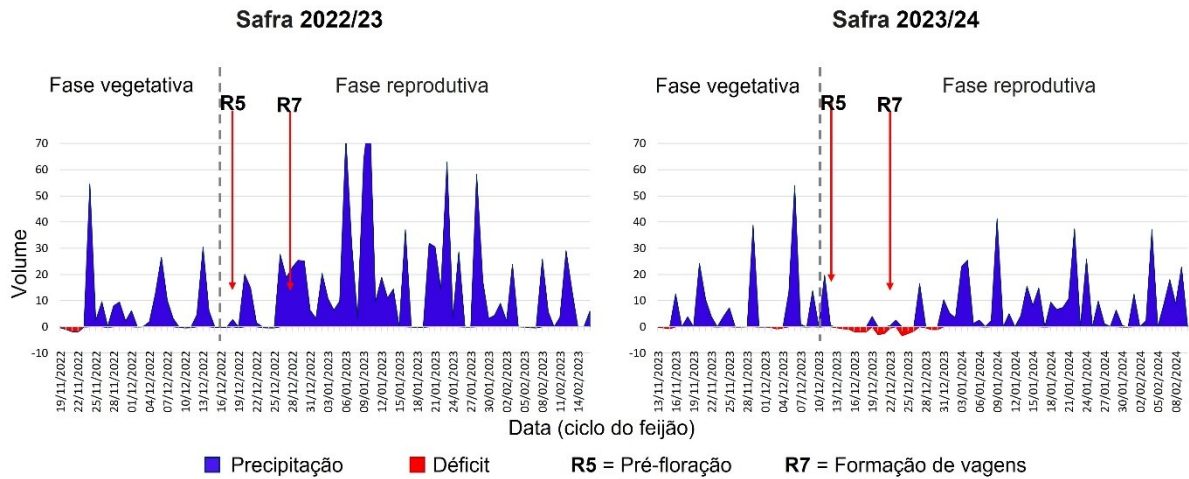
Foram coletadas amostras de solo em cada parcela experimental, nas profundidades 0,00-0,05, 0,15-0,20 e 0,25-0,30 m, para determinação do teor de carbono orgânico total (CO). Em laboratório, as amostras foram submetidas à estufa na temperatura de 60° C por onde permaneceram por um período de 7 dias. Este período foi necessário, para que o peso seco se estabilizasse, não sendo necessário submeter as amostras a altas temperaturas, o que poderia comprometer o resultado da análise de carbono. Após secas, foram preparadas por peneiramento, utilizando 10 gramas de solo e enviadas para o laboratório de Análise de Carbono e Nitrogênio (LABSEN) da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, para determinação pelo método da combustão seca em analisador elementar (Teixeira *et al.*, 2017).

2.5 Produtividade de grãos

A produtividade de grãos foi determinada por meio de amostragem aleatória, com a coleta de cinco linhas de plantas em cada parcela, seguindo um método sistemático de seleção para garantir a representatividade da amostra. A coleta dos grãos foi realizada logo após a colheita, no momento em que os grãos atingiram a maturidade fisiológica, identificada visualmente pela coloração e consistência dos grãos. As plantas amostradas em cada parcela foram cuidadosamente colhidas, separando-se os grãos das demais partes da planta por meio de debulha manual. Em seguida, os grãos foram pesados em balança de precisão, registrando-se a massa de grãos por planta em cada parcela. Com base na massa de grãos obtida em cada planta, corrigida para 13% de umidade, foi estimada a produtividade por hectare. Para realizar essa estimativa, considerou-se a área ocupada por cada planta na parcela, calculada dividindo-se a área total da parcela pelo número de plantas presentes na mesma.

Como os registros pluviométricos indicaram déficit hídrico de 44,8% na safra 2023/24, quando comparada à safra anterior, utilizou-se o Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária (Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, 2025) para elaborar o balanço hídrico de cultivo do feijão das safras 2022/23 e 2023/24 (Figura 3), nas condições do experimento.

Figura 3 - Componentes do balanço hídrico da cultura do feijoeiro no período de cultivo do experimento para as safras 2022/23 e 2023/24 destacando o déficit e excedente hídrico bem como os estágios de pré-floração (R5) e formação de vagens (R7) do feijoeiro (INMET, 2025).



Fonte: elaboração própria.

2.6 Análise de dados e estatística

Utilizou-se a análise de componentes principais (PCA) para sintetizar as relações entre os atributos do solo indicadores da sua qualidade física, o teor de carbono orgânico no solo e a produtividade da safra de verão, influenciados pelas diferentes estratégias de manejo do solo para descompactação, em três condições crescentes de compactação do solo. Em adição, essa análise ainda foi realizada de forma separada por profundidade de amostragem de solo.

Posteriormente, os dados foram avaliados quanto às premissas de normalidade, homocedasticidade e homogeneidade de variâncias dos atributos físicos do solo e da produtividade, por meio de modelos lineares, utilizando tanto visualizações gráficas (Kozak; Piepho, 2018) quanto testes numéricos (Peña; Slate, 2006). Quando necessário, foram aplicadas transformações, como logarítmica e raiz quadrada, ou adotados métodos para a remoção de outliers.

Como todos os dados atenderam às premissas estabelecidas, realizou-se a análise de variância (ANOVA) por meio do teste F ($P < 0,05$), considerando um esquema fatorial 3×4 em delineamento de blocos casualizados, com três repetições. Foram analisadas duas safras agrícolas, 2022/2023 e 2023/2024, considerando quatro sistemas de manejo: M, MS, MBC e MSBC. Quando a hipótese nula da ANOVA foi rejeitada, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) para identificar diferenças significativas.

De maneira complementar, uma correlação de Pearson ($P < 0,05$) foi empregada para analisar as correlações entre a produtividade e os atributos físicos do solo em cada tratamento

estudado (2 safras agrícolas e os 4 sistemas de manejo). Todas as análises foram avaliadas utilizando o ambiente estatístico em linguagem R (Rstudio Team, 2025).

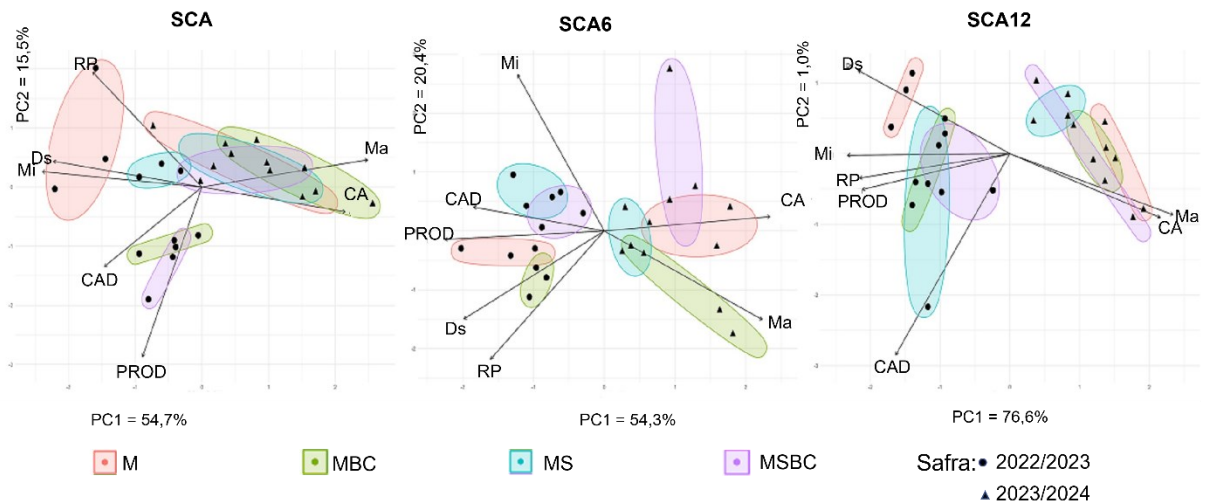
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Relações entre produtividade de feijão, atributos físicos e carbono no solo

Entre as Análise de Componentes Principais (PCA) realizadas para as três profundidades, a camada de 0,15-0,20 m apresentou a maior variância explicada (as demais análises estão disponíveis no arquivo suplementar). Nas três condições de compactação do solo, a safra 2023/2024 apresentou desempenho superior à safra 2022/2023, indicando melhorias nos atributos físicos do solo, especialmente na capacidade de água disponível (CAD), que demonstrou sensibilidade na explicação da produtividade (Figura 4), corroborando com os resultados de De Paepe, Bono e Alvarez (2018).

Apesar dessas melhorias físicas, a produtividade não refletiu diretamente esses avanços. Esse resultado pode estar relacionado ao déficit hídrico registrado durante a safra 2023/2024, especialmente nos estágios de pré-floração (R5) e formação de vagens (R7) (Figura 3), períodos críticos para o desenvolvimento do feijão. A escassez de água nesses estágios, sensíveis ao estresse hídrico, pode ter limitado o potencial produtivo da cultura, neutralizando parcialmente os ganhos esperados com a melhoria nas condições do solo.

Figura 4 - Análise de componentes principais dos atributos físicos do solo na profundidade 0,15-0,20 m e da produtividade de feijão sob diferentes sistemas de manejos do solo em três condições de compactação para as safras 2022/2023 e 2023/2024.



Atributos: Ma - macroporosidade, Mi - microporosidade, CA - capacidade de aeração, Ds - Densidade do solo, CAD - capacidade de água disponível, RP - resistência a penetração, e PROD - produtividade. Manejos agrícolas: M: Milho em monocultivo; MS: Milho e subsolagem; MBC: Milho, braquiária e crotalária MSBC: Milho, subsolagem, braquiária e crotalária.

Fonte: elaboração própria.

Para a condição de SCA, os atributos Ma, a CA, a Ds e a RP se destacaram como os principais responsáveis pela diferenciação entre os tratamentos. O manejo influenciou significativamente a Ds e a RP, tornando mais evidente a degradação estrutural do solo no sistema de manejo em monocultivo de milho (M), associado a maior compactação. Em contrapartida, os tratamentos que integraram subsolagem, braquiária e crotalária (M-S-B e M-S-B-C) apresentaram maior CAD e produtividade na safra 2022/2023, mantendo um efeito significativo sobre a Ma e CA na safra seguinte, o que reforçam outros resultados, como os obtidos por Crespo *et al.* (2021).

Na condição CA6, não foi observada uma diferenciação clara entre os sistemas de manejo. Os tratamentos com subsolagem (M-S e M-S-B-C) demonstraram maior eficiência na redução da Ds e no aumento da CAD, enquanto os sistemas sem subsolagem (M e M-B-C) apresentaram maiores valores de RP e Ds, indicando, portanto, uma maior relação com esses atributos na análise de componentes principais (Gongora *et al.*, 2022), o que demonstra sua menor eficácia em reduzir os efeitos negativos da compactação. Esses resultados indicam que a subsolagem favorece a redução da compactação e melhora a retenção hídrica (Feng Tiantao *et al.*, 2023) na profundidade avaliada. Além disso, os sistemas M-B-C e M-S-B-C apresenta-

ram um bom desempenho em ambas as safras, embora não de forma idêntica. Contudo, a influência dos atributos físicos do solo nem sempre se traduziu em maior produtividade, devido às condições climáticas adversas da safra 2023/2024 (Figura 3).

No geral, o sistema M-S-B-C apresentou os melhores resultados para a qualidade estrutural do solo e para a produtividade, sugerindo que essa combinação de práticas agrícolas contribui para a melhoria da estrutura do solo (Rosolem; Pivetta, 2016), com aumento da Ma e CA e redução da RP. Essas melhorias estruturais favorecem o desenvolvimento radicular das plantas e a infiltração de água, promovendo maior resiliência do sistema produtivo. A presença de braquiária e crotalária, aliada à subsolagem, pode ter contribuído para o incremento de matéria orgânica no solo, resultando em melhorias na fertilidade e na CAD. Para a condição CA12, todas as práticas de manejo avaliadas, com exceção do controle, contribuíram para melhorias na qualidade física do solo, evidenciando a importância de estratégias combinadas para a mitigação dos efeitos da compactação e o aumento da sustentabilidade do sistema de produção de grãos em plantio direto.

3.2 Impacto dos sistemas de manejo e das safras nos atributos físicos do solo, carbono orgânico e na produtividade

3.2.1 Indicadores físicos do solo

Dentre as três profundidades demonstradas, a camada superficial (0,05-0,10 m) se mostrou a mais sensível aos efeitos dos sistemas de manejo e da compactação do solo. Essa maior suscetibilidade pode ser atribuída à sua proximidade com a superfície, onde há maior adição de biomassa pelas plantas de cobertura e intensificação dos processos biológicos e do crescimento radicular (Souza *et al.*, 2010). Além disso, essa camada é mais diretamente influenciada pelo manejo agrícola e pelas interações planta-solo, o que resulta em respostas mais rápidas.

Na safra 2023/24, os sistemas com maior diversidade vegetal (M-B-C e M-S-B-C) evidenciaram melhorias estruturais significativas, com redução da Ds, aumento da Ma e da CAD, especialmente sob a condição de solo sem compactação adicional (SCA). Ainda que sob a condição CA6 os ganhos tenham sido de menor magnitude, os efeitos foram consistentes. Na condição CA12, os ganhos estruturais foram mais discretos, mas ainda presentes, sugerindo que as plantas de cobertura atuam mesmo sob restrição física mais severa (Tabela 1).

Na camada intermediária (0,15-0,20 m), os efeitos benéficos foram mantidos, mas com menor intensidade. Na condição SCA, houve redução da Ds e da RP nos sistemas M-S-B e M-

S-B-C na safra 2023/24, refletindo melhorias estruturais ao longo do tempo. No entanto, a Ma nesses sistemas apresentou leve decréscimo sob SCA, enquanto os incrementos proporcionais foram mais expressivos nas condições de compactação adicional. Em CA6 e CA12, os sistemas com plantas de cobertura promoveram aumentos relativos de até 83% na Ma, mesmo sob maior pressão mecânica. Esses resultados reforçam que, embora a presença de plantas de cobertura contribua para a mitigação da compactação, seus efeitos são mais evidentes sob estresse físico, sugerindo a necessidade de práticas mitigadoras contínuas ao longo dos ciclos agrícolas (Tabela 2).

Já na camada de 0,25–0,30 m, não foram observadas diferenças significativas nos atributos físicos entre os níveis de compactação (SCA, CA6 e CA12), sugerindo que o tráfego de máquinas não provocou compactação adicional nessa profundidade (Tabela 3). A estabilidade dos valores de RP, Ds e Ma reforça essa interpretação. Assim, torna-se questionável a necessidade do uso de subsolagem com o objetivo de descompactar essa camada, ao menos sob os parâmetros analisados. Uma vez que não há evidências de compactação limitante nesse estrato. Embora o sistema com subsolagem (M-S-B-C) tenha apresentado os menores valores de RP e Ds nessa profundidade, é importante ponderar se tais mudanças são agronomicamente relevantes, uma vez que intervenções mecânicas nem sempre resultam em incrementos produtivos (Peixoto *et al.*, 2020) e podem, inclusive, atuar como um fator de perturbação do solo, afetando negativamente sua estrutura natural e elevando os custos de produção.

Por outro lado, os sistemas consorciados, mesmo com tempo relativamente curto de adoção, já demonstraram efeitos benéficos na melhoria da estrutura do solo nas camadas mais superficiais, justamente onde os efeitos do tráfego foram mais expressivos. Isso reforça o potencial das plantas de cobertura como estratégia sustentável de manejo da compactação, especialmente em substituição a práticas mecânicas de alto custo e impacto físico no solo.

3.2.2 Dinâmica do carbono orgânico do solo

Nas três camadas avaliadas, o CO do solo apresentou poucas variações significativas entre os sistemas de manejo e as safras. A única diferença estatisticamente relevante ocorreu na camada mais profunda (0,25–0,30 m), onde os tratamentos com plantas de cobertura apresentaram teores mais elevados de carbono (Tabela 3). Isso contraria, à primeira vista, a expectativa de maior acúmulo de CO nas camadas superficiais em sistemas com cobertura vegetal, uma vez que é ali que há maior deposição de resíduos orgânicos e atividade biológica.

Essa resposta, no entanto, pode estar diretamente relacionada ao curto tempo de adoção dos sistemas consorciados, o que limita a formação de estoques significativos de carbono no solo. O sequestro de carbono orgânico é um processo lento, acumulativo e altamente dependente da estabilidade da matéria orgânica, o que demanda maior tempo de exposição aos manejos conservacionistas. Além disso, a variabilidade espacial e temporal dos teores de CO no solo pode mascarar ganhos sutis em períodos mais curtos, sendo necessário um horizonte temporal maior para capturar tendências mais robustas.

Outro ponto que merece atenção é o efeito do preparo mecânico ocasional, como a subsolagem, sobre os teores de carbono. Embora não se tenha observado redução direta do CO em áreas subsoladas, estudos indicam que intervenções que revolvem o solo podem acelerar a mineralização da matéria orgânica, contribuindo para perdas de carbono a médio e longo prazo (Jordon; Smith, 2022). Isso reforça a necessidade de cautela na recomendação da subsolagem como prática rotineira, sobretudo em contextos onde os ganhos estruturais possam ser alcançados com manejos vegetais menos invasivos.

Por fim, é importante destacar que, mesmo em período relativamente curto, os consórcios com braquiária e crotalária demonstraram capacidade de alterar a dinâmica do carbono em profundidade, possivelmente em função de um sistema radicular mais agressivo e eficiente. Isso aponta para o potencial de estratégias biológicas em promover a reestruturação física e a melhoria da qualidade do solo de forma mais sustentável, quando comparadas às práticas mecânicas.

Tabela 1 - Densidade (Ds), Microporosidade (Mi), Macroporosidade (Ma), Capacidade de Água Disponível (CAD), Capacidade de Aeração (CA), Resistência do solo à Penetração (RP) e carbono orgânico (CO) na camada de 0,00-0,05 m para as condições de solo sem compactação adicional (SCA), com compactação adicional de 6 passadas (CA6) e com compactação adicional de 12 passadas (CA12).

Sistema de manejo	Ds		Mi		Ma		CAD		CA		RP		CO			
	----- Mg m ⁻³ -----		----- m ³ m ⁻³ -----										-----MPa -----		----- dag/kg -----	
	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24
SCA																
M	1,22 aA	1,17 abA	0,38ns	0,30ns	0,11 bB	0,25 aA	0,09 bA	0,09 aA	0,19ns	0,27ns	1,58 aA	1,57 aA	1,88 ns	1,90 ns		
M-S	1,23 aA	1,12 bB	0,33ns	0,30ns	0,17 aB	0,28 aA	0,13 aA	0,08 aB	0,23ns	0,26ns	1,23 abA	1,52 aA	2,03 ns	2,07 ns		
M-B-C	1,25 aA	1,13 bB	0,39ns	0,32ns	0,13 abB	0,26 aA	0,10 abA	0,09 aA	0,19ns	0,28ns	0,91 abB	1,51 aA	1,76 ns	1,98 ns		
M-S-B-C	1,25 aA	1,24 aA	0,37ns	0,31ns	0,14 abB	0,22 aA	0,12 abA	0,09 aB	0,17ns	0,24ns	0,89 bB	1,39 aA	1,93 ns	1,77 ns		
Média	-	-	0,37 A	0,31 B	-	-	-	-	0,19 B	0,26 A	-	-	1,90ns	1,93ns		
CA6																
M	1,37ns	1,24ns	0,40 b	0,36 a	0,10 bA	0,13 bA	0,12ns	0,10ns	0,07ns	0,21ns	1,85 abA	1,54 bA	1,65ns	2,08ns		
M-S	1,28ns	1,22ns	0,46 a	0,35 a	0,11 bB	0,15 bA	0,15ns	0,09ns	0,13ns	0,23ns	1,61 bB	2,55 aA	1,84ns	1,77ns		
M-B-C	1,34ns	1,25ns	0,36 b	0,34 a	0,11 bB	0,19 abA	0,14ns	0,10ns	0,14ns	0,22ns	2,18 aA	2,06 aA	1,89ns	1,83ns		
M-S-B-C	1,27ns	1,14ns	0,36 b	0,35 a	0,17 aB	0,23 aA	0,12ns	0,10ns	0,14ns	0,29ns	1,83 abA	0,83 cB	1,60ns	2,16ns		
Média	1,32 A	1,21 B	-	-	-	-	0,13 A	0,10 B	0,12 A	0,24 B	-	-	-	-		
CA12																
M	1,40 aA	1,09 cB	0,38 aA	0,32 bB	0,07 cB	0,27 aA	0,09ns	0,10ns	0,20ns	0,31ns	3,01 aA	1,57 abB	1,68ns	2,10ns		
M-S	1,32 bA	1,20 bB	0,38 aA	0,31 bB	0,13 bB	0,24 aA	0,12ns	0,10ns	0,22ns	0,27ns	2,27 bA	1,77 abB	1,62ns	2,00ns		
M-B-C	1,36 abA	1,35 aA	0,34 bA	0,35 aA	0,23 aA	0,14 bB	0,10ns	0,09ns	0,20ns	0,18ns	1,71 bA	2,18 aA	1,80ns	2,25ns		
M-S-B-C	1,36 abA	1,16 bcB	0,38 aA	0,31 bB	0,12 bB	0,25 aA	0,11ns	0,10ns	0,15ns	0,28ns	0,95 cA	1,34 bA	1,77ns	1,85ns		
Média	-	-	-	-	-	-	-	-	0,19 B	0,26 A	-	-	1,72 B	2,05 A		

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste F da ANOVA (P < 0,05): letras minúsculas comparam sistemas de manejo para descompactação do solo para cada safra; letras maiúsculas comparam as duas safras para cada sistema de manejo.

ns: não significativo.

M: milho solteiro em monocultivo;

M-S: milho com subsolagem;

M-B-C: milho, braquiária e crotalária;

M-S-B-C: milho, subsolagem, braquiária e crotalária.

Fonte: elaboração própria.

Tabela 2 - Densidade (Ds), Microporosidade (Mi), Macroporosidade (Ma), Capacidade de Água Disponível (CAD), Capacidade de Aeração (CA), Resistência do solo à Penetração (RP) e carbono orgânico (CO) na camada de 0,15-0,20 m para as condições de solo sem compactação adicional (SCA), com compactação adicional de 6 passadas (CA6) e com compactação adicional de 12 passadas (CA12).

Sistema de manejo	Ds		Mi		Ma		CAD		CA		RP		CO			
	Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³										MPa		dag/kg	
	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24		
SCA																
M	1,39 aA	1,24 aB	0,45 aA	0,30 aB	0,10ns	0,22ns	0,08 aA	0,08 aA	0,15ns	0,25ns	2,18 aA	1,59 aB	1,73ns	1,63ns		
M-S	1,25 bA	1,22 aA	0,34 bA	0,29 aB	0,16ns	0,25ns	0,11 aA	0,04 bB	0,16ns	0,27ns	1,84 abA	1,70 aA	1,74ns	1,57ns		
M-B-C	1,32 abA	1,15 aB	0,34 bA	0,33 aA	0,14ns	0,24ns	0,10 aA	0,08 aA	0,21ns	0,27ns	1,24 bA	1,22 aA	1,56ns	1,97ns		
M-S-B-C	1,25 bA	1,14 aA	0,36 bA	0,30 aB	0,11ns	0,24ns	0,10 aA	0,07 aB	0,21ns	0,26ns	1,24 bA	1,59 aA	1,75ns	1,44ns		
Média	-	-	-	-	0,13 B	0,24 A	-	-	0,18 B	0,26 A	-	-	-	-		
CA6																
M	1,39 aA	1,17 bB	0,40 aA	0,30 abB	0,09 aB	0,26 abA	0,11 aA	0,08 abA	0,15ns	0,28ns	2,85 aA	1,13 bB	1,54ns	1,72ns		
M-S	1,25 bA	1,27 aA	0,37 aA	0,34 abA	0,12 aB	0,18 bcA	0,15 aA	0,09 aB	0,08ns	0,23ns	1,45 bA	1,45 abA	2,00ns	1,55ns		
M-B-C	1,32 abA	1,23 abB	0,31 aA	0,24 bA	0,13 aB	0,35 aA	0,11 aA	0,05 bB	0,15ns	0,26ns	2,70 aA	1,72 aB	1,47ns	2,07ns		
M-S-B-C	1,25 bA	1,20 abA	0,35 aA	0,40 aA	0,12 aA	0,16 cA	0,10 aA	0,08 abA	0,14ns	0,28ns	1,66 bA	0,93 bB	1,70ns	1,85ns		
Média	-	-	-	-	-	-	-	-	0,13 B	0,26 A	-	-	-	-		
CA12																
M	1,42 aA	1,24 bcB	0,37ns	0,25ns	0,06 bB	0,29 aA	0,06 bA	0,04 aB	0,14ns	0,31ns	2,98 aA	1,32 abB	1,42ns	1,64ns		
M-S	1,33 cA	1,29 aB	0,39ns	0,29ns	0,13 aB	0,22 bA	0,11 aA	0,04 aB	0,14ns	0,23ns	2,52 abA	1,83 aB	1,43ns	1,48ns		
M-B-C	1,37 bcA	1,21 cB	0,39ns	0,28ns	0,13 aB	0,26 abA	0,09 abA	0,05 aB	0,16ns	0,28ns	2,58 abA	1,16 bB	1,61ns	1,64ns		
M-S-B-C	1,39 abA	1,29 abB	0,34ns	0,27ns	0,17 aB	0,31 aA	0,09 abA	0,05 aB	0,19ns	0,26ns	2,38 bA	1,60 abB	1,72ns	1,48ns		
Média	-	-	0,37 A	0,27 B	-	-	-	-	0,16 B	0,27 A	-	-	-	-		

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste F da ANOVA (P < 0,05): letras minúsculas comparam sistemas de manejo para descompactação do solo para cada safra; letras maiúsculas comparam as duas safras para cada sistema de manejo.

ns: não significativo.

M: milho solteiro em monocultivo;

M-S: milho com subsolagem;

M-B-C: milho, braquiária e crotalária;

M-S-B-C: milho, subsolagem, braquiária e crotalária.

Fonte: elaboração própria.

Tabela 3 - Densidade (Ds), Microporosidade (Mi), Macroporosidade (Ma), Capacidade de Água Disponível (CAD), Capacidade de Aeração (CA), Resistência do solo à Penetração (RP) e carbono orgânico (CO) na camada de 0,25-0,30 m para as condições de solo sem compactação adicional (SCA), com compactação adicional de 6 passadas (CA6) e com compactação adicional de 12 passadas (CA12).

Sistema de manejo	Ds		Mi		Ma		CAD		CA		RP		CO			
	Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³										MPa		dag/kg	
	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24	2022/23	2023/24		
SCA																
M	1,35 aA	1,18 bB	0,36 aA	0,27 bB	0,10 bB	0,30 aA	0,10 aA	0,06 abB	0,20ns	0,35ns	1,99 aA	0,62 cB	1,24ns	1,41ns		
M-S	1,24 bB	1,36 aA	0,35 aA	0,33 aA	0,14 aA	0,16 cA	0,09 aA	0,06 abA	0,16ns	0,21ns	1,42 cB	1,93 aA	1,27ns	1,56ns		
M-B-C	1,28 bA	1,22 bA	0,35 aA	0,33 aA	0,13 aB	0,22 bA	0,12 aA	0,10 aA	0,13ns	0,26ns	1,87 bA	1,54 bB	1,32ns	1,85ns		
M-S-B-C	1,24 bA	1,16 bB	0,36 aA	0,31 abB	0,15 aB	0,25 abA	0,09 aA	0,03 bB	0,13ns	0,33ns	1,16 dB	1,50 bA	1,41ns	1,31ns		
Média									0,15 B	0,29 A			-	-		
CA6																
M	1,35ns	1,21ns	0,40ns	0,29ns	0,11ns	0,25ns	0,11 abA	0,08 aA	0,17ns	0,27ns	2,51 aA	1,62 abB	1,27ns	1,37ns		
M-S	1,25ns	1,18ns	0,36ns	0,30 ns	0,14ns	0,25ns	0,16 aA	0,07 abB	0,15ns	0,30ns	1,09 cA	1,14 bcA	1,27ns	1,39ns		
M-B-C	1,30ns	1,18ns	0,39ns	0,32 ns	0,11ns	0,23ns	0,12 abA	0,05 bB	0,06ns	0,30ns	1,65 bA	1,78 aA	1,33ns	1,67ns		
M-S-B-C	1,26ns	1,28ns	0,37ns	0,33 ns	0,13ns	0,18ns	0,10 bA	0,06 abB	0,14ns	0,22ns	1,53 bcA	0,99 cB	1,30ns	1,66ns		
Média	1,29 A	1,21 B	0,38 A	0,31 B	0,12 B	0,23 A	-	-	0,13 B	0,27 A	-	-	-	-		
CA12																
M	1,38 aA	1,18 bB	0,37 abA	0,32 aB	0,06 dB	0,26 abA	0,08ns	0,10ns	0,17ns	0,25ns	1,88 aA	1,32 abA	1,49ns	1,54ns		
M-S	1,27 cA	1,16 bB	0,33 bA	0,33 aA	0,19 bB	0,24 bA	0,09ns	0,07ns	0,17ns	0,25ns	1,12 aB	2,08 aA	1,36ns	1,40ns		
M-B-C	1,33 bA	1,30 aA	0,39 aA	0,31 aB	0,12 cB	0,22 bA	0,07ns	0,07ns	0,16ns	0,25ns	1,60 aA	1,20 bA	1,35ns	1,41 ns		
M-S-B-C	1,33 bA	1,11 cB	0,34 bA	0,30 aB	0,28 aA	0,29 aA	0,12ns	0,07ns	0,18ns	0,34ns	1,23 aA	1,28 abA	1,37ns	1,38ns		
Média	-	-	-	-	-	-	-	-	0,17 B	0,27 A	-	-	-	-		

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste F da ANOVA (P < 0,05): letras minúsculas comparam sistemas de manejo para descompactação do solo para cada safra; letras maiúsculas comparam as duas safras para cada sistema de manejo.

ns: não significativo.

M: milho solteiro em monocultivo;

M-S: milho com subsolagem;

M-B-C: milho, braquiária e crotalária;

M-S-B-C: milho, subsolagem, braquiária e crotalária.

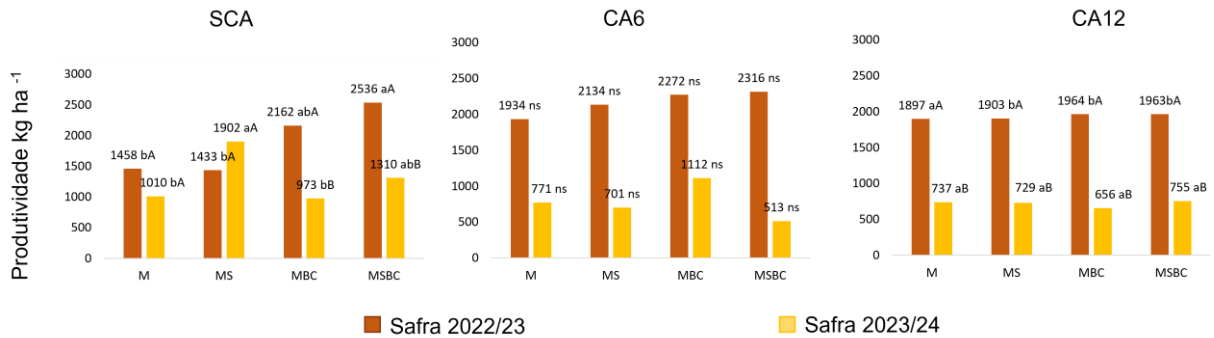
Fonte: elaboração própria.

3.2.3 Produtividade dos sistemas de manejo

A produtividade agrícola nas safras de feijão avaliadas (Figura 5) demonstra variações significativas entre os sistemas de manejo e as condições de compactação do solo. Observa-se, de maneira geral, uma menor produtividade na safra 2023/2024 em comparação com a safra 2022/2023 em todas as condições de compactação e sistemas de manejo testados. A menor produtividade da safra 2023/2024 esteve associada à ocorrência de déficits hídricos acentuados durante a fase reprodutiva do feijoeiro, período determinante para a formação e preenchimento dos grãos (Figura 3). Corroboram com esses resultados, informações da CONAB (Brasil, 2024), que apresentam redução de 21,4 milhões de toneladas na produção da safra 2023/2024, em comparação ao ciclo anterior.

Na safra 2022/2023, a distribuição das chuvas foi mais regular, proporcionando condições hídricas adequadas ao longo do ciclo (Figura 3), o que refletiu diretamente na produtividade, que foi superior em comparação com a safra seguinte. Já na safra 2023/2024, o déficit hídrico apresentado coincidiu com o período crítico da cultura, reduzindo significativamente a eficiência do enchimento dos grãos e impactando o rendimento final. Esse efeito foi agravado nos tratamentos com maior compactação do solo, especialmente em CA12. Esse efeito pode ter sido agravado nos tratamentos com maior compactação do solo, especialmente em CA12. Embora a infiltração não tenha sido avaliada diretamente neste estudo, é conhecido na literatura que solos compactados tendem a apresentar menor capacidade de infiltração e retenção de água, o que poderia ter limitado ainda mais o desenvolvimento da planta sob condições de estiagem.

Figura 5 -Produtividade médias de feijão das safras 2022/23 e 2023/24 dos sistemas de manejo: M - milho solteiro em monocultivo; MS - milho e subsolagem; MBC - milho, braquiária e crotalária; MSBC - milho, subsolagem, braquiária e crotalária, sob diferentes condições de compactação do solo: SCA – sem compactação adicional; CA6 – compactação adicional com 6 passadas e trator; CA12 – compactação adicional com 12 passadas de trator.



Letra minúsculas comparam métodos de descompactação, enquanto letras maiúsculas comparam safras (cores diferentes).

Fonte: elaboração própria.

Embora a infiltração não tenha sido medida diretamente neste estudo, é provável que nos tratamentos que incluíram estratégias de descompactação, especialmente aqueles combinando descompactação mecânica e biológica, tenham ocorrido melhoria na estrutura do solo, o que, conforme Silva *et al.* (2005), pode favorecer a infiltração e o armazenamento de água. Essa melhoria estrutural pode ter contribuído para um desempenho relativamente melhor em comparação com os solos mais compactados, embora a restrição hídrica severa tenha sido determinante para a redução da produtividade na safra 2023/2024, demonstrando que uma boa estrutura do solo influencia a capacidade de retenção de água, mas não substitui uma disponibilidade hídrica adequada.

É importante destacar que os tratamentos se referem ao manejo do solo na entressafra e que, na safra, foi cultivado feijão em todos os sistemas. Dessa forma, as diferenças observadas na produtividade refletem os efeitos das práticas adotadas anteriormente.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) processo n. APQ-01173-24, da Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ) - Projeto Agrisus 3246/22, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Projeto 406903-2022, da Coordenação de Aperfeiçoamento de

Pessoal de Nível Superior (CAPES) por meio do PROEX/PPGCS, além do apoio do Departamento de Ciência do Solo da UFLA e da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais (EMATER MG).

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que os sistemas de manejo adotados na entressafra influenciaram positivamente a estrutura física do solo, principalmente nas camadas mais superficiais (0,00-0,20 m), onde os efeitos da compactação foram mais expressivos. Sistemas com maior diversidade vegetal, apresentaram ganhos consistentes em atributos como Ds, Ma e CAD.

Quanto a inclusão da subsolagem em alguns tratamentos, seus efeitos foram limitados à camada intermediária e similares aos obtidos apenas com o uso de plantas de cobertura, o que sugere que seu uso deve ser criteriosamente avaliado. Nas camadas mais profundas (0,25–0,30 m), não se observaram sinais de compactação limitante, tampouco benefícios agrônômicos relevantes associados à intervenção mecânica.

Ainda que não tenham sido verificadas diferenças significativas nos teores de carbono orgânico entre os sistemas de manejo, os efeitos estruturais observados indicam que práticas vegetais diversificadas promovem benefícios ao solo mesmo em curto prazo. Assim, a adoção de plantas de cobertura na entressafra configura-se como uma estratégia mais sustentável e eficiente na mitigação da compactação superficial, podendo reduzir a necessidade de práticas mecânicas invasivas e de alto custo.

Recomenda-se a continuidade de estudos em longo prazo para avaliar o acúmulo gradual de carbono e os impactos produtivos dessas estratégias, considerando diferentes condições edafoclimáticas e sistemas de manejo.

REFERÊNCIAS

BERTOLLO, A. M. *et al.* Precrops alleviate soil physical limitations for soybean root growth in an Oxisol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 206, Jan. 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104820.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. *In*: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis, part 1: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of

Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 363-382. (Agronomy monograph, 9). Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=498675>. Acesso em: 19 fev. 2025.

BLANCO-CANQUI, H.; WORTMANN, C. S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till?: a review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 198, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2019.104534.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Levantamento da safra 2023/2024**. Brasília, DF: Conab, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5728-ultimo-levantamento-da-safra-2023-2024-estima-producao-de-graos-em-298-41-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 16 fev. 2025.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Safra de grãos: 12º levantamento produção área produtividade**. Brasília, DF: Conab, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/fazenda/pt-br/central-de-conteudo/publicacoes/conjuntura-economica/agricola/2023/20230906_levantamento-de-safras_conab.pdf. Acesso em: 16 fev. 2025.

CALONEGO, J. C. *et al.* Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, London, v. 85, p. 31-37, Apr. 2017.

CORREA, J. *et al.* Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 70, n. 21, p. 6019-6034, 2019.

CRESPO, C. *et al.* Effect of intensified cropping sequences on soil physical properties in contrasting environments. **Catena**, Amsterdam, v. 207, Dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105690>.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, dez. 2007.

DE PAEPE, J. L.; BONO, A. A.; ALVAREZ, R. Simple estimation of available water capacity in soils of semiarid and subhumid environments. **Arid Land Research and Management**, London, v. 32, n. 2, p. 133-148, Apr. 2018.

FENG TIANAO, S. *et al.* Soil properties and maize growth as affected by subsoiling and traffic-induced compaction. **IOP Conference Series: earth and environmental science**, Philadelphia, v. 1225, n. 1, Aug. 2023. DOI: 10.1088/1755-1315/1225/1/012077.

FRANCHINI, J. C. *et al.* Eficiência na manutenção e readequação do sistema de terraceamento numa fazenda no norte do Paraná. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 20., 2016, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Curitiba: SBCS-NEPAR; Londrina: IAPAR, 2016.

FURQUIM, L. C. *et al.* Resistência do solo à penetração e velocidade de infiltração de água em sistemas de cultivo integrados sobre área de pastagem degradada. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 16, n. 5, 2020. Disponível em:

<https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscador.html?task=detalhes&source=all&id=W3135098540>. Acesso em: 19 fev. 2025.

GONGORA, V. R. M. *et al.* Impact of cover crops on soil physical properties, soil loss and runoff in compacted Oxisol of southern Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 31, Dec. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00577>.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, June 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário: resultados definitivos 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73096>. Acesso em: 16 fev. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Balço hídrico de cultivo e perda de produtividade**. Brasília, DF: INMET, 2025. Disponível em: <https://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/monitoramento/bhc>. Acesso em: 14 fev. 2025.

JORDON, M.; SMITH, P. Modelling soil carbon stocks following reduced tillage intensity: a framework to estimate decomposition rate constant modifiers for RothC-26.3, demonstrated in north-west Europe. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 222, Aug. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105428>.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of conservation agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, London, v. 76, n. 1, p. 29-51, Jan. 2019.

KELLER, T. *et al.* Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 194, Nov. 2019. DOI: [10.1016/j.still.2019.104293](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293).

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. *In*: BLACK, C. A. (ed.). **Methods of soil analysis: I, physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-662.

KOZAK, M.; PIEPHO, H. P. What's normal anyway?: residual plots are more telling than significance tests when checking ANOVA assumptions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Hoboken, v. 204, n. 1, p. 86-98, Feb. 2018.

MOREIRA, S. G. **Desafios para a sustentabilidade dos sistemas de produção com culturas anuais**. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/353587475_Desafios_para_a_sustentabilidade_dos_sistemas_de_producao_com_culturas_anuais. Acesso em: 19 fev. 2025.

NOURI, A. *et al.* Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. **Geoderma**, Amsterdam, v. 337, p. 998-1008, Mar. 2019.

PEIXOTO, D. S. *et al.* Diagnosing, ameliorating, and monitoring soil compaction in no-till Brazilian soils. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, Madison, v. 2, n. 1, p. 1-14, Jan.

2019. DOI: <https://doi.org/10.2134/AGE2018.09.0035>.

PEIXOTO, D. S. *et al.* Occasional tillage in no-tillage systems: a global meta-analysis. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 745, Nov. 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140887.

PEÑA, E. A.; SLATE, E. H. Global validation of linear model assumptions. **Journal of the American Statistical Association**, New York, v. 101, n. 473, p. 341, Mar. 2006.

REYNOLDS, W. D. *et al.* Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, n. 3/4, p. 466-474, Aug. 2008.

REYNOLDS, W. D. *et al.* Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, n. 3/4, p. 252-263, Sept. 2009.

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**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 141-152, Dec. 2016.

RSTUDIO TEAM. **RStudio**: integrated development environment for R. Boston: Rstudio, 2025. Disponível em: <https://posit.co/download/rstudio desktop/>. Acesso em: 18 fev. 2025.

SILVA, B. M. *et al.* Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 464-475, 2014.

SILVA, M. A. S. da *et al.* Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 544-552, jun. 2005.

SOUZA, E. D. de *et al.* Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 1, p. 79-88, 2010.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 2, p. 395-401, jun. 2001.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 19 fev. 2025.

TORRES, J. L. R. *et al.* Mechanical and biological soil decompaction for no-tillage maize production. **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 10, Sept. 2022. DOI: 10.3390/agronomy12102310.

Arquivo suplementar

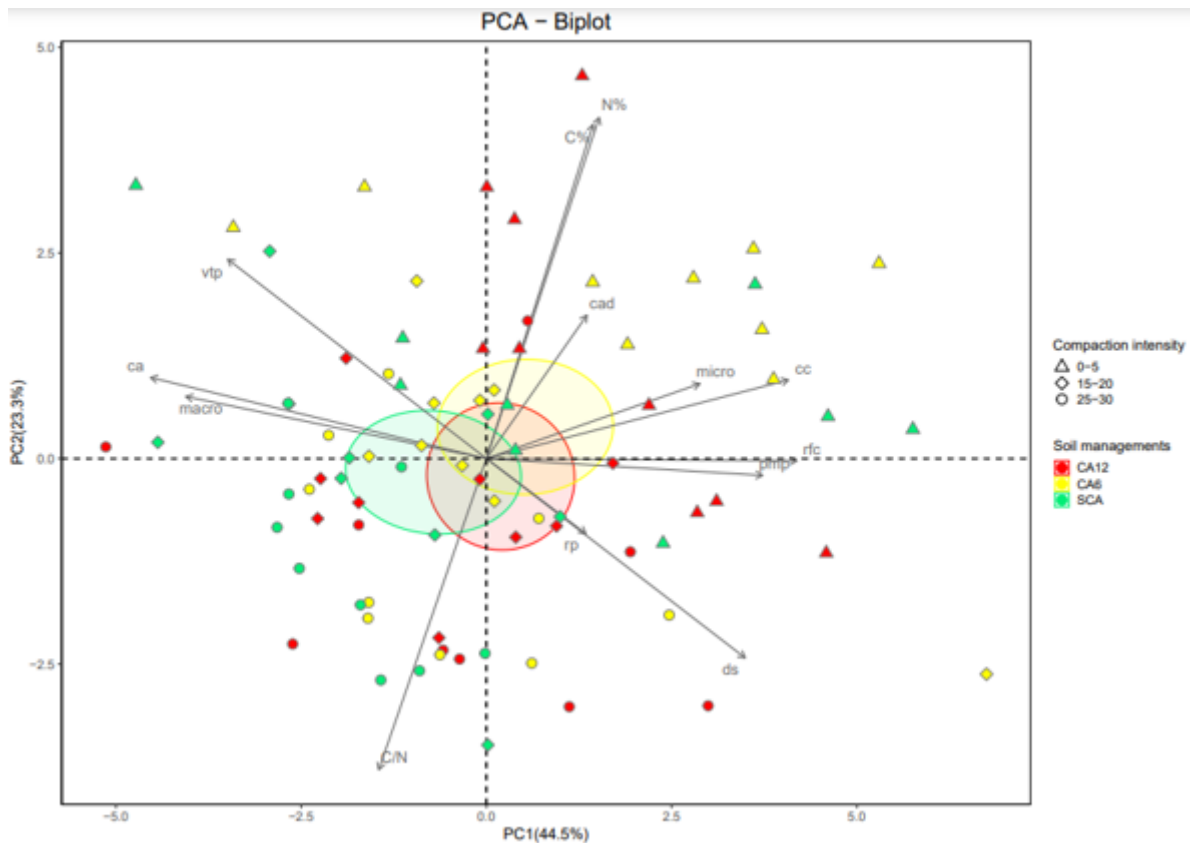


Figura A1. Análise de componentes principais das variáveis, considerando as médias por bloco nas profundidades 0,00-0,05, 0,15-0,20 e 0,25-0,30 m nas três condições de compactação: SCA - sem compactação adicional; CA6 - compactação adicional de 6 passadas de trator e CA12 - Compactação adicional de 12 passadas de trator.

Atributos: macro - macroporosidade, micro - microporosidade, ca - capacidade de aeração, ds - densidade do solo, cad - capacidade de água disponível, rp - resistência a penetração, vtp - volume total de poros; C% - percentual de carbono. N% - percentual de nitrogênio, cc - capacidade de campo. rfc - capacidade de campo relativa, pmp - ponto de murcha permanente, C/N - relação carbono nitrogênio.

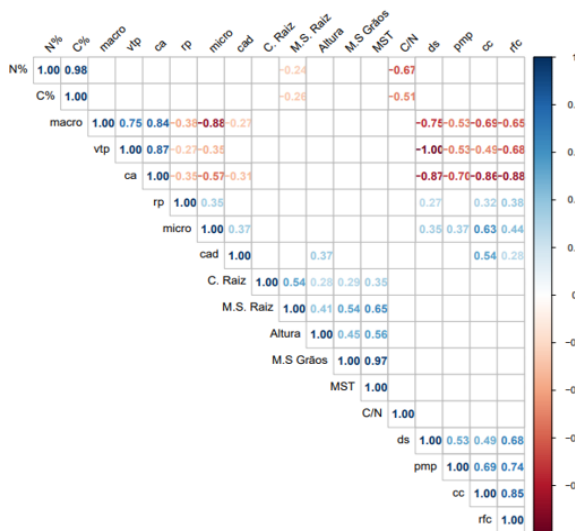


Figura A2. Correlação de Pearson das variáveis, na profundidade 0,00-0,05 m.

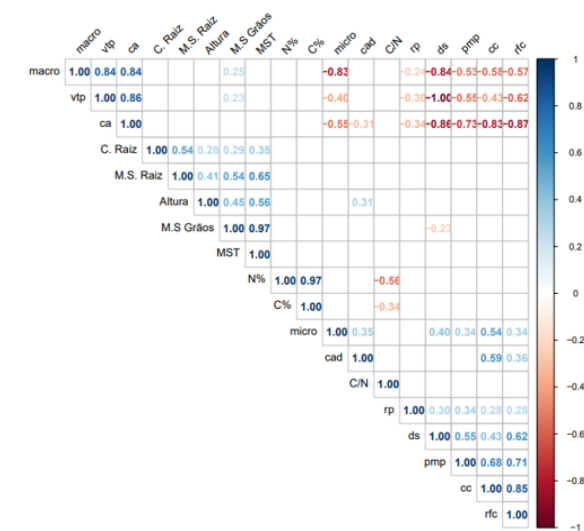


Figura A3. Correlação de Pearson das variáveis, nas profundidades 0,15-0,20 m.

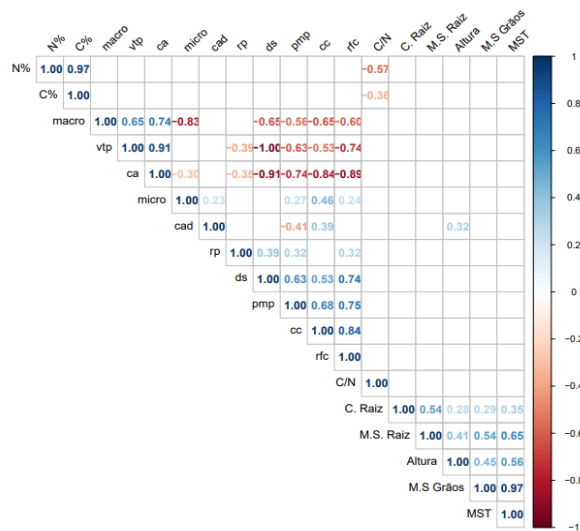


Figura A4. Correlação de Pearson das variáveis, nas profundidades 0,25-0,30 m.

Figuras A2, A3 e A4: C% - percentual de carbono. N% - percentual de nitrogênio, macro - macroporosidade, vtp – volume total de poros, ca - capacidade de aeração, micro - microporosidade, cad - capacidade de água disponível, rp - resistência a penetração, ds - densidade do solo, pmp – ponto de murcha permanente, cc – capacidade de campo. rfc – capacidade de campo relativa, C/N – relação carbono-nitrogênio, C. Raiz – comprimento de raiz, M. S. Raiz – matéria seca da Raiz, Altura - altura de planta, M. S. Grãos – massa seca de grãos e MST – massa seca total.

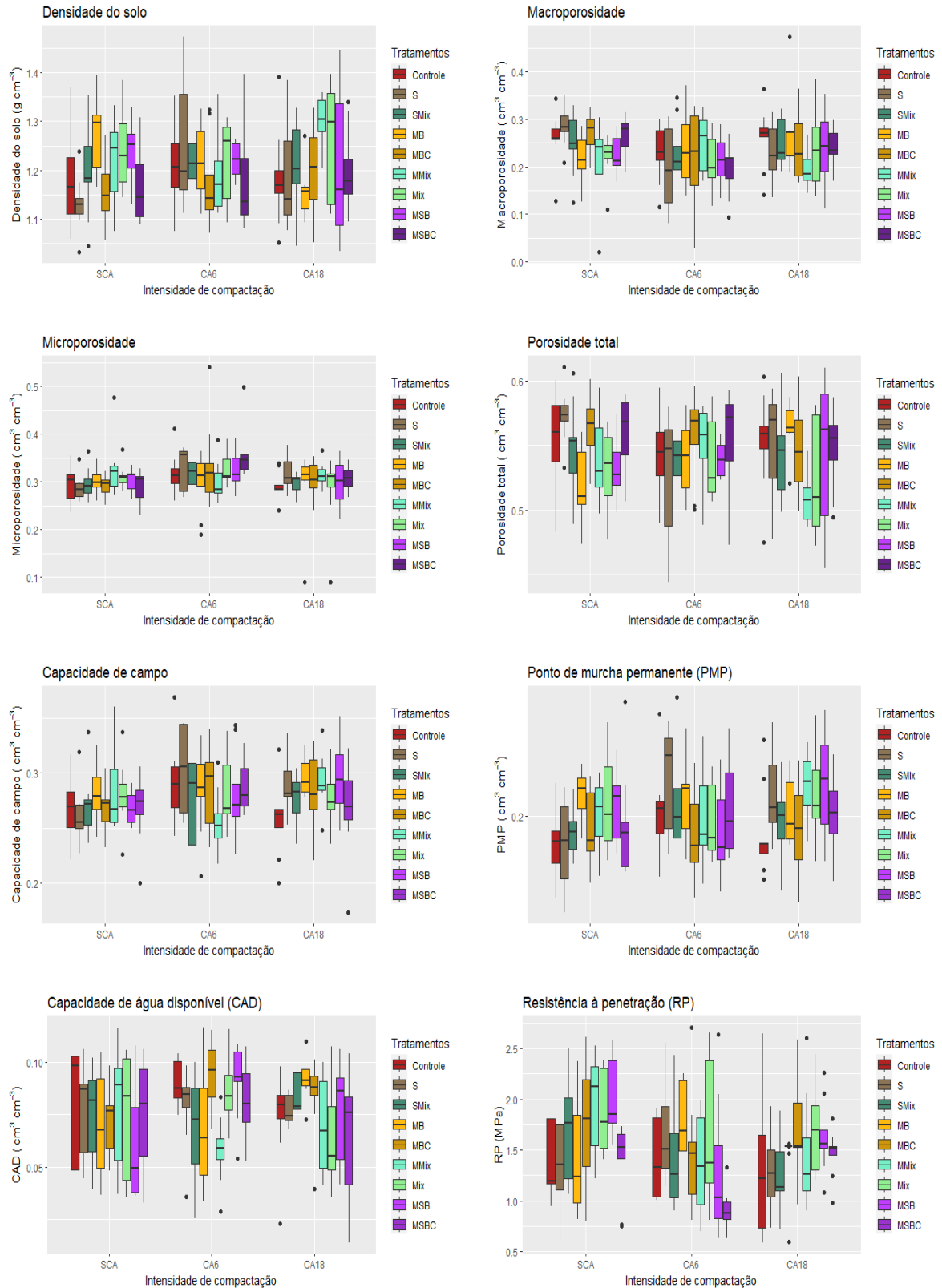


Figura A5. Análise de exploratória para as variáveis considerando os nove tratamentos de descompactação do solo: 1 – Milho: milho em monocultivo (controle); 2 – MSBC: milho, subsolação, braquiária (*Brachiaria ruziziensis*) e crotalária (*Crotalaria spectabilis*); 3 – MSB: milho, subsolação, braquiária; 4 – MBC: milho, braquiária, crotalária; 5 – MB: milho e braquiária; 6 – MMix: milho e mix de sementes; 7 – Mix: mix de sementes; 8 – MSMix: subsolação e mix sementes; 9 – MS: milho e subsolação.

continua

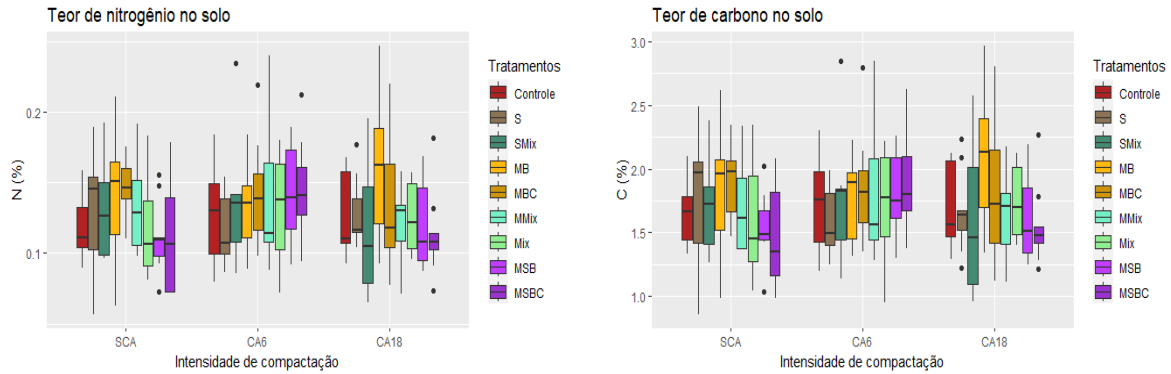


Figura A5. Análise de exploratória para as variáveis considerando os nove tratamentos de descompactação do solo: 1 – Milho: milho em monocultivo (controle); 2 – MSBC: milho, subsolagem, braquiária (*Brachiaria ruziziensis*) e crotalária (*Crotalaria spectabilis*); 3 – MSB milho, subsolagem, braquiária; 4 – MBC: milho, braquiária, crotalária; 5 – MB: milho e braquiária; 6 – MMix: milho e mix de sementes; 7 – Mix: mix de sementes; 8 – MSMix: subsolagem e mix sementes; 9 – MS: milho e subsolagem.

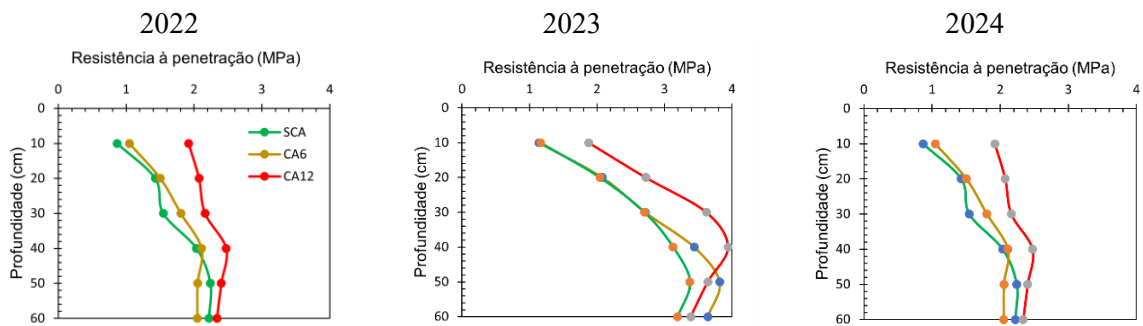


Figura A6. Valores médios de resistência do solo à penetração (RP) em função da profundidade de avaliação para os tratamentos SCA (sem compactação adicional), CA6 (compactação adicional com 6 passadas de trator) e CA12 (compactação adicional com 12 passadas de trator) em novembro de 2022, fevereiro de 2023 e 2024.

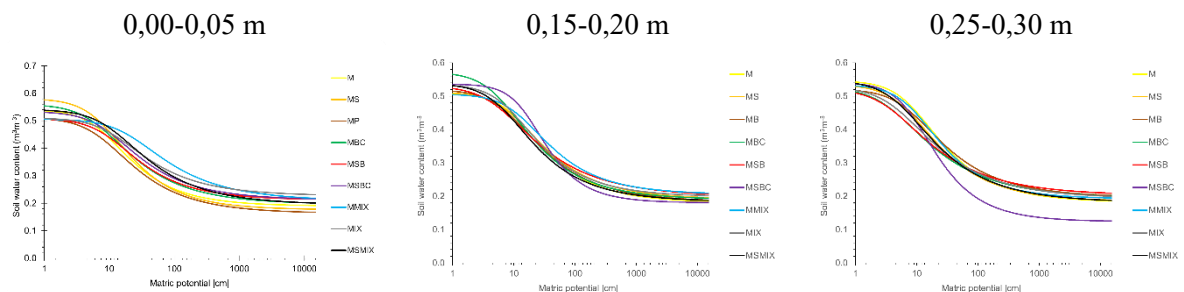


Figura A7. Curvas de retenção de água no solo nas camadas de 0,00-0,05, 0,15-0,20 e 0,25-0,30 m por sistemas de manejo, na condição sem compactação adicional (SCA).

0,00-0,05 m

0,15-0,20 m

0,25-0,30 m

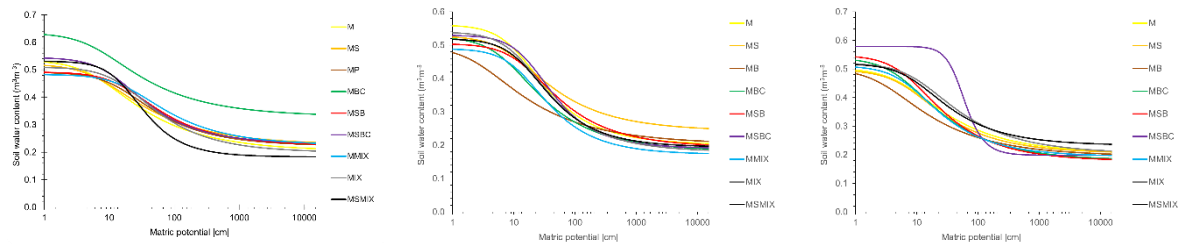


Figura A8. Curvas de retenção de água no solo nas camadas de 0,00-0,05, 0,15-0,20 e 0,25-0,30 m por sistemas de manejo, compactação adicional de 6 passadas de um trator (CA6).

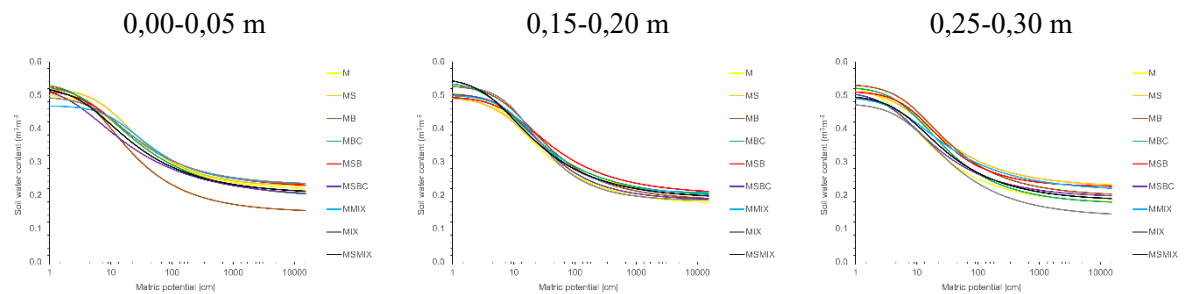


Figura A9. Curvas de retenção de água no solo nas camadas de 0,00-0,05, 0,15-0,20 e 0,25-0,30 m por sistemas de manejo, compactação adicional de 12 passadas de um trator (CA12).

Figuras A7, A8 e A9: M - milho em monocultivo; MS - milho com subsolagem; MBC - milho consorciado com braquiária e crotalária; MSBC - milho com subsolagem, braquiária e crotalária; MSB - milho com subsolagem e braquiária; MB - milho e braquiária; MMix - milho com mix de sementes; Mix - mix de sementes; MSMix - milho com subsolagem e mix sementes.

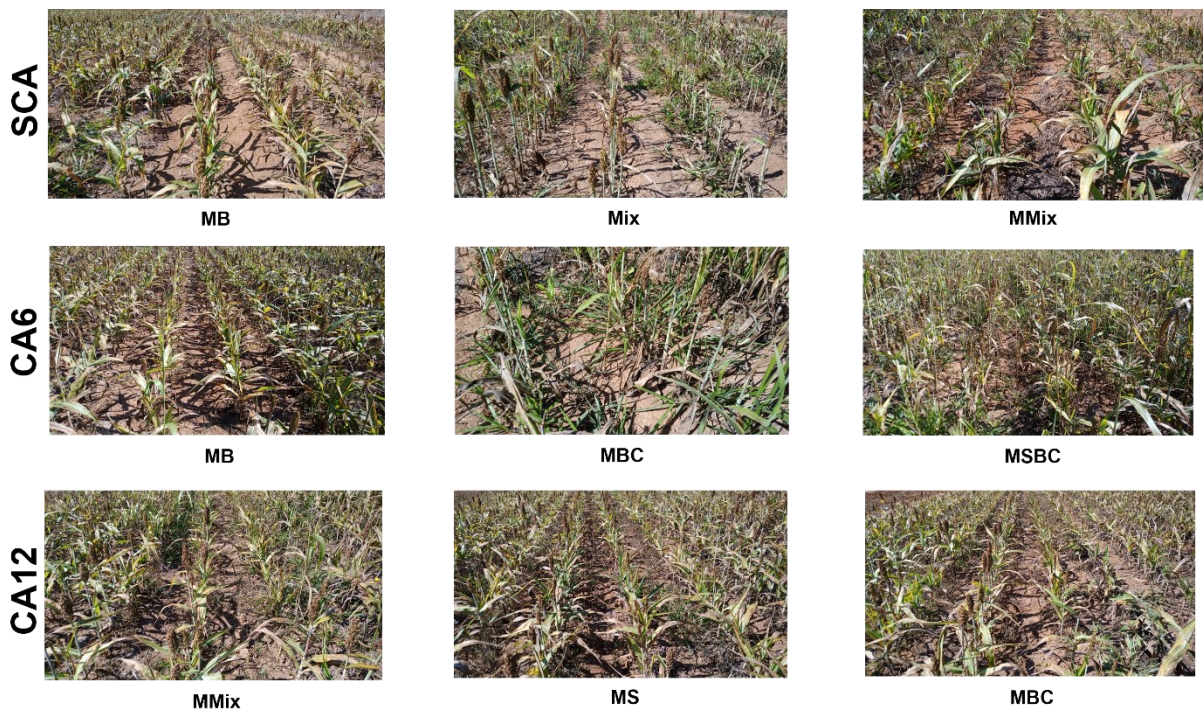


Figura A10. Registro fotográfico de algumas parcelas do bloco 1, tomado em 01/07/2022.

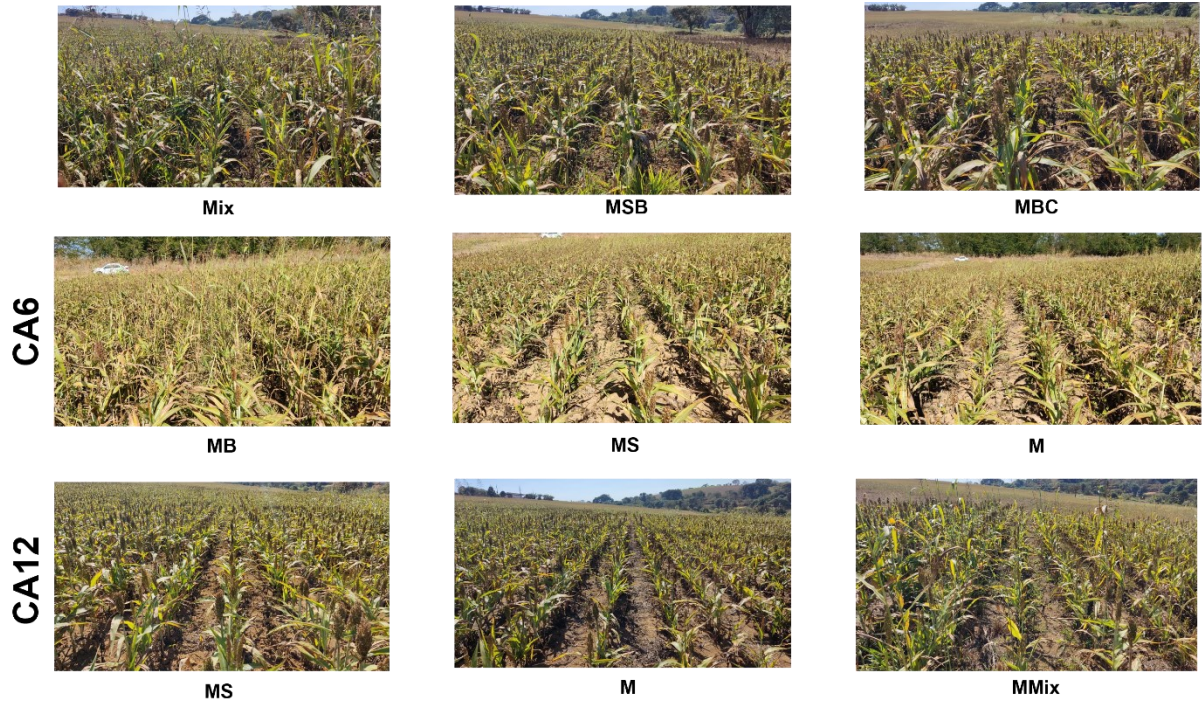


Figura A11. Registro fotográfico de algumas parcelas do bloco 2, tomado em 01/07/2022.

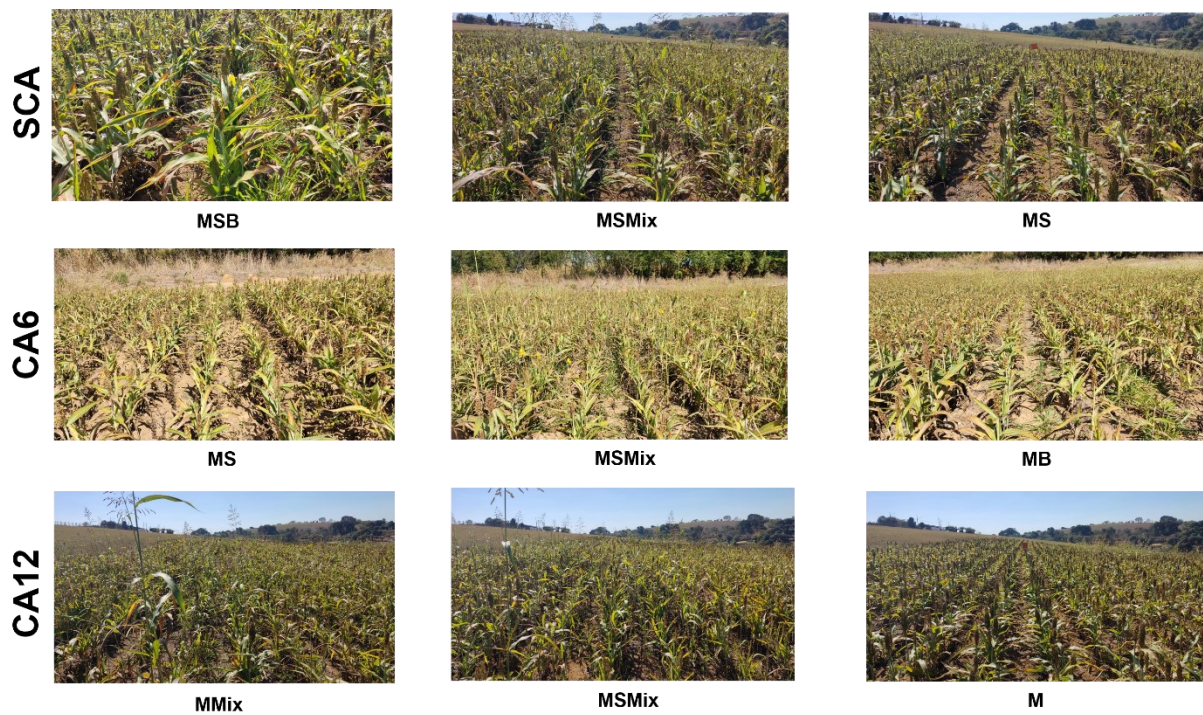


Figura A12. Registro fotográfico de algumas parcelas do bloco 3, tomado em 01/07/2022.



Figura A13. Registro fotográfico dos três blocos experimentais, tomado em 02/11/2022.



Figura A14. Aspecto geral dos blocos após colheita da safra de verão 2022/2023.

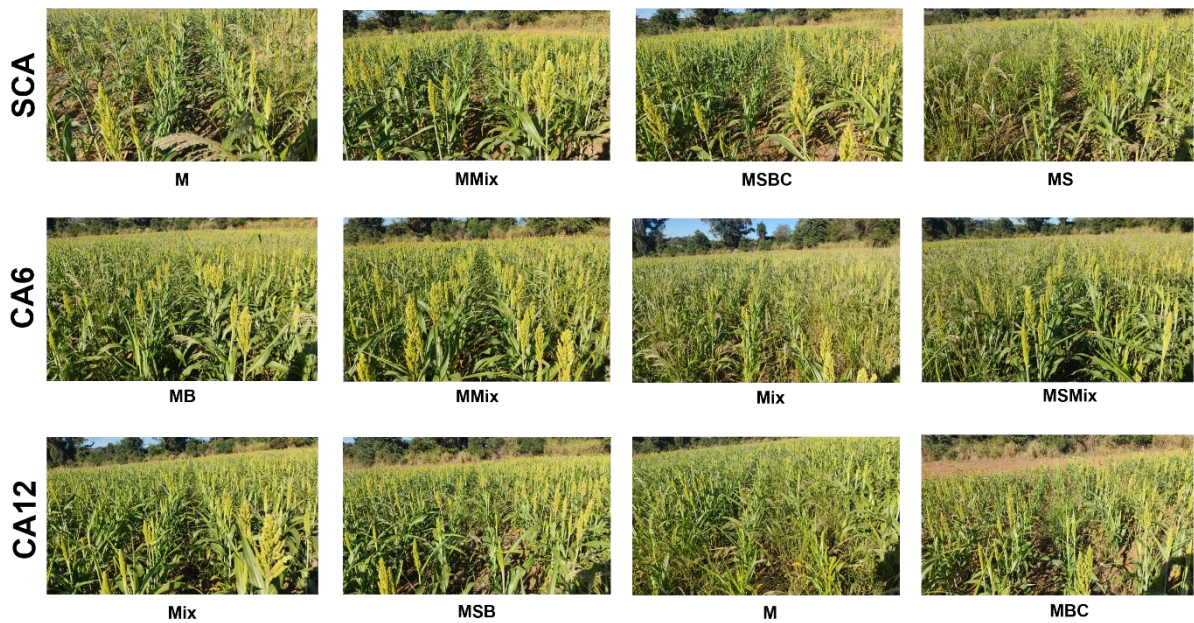


Figura A15. Imagens de algumas parcelas do bloco 1 em 26 de junho de 2023.

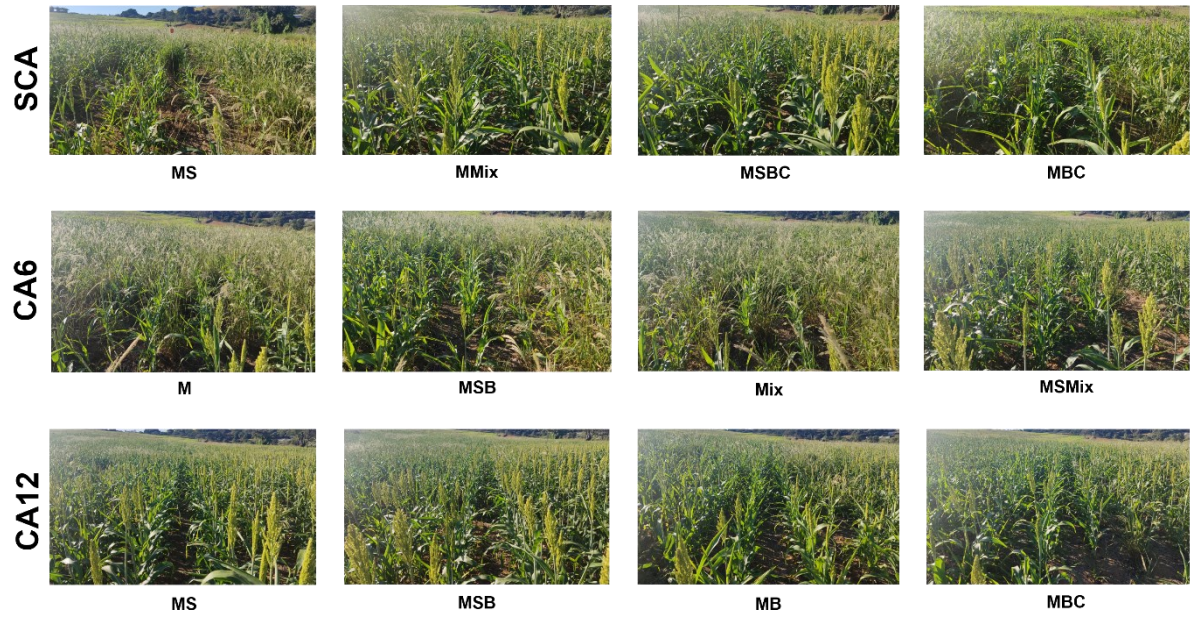


Figura A16. Imagens de algumas parcelas do bloco 2 em 26 de junho de 2023.

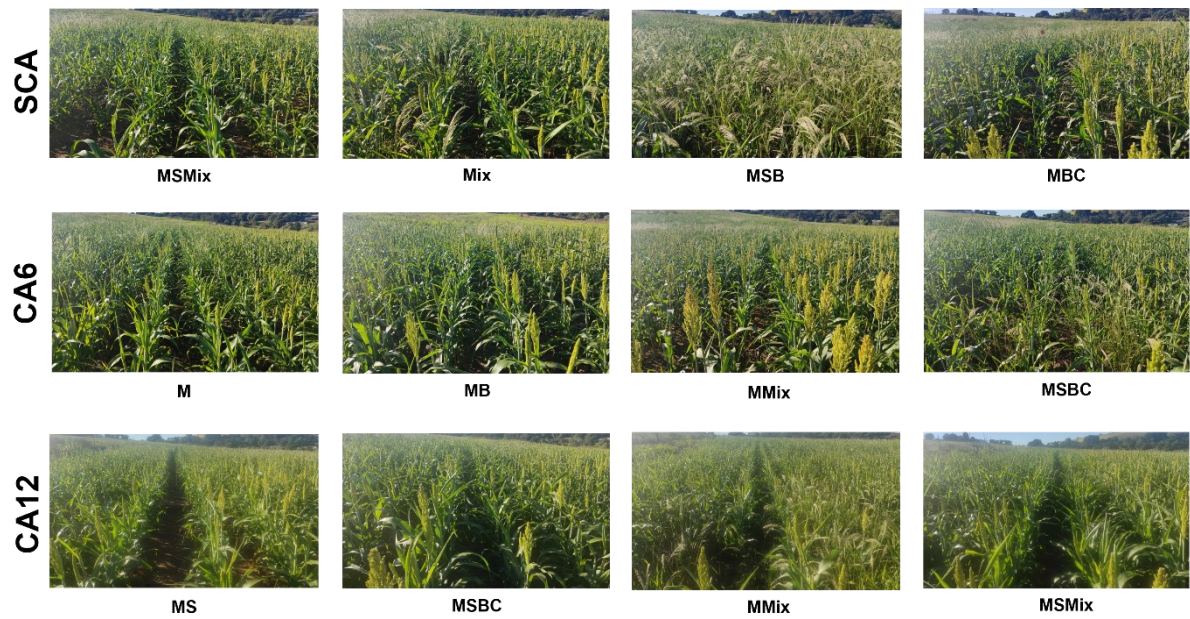


Figura A17. Imagens de algumas parcelas do bloco 3 em 26 de junho de 2023.



Figura A18. Imagens demonstrando a condição do solo após subsolagem realizada em 18/03/2022, para os tratamentos SCA (sem compactação adicional), CA6 (compactação adicional com 6 passadas de trator) e CA12 (compactação adicional com 12 passadas de trator) em novembro de 2022, fevereiro de 2023 e 2024 .

TERCEIRA PARTE

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa avaliou o impacto de diferentes estratégias de manejo do solo na qualidade física, na dinâmica do carbono e na produtividade agrícola, com foco em sistemas diversificados de produção, plantas de cobertura e intervenções mecânicas. Os resultados demonstram que a integração de práticas como rotação de culturas, uso de plantas de cobertura e subsolagem – quando utilizada em solos diagnosticados como compactados – pode melhorar significativamente a qualidade física do solo e a produtividade das culturas.

A inclusão de forrageiras em consórcio com culturas principais, como o milho, bem como a adoção de sistemas integrados que associam agricultura e pastagens, revelou-se uma estratégia eficiente para a recuperação da estrutura do solo e a promoção de ganhos no estoque de carbono, especialmente em solos argilosos suscetíveis a compactação. No entanto, os resultados evidenciaram que a disponibilidade hídrica pode ser um fator limitante para a plena manifestação dos benefícios dessas práticas, reforçando a necessidade de abordagens holísticas que considerem a interação entre condições climáticas e manejos agrícolas.

Além disso, observou-se que certos benefícios, como o aumento do estoque de carbono no solo, tendem a se tornar mais expressivos em médio e longo prazo. De forma semelhante, os efeitos positivos da subsolagem, como a redução da resistência do solo à penetração, também podem se estender ao longo do tempo, especialmente quando associados ao uso de plantas de cobertura. Isso destaca a importância de monitoramentos contínuos e da adoção de práticas conservacionistas de forma consistente ao longo do tempo. A pesquisa também aponta que a compactação do solo, quando gerenciada especificamente, pode ser mitigada sem comprometer a sustentabilidade e a produtividade dos sistemas agrícolas.

Este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre o manejo sustentável do solo em sistemas agrícolas conservacionistas, fornecendo diretrizes técnicas para a mitigação da compactação, a melhoria da qualidade física do solo e o aumento da resiliência dos sistemas produtivos. As orientações e recomendações aqui apresentadas podem subsidiar a tomada de decisão de agricultores, técnicos e formuladores de políticas públicas, promovendo uma agricultura mais sustentável e adaptada às variabilidades ambientais no Brasil.

Contudo, a adoção dessas práticas sustentáveis no campo ainda enfrenta desafios, como limitações técnicas e econômicas, baixa disponibilidade de máquinas adaptadas, e carência de

assistência técnica continuada, especialmente entre pequenos produtores. Esses entraves reforçam a importância do trabalho de extensão rural como elo entre o conhecimento científico e sua aplicação prática, promovendo capacitações, adaptações tecnológicas e o fortalecimento da agricultura conservacionista. Além disso, recomenda-se a continuidade dos estudos em longo prazo, com monitoramento dos indicadores físicos e químicos do solo em diferentes condições edafoclimáticas, a fim de aprofundar a compreensão dos efeitos combinados das práticas de manejo e subsidiar recomendações cada vez mais assertivas.

REFERÊNCIAS

- ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden I: soil physical properties and crop yield in six field experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1/2, p. 67-78, 2001.
- AURÉLIO, M. *et al.* **Compactação do solo**: consequências para o crescimento vegetal. Planaltina, DF: Embrapa, 2005. (Documentos, 136).
- BERTOLLO, A. M. *et al.* Precrops alleviate soil physical limitations for soybean root growth in an Oxisol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 206, Jan. 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104820.
- BEUTLER, A. N. *et al.* Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, p. 167-177, 2001.
- BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, Amsterdam, v. 326, p. 164-200, Sept. 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.03.011.
- BLANCO-CANQUI, H.; WORTMANN, C. S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till?: a review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 198, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2019.104534.
- BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; FREDERICK, J. R. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, p. 49-57, 2002.
- CALONEGO, J. C. *et al.* Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, London, v. 85, p. 31-37, 2017. DOI: 10.1016/j.eja.2017.02.001.
- COLLARES, G. L. *et al.* Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 933-942, 2008.
- CORREA, J. *et al.* Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 70, n. 21, p. 6019-6034, 2019. DOI: 10.1093/jxb/erz383.
- CUBILLA, M. *et al.* Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Santa Maria, v. 71, p. 29-32, 2002.
- DAIGH, A. L. M. *et al.* Yields and yield stability of no-till and chisel-plow fields in the Midwestern US Corn Belt. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 218, p. 243-253, Apr. 2018.
- DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; GONÇALVES, S. L. **Manejo da compactação do solo em sistemas de produção de soja sob semeadura direta**. Brasília, DF: Embrapa Soja, 2008. (Circular técnica INFOTECA-E).

DERPSCH, R. *et al.* **Controle da erosão no Paraná, Brasil:** sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Curitiba: GTZ, 1991.

DEVINE, S. *et al.* Soil aggregates and associated organic matter under conventional tillage, no-tillage, and forest succession after three decades. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 9, n. 1, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084988>.

DIAS JÚNIOR, M. de S. Compactação do solo. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ED.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 55-94.

DIAS JÚNIOR, M. de S.; TASSINARI, D.; MARTINS, P. C. C. Compactação do solo: atualização. *In*: SEVERIANO, E. C.; MORAES, M. F.; PAULA, A. M. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. v. 10, p. 7-69.

DRESCHER, M. S. *et al.* Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, p. 1713-1722, 2011.

FIGUEIREDO, C. C. *et al.* Propriedades físico-hídricas em Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 146-151, 2009.

FIORINI, A. *et al.* May conservation tillage enhance soil C and N accumulation without decreasing yield in intensive irrigated croplands?: results from an eight-year maize monoculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 296, Mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106926>.

FRANCHINI, J. C. *et al.* Eficiência na manutenção e readequação do sistema de terraceamento numa fazenda no norte do Paraná. *In*: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 20., 2016, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Curitiba: SBSC-NEPAR; Londrina: IAPAR, 2016.

GONÇALVES, W. G. *et al.* Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, p. 67-75, 2006.

GUBIANI, P. I. *et al.* Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, p. 1502-1511, 2013.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. R.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 239-282, 1988.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, June 2005. DOI: 10.1016/j.still.2004.08.009.

HERNANI, L. C. *et al.* **Uma resposta conservacionista:** o impacto do sistema plantio direto. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1122029>. Acesso em: 18 fev. 2025.

HORN, R. *et al.* Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n. 1/2, p. 23-36, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário: resultados definitivos 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73096>. Acesso em: 16 fev. 2025.

ISHAQ, M. *et al.* Subsoil compaction effects on crop in Punjab, Pakistan: II root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 3/4, p. 153-161, 2001.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of conservation agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, London, v. 76, n. 1, p. 29-51, Jan. 2019. DOI: 10.1080/00207233.2018.1494927.

KELLER, T. *et al.* Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 194, Nov. 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.104293.

KUROTHE, R. S. *et al.* Effect of tillage and cropping systems on runoff, soil loss and crop yields under semiarid rainfed agriculture in India. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 140, p. 126-134, 2014.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, Berlin, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

LIMA, V. M. P. *et al.* Least limiting water range and porosity of cultivated soils in an environmental protection area in the south of Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 5, p. 1087-1095, 2009.

LIPIEC, J.; STĘPNIEWSKI, W. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n. 1/2, p. 37-52, Aug. 1995. DOI: 10.1016/0167-1987(95)00474-7.

MACHADO, P. L. O. de A. **Compactação do solo e crescimento de plantas: como identificar, evitar e remediar**. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2003. (Documentos. INFOTECA-E).

MARTINS, F. P.; SANTOS, E. L. dos. Taxa de infiltração da água e a resistência do solo a penetração sob sistemas de uso e manejo. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 6, n. 4, p. 28-40, 2017.

- MARTINS, P. C. C. **Capacidade de suporte de carga de diferentes classes de solos submetidas a diferentes usos**. 2012. 100 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- MATTOS, C. G. de. **Perfil cultural**: instrumento de avaliação de atributos físicos e morfológicos em solos agrícolas. 2016. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônoma) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2016.
- NAWAZ, M. F.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 33, n. 2, p. 291-309, Apr. 2013. DOI: 10.1007/s13593-011-0071-8.
- NOURI, A. *et al.* Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. **Geoderma**, Amsterdam, v. 337, p. 998-1008, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.10.016.
- NUNES, M. R. *et al.* Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, Amsterdam, v. 259, p. 149-155, 2015.
- NUNES, M. R. *et al.* Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 49, n. 7, p. 531-539, jul. 2014. DOI: 10.1590/S0100-204X2014000700005.
- PEIXOTO, D. S. *et al.* Diagnosing, ameliorating, and monitoring soil compaction in no-till Brazilian soils. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, Madison, v. 2, n. 1, Aug. 2019a. DOI: 10.2134/age2018.09.0035.
- PEIXOTO, D. S. *et al.* Occasional tillage in no-tillage systems: a global meta-analysis. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 745, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140887.
- PEIXOTO, D. S. *et al.* A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 194, Nov. 2019b. DOI: 10.1016/j.still.2019.104307.
- PENTOŚ, K.; PIECZARKA, K.; SERWATA, K. The relationship between soil electrical parameters and compaction of sandy clay loam soil. **Agriculture**, London, v. 11, n. 2, p. 114, 2021.
- RALISCH, R. *et al.* **Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo - DRES**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 63 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1107195>. Acesso em: 2 out. 2021.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 5, p. 49-134, 2007.

- RIBEIRO, M. A. V. **Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade**. 1999. 71 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.
- ROMÃO, M. R. de O. *et al.* Modelos físicos para conversão de unidades de penetrômetros de impacto utilizados no diagnóstico de compactação de solos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 17.*, 2010, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABAS, 2010.
- ROQUE, A. A. de O. *et al.* Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, p. 1536-1542, 2011.
- SAFFIH-HDADI, K. *et al.* A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 96-103, Sept. 2009.
- SCHULER, A. E. *et al.* Propriedades físicas dos solos na parametrização dos modelos hidrológicos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 61-70, jan./mar. 2003.
- SEKI, A. S. *et al.* Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto1. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, p. 460-468, 2015.
- SHAH, A. N. *et al.* Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 24, n. 11, p. 10056-10067, 2017.
- SILVA, A. P. *et al.* Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v. 58, p. 1775-1781, 1994.
- SINGH, A. *et al.* Impact of long-term zero till wheat on soil physical properties and wheat productivity under rice-wheat cropping system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 140, p. 98-105, 2014.
- SOIL SCIENCE GLOSSARY TERMS COMMITTEE. **Glossary of soil science terms**. Madison: Soil Science Society of America Journal, 2008.
- STEFANOSKI, D. C. *et al.* Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, dez. 2013.
- STOLF, R. *et al.* Enetrômetro de impacto Stolf: programa computacional de dados em Excel-VBA(1). **Revista Brasileira de Ciência do Solos**, Viçosa, MG, v. 38, n. 3, p. 1-9, jun. 2014.
- STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, p. 395-401, 2001.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, p. 83-91, 1999.

STRECK, C. A. *et al.* Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 755-760, 2004.

SZATANIK-KLOC, A. *et al.* Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 175, p. 226-233, Jan. 2018. DOI: 10.1016/j.still.2017.08.016.

TORMENA, C. A.; ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, p. 333-339, 1996.

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. **The nature and properties of soils**. 15th ed. New York: Pearson, 2017.

WILLIAMS, S. M.; WEIL, R. R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v. 68, n. 4, p. 1403, 2004. DOI: 10.2136/sssaj2004.1403.

ZHANG, S. *et al.* Conservation tillage positively influences the microflora and microfauna in the black soil of Northeast China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 149, p. 46-52, 2015.