



ALTENE JEAN-LOUIS

**EFEITO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE MILHO
SILAGEM E ADUBAÇÃO NITROGENADA NA QUALIDADE
DE LATOSSOLO DO CERRADO**

LAVRAS-MG

2024

ALTENE JEAN-LOUIS

**EFEITO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE MILHO SILAGEM E ADUBAÇÃO
NITROGENADA NA QUALIDADE DE LATOSSOLO DO CERRADO**

Dissertação 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 obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Junior Cesar Avanzi

Orientador

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva

Coorientador

LAVRAS – MG

2024

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

Jean-Louis, Altene.

Efeito de sistemas de produção de milho silagem adubação nitrogenada na qualidade de latossolo do cerrado / Altene Jean-Louis. - 2024.

85 p.

Orientador(a): Junior Cesar Avanzi.

Coorientador(a): Bruno Montoani Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Milho para silagem. 2. Adubação nitrogenada. 3. Qualidade do solo. I. Avanzi, Junior Cesar. II. Silva, Bruno Montoani. III. Título.

ALTENE JEAN-LOUIS

**EFEITO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE MILHO SILAGEM E ADUBAÇÃO
NITROGENADA NA QUALIDADE DE LATOSSOLO DO CERRADO**

Dissertação 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 obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 16 de agosto 2024.

Dr. Teotonio Soares de Carvalho UFLA

Dr. Alvaro Vilela de Rezende EMBRAPA

Dr. Diego Tassinari UFLA

Prof. Dr. Junior Cesar Avanzi

Orientador

LAVRAS – MG

2024

Aos meus irmãos, minha namorada e meus amigos, pelo apoio, estímulo e compreensão.

Em memória da minha mãe, Paulette DEGANT, a quem amei e por quem fui amado.

Dedico...

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Nosso Deus, porque sem Ele não chegaria até aqui. Pela capacidade e sabedoria concedidas em cada passo e pela fé, esperança e paz no futuro que virá.

À Organização dos Estados Americanos (OEA) e ao GCUB, pela oportunidade.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência do Solo, por ser um lugar único, onde amadureci e fiz grandes amigos que levarei para a vida toda. A todos os professores pelos ensinamentos que contribuíram tanto para o meu crescimento profissional quanto pessoal. Em especial, aos professores Bruno Montoani Silva, Carlos Alberto Silva, Débora Racy Soares e Teotonio Soares de Carvalho, pelas oportunidades que me proporcionaram.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado. Ao Fonds National de l'Éducation (FNE), à Fondation Connaissance et Liberté (FOKAL), à PlanConsult, à FAPEMIG e ao CNPq.

Ao Professor Junior Cesar Avanzi, por todo o tempo de orientação, pelos ensinamentos, pela paciência, compreensão e apoio.

À Embrapa Milho e Sorgo e à Yara Brasil, pela oportunidade de desenvolver o presente estudo no âmbito do projeto de pesquisa em parceria destas instituições.

Aos funcionários do DCS/UFLA, Embrapa Milho e Sorgo e à equipe de Rehagro Pesquisa, por todo o auxílio durante o desenvolvimento dos experimentos, em particular aos pesquisadores Álvaro Resende, Victo Vargas e Monna Lysa Santana.

À minha irmã Marjorie Eliezer e ao meu irmão Roody Gelin, pelos exemplos de perseverança e fé, que sempre me inspiraram e apoiaram para que eu nunca desistisse dos meus sonhos.

Aos meus grandes amigos Vilmont Eric Junior, Aline Oliveira, Wanderline Amazan, Cadostin Cameau, Johnny Jean, Feranie Saintilus, Fernando Belfort, Renan Previl, Romario Veranne e Smiralda Milfort, Miaulie L. Pluiose, Vinícius A. Coelho que sempre levarei comigo, com quem dividi alegrias, tristezas, aprendizados e aventuras durante esses anos.

À minha amiga Priscilla Moreira Curtis Peixoto, pela amizade, paciência e por todos os conselhos que tanto me ajudaram a chegar até aqui. A todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho e da minha graduação.

Agradeço.

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

RESUMO

A silagem de milho é caracterizada por uma alta demanda e remoção significativa de nitrogênio, o que requer substanciais reservas de matéria orgânica e complementação com fertilizante. Ao mesmo tempo, a qualidade do solo está se tornando uma preocupação cada vez mais importante a cada ano. Com a exploração agrícola intensiva em todo o mundo e o uso de fertilizantes, especialmente em países tropicais, sistemas destinados a preservar os atributos químicos, físicos e biológicos do solo tornaram-se uma alternativa indispensável para manter a qualidade do solo e a sustentabilidade ambiental. Este estudo avaliou a hipótese de que o consórcio de milho com braquiária, aliado ao uso eficiente de fertilizantes nitrogenados, pode aumentar a produtividade e aprimorar a qualidade física e biológica do solo, promovendo maior incorporação de carbono num Latossolo Vermelho-Amarelo no Cerrado de Minas Gerais. O experimento comparou o cultivo exclusivo de milho silagem com o sistema de cultivo intercalar envolvendo braquiária, sob diferentes tratamentos de fertilização nitrogenada. Foi utilizado um delineamento experimental em blocos casualizados com parcelas subdivididas, abrangendo tratamentos com três fontes de nitrogênio: nitrato de amônio (CAN), ureia + NBPT e ureia comum, além de um controle e outro sem nitrogênio (SemNitro). Foram avaliados indicadores de qualidade do solo, como densidade, porosidade, teor de carbono orgânico e atividade microbiana, bem como frações específicas de carbono, incluindo carbono na fração da matéria orgânica leve (MOL) e carbono orgânico total (COT). Os resultados indicaram que o cultivo consorciado de milho com braquiária melhorou significativamente a estrutura do solo, aumentando a porosidade e a respiração basal da microbiota no solo em comparação com a monocultura. Além disso, foi demonstrado que a braquiária aumenta a matéria orgânica e o sequestro de carbono no solo, favorecendo manejo sustentável. No entanto, para algumas variáveis, as diferenças significativas podem exigir um período de estudo mais prolongado para serem plenamente observadas. Concluiu-se que o sistema consorciado de milho e braquiária poderia mitigar a degradação do solo e melhorar sua saúde, ao longo prazo, em regiões tropicais. Este estudo contribuiu para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis, enfatizando a importância da fertilização estratégica e do manejo das culturas para manter a qualidade do solo, aumentar os estoques de carbono e melhorar a produtividade da silagem de milho.

Palavras-chave: carbono orgânico do solo; agricultura conservacionista; conservação do solo.

ABSTRACT

Corn silage is characterized by high demand and significant nitrogen removal, requiring substantial organic matter reserves and supplementation with fertilizers. At the same time, soil quality is becoming an increasingly important concern each year. With intensive agricultural exploitation worldwide and fertilizer use, especially in tropical countries, systems designed to preserve the chemical, physical, and biological attributes of soil have become an indispensable alternative for maintaining soil quality and environmental sustainability. This study evaluated the hypothesis that intercropping corn with brachiaria, combined with efficient nitrogen fertilizer use, can increase productivity and enhance the soil's physical and biological quality, promoting greater carbon incorporation in a Red-Yellow Latosol in the Cerrado region of Minas Gerais. The experiment compared monoculture corn silage with an intercropping system involving brachiaria under different nitrogen fertilization treatments. A randomized block design with split plots was used, covering treatments with three nitrogen sources: ammonium nitrate (CAN), urea + NBPT, and regular urea, in addition to a control and a no-nitrogen (NoNitro) treatment. Soil quality indicators, such as density, porosity, organic carbon content, and microbial activity, were evaluated, along with specific carbon fractions, including light organic matter fraction (LOM) carbon and total organic carbon (TOC). The results indicated that the corn-brachiaria intercropping system significantly improved soil structure by increasing porosity and basal respiration of soil microbiota compared to monoculture. Additionally, brachiaria was shown to increase soil organic matter and carbon sequestration, favoring sustainable management. However, for some variables, significant differences may require a longer study period to be fully observed. It was concluded that the corn-brachiaria intercropping system could mitigate soil degradation and improve its health in the long term in tropical regions. This study contributed to the development of sustainable agricultural practices, emphasizing the importance of strategic fertilization and crop management to maintain soil quality, increase carbon stocks, and enhance corn silage productivity.

Keywords: soil organic carbon; conservation agriculture; soil conservation.

INDICADORES DE IMPACTO

Este estudo apresenta impactos tecnológicos, sociais e ambientais significativos para o setor agrícola no Cerrado, com potencial de contribuir para a sustentabilidade do solo e aumentar a eficiência produtiva do milho para silagem. A implementação de sistemas consorciados de milho com braquiária, aliados à adubação nitrogenada, revelou uma melhoria substancial na qualidade do solo, promovendo práticas agrícolas sustentáveis com efeitos duradouros tanto para o meio ambiente quanto para os produtores rurais da região. A natureza extensionista do trabalho é evidenciada pela parceria com empresas e pela transferência de conhecimento técnico a pequenos e médios agricultores do Cerrado Mineiro, fortalecendo a adoção de práticas de manejo e conservação do solo. Este trabalho está alinhado com as áreas temáticas de Tecnologia, Produção e Meio Ambiente, reforçando práticas essenciais para a sustentabilidade e produtividade agrícola. A pesquisa também contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ao promover uma produção agrícola mais eficiente e resiliente, e o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), ao incentivar o sequestro de carbono e reduzir os impactos ambientais. Ao longo do projeto, foram beneficiados diretamente agricultores locais, e uma equipe multidisciplinar de 10 técnicos e pesquisadores foi envolvida na implementação e análise dos resultados. Dessa forma, os achados desta pesquisa demonstram um potencial transformador para as práticas agrícolas, impulsionando a sustentabilidade e a resiliência dos ecossistemas de produção no Cerrado brasileiro e promovendo uma agricultura mais alinhada aos desafios climáticos e de segurança alimentar.

IMPACT INDICATORS

This study presents significant technological, social, and environmental impacts for the agricultural sector in the Cerrado, with the potential to contribute to soil sustainability and increase the productive efficiency of corn for silage. The implementation of corn-brachiaria intercropping systems, combined with nitrogen fertilization, revealed a substantial improvement in soil quality, promoting sustainable agricultural practices with long-term benefits for both the environment and the region's farmers. The extension-oriented nature of the work is demonstrated through partnerships with companies and the transfer of technical knowledge to small and medium-sized farmers in the Cerrado of Minas Gerais, strengthening the adoption of soil management and conservation practices. This work aligns with the thematic areas of Technology, Production, and Environment, reinforcing essential practices for agricultural sustainability and productivity. The research also directly supports the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), by promoting more efficient and resilient agricultural production, and SDG 13 (Climate Action), by encouraging carbon sequestration and reducing environmental impacts. Over the course of the project, local farmers benefited directly, and a multidisciplinary team of 10 technicians and researchers was involved in the implementation and analysis of results. Thus, the findings of this research demonstrate transformative potential for agricultural practices, boosting sustainability and resilience in the production ecosystems of the Brazilian Cerrado and promoting agriculture better aligned with climate and food security challenges.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Precipitação diária e acumulada na área experimental.	30
Figura 2: Distribuição de tratamentos/parcelas no campo.....	31
Figura 3: Valores médios da densidade do solo para diferentes tratamentos e sistemas de manejo do solo.....	36
Figura 4: Interação dos sistemas e dos tratamentos na densidade do solo.	38
Figura 5: Resistência do solo à penetração para diferentes tratamentos e sistemas de manejo.	40
Figura 6: Resistência do solo à penetração para diferentes tratamentos e sistemas de manejo.	41
Figura 7: Valores médios do volume total da porosidade.	42
Figura 8: Valores médios da macroporosidade para diferentes tratamentos e sistemas de manejo do solo.....	45
Figura 9: Valores médios da microporosidade para diferentes tratamentos e sistemas de manejo do solo.....	46
Figura 10: Valores médios do DMG para diferentes tratamentos e sistemas de manejo do solo.	48
Figura 11: Valores do diâmetro médio ponderado (DMP) do solo.	49
Figura 12: Valores médios do armazenamento de carbono no solo (g/kg).	51
Figura 13: Interação dos sistemas e dos tratamentos no estoque de carbono do solo.	52
Figura 14: Valores médios do Carbono na fração do COT no solo.	53
Figura 15: Valores médios do Carbono na fração da MOL no solo (em mg).	54
Figura 16: Porcentagem de C-MOL no COT por tratamento e por sistema.....	55
Figura 17: Valores médios do carbono da biomassa no solo por tratamento e sistema.	57
Figura 18: Valores médios da respiração basal no solo por tratamento e sistema.	58
Figura 19: Valores médios de quociente metabólico microbiano (qCO ₂) por tratamento e sistema.	59
Figura 20: Razão entre carbono da biomassa e COT por tratamento e sistema.	60
Figura 21: Atividade da fluoresceína diacetato (FDA) entre tratamentos dentro de sistemas de cultivo diferentes.	61
Figura 22: Matéria seca de milho (t/ha) por Tratamento e Sistema (2023).....	63
Figura 23: Matéria seca da silagem de milho (t/ha) por tratamento e sistema (2024).	64
Figura 24: Análise em componentes principais (ACP).	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores médios para resistência do solo à penetração.....	39
Tabela 2: Rendimentos de matéria seca (2024).....	63

SUMÁRIO

I.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	Hipótese.....	16
1.2.	Objetivos.....	16
1.2.1.	Objetivo principal	16
1.2.2.	Objetivos específicos.....	16
II.	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1.	Agricultura conservacionista (AC).....	17
2.2.	Saúde do solo	18
2.3.	Efeito do braquiária (<i>Urochloa spp.</i>) sobre a saúde dos solos.....	19
2.4.	Os fertilizantes nitrogenados na produção de forragem	20
2.5.	Qualidade física do solo	22
2.5.1.	Indicadores de qualidade física do solo	23
2.5.1.1.	Densidade do solo.....	23
2.5.1.2.	Porosidade do solo	24
2.5.1.3.	Distribuição do tamanho dos poros: macro e microporosidade	25
2.5.1.4.	Estabilidade de agregados.....	26
2.6.	Matéria orgânica e estoque de carbono no solo.....	26
2.7.	Dinâmica do carbono orgânico e do nitrogênio em ambiente tropical.....	29
III.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1.	Caracterização da área experimental	30
3.2.	Amostragem e análise laboratorial.....	31
3.2.1.	Indicadores de qualidade física do solo	31
3.2.2.	Resistência do solo à penetração (RP)	32
3.2.3.	Estabilidade de agregados	32
3.2.4.	Matéria orgânica e biomassa microbiana	33
3.2.5.	Modelagem e análise estatística de dados.....	35
IV.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1.	Densidade do solo.....	36
4.2.	Resistencia à penetração (RP)	39
4.3.	Porosidade do solo	42
4.4.	Distribuição do tamanho dos poros: macro e microporos.....	44
4.4.1.	Macroporosidade.....	44
4.4.2.	Microporosidade.....	46
4.5.	Estabilidade de agregados.....	47
4.5.1.	Diâmetro Médio Geométrico (DMG).....	47

4.5.2.	Diâmetro Médio Ponderado (DMP)	49
4.6.	Carbono orgânico no solo.....	50
4.6.1.	Estoque de Carbono no Solo (0-5 cm).....	51
4.6.2.	Carbono Orgânico Total (COT) e Matéria Orgânica Leve (MOL).....	52
4.6.3.	Relação entre C-MOL e COT	54
4.7.	Atributos do carbono da biomassa do solo	56
4.8.	Produção do milho para silagem	62
4.9.	Análise em componentes principais (ACP).....	65
V.	CONCLUSÃO	68
	REFERÊNCIAS	70

I. INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro, incluindo a atividade agropecuária, desempenha um papel fundamental na economia do país, sendo importante no suprimento de alimentos tanto para o mercado interno como para o mercado internacional, representando cerca de 25% do Produto Interior Bruto (Quintam e Assunção, 2023; Leal e Duarte, 2023; Filho, 2024). Dentro dessa atividade, a pecuária leiteira é essencial para a geração de renda de muitas famílias, beneficiando tanto proprietários rurais quanto trabalhadores (Machado, 2017). Embora a criação de gado baseada em pastagens seja predominante, cerca de 70% das pastagens encontram-se degradadas devido a práticas de manejo inadequadas. Esse cenário aumenta a necessidade de alimentos alternativos para suplementação do rebanho, especialmente durante a estação seca, quando a produção de forragem é reduzida (IBGE, 2016; CEPEA, 2016; Cardoso, 2016).

A silagem surge como uma alternativa fundamental na alimentação do gado por apresentar baixo custo em comparação com outras fontes concentradas (Cruciol et al., 2020). A silagem de milho é especialmente valorizada pelo alto potencial energético, elevada produção de matéria seca e seu conteúdo significativo de carboidratos fibrosos e não fibrosos (Carvalho et al., 2016; Costa, 2019; Moraes et al., 2013). No entanto, o cultivo de milho para silagem exige maiores quantidades de nitrogênio (N) do que o milho-grão, aumentando a necessidade de adubação e demandando reservas significativas de matéria orgânica (Resende et al., 2016). Além disso, a produção de silagem pode reduzir a qualidade do solo mais do que outros sistemas de cultivo intensivo, devido à remoção significativa de biomassa e à reciclagem limitada de nutrientes no solo (Souza et al., 2024). Como consequência, a degradação do solo pode comprometer a qualidade nutricional da alimentação animal e afetar negativamente o desempenho do rebanho durante a estação seca.

O Cerrado de Minas Gerais apresenta desafios adicionais, como uma estação seca prolongada no inverno e períodos de seca intercalados mesmo durante a estação chuvosa. A rápida decomposição da matéria orgânica e a escassez de palha no solo agravam esse cenário (Borghetti et al., 2013; Cruciol et al., 2014; Abrahão e Costa, 2018). Durante a colheita, o uso intensivo de máquinas aumenta o risco de compactação do solo, especialmente na ausência de cobertura vegetal suficiente para amortecer a pressão mecânica (Shah et al., 2017). A degradação do solo reduz a produtividade durante períodos de escassez e, por isso, o uso de sistemas consorciados entre milho e gramíneas perenes, como as do gênero *Urochloa* (*sin. Braquiária*), tem se mostrado uma alternativa eficiente (Pariz et al., 2016; Almeida et al., 2017;

Souza et al., 2024). A braquiária, comumente cultivada como pastagem em monocultura, pode atuar como cultura de cobertura quando consorciada com milho, formando uma camada uniforme de palha após a colheita e, assim, protegendo o solo contra erosão e compactação (Cruciol et al., 2015; Pereira et al., 2016). Além de fornecer biomassa para alimentação animal, a braquiária também melhora a reciclagem de nutrientes, adiciona carbono ao solo e promove a estabilidade estrutural (Oliveira et al., 2019). Estudos mostram que essa prática é economicamente mais vantajosa do que a semeadura de alfafa em monocultura na primavera nos Estados Unidos (Berti et al., 2021).

O nitrogênio (N) é um nutriente essencial para o crescimento das culturas (Bhatla et al., 2018). A mineralização do nitrogênio no solo é controlada por fatores climáticos e pelas propriedades físico-químicas do solo (Li et al., 2020). No entanto, a dinâmica do nitrogênio no sistema solo-planta-atmosfera é complexa e afeta diretamente a acumulação de carbono (C), elemento essencial para a agregação do solo e o desenvolvimento de uma estrutura mais resistente à erosão e compactação (Christensen et al., 2019; Haghverdi e Kooch, 2019). A matéria orgânica do solo, ao regular o ciclo dos nutrientes e melhorar a retenção de água, é fundamental para a saúde do solo e a sustentabilidade agrícola (Pimentel et al., 2005; Bünemann et al., 2018).

Fertilizantes nitrogenados são amplamente utilizados na agricultura devido à sua alta eficiência e praticidade de aplicação (Mosier e Galloway, 2005; Chen et al., 2020). É possível obter colheitas suficientes com a utilização de doses adequadas de agroquímicos, ajustadas para diferentes tipos de culturas (Khan et al., 2018). Um exemplo disso é a produção brasileira de milho, que atingiu cerca de 131,9 milhões de toneladas na safra 2022/2023 (Conab, 2023), um crescimento significativo em relação às 110 milhões de toneladas de 2021 (Faostat, 2021), impulsionado por melhorias na gestão dos fertilizantes (Silva et al., 2024). Entretanto, o uso intensivo de fertilizantes nitrogenados pode trazer efeitos negativos a longo prazo. O excesso de nitrogênio pode aumentar os níveis de nitrato nas plantas, reduzindo a eficiência produtiva (Karnpanit et al., 2019). Além disso, a lixiviação de nitrato e amônio pode contribuir para a acidificação do solo e comprometer a saúde das comunidades microbianas, favorecendo o crescimento de fungos patogênicos (Salomon et al., 2016).

Os impactos ambientais do uso excessivo de fertilizantes são preocupantes, pois o escoamento de nutrientes libera compostos reativos, como nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+), para ecossistemas aquáticos, causando eutrofização e degradação ambiental (Cantarella et al., 2008;

Salomon et al., 2016). Além disso, parte do nitrogênio aplicado pode se perder por lixiviação, volatilização ou desnitrificação, sendo liberado como óxido nitroso (N_2O), um potente gás de efeito estufa (Peng et al., 2015; Carvalho et al., 2022). A adoção de práticas agrícolas mais eficientes, como o uso de sistemas consorciados, é fundamental para reduzir esses impactos e aumentar a sustentabilidade da produção agrícola.

Embora muitos estudos tenham avaliado separadamente os efeitos da adubação nitrogenada e do uso de braquiária na agricultura, poucos trabalhos investigaram simultaneamente o impacto de ambas as práticas na qualidade do solo e na produtividade do milho silagem no contexto do Cerrado.

1.1.Hipótese

O consórcio de milho com braquiária e o uso eficiente de adubação nitrogenada aumentam a produtividade do milho e melhoram a qualidade física e biológica do solo, com maior incorporação de carbono.

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivo principal

Avaliar o impacto dos sistemas de produção de silagem de milho, solteiro e em consórcio com braquiária, bem como o uso de diferentes fontes de nitrogênio, na qualidade do solo, com ênfase no carbono, e na produtividade do milho silagem.

1.2.2. Objetivos específicos

- ✓ Avaliar a qualidade física do solo em função da adoção do consórcio com braquiária na produção de milho silagem, sob efeito de diferentes fontes de nitrogênio;
- ✓ Determinar os estoques de carbono do solo na camada superficial sob influência de sistemas de produção de milho silagem em cultivo solteiro e consorciado com braquiária, e fontes de nitrogênio;
- ✓ Estudar a dinâmica da biomassa microbiana e atividades dos microorganismos em relação ao carbono, sob influência de sistemas de produção de milho silagem em cultivo solteiro e consorciado com braquiária, e fontes de nitrogênio;
- ✓ Comparar os dois sistemas de produção de milho silagem em cultivo solteiro e consorciado com braquiária.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo discute conceitos importantes relacionados ao tema geral deste estudo.

2.1. Agricultura conservacionista (AC)

A Agricultura Conservacionista (AC) recentemente se tornou um tema de grande interesse na pesquisa agrícola e despertou considerável interesse em escala mundial. Ela se caracteriza como um modelo de produção agrícola baseado em um conjunto abrangente de tecnologias. A AC se fundamenta em três princípios: mínima perturbação do solo, cobertura permanente do solo e rotação de culturas (Bhattacharjee et al., 2023).

Dessa forma, as práticas de AC contribuem para reduzir o impacto ambiental da agricultura, melhorar a saúde dos solos, aumentar o sequestro de carbono e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Wade, Claassen e Wallander, 2015). As decisões dos agricultores/produtores de adotar práticas de AC têm implicações econômicas e ambientais, frequentemente envolvendo investimentos significativos em equipamentos especializados, um compromisso de tempo (Dessart, Barreiro-Hurlé e van Bavel, 2019) e a escolha de fertilizantes de qualidade. Assim, a AC estabeleceu um novo paradigma para a agricultura no Brasil, substituindo o modelo tradicional, que envolvia perturbação intensiva do solo com aração e gradagem frequentes, por um modelo mais sustentável e eficiente. Essa mudança favoreceu um melhor alinhamento institucional e político, além de uma melhor distribuição dos benefícios entre os agricultores e a sociedade (Fuentes-Llanillo et al., 2021).

Existe uma grande variedade de práticas de agricultura conservacionista nas regiões tropicais e subtropicais (Baptistella et al., 2020). A AC pode ser aplicada a sistemas de cultivo anuais e perenes, e sua adoção depende do clima, das diferenças regionais, da gestão das culturas, das culturas comerciais e da disposição espacial/temporal das espécies vegetais nas áreas cultivadas (Gil et al., 2015; Bieluczyk et al., 2020). Como as práticas de AC apresentam semelhanças com outros sistemas convencionais, a transição dos sistemas agrícolas convencionais é relativamente simples e pode ser aplicada ou adaptada a grandes áreas (Gil et al., 2015).

Os sistemas de AC mais estudados e comuns adotados nos trópicos incluem o plantio direto (PD), com produção de grãos, culturas de cobertura e rotação de culturas; o sistema integrado lavoura-floresta (iLF), com produção simultânea de grãos e árvores; o sistema integrado lavoura-pecuária (iLP), com produção de grãos, forragens e animais; o sistema integrado pecuária-floresta (iPF), com produção de forragem, animais e árvores; e o sistema

integrado lavoura-pecuária-floresta (iLPF), com produção de grãos, forragem, animais e árvores (Carvalho et al., 2014; Gil et al., 2015; Bieluczyk et al., 2020). Esses sistemas podem ser considerados níveis de complexidade e intensificação, com o PD sendo o menos intensivo e o iLPF o mais intensivo. Quanto mais espécies (vegetais e/ou animais) são introduzidas, mais o agroecossistema se assemelha a um ecossistema natural, tornando-se mais complexas as interações entre as espécies e produzindo mais biomassa total (Bieluczyk et al., 2020).

O estudo de Besen et al. (2024) sustenta que as práticas de conservação dos solos, como o plantio direto combinado com o uso de culturas de cobertura de alta qualidade, aumentam os estoques de carbono do solo e os rendimentos do milho no sul do Brasil. No planalto de Apodi, uma região semiárida do Brasil, foram observadas interações variáveis entre os atributos do solo, como a resistência do solo à penetração das raízes e a infiltração de água no solo, de acordo com diferentes usos da terra. O uso de culturas de cobertura, como a braquiária, reduziu a compactação do solo (Dias et al., 2023).

2.2.Saúde do solo

A saúde dos solos refere-se à capacidade do solo de funcionar como um ecossistema vivo que sustenta a saúde de humanos, animais e plantas (Lehmann et al., 2020). Ela é avaliada com base nas características químicas, físicas e biológicas dos solos (Giri e Narasu, 2020). Em escala mundial, os ecossistemas agrícolas saudáveis, que constituem a maioria dos solos produtivos, ocupam cerca de 11% da superfície da Terra (Ghosh et al., 2012). No entanto, atividades antropogênicas levaram à degradação severa de cerca de 25% dos recursos de solos produtivos do planeta, e 44% adicionais são classificados como moderadamente degradados (Abhilash et al., 2018).

No Brasil, o manejo integrado dos solos constitui uma abordagem abrangente que pode atenuar os efeitos variados da degradação dos solos, afetando gravemente a saúde dos solos e a produtividade agrícola em algumas regiões. Alguns estudos mostraram que o uso dos fertilizantes (minerais e orgânicos) e a inclusão de braquiária no sistema de produção aumentam não apenas a produtividade, mas também a atividade biológica do solo (Mendes et al., 2024). Por outro lado, os resultados do estudo de Nascimento et al. (2021) sugerem que, em condições climáticas de savana tropical, é necessário adotar a prática contínua de adubação verde sem aporte de adubo mineral após algum tempo, para criar um ciclo sustentável no perfil do solo, favorecendo assim a saúde do solo.

Embora a saúde dos solos nos sistemas de cultivo do bioma do Cerrado brasileiro tenha sido estudada ao longo dos anos, os impactos de alguns problemas, como a erosão dos solos e a degradação, e suas soluções ainda não são bem compreendidos (Falcão et al., 2020). Isso é particularmente verdadeiro no que diz respeito ao papel da diversificação dos sistemas de cultivo, seus efeitos sobre o rendimento das culturas (da Silva et al., 2021) e a escolha dos fertilizantes.

2.3.Efeito do braquiária (*Urochloa spp.*) sobre a saúde dos solos

Em todos os sistemas de agricultura conservacionista (AC) descritos acima, é possível incluir forrageiras que servem tanto como culturas de cobertura quanto como pastagem para animais. A introdução de espécies forrageiras é justificada quando elas oferecem serviços ao agroecossistema (Foley et al., 2005; Cherr et al., 2006). Esses serviços podem estar relacionados ao fornecimento de nutrientes, ao aumento da eficiência do uso de nutrientes (NUE), à proteção e saúde do solo, à supressão de plantas daninhas e/ou à melhoria da produção e dos rendimentos das culturas ou culturas companheiras. Além disso, elas devem ser adequadas ao contexto socioeconômico local (Cherr et al., 2006; Horrocks et al., 2019; Paul et al., 2020). Algumas características das plantas estão ligadas à prestação desses serviços, tais como adaptação às condições ambientais tropicais, baixa exigência de fertilidade do solo, alta capacidade de produção de biomassa, recalitrância da biomassa, morfologia radicular eficiente e atividade de exsudação, entre outras (Cherr et al., 2006; Horrocks et al., 2019).

Urochloa é um gênero de gramíneas C4 perenes utilizadas como culturas de cobertura e como pastagens. No Brasil e em outros países da América do Sul, as espécies de *Urochloa* representam a forrageira com a maior área de pastagem (Rao et al., 1995; Dias-Filho, 2016). Sua utilização em sistemas de cultivo consorciado com culturas comerciais anuais e/ou perenes aumentou consideravelmente nos últimos anos, graças à adoção das práticas de AC nos trópicos (Ragassi et al., 2013; Almeida et al., 2017). Existe um evidente interesse científico nas características agrônômicas das espécies de *Urochloa*. O cultivo de *Urochloa* revela características positivas relacionadas à qualidade e saúde do solo nos agroecossistemas, tais como maior NUE, menor risco de erosão, melhor estrutura do solo, níveis mais elevados de matéria orgânica e maior atividade biológica (Boddey et al., 1996).

As espécies de *Urochloa* produzem grandes quantidades de biomassa e possuem um sistema radicular vigoroso, abundante e profundo, essas plantas podem explorar um grande volume de solo e absorver quantidades substanciais de nutrientes disponíveis em regiões do

solo distantes das raízes da cultura companheira, que geralmente são mais superficiais e escassas (Rosolem et al., 2017). Além disso, ao adicionar e estabilizar a matéria orgânica do solo, estudos mostraram que as raízes de *Urochloa* influenciam a mobilidade e a disponibilidade de alguns nutrientes no solo, reduzindo as perdas e beneficiando o processo de ciclagem (Almeida e Rosolem, 2016; Nuñez et al., 2018). Por exemplo, certos exsudatos radiculares de *Urochloa* podem reduzir as perdas de nitrogênio (N) por lixiviação e desnitrificação, impedindo que o processo de nitrificação ocorra por meio da inibição biológica da nitrificação (BNI) (Ishikawa et al., 2003; Subbarao et al., 2009; Byrnes et al., 2017; Nuñez et al., 2018). No caso do fósforo (P), os exsudatos podem mobilizar formas recalcitrantes de P do solo, tornando-as disponíveis para a absorção pelas plantas (Janegitz et al., 2013; Almeida e Rosolem, 2016). *Urochloa* também pode afetar diretamente a NUE dos agroecossistemas, um aspecto fundamental para a sustentabilidade da produção de alimentos (Hobbs et al., 2008).

2.4.Os fertilizantes nitrogenados na produção de forragem

O aumento da demanda alimentar global impõe uma significativa expansão da produção agrícola (Mottaleb et al., 2023). Contudo, para enfrentar o desafio da segurança alimentar global, não basta apenas aumentar a produção; é igualmente essencial promover a prosperidade econômica individual, ao mesmo tempo que se minimiza a poluição ambiental. Nesse cenário, o Brasil se destaca como um dos principais atores no setor de produção de alimentos. Com uma área de 153,79 milhões de hectares de pastagens, o país lidera as exportações de carne bovina, atingindo 2,26 milhões de toneladas exportadas para mais de 150 países (Abiec, 2022). A produção pecuária global depende amplamente das pastagens cultivadas, especialmente de espécies forrageiras C3 e C4 (Silva et al., 2024).

Na agricultura, o nitrogênio pode ser proveniente de várias fontes, como fertilizantes químicos, esterco orgânico, resíduos de culturas e pela fixação biológica de nitrogênio (Liu et al., 2024). A ureia destaca-se como o fertilizante nitrogenado preferido na agricultura mundial, devido à sua alta concentração de nitrogênio e sua relação custo-benefício por unidade de nitrogênio. Globalmente, cerca de 40% a 60% do consumo total de fertilizantes nitrogenados é atribuído à ureia, enquanto o nitrato de amônio representa aproximadamente 8% (Ifastat, 2022). No entanto, as perdas associadas aos fertilizantes nitrogenados, que podem atingir até 50% da quantidade aplicada, impactam significativamente a produtividade primária, elevam os custos e exacerbam a insegurança alimentar (Dimkpa et al., 2020). Além disso, essas perdas contribuem para a degradação ambiental, incluindo a poluição das águas e a emissão de gases de efeito estufa (Coskun et al., 2017). Esse contexto cria uma convergência de imperativos

agronômicos, ambientais e de saúde pública – visto que níveis elevados de nitrato na água potável representam riscos à saúde, como o aumento da incidência de câncer (Temkin et al., 2019) –, o que exige a redução das perdas de nitrogênio no ambiente e a melhoria da eficiência de seu uso.

A eficiência do uso do nitrogênio pode ser aumentada por meio de estratégias de manejo de fertilizantes que aproveitem as sinergias entre nutrientes. Entre essas estratégias, destacam-se o uso de fontes de nitrogênio que minimizam perdas (como a volatilização de amônia) e a combinação com outros elementos essenciais, como o enxofre e o cálcio. Condições como baixa matéria orgânica no solo, erosão e maior demanda de nutrientes pelas culturas podem resultar em deficiências de enxofre nas plantas (Silva et al., 2024). Além disso, o cálcio desempenha um papel central na gestão do solo, pois suas concentrações em equilíbrio com outros elementos são essenciais para a expansão do sistema radicular (De Souza et al., 2023; Gómez-Paccard et al., 2013). Esses efeitos facilitam a exploração do solo pelas raízes (Galdos et al., 2020), melhorando a eficiência do uso da água e dos nutrientes, incluindo o nitrogênio (Rosolem et al., 2017).

A otimização do uso do nitrogênio, aliada ao cálcio e ao enxofre, pode também melhorar o valor nutritivo da forragem, aumentando o teor total de nitrogênio das plantas (Singh & Parihar, 2018). No entanto, no contexto de estratégias de manejo de pastagens, como o conceito de "rotação" proposto por Carvalho (Stobbs, 2013), que visa equilibrar a otimização da produção secundária e a preservação ambiental, os benefícios potenciais de uma forragem de melhor qualidade nem sempre resultam em ganhos de produção secundária. Segundo esse paradigma, a qualidade nutricional específica disponível na pastagem tem menor importância em comparação com os atributos estruturais do gramado, particularmente a altura das plantas, que exerce maior influência no consumo e, conseqüentemente, no desempenho dos animais em sistemas de pastoreio (Carvalho et al., 2001). Isso implica que, ao se manter uma altura de pastagem ideal, a relevância direta da composição nutricional da forragem para o desempenho animal pode ser reduzida.

Em síntese, embora o nitrogênio (N) seja essencial para a otimização dos sistemas de produção, seu uso como fertilizante é limitado por perdas significativas (Dimkpa et al., 2020). Essa relação entre a produção animal e vegetal e o uso estratégico de fertilizantes nitrogenados ressalta a importância de abordagens integradas para enfrentar os desafios globais de forma sustentável.

2.5. Qualidade física do solo

A qualidade de um solo foi inicialmente definida como sua capacidade de fornecer à biomassa, especialmente às plantas, um meio favorável ao seu desenvolvimento. Hoje, o conceito de qualidade vai além do âmbito da produção agrícola, abrangendo todas as suas facetas (Guérif, 2020). Em termos físicos, o solo não é apenas um suporte para a passagem de animais e máquinas, mas também um reservatório e um local de trânsito para a água e gases. Sua capacidade de permitir o transporte de água e gases condiciona o desenvolvimento da biomassa, em particular das plantas. As seguintes características do solo podem estar relacionadas com as operações de manejo: presença dos horizontes do solo, textura, estrutura e propriedades químicas. A textura e algumas das propriedades químicas (desconsiderando pH, teores de nutrientes disponíveis, CTC, ..) são fixas e não podem ser modificadas pelo manejo, exceto indiretamente por alterações induzidas pela lixiviação (Willem, 2017). Os horizontes do solo podem ser modificados por operações de aração profunda, o que significa que o acesso aos recursos nutricionais das plantas depende das características do espaço poroso, ou seja, da estrutura do solo (Benard et al., 2019).

Os Latossolos constituem a principal classe de solos no Brasil, abrangendo mais de 60% da superfície do país (Schaefer et al., 2008) e cerca da metade do bioma Cerrado (Eberhardt et al., 2008). Esses solos apresentam altos graus de lixiviação e intemperismo, resultando em teores substanciais de gibbsita na fração argilosa (Ferreira et al., 1999; Ker, 1997). Além disso, os Latossolos apresentam restrições químicas severas ao desenvolvimento das plantas, devido à baixa capacidade de troca catiônica (CTC), alta saturação de alumínio e baixa disponibilidade de nutrientes (Goedert, 1983; Lopes, 1984; Lopes e Cox, 1977). No entanto, quando essas limitações de fertilidade são resolvidas por meio de corretivos e fertilizantes, esses solos têm alto potencial de rendimento (Castro e Crusciol, 2013; Goedert, 1983). As propriedades físicas do solo são ideais para o crescimento das plantas.

Além disso, os Latossolos oxidícos apresentam uma estrutura granular, baixa densidade aparente, macroporosidade e microporosidade elevadas, alta estabilidade de agregados, alta taxa de infiltração, baixa resistência mecânica à penetração das raízes e são encontrados principalmente em topografia relativamente plana, tornando-os adequados para a agricultura mecanizada em grande escala (Ferreira et al., 1999; Goedert, 1983; Ker, 1997; Severiano et al., 2011; Silva et al., 2015). Embora esses solos tenham alta retenção de água, possuem baixa Capacidade de Água Disponível para as plantas (CAD), devido à quase ausência de mesoporos

(Carducci et al., 2013; Silva et al., 2014, 2015); ou seja, há uma transição abrupta na distribuição do tamanho dos poros, de poros muito grandes a poros muito pequenos.

A qualidade física de um solo para a emergência e o crescimento das culturas pode ser quantificada com o uso de propriedades ou processos que refletem os efeitos das restrições físicas do solo em diferentes estágios do desenvolvimento das culturas (da Silva e Kay, 2004). Densidade aparente, macroporosidade, condutividade hidráulica, permeabilidade, espaço poroso preenchido de ar, parâmetros de agregação, resistência à penetração e disponibilidade de água são propriedades físicas do solo que afetam o crescimento das plantas (Bengough, 2012; Letey, 1985; Reichert et al., 2009). Essas propriedades influenciam a disponibilidade de oxigênio e água, a difusão de calor e a resistência do solo à penetração das raízes, impactando diretamente nas reações metabólicas das sementes e das plantas. O oxigênio é essencial para a respiração celular e fornece energia para os processos metabólicos das plantas; níveis baixos podem reduzir a biomassa das raízes, bem como o teor de carotenoides, clorofila e proteínas das plantas (Bennicelli et al., 1998; Ityel et al., 2014). A água é vital para a embebição das sementes, a fotossíntese, a absorção e o transporte de nutrientes, além de manter a turgescência das paredes celulares, essenciais para promover o crescimento das raízes. A resistência do solo à penetração afeta o alongamento e a exploração das raízes e, se os limites específicos do solo forem excedidos, o crescimento total das raízes será reduzido (Imhoff et al., 2010; Nunes et al., 2019).

2.5.1. Indicadores de qualidade física do solo

A avaliação física do solo é complexa, razão pela qual Letey (1985) sugeriu que a avaliação da qualidade física do solo fosse feita por meio de atributos físicos relacionados ao crescimento das plantas, com a água como uma variável de equilíbrio, amenizando ou agravando os efeitos da aeração e da resistência à penetração.

2.5.1.1. Densidade do solo

A escolha do sistema de manejo do solo visando à sustentabilidade passa por uma boa análise da densidade do solo. Ela é representada pela relação entre a massa de solo seco em estufa e seu respectivo volume total, incluindo os espaços porosos ocupados por ar e água. Segundo Lier (2016), a densidade do solo é um indicativo do potencial do solo em armazenar água para as plantas, pois, de acordo com Reichardt e Timm (2008), a compactação causa diminuição no volume de solo, implicando na redução de poros. Isso está diretamente

relacionado à estrutura, disposição do tamanho dos poros e às propriedades de retenção de água do solo.

A densidade do solo pode variar amplamente dependendo do tipo de solo, das práticas agrícolas, das condições climáticas e da vegetação. Ela afeta diretamente a porosidade do solo, que, por sua vez, influencia a retenção de água, a aeração, a penetração de raízes e outros processos importantes para o crescimento das plantas e o uso do solo em geral (Lal, 1994). Quanto maior a densidade do solo, maior seu grau de compactação, enquanto uma densidade menor indica um solo mais poroso e menos compacto.

Os valores de densidade nos solos podem ser extremamente variáveis. Em solos de mesma textura, podem ser encontradas densidades diferenciadas no perfil. A densidade tende a aumentar com a profundidade para algumas classes de solo, variando em função de diversos fatores, como teor reduzido de matéria orgânica, menor agregação, maior compactação e diminuição da porosidade do solo. De maneira geral, a densidade do solo varia de 1,1 a 1,6 kg dm⁻³ em solos minerais e de 0,6 a 0,8 kg dm⁻³ em solos orgânicos, dependendo principalmente da textura e do teor de matéria orgânica. Alguns autores relatam que a densidade do solo (D_s), a macroporosidade e a relação macroporos são atributos muito utilizados como indicadores do estado de estruturação do solo (Gupta e Allmaras, 1987; Imhoff et al., 2001). Campbell (1994) comentou que, pelo fato de a densidade do solo ser influenciada pelos seus constituintes, como a textura e a matéria orgânica, esse parâmetro pode mostrar uma correlação limitada com o crescimento das plantas. Goedert et al. (2012) relataram a falta de consenso entre pesquisadores sobre o nível crítico da densidade do solo, não apresentando um valor acima do qual o solo é considerado compactado. Assim, características originais de cada solo e as práticas de manejo empregadas destacam-se dentre vários outros fatores sobre o estado de compactação do solo.

2.5.1.2. Porosidade do solo

A porosidade do solo resulta do arranjo tridimensional das partículas sólidas (Klein, 2012). De acordo com Ferreira (2010), as partículas variam em tamanho, forma, regularidade e tendência de expansão pela água, o que torna os poros consideravelmente diferentes quanto à forma, comprimento, largura, tortuosidade e continuidade. A porosidade abrange os caminhos e o volume disponível para o fluxo e transporte de fluídos nos solos, além do armazenamento e retenção de água (Flint e Flint, 2002), o que afeta diretamente a produtividade das plantas e o ambiente (Gonçalves e Moraes, 2012). Os poros são onde ocorrem os processos de troca química, e a distribuição do tamanho dos poros é usada para estimar a retenção de umidade e

as curvas de permeabilidade relativa e saturada de uma amostra (Flint e Flint, 2002). Todas as variáveis condicionantes da estrutura, incluindo textura e matéria orgânica, influenciam os valores de porosidade total do solo (Ferreira, 2010).

A compactação do solo é o principal fator de impacto na porosidade, com aumento concomitante na densidade do solo, declínio da condutividade hidráulica e desenvolvimento de uma crosta dura abaixo da camada cultivada (Soane e Ouwerkerk, 2013; Raghavan, 2017; Shah et al., 2017). A alteração da porosidade do solo devido à compactação resulta em aumento do escoamento superficial, diminuição da infiltração e altas perdas por erosão (Shah et al., 2017). A presença de uma rede ideal de poros no solo exerce expressiva influência sobre a fertilidade, afetando as relações entre drenagem, absorção de nutrientes, penetração de raízes, aeração e temperatura, relacionando-se diretamente com o desenvolvimento e produtividade das culturas (Letey, 1985; Ribeiro et al., 2007).

De acordo com Almeida et al. (2017), o volume total de poros se refere à fração de um determinado volume de solo passível de ser ocupada por água e ar, sendo importante para entender a dinâmica de solutos. Rotineiramente, é determinado pela mensuração da massa de água necessária para saturar uma amostra de solo de volume total conhecido (Almeida et al., 2017). O uso de amostragem por cilindro de volume conhecido é necessário, pois este método requer uma amostra que resista à saturação sem se desintegrar (Flint e Flint, 2002). Também pode ser estimada indiretamente pela relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas, conforme indicado em Almeida et al. (2017).

O volume total de poros é uma informação importante para o manejo dos solos. No entanto, em estudos sobre o armazenamento e movimento de água e gases, desenvolvimento do sistema radicular das plantas, problemas relativos ao fluxo e retenção de calor, e investigações de resistência mecânica em solos, a simples determinação da porosidade total fornece informações de utilidade limitada, sendo fundamental o conhecimento da distribuição dos tamanhos dos poros do solo (Ferreira, 2010).

2.5.1.3. Distribuição do tamanho dos poros: macro e microporosidade

A caracterização do espaço poroso do solo é um aspecto importante da investigação de qualidade. A mobilidade dos constituintes sólidos, líquidos e gasosos dos solos leva à formação e desenvolvimento de poros, cujas características influenciam profundamente o comportamento do solo (Soltani et al., 2019). Os poros resultantes do arranjo das partículas primárias do solo são chamados de poros texturais, enquanto os resultantes da atividade biológica, do clima e das

práticas de manejo são chamados de poros estruturais (Rabot et al., 2018). A distribuição dos poros por tamanho como um atributo físico do solo requer a aceitação de que o espaço poroso pode ser representado pelo modelo de capilaridade (Ferreira, 2010). A avaliação da distribuição de poros de solos por classes de tamanho separa os poros em duas classes distintas: macroporos, representados por poros não capilares ($> 50 \mu\text{m}$), e microporos, para os capilares ($< 50 \mu\text{m}$) (Almeida et al., 2017).

De acordo com Almeida et al. (2017), a diferença dos tamanhos das partículas das frações minerais de solos arenosos e argilosos resulta em poros capilares e não capilares de tamanhos diferentes, o que não é elucidado pelo conceito de macro e microporos. Uma classificação intermediária, considerando quatro classes de poros, com base nas classificações sugeridas por Klein e Libardi (2002) e Prevedello (1996), é indicada pelos autores, bem como a classificação de poros segundo o diâmetro equivalente dos poros no solo proposta por Brewer (1964), subdividindo os macroporos em grandes, médios, pequenos e muito pequenos.

2.5.1.4. Estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados é um índice que indica o quanto o solo é suscetível à erosão, influenciando atributos como infiltração, retenção de água, aeração, resistência à penetração de raízes, selamento e encrostamento superficial, erosão hídrica e eólica, entre outros (de Sá et al., 2000). Ela indica a capacidade do solo de manter a estrutura de agregados sob várias condições, naturais ou impostas pelo homem. A estabilidade de agregados é um indicador importante da qualidade do solo e da sua capacidade de resistir à erosão, manter a água e os nutrientes disponíveis para as plantas e melhorar a aeração e a infiltração de água. A estabilidade de agregados é um indicador da resistência do solo à erosão e à pressão mecânica do tráfego de máquinas e de implementos (Embrapa, 2021). De acordo com Portugal et al. (2010), a estabilidade de agregados do solo está relacionada a fatores como matéria orgânica, argila, raízes das plantas, umidade, presença de poluentes e métodos de manejo.

2.6. Matéria orgânica e estoque de carbono no solo

A matéria orgânica do solo (MOS) é um componente indispensável, possuindo propriedades diversas e críticas no solo (Li et al., 2021). Ela é uma mistura de compostos com diferentes graus de decomposição e estabilidade. Seu status é frequentemente considerado um indicador poderoso da qualidade do solo e tem sido objeto de intensas pesquisas nas últimas duas décadas (Schmidt et al., 2011; Sokol et al., 2019). Entre as diversas funções da MOS, podemos citar a melhoria das condições físicas, como a aeração, a retenção e o armazenamento

de água, os benefícios para as propriedades químicas e físico-químicas, o fornecimento de nutrientes (C, N, P e S) às plantas, o aumento da capacidade de troca catiônica do solo (CEC), a complexação de elementos tóxicos e de micronutrientes, e o suporte à ação da microbiota do solo, entre outras (Figueiredo, Ramos, Tostes, 2008).

As práticas agrícolas podem influenciar a matéria orgânica do solo (MOS) (Von Lützow et al., 2006). No entanto, os dados detalhados que relacionam a MOS às práticas agrícolas ainda são controversos em todo o mundo. Alguns estudos sugerem que as mudanças no uso da terra e nas práticas agrícolas têm pouco impacto (Guggenberger et al., 1995), enquanto outros demonstram mudanças significativas nas composições estruturais da MOS devido a diversos ambientes físico-químicos e à disponibilidade de nutrientes (Solomon et al., 2007; Laudicina et al., 2015). Gleixner et al. (2002) e Kögel-Knabner (2017) afirmaram que a maioria das divergências pode estar relacionada à natureza complexa da MOS, bem como às limitações analíticas dos métodos utilizados para caracterizar as mudanças da MOS durante a decomposição dos resíduos e a formação da MOS. Além disso, as mudanças na MOS seriam controladas ao nível da estrutura molecular, possivelmente via processos microbianos do solo (Zhu et al., 2020).

Um parâmetro de grande importância nos estudos de qualidade do solo é o carbono orgânico do solo (COS), pois ele influencia vários atributos do solo, como a estrutura (estabilidade dos agregados), a retenção e o armazenamento de água, bem como o ciclo dos nutrientes (Sathya, Vijayabharathi, Gopalakrishnan, 2016; Srivastava et al., 2016). No que diz respeito à qualidade ambiental e às emissões de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, compreender os impactos da agricultura sobre as emissões de carbono torna-se crucial. A relevância dos estoques de carbono do solo nos sistemas agrícolas aumentou devido à relação entre o aquecimento global e a concentração atmosférica de CO₂ (Lal et al., 1998). O COS é geralmente influenciado pelas mudanças climáticas ou ambientais, muitas vezes justificadas pela conversão de ecossistemas naturais em áreas agrícolas devido a práticas de manejo inadequadas. Essas práticas podem modificar significativamente o estado biogeoquímico do solo, impactando diretamente a biodiversidade e o ciclo do carbono (Zinn, Lal, Resck, 2005; Schmidt et al., 2011; de Sá et al., 2015; Petter et al., 2017). Estudos mostraram que a oxidação do COS é particularmente intensificada por esses processos, resultando na ruptura dos agregados, o que leva a uma redução dos estoques de COS e a um aumento das emissões de CO₂ na atmosfera (Briedis et al., 2018; Guo et al., 2019; Xiao et al., 2019).

Vários estudos já avaliaram os estoques de C em solos influenciados por práticas agrícolas distintas aplicadas no Cerrado (de Carvalho et al., 2022). Jorge Carlos Souza Junior et al. (2023), em um estudo recente, observaram uma tendência de aumento das taxas anuais de C nos solos do Cerrado quando práticas agrícolas inteligentes para o clima foram adotadas, como a fertilização do solo com adubos orgânicos, o plantio direto e os sistemas integrados de lavoura-pecuária ou lavoura-pecuária-floresta. No entanto, ainda não há consenso na literatura sobre as práticas agrícolas que contribuem para o aumento dos estoques de C no solo do Cerrado brasileiro. Em muitas áreas onde se pratica uma agricultura conservacionista, como o plantio direto com culturas de cobertura, os estoques de C do solo foram menores do que em áreas adjacentes sob vegetação nativa do Cerrado (Torres et al., 2021; de Carvalho et al., 2022). O mesmo ocorreu em áreas com sistemas de cultivo integrados (Batista et al., 2013; de Freitas et al., 2020). Por outro lado, estudos relataram ganhos nos estoques de C do solo após a introdução de práticas agrícolas como o PD e pastagens bem manejadas, onde os estoques de C do solo foram mais elevados do que os encontrados em áreas de Cerrado nativo sem interferência antrópica (Carneiro et al., 2013; Miranda et al., 2016; da Silva Farias et al., 2022). Um estudo mostrou que as taxas de sequestro de carbono no solo aumentavam rapidamente após a implementação do Sistema de Plantio Direto (SPD) e diminuía ao longo do tempo, à medida que os estoques de COS atingiam um nível de saturação (Corbeels et al., 2016). Da mesma forma, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) demonstrou uma elevada capacidade de armazenamento de carbono no solo (Oliveira et al., 2019). Conceição et al. (2017) observaram que, após três anos de implementação, o sistema iLPF mostrava uma capacidade de sequestro de carbono semelhante à encontrada em áreas de floresta nativa.

As taxas de armazenamento ou perda de COS podem variar dependendo do sistema de produção adotado, do tipo de solo, da profundidade, do tipo de vegetação, do clima, entre outros fatores (Guo e Gifford, 2002; Maia et al., 2010; Cerri et al., 2017). Em um estudo de longa duração, os pesquisadores constataram que as modificações dos estoques de carbono no solo, devido à substituição do Cerrado nativo *sensu stricto* por culturas anuais, estavam limitadas a uma profundidade de 0-0,60 m. Observou-se que a substituição do Cerrado *sensu stricto* pelo plantio direto em rotação soja-milho provocou uma redução de cerca de 11% nos estoques de COS (Ferreira et al., 2016). É evidente que as práticas de manejo que promovem a acumulação do COS são atraentes, pois não apenas compensam essa dívida de carbono do solo, mas também oferecem a possibilidade de contribuir para a mitigação sustentável do aumento dos níveis atmosféricos de CO₂, além de fornecer uma série de outros co-benefícios, como um ciclo de

nutrientes mais ativo e uma maior produtividade das culturas (Schmidt et al., 2011; Wiesmeier et al., 2019).

2.7. Dinâmica do carbono orgânico e do nitrogênio em ambiente tropical

O teor de carbono orgânico do solo (COS) é um parâmetro fundamental na saúde e fertilidade do solo, operando simultaneamente como fonte e reservatório de carbono. No contexto agrícola, o COS tem papel central no ciclo do carbono, pois regula a estabilidade do solo e sua capacidade de se renovar, sendo essencial para a resiliência e sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas (Wei et al., 2024). Estudos mostram que os teores de COS e nitrogênio variam consideravelmente com a profundidade e tipo de uso do solo, sendo influenciados por práticas de manejo que envolvem desde a agricultura intensiva até as florestas nativas (Lorenz & Lal, 2005; Li et al., 2013; Hu et al., 2024; Krüger et al., 2024).

Lorenz e Lal (2005) demonstram que práticas como desmatamento, queima de biomassa, aração e drenagem afetam profundamente o teor de COS. Observa-se que o carbono se concentra nos primeiros 10 cm do solo (entre 50,1% a 61,4%), seguido de 25% a 32% entre 10 e 20 cm, e de apenas 13% a 19% abaixo de 20 cm. Esse perfil de concentração também foi constatado por Hu et al. (2024), que registraram densidade média de 50,24% de COS nos primeiros 20 cm, com uma diminuição acentuada a partir dessa profundidade. Em camadas mais profundas, o teor de COS é regulado pela distribuição das raízes, que é menos densa em camadas abaixo dos 60 cm.

Em solos tropicais, a concentração de carbono e nitrogênio apresenta acentuada redução com a profundidade, em função da maior concentração de matéria orgânica nas camadas superficiais, sendo esta uma característica importante para práticas de manejo (Schilling et al., 2009). Observa-se uma correlação entre o teor de argila e a retenção de COS, mas essa relação não é significativa para o nitrogênio.

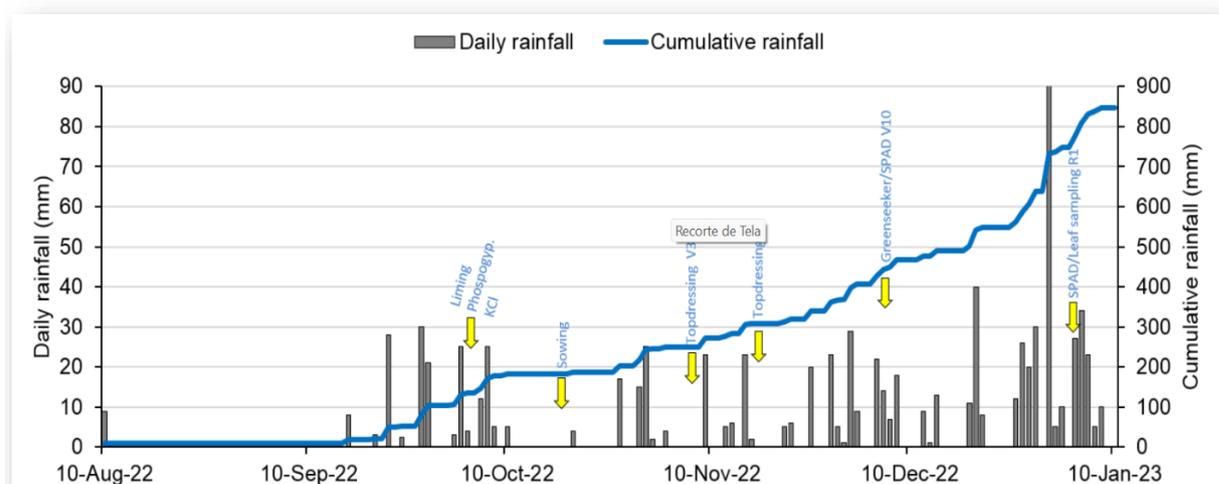
A compreensão das complexas interações entre o COS e o nitrogênio no solo é vital para o manejo sustentável de solos tropicais, onde as condições climáticas aceleram a ciclagem de nutrientes e exigem técnicas de manejo que preservem o equilíbrio entre produtividade e conservação ambiental. Práticas como o plantio direto e a rotação de culturas contribuem para a retenção de carbono e nitrogênio no solo, promovendo a saúde do solo e a estabilidade dos ecossistemas agrícolas tropicais, onde o manejo adequado de nutrientes desempenha um papel central na sustentabilidade da produção (Schilling et al., 2009; Quesada et al., 2020).

III. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido no ambiente de um projeto de parceira em pesquisa entre as instituições Embrapa Milho e Sorgo e Yara Brasil, sendo a experimentação a campo conduzida na Estação de Pesquisa Reagiro (21°15'40.3"S, 44°31'02.1"W), no município de Nazareno, Minas Gerais, Brasil. De acordo com a classificação de Köppen, a região possui um clima subtropical úmido (Cwb), com temperatura média anual de 18,5 °C e precipitação média anual de 1.689,4 mm (Figura 1). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo e tem sido cultivado com culturas anuais por aproximadamente 14 anos. A última subsolagem ocorreu em 2020.

Figura 1: Precipitação diária e acumulada na área experimental.

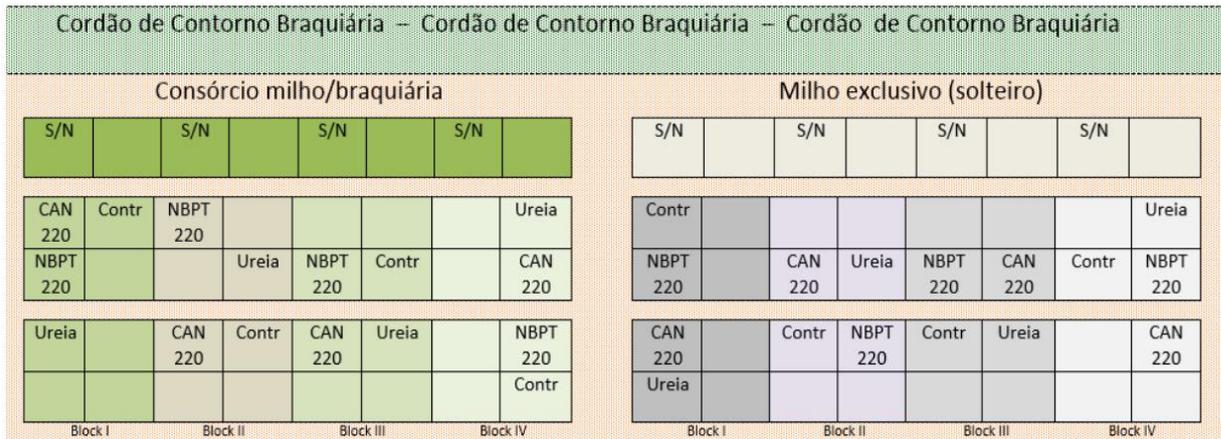


Legenda: Data de 10 de agosto de 2022 a 10 de janeiro de 2023. Fonte: Embrapa Milho e Sorgo (2023).

Os tratamentos consistiram de dois sistemas de cultivo do milho para silagem (milho exclusivo e milho consorciado com braquiária – *Urochloa ruziziensis*, cultivar BRS Integra), duas fontes de nitrogênio (CAN Yarabela e Ureia NBPT) e três doses de nitrogênio em cobertura (155, 220, 285 kg/ha de nitrogênio). O experimento também conta com dois tratamentos adicionais (controle sem nitrogênio em cobertura e ureia comum na dose de 220 kg/ha), compreendendo 16 tratamentos em 4 repetições, totalizando 64 parcelas (10 linhas x 10 m espaçadas 0,50 m) mais um faixa “Extra” sem nenhum nitrogênio em cada sistema.

No presente trabalho, foram estudados os dois sistemas de produção e apenas a dose de 220 kg ha⁻¹ para as fontes CAN YaraBela, Ureia NBPT e Ureia comum além do Controle sem N em cobertura, perfazendo um delineamento experimental fatorial com parcelas subdivididas com quatro blocos casualizados (Figura 2).

Figura 2: Distribuição de tratamentos/parcelas no campo.



Legenda: Tamanho regular da parcela: 50 m² (10 fileiras x 10 m de comprimento x 0,5 m entre as fileiras). Starter N fornecido como CAN - Nitrato de Cálcio Amônio (27% N, 4% Ca, 2% Mg). NBPT Ureia - SuperN Pro (46% N, 0,05% NBPT+RNUF Duromide). Ureia comum - Fertipar (46% N). Fonte: EMBRAPA (2024).

3.2. Amostragem e análise laboratorial

Amostras com estrutura preservada foram coletadas usando cilindros volumétricos com volume previamente mensurado em quatro profundidades, 0-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, utilizando amostrador tipo Uhland, em 4 repetições (blocos experimentais) e 5 réplicas por bloco, resultando em 160 amostras. Em seguida, as amostras foram transportadas para o laboratório de Física do solo, onde foram preparadas para que o volume de solo coincidissem com o volume do cilindro.

3.2.1. Indicadores de qualidade física do solo

Os indicadores de qualidade avaliados foram: porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds), e resistência do solo à penetração determinada ao potencial matricial de -100 kPa (RP 100kPa). Os atributos Ds, Pt, Ma e Mi foram determinados utilizando os métodos descritos por Teixeira et al. (2017). Em laboratório, as amostras foram dispostas em bandejas com água destilada para atingirem a saturação, com tecidos porosos fixados na parte inferior dos cilindros para evitar a perda de material sólido e permitir a ascensão da água no solo. Após a saturação, as amostras foram pesadas para determinar o peso do solo saturado e, posteriormente, submetidas ao potencial matricial de -6 kPa. Para os potenciais -100 kPa, as amostras foram colocadas no Extrator de Richards (Klute, 1986) e pesadas após atingirem o equilíbrio. Em seguida, as amostras foram submetidas ao penetrômetro digital de bancada para quantificação da resistência do solo à penetração do solo

(RP), conforme o método descrito por Tormena et al. (1998), e secas em estufa a 105 °C para determinar a massa de solo seco.

A microporosidade foi determinada pelo conteúdo de água retido à 6 kPa. A macroporosidade foi determinada pela diferença entre o volume total de poros e o volume de microporos.

3.2.2. Resistência do solo à penetração (RP)

Para o teste de RP em laboratório, a força (kgf) aplicada para penetrar o solo foi mensurada por um penetrômetro digital de bancada MA933 (Marconi, SP Brasil) com ponteiro tipo cone, ângulo de penetração de 45° e 0,00384 m de diâmetro, a uma velocidade constante de 0,01 m/min. Para calcular a resistência à penetração média de cada ensaio, foram considerados apenas os registros de força de penetração entre 60 e 120 segundos, excluindo os dados de resistência nas extremidades das amostras, uma vez que o equipamento registra uma medida de força de penetração (kgf) a cada segundo. Os valores de RP foram obtidos utilizando uma equação modificada de Serafim et al. (2013), que considera a razão entre a força aplicada e a área superficial da ponta do penetrômetro:

$$RP = \frac{F * \vec{g}}{\frac{\pi r^2}{\cos 45^\circ}} * \frac{1}{10^6} \Rightarrow RP = \frac{9,806648F * 1}{\frac{\pi * (0,00192)^2}{0,7071}} * \frac{1}{10^6} \quad (1)$$

$$RP = 0,59876 * F$$

em que: RP = resistência à penetração radicular (MPa); F = força obtida do penetrômetro (kgf); g = aceleração por gravidade (9,806648 m/s²); π = 3,1415926; r = raio da ponta do penetrômetro (0,00192 m); e cos45° = 0,7071.

No campo, a resistência mecânica do solo à penetração foi determinada utilizando o penetrômetro digital PenetroLOG (Falker, RS, Brasil), que realiza a medição da RP através de cone metálico inserido diretamente no solo, indicando em várias profundidades, o valor de pressão correspondente à compactação do solo. O conjunto desses valores forma o perfil de compactação do solo. O aparelho acompanha um software que permite a visualização e a análise dos dados armazenados em um computador.

3.2.3. Estabilidade de agregados

Amostras com estrutura preservada foram coletadas com enxadão para avaliar a estabilidade de agregados em água na profundidade de 0-0,20 m. Após secagem ao ar, foram obtidos agregados de solo que ficaram retidos entre peneiras com malhas de 8,0 e 4,75 mm,

separados em grupos de 25 g de solo seco para cada repetição. As amostras foram pré-umedecidas e depois agitadas verticalmente em água em um conjunto de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,105 mm, de acordo com o método de Yoder (1936), durante 15 minutos e adaptações sugeridos por Embrapa (2011). Posteriormente, foram calculados o Diâmetro Médio Geométrico (DMG), Diâmetro Médio Ponderado (DMP).

3.2.4. Matéria orgânica e biomassa microbiana

Após serem secas ao ar, as amostras deformadas foram trituradas e passadas por uma peneira de 2 mm para obter terra fina seca ao ar (TFSA). O carbono orgânico total foi medido neste material por oxidação úmida usando dicromato de potássio em meio sulfúrico (Embrapa, 1997). As mesmas amostras coletadas para análise do carbono orgânico total foram utilizadas para determinar o carbono da biomassa microbiana do solo. Essas amostras foram armazenadas em sacos plásticos e mantidas refrigeradas a 4°C por até cinco dias. Um dia antes da análise, as amostras foram deixadas em temperatura ambiente por 24 horas. O carbono da biomassa microbiana foi medido pelo método de irradiação-extração (Islam e Weil, 1998; Mendonça e Matos, 2005) com um forno de micro-ondas de 900 W operando a 2.450 MHz. Após a irradiação, as amostras foram extraídas com sulfato de potássio 0,5 mol L⁻¹; o carbono da biomassa microbiana foi determinado por oxidação com dicromato de potássio 0,066 mol L⁻¹ e titulação com sulfato ferroso amoniacal 0,033 mol L⁻¹. O carbono da biomassa microbiana ($\mu\text{g kg}^{-1}$ Cmicrobiano no solo) foi calculado usando a seguinte equação:

$$C_{\text{microbiano}} = FC \cdot K_c^{-1} \quad (2)$$

em que FC = CI – CNI. Aqui, CI = teor de carbono extraído do solo irradiado; CNI = teor de carbono extraído do solo não irradiado; Kc = fator de correção (0,033).

A respiração basal foi avaliada medindo-se o CO₂ liberado; a umidade da amostra foi ajustada para 70% da capacidade de campo para essa determinação. As amostras foram incubadas por 72 horas com uma solução de NaOH 0,05 mol L⁻¹ e depois tituladas com HCl 0,05 mol L⁻¹, seguindo Alef & Nannipieri (1995). A quantidade de CO₂ liberada, calculada em mgC-CO₂ (100 cm³)⁻¹ de solo durante o período de monitoramento, foi determinada usando a seguinte equação:

$$\text{C-CO}_2(\mu\text{g}) = (\text{PS} \times t) \times ((V_o - V) \times 1.1) \quad (3)$$

em que PS = quantidade de solo em gramas; t = tempo de incubação em horas; Vo = volume de HCl para titulação do controle (mL); V = volume de HCl usado na titulação da amostra (mL).

A quantidade total de C-CO₂ produzida é a soma dos valores obtidos durante cada amostragem. O quociente metabólico (qCO₂), que indica a liberação de CO₂ por unidade de biomassa microbiana, foi calculado como a razão entre a respiração basal e o carbono da biomassa microbiana do solo (Anderson & Domsch, 1993):

$$qCO_2 = \frac{RBS}{BMS} \quad (4)$$

Em que: RBS = respiração basal dos microorganismos no solo; BMS = o carbono da biomassa microbiana do solo

A matéria orgânica leve (MOL) em água foi quantificada utilizando o método de Anderson e Ingram (1989). Cinco gramas de terra fina seca ao ar (TFSA) foram pesadas em um Becker de 250 mL, e 25 mL de solução de NaOH 0.1 mol L⁻¹ foram adicionados. A mistura foi deixada em repouso durante a noite. A suspensão foi então agitada com um bastão de vidro e passada por uma peneira de 0,25 mm, removendo toda a fração argila. O material retido (MOL e areia) foi transferido de volta ao Becker e completado com água. A porção sobrenadante foi peneirada com uma malha de 0,25 mm para separar a MOL da fração areia. Este processo foi repetido até que todo o material flutuante fosse removido. A MOL foi então seca a 65°C até peso constante e pesada usando uma balança de precisão. O teor de carbono da MOL e o carbono orgânico total (COT) foram determinados pelo método de combustão seca (Nelson e Sommers, 1996) utilizando um analisador de carbono elementar (Thermo, Flash EA 1112). O estoque de carbono (EstC) foi estimado usando o procedimento recomendado por Ellert e Bettany (1995):

$$EstC = COT \cdot Ds \cdot e \quad (5)$$

Em que: EstC = estoque de carbono (mg ha⁻¹); COT carbono orgânico total (%); Ds = densidade do solo (g cm⁻³); e = espessura do solo (apenas da camada 0-5 cm).

O quociente microbiano (qMic) foi calculado pela relação entre a BMS e o COT, expresso em porcentagem, conforme a Equação 9 (INSAM et al., 1988):

$$qMic = \frac{BMS}{COT} \cdot 100 \quad (6)$$

Em que: qMic = quociente microbiano (%); BMS = carbono da biomassa microbiana do solo e COT é carbono orgânico total.

3.2.5. Modelagem e análise estatística de dados

Para avaliação temporal, foram utilizados dados de estudos anteriores realizados na região em 2022 e 2023. Os dados foram submetidos à análise de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (teste de Bartlett). Quando as premissas não foram significativas ($p < 0,05$), os dados foram submetidos à transformação de potência. Em seguida, foi realizada a análise de variância ($p < 0,05$) e o teste de Tukey ($p < 0,05$) foi aplicado para comparações múltiplas.

Foi conduzida uma análise multivariada com o método de análise de componentes principais (ACP). Inicialmente, elaborou-se uma matriz de correlação no RStudio para selecionar as variáveis mais relevantes. Posteriormente, utilizou-se o parâmetro "centroids" para realizar o agrupamento ("clustering") dos tratamentos e dos sistemas, destacando os mais significativos em um espaço bidimensional.

A ACP permitiu reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar as variáveis que explicam a maior parte da variância nos indicadores de qualidade do solo, facilitando a visualização das relações complexas entre as variáveis e a identificação dos principais fatores que influenciam a qualidade do solo. Todas as análises estatísticas foram executadas no software R 4.4.0 (R Core Team, 2024) e utilizaram os pacotes tidyverse (Wickham, 2017), lmerTest (Kuznetsova et al., 2014), lsmeans (Lenth, 2016) e corrplot (Taiyun Wei, 2017).

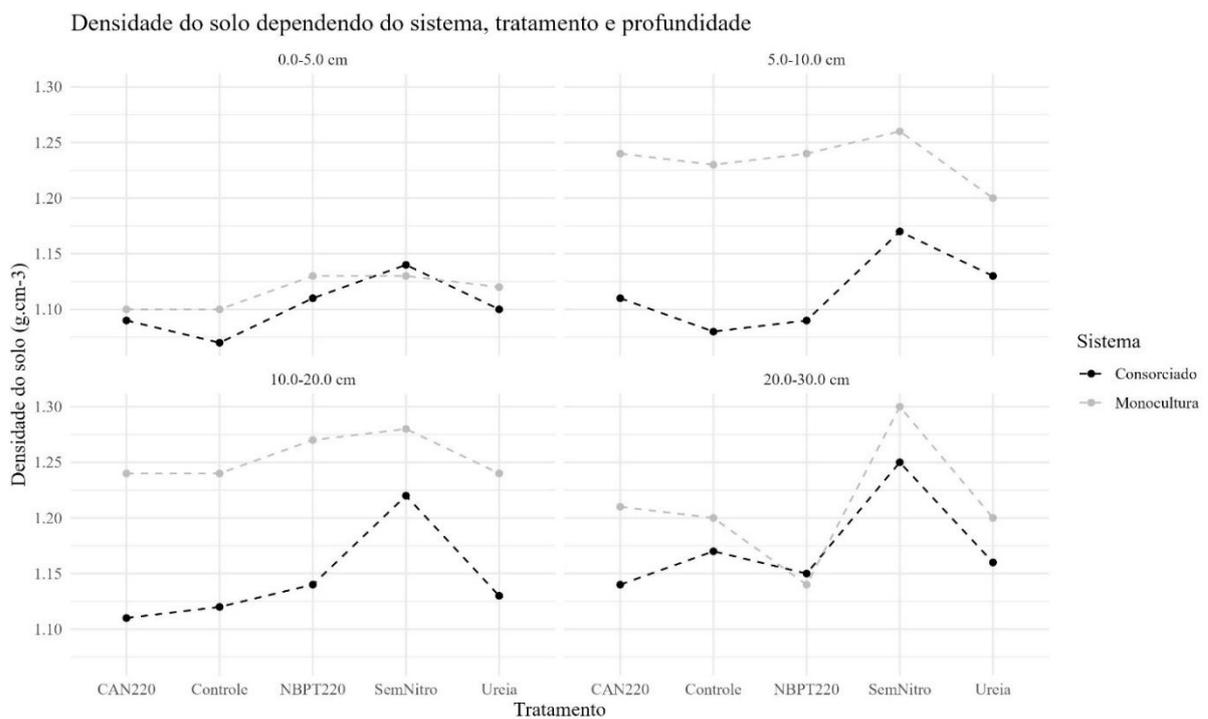
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa são apresentados nos tópicos a seguir.

4.1. Densidade do solo

A análise dos gráficos permitiu observar padrões importantes na densidade do solo conforme o tipo de sistema de manejo e tratamento aplicados. Na Figura 3, os valores médios da densidade do solo foram apresentados de acordo com cada combinação de tratamento, profundidade e sistema, revelando variações relevantes que indicaram a influência do sistema consorciado versus monocultura.

Figura 3: Valores médios da densidade do solo para diferentes tratamentos e sistemas de manejo do solo.



Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Em profundidades mais superficiais (0,0-5,0 cm e 5,0-10,0 cm), observou-se que o sistema de monocultura apresentou uma densidade do solo ligeiramente mais alta quando comparado ao sistema consorciado. Essa maior compactação na monocultura associou-se ao menor volume de raízes e à menor cobertura do solo, resultando em uma descompactação natural reduzida. Esse comportamento foi particularmente relevante, pois densidades elevadas nas camadas superficiais limitaram a infiltração de água e reduziram a aeração, impactando negativamente o desenvolvimento das plantas (Kiehl, 1979; Mukhopadhyay et al., 2019).

Portanto, em camadas mais profundas (10,0-20,0 cm e 20,0-30,0 cm), a monocultura continuou a apresentar valores mais altos de densidade do solo, especialmente no tratamento SemNitro. A ausência de nitrogênio neste tratamento reduziu o crescimento radicular e a atividade biológica, levando a uma maior compactação do solo, especialmente na ausência de uma planta de cobertura. No sistema consorciado, mesmo com o tratamento SemNitro, a presença da braquiária contribuiu para uma estrutura de solo menos compactada, principalmente em profundidades maiores, onde suas raízes atuaram na descompactação e na criação de porosidade no solo. Esses resultados confirmaram a literatura, que associou a presença de plantas de cobertura a uma menor compactação e a uma melhor estrutura do solo (Reichert et al., 2003; Upadhyay e Raghubanshi, 2020).

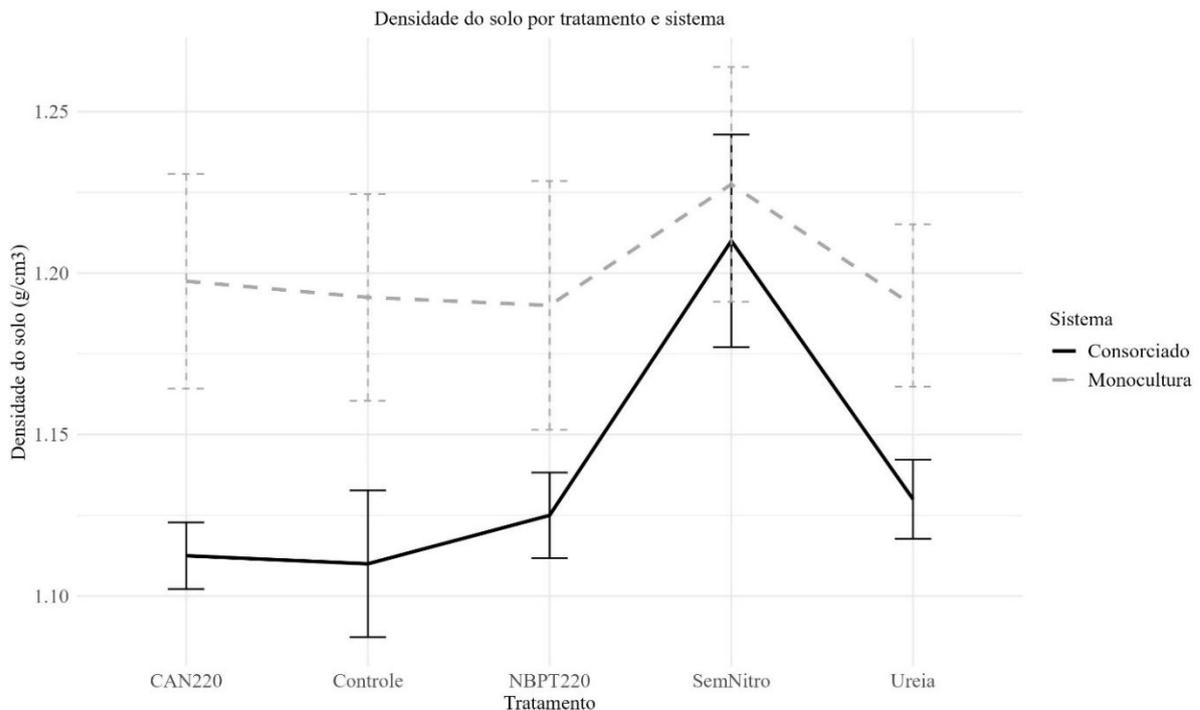
Entre os tratamentos, o SemNitro destacou-se como o que mais aumentou a densidade do solo, principalmente nas camadas intermediárias e profundas. Esse tratamento apresentou o maior valor de densidade para ambos os sistemas, mas com um efeito mais pronunciado na monocultura. Esse aumento indicou que, sem nitrogênio, o solo perdeu parte de sua estrutura, e a compactação se intensificou, possivelmente pela falta de suporte ao crescimento radicular e pela menor atividade microbiológica, fatores que, quando presentes, auxiliaram na descompactação. Por outro lado, os tratamentos Controle e CAN220 (Nitrato de Amônio Cálcio) demonstraram uma compactação menor, sugerindo que a adição de nitrogênio ou a ausência de tratamento contribuíram para manter a densidade do solo em níveis aceitáveis (Queiroz-Voltan et al., 2020).

Conforme valores de densidade do solo compilados por Kiehl (1979) e outros pesquisadores, a densidade do solo entre 1,1 e 1,6 g/cm³ é comum em solos minerais e pode ser adequada para o desenvolvimento de culturas agrícolas. Neste experimento, os valores encontrados estão dentro dessa faixa, sugerindo que o solo é apto para o cultivo de milho para silagem, especialmente no sistema consorciado. Além disso, o manejo consorciado com braquiária apresentou densidades abaixo dos limites críticos, mantendo a compactação dentro de uma faixa considerada benéfica para o desenvolvimento radicular e para o fluxo de água e nutrientes no solo (Rahman et al., 2024; Queiroz-Voltan et al., 2020).

A interação entre sistemas de manejo e tratamentos revelou que a densidade do solo foi significativamente influenciada pelo tipo de sistema adotado (Figura 4). O sistema consorciado com braquiária manteve a densidade do solo em níveis mais baixos em comparação à monocultura em quase todos os tratamentos. Essa diferença foi especialmente evidente no

tratamento SemNitro, onde a densidade do solo aumentou consideravelmente na monocultura. Esse resultado reforçou a importância do consórcio de culturas para a sustentabilidade do manejo do solo, uma vez que a braquiária contribuiu para uma redução na compactação, especialmente em condições de ausência de nitrogênio. A presença da braquiária no sistema consorciado atuou como um mecanismo natural de descompactação, melhorando a estrutura do solo e potencializando sua capacidade de retenção de água e nutrientes (Reichert et al., 2003).

Figura 4: Interação dos sistemas e dos tratamentos na densidade do solo.



Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Os gráficos sugeriram que a densidade do solo foi diretamente afetada pela profundidade, pelo tipo de sistema e pelo tratamento aplicado. A análise de interação destacou que o sistema consorciado com braquiária foi preferível ao sistema de monocultura para evitar compactação excessiva, particularmente em condições de ausência de nitrogênio, como observado no tratamento SemNitro. Os dados indicaram que a adoção de um sistema consorciado pode ser uma estratégia eficaz para a melhoria da estrutura do solo e para a manutenção de densidades dentro de uma faixa aceitável, proporcionando um ambiente mais favorável ao desenvolvimento das culturas.

4.2. Resistência à penetração (RP)

A avaliação da resistência à penetração (RP) realizada com o penetrômetro automatizado revelou pouca sensibilidade às variações de compactação entre os diferentes tratamentos de solo (Tabela 3). Não foram observadas diferenças significativas na RP entre os tratamentos, indicando que as práticas de manejo e os tipos de adubação aplicados não influenciaram significativamente a resistência do solo à penetração em condições de campo.

Tabela 1: Valores médios para resistência do solo à penetração.

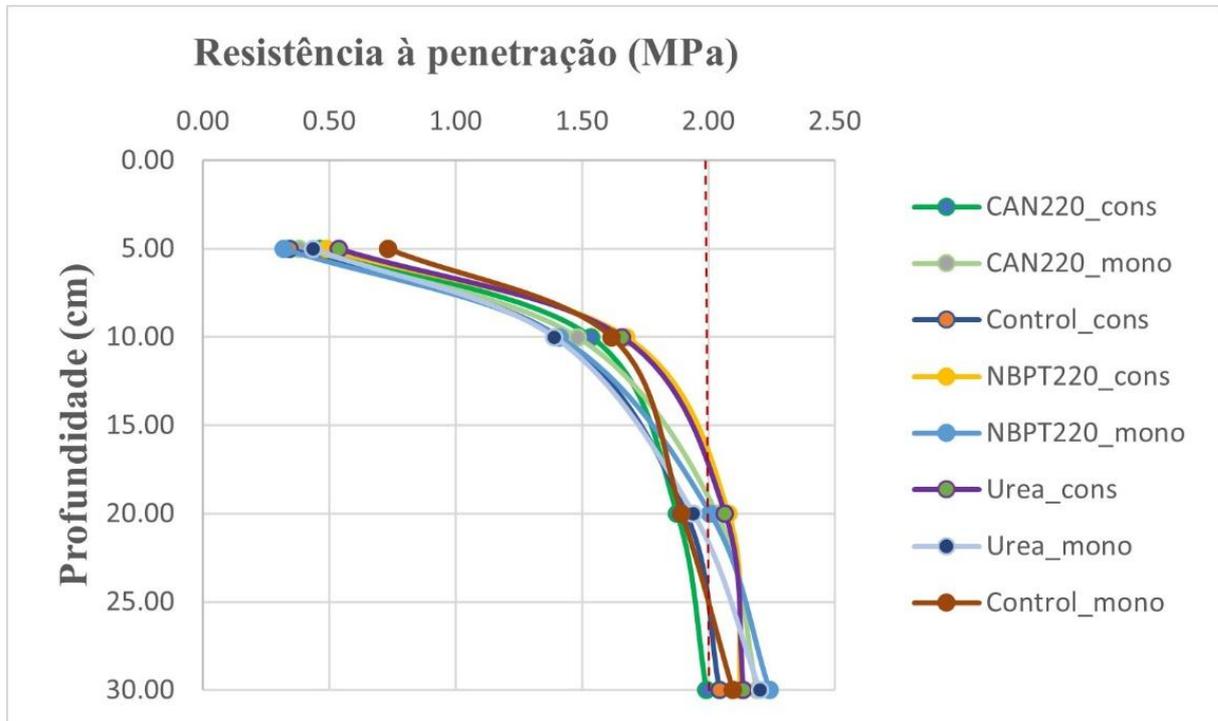
Tratamento	Resistência à penetração (MPa)			
	0,0 -0,05 m	0,05 - 0,10 m	0,10 - 0,20 m	0,20 – 0,30 m
Ensaio de campo				
CAN220				
Conso	0,46 Aa	1,54 Aa	1,88 Aa	1,99 Aa
Exclusivo	0,38 Ab	1,48 Ab	2,03 Ab	2,19 Ab
Control				
Conso	0,34 Aa	1,41 Aa	1,91 Aa	2,04 Aa
Exclusivo	0,73 Ab	1,62 Ab	1,89 Ab	2,10 Ab
NBPT220				
Conso	0,49 Aa	1,68 Aa	2,37 Aa	2,13 Aa
Exclusivo	0,32 Ab	1,41 Ab	2,01 Ab	2,24 Ab
Ureia				
Conso	0,54 Aa	1,66 Aa	2,07 Aa	2,14 Aa
Exclusivo	0,44 Ab	1,39 Ab	1,94 Ab	2,20 Ab
Ensaio de laboratório				
CAN220				
Conso	1,25 Aa	2,03 Aa	1,61 Aa	1,35 Aa
Exclusivo	1,32 Ab	1,19 Ab	0,84 Ab	0,55 Ab
Control				
Conso	1,04 Aa	1,67 Aa	1,07 Aa	0,72 Aa
Exclusivo	0,95 Ab	0,97 Ab	0,89 Ab	0,79 Ab
NBPT220				
Conso	1,17 Aa	2,20 Aa	1,97 Aa	1,03 Aa
Exclusivo	1,29 Ab	2,19 Ab	1,58 Ab	1,11 Ab
Ureia				
Conso	1,29 Aa	1,40 Aa	1,37 Aa	0,85 Aa
Exclusivo	0,85 Ab	1,13 Ab	0,92 Ab	1,16 Ab

Legenda: RP determinada em campo e no laboratório em função dos tratamentos e sistemas de manejo, nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30m. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si em profundidade pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Contudo, valores de RP mais elevados foram identificados na camada de 20 a 30 cm de profundidade, aproximando-se de 2,0 MPa. Esses valores são considerados críticos para o crescimento radicular, especialmente se as medições foram realizadas em umidade próxima à

capacidade de campo. Valores de RP nessa faixa podem limitar a expansão das raízes em profundidades mais baixas, comprometendo a absorção de água e nutrientes essenciais (Figura 5).

Figura 5: Resistência do solo à penetração para diferentes tratamentos e sistemas de manejo.



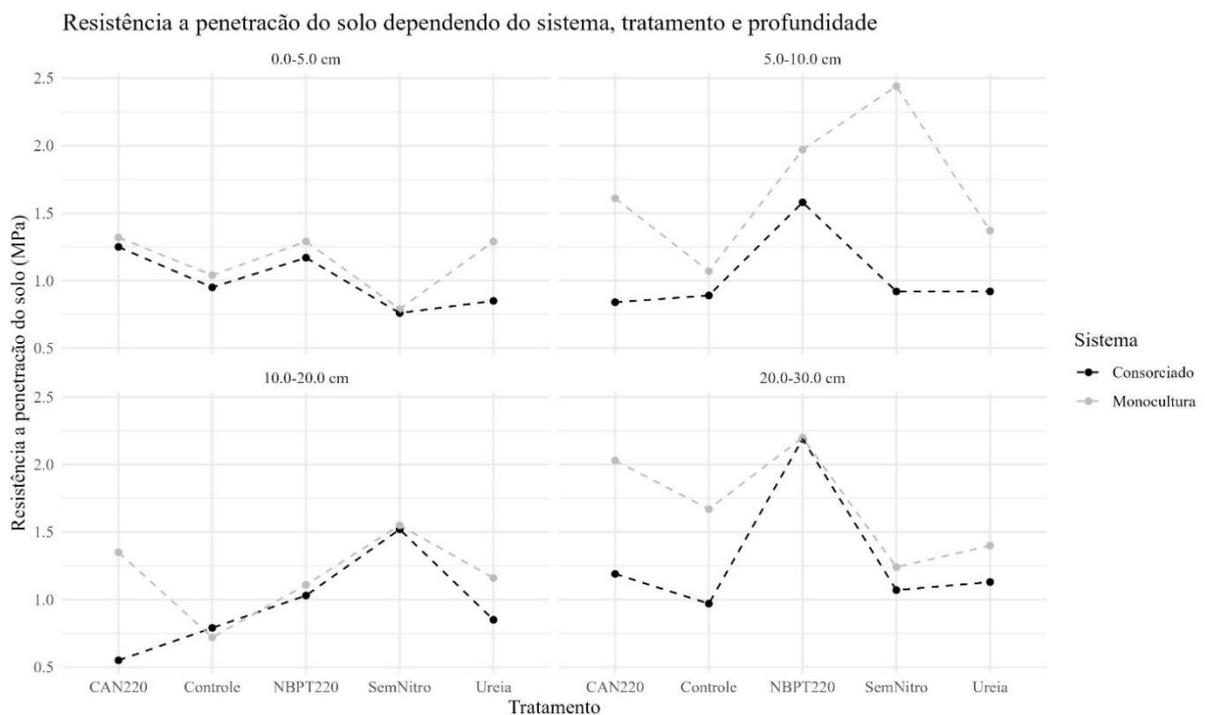
Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Ao contrário dos resultados em campo, o penetrômetro de bancada em laboratório indicou uma menor resistência à penetração nos tratamentos com consórcio de milho e braquiária (Figura 6). Esse resultado pode ser explicado pela influência positiva da braquiária, cujas raízes proporcionam uma maior diversidade radicular e favorecem a descompactação do solo (Ramos et al., 2019). A presença da braquiária no sistema consorciado pode ter contribuído para a redução da RP ao longo do perfil do solo, promovendo uma melhor distribuição das raízes nas camadas mais profundas, o que facilita a penetração radicular e melhora a estrutura física do solo (Santos et al., 2017). Esse comportamento difere dos achados de da Silva et al. (2020), que não observaram influência do sistema radicular das culturas de cobertura na RP durante o cultivo de milho com braquiária e pousio. A divergência nos resultados pode estar relacionada à diferença entre os métodos de medição utilizados. No presente estudo, a discrepância entre o penetrômetro de campo (PenetroLOG digital da Falker) e o penetrômetro de bancada (Marconi) pode ser atribuída a fatores operacionais e às condições específicas de cada teste. No campo, o penetrômetro digital demonstrou maior variabilidade nos valores de

RP (Silva et al., 2021), possivelmente devido à sensibilidade às condições de umidade do solo no momento das medições. Em contrapartida, o ensaio em laboratório controlou melhor essas variáveis, permitindo uma maior reprodutibilidade dos dados e apresentando menores variações nos valores de RP.

No geral, a Figura 5 demonstra que o limite crítico de 2,0 MPa foi atingido principalmente nas camadas mais profundas (20-30 cm), independentemente do tratamento, com variações mínimas entre os sistemas de consórcio e monocultura. Esse valor pode representar uma limitação para o crescimento radicular, especialmente em solos onde a umidade se encontra próxima à capacidade de campo. Já na Figura 6, os resultados laboratoriais sugerem uma resistência menor à penetração em sistemas consorciados, corroborando a ideia de que a braquiária promove condições mais favoráveis para a penetração radicular, ao reduzir a compactação através de sua atividade radicular.

Figura 6: Resistência do solo à penetração para diferentes tratamentos e sistemas de manejo.



Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

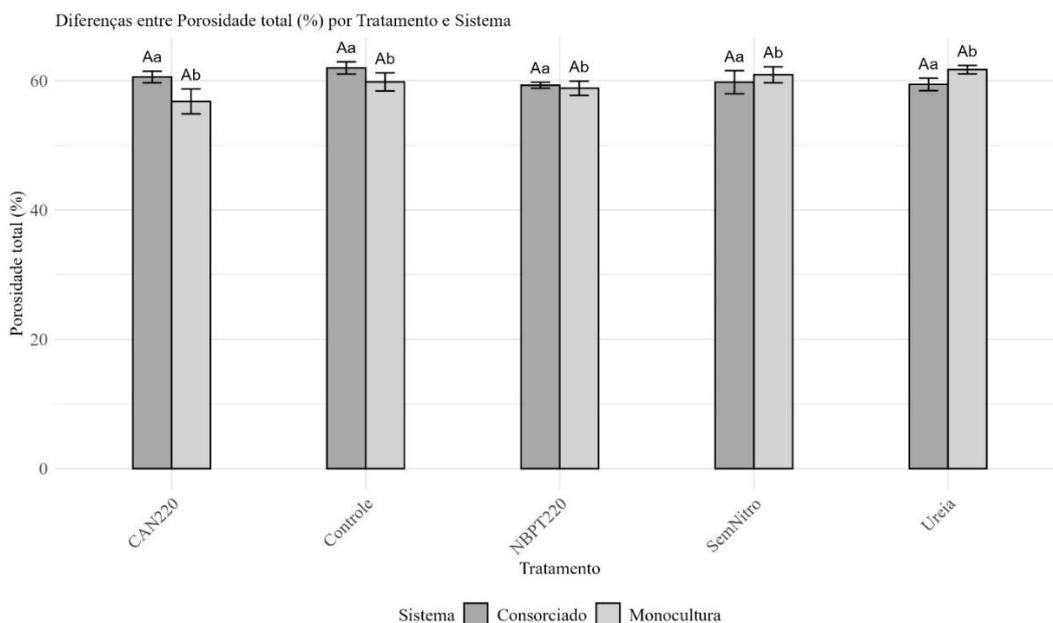
Em síntese, os resultados indicam que o uso de braquiária em consórcio com milho pode ser uma estratégia eficaz para reduzir a resistência do solo à penetração, especialmente em camadas superficiais e intermediárias, como observadas em laboratório. Contudo, a ausência de diferenças significativas na RP em condições de campo sugere que fatores como a umidade e a variabilidade no perfil do solo podem influenciar a sensibilidade dos métodos de medição,

impactando os resultados de resistência. Assim, a escolha do método de medição de RP é importante para interpretações precisas e comparações entre sistemas de manejo e tratamentos de solo. Além disso, a profundidade foi um fator determinante para a resistência à penetração, e o resultado desse indicador de qualidade física do solo destaca a importância do uso de sistema consorciado, como o milho com braquiária, para minimizar a compactação e melhorar a qualidade estrutural do solo, especialmente nas camadas superiores e intermediárias.

4.3. Porosidade do solo

A porosidade do solo é uma característica fundamental para a dinâmica da água e do ar no solo, indicando a proporção de espaços vazios (poros) em relação ao volume total. Essa propriedade é diretamente influenciada pela textura e estrutura do solo. Solos argilosos, por exemplo, tendem a exibir maior porosidade total devido à presença de microporos, que se formam pela estrutura mais agregada e pela superfície específica elevada das partículas de argila. Já solos arenosos, com partículas maiores e menos agregadas, apresentam menos microporos e, conseqüentemente, uma menor porosidade total. No presente estudo, a porosidade total variou entre 53,46% e 61,5%, sendo os valores mais altos observados no sistema consorciado com braquiária e os menores na monocultura (Figura 7).

Figura 7: Valores médios do volume total da porosidade.



Legenda: Porosidade para diferentes tratamentos e sistemas de manejo do solo. As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

A média de porosidade para todas as condições experimentais foi de 57,48%, o que se enquadra dentro dos valores esperados para solos argilosos. Segundo Freire (2006), uma porosidade entre 52,8% e 61,5% é típica de solos argilosos, o que confirma a adequação dos valores observados neste estudo.

Embora os resultados mostrem que o sistema consorciado apresentou uma tendência a maior porosidade em comparação à monocultura, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os sistemas de manejo para a porosidade total. Essa similaridade sugere que, apesar da presença da braquiária no sistema consorciado, que contribui para uma estrutura mais estável e um volume de poros potencialmente maior, essa diferença pode não ter sido suficiente para causar um impacto estatístico significativo. Estudos anteriores, como o de Wendling et al. (2012), que analisaram áreas de conversão de cerrado em diferentes usos, também não observaram variações expressivas na porosidade total em função da profundidade ou do tipo de uso, corroborando os resultados encontrados aqui.

A presença da braquiária no consórcio é conhecida por favorecer a porosidade, especialmente devido ao seu sistema radicular denso e profundo, que ajuda a formar macroporos e a melhorar a estabilidade estrutural do solo. No entanto, a estrutura inicial do solo e as características físicas preexistentes podem ter limitado o impacto adicional que o sistema radicular da braquiária poderia exercer sobre a porosidade total. Isso sugere que, em solos argilosos, o efeito do consórcio na porosidade é mais sutil e pode depender de condições como o tempo de cultivo e a intensidade de atividades radiculares.

A presença da braquiária no consórcio é conhecida por favorecer a porosidade, especialmente devido ao seu sistema radicular denso e profundo, que ajuda a formar macroporos e a melhorar a estabilidade estrutural do solo. No entanto, a estrutura inicial do solo e as características físicas preexistentes podem ter limitado o impacto adicional que o sistema radicular da braquiária poderia exercer sobre a porosidade total. Isso sugere que, em solos argilosos, o efeito do consórcio na porosidade é mais sutil e pode depender de condições como o tempo de cultivo e a intensidade de atividades radiculares.

Embora a análise por profundidade não tenha sido explorada em detalhe neste gráfico, é importante considerar que em solos argilosos a porosidade pode ser menos afetada em profundidades maiores, mesmo sob diferentes sistemas de manejo. Isso se deve à compactação natural das camadas mais profundas e à menor atividade biológica e radicular nessas regiões. Wendling et al. (2012) observaram que a porosidade total se manteve constante ao longo do

perfil em diferentes sistemas de uso, o que pode indicar que a variação da porosidade é mais restrita às camadas superficiais, onde a ação radicular e os processos de manejo têm maior influência. Os resultados sugerem que o consórcio com braquiária pode fornecer um leve aumento na porosidade, ainda que esse aumento não seja estatisticamente significativo a curto prazo. Para futuros estudos, investigações em longo prazo e em diferentes profundidades podem ser necessárias para avaliar de forma mais abrangente o impacto de diferentes práticas de manejo sobre a porosidade em solos argilosos.

4.4. Distribuição do tamanho dos poros: macro e microporos

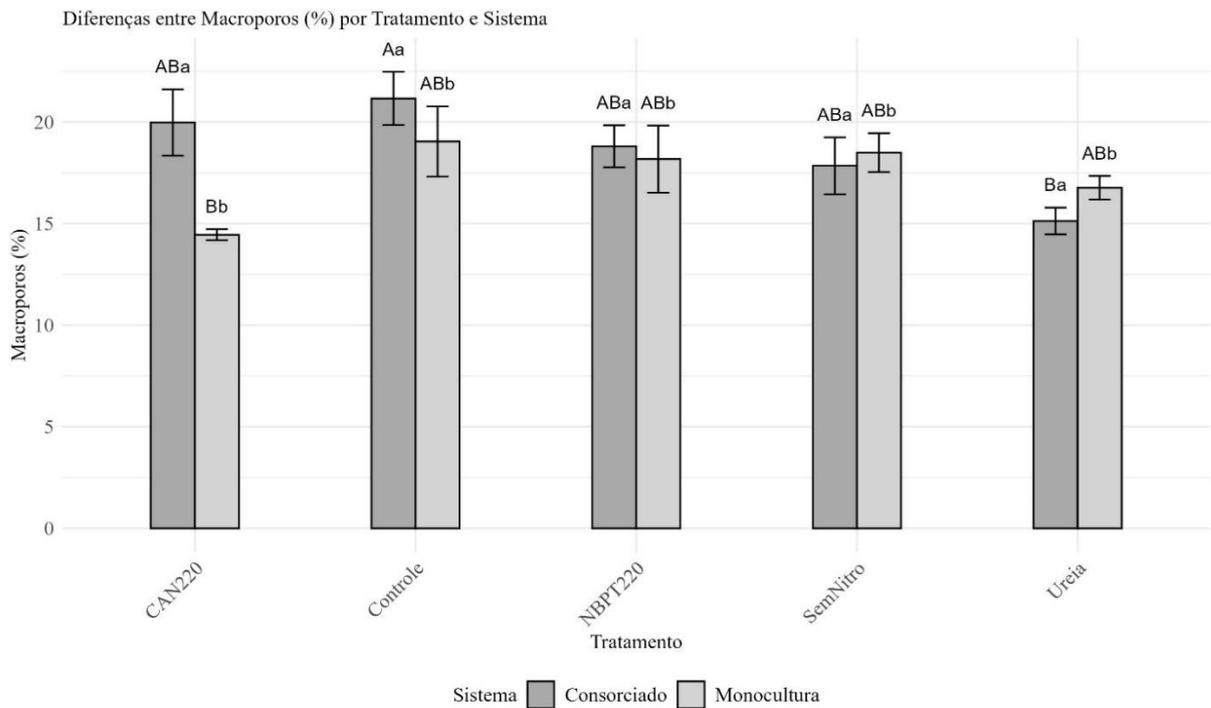
A distribuição do tamanho dos poros na matriz do solo é um fator determinante para as propriedades físicas e hidráulicas do solo, afetando a movimentação da água e a aeração. A macroporosidade e a microporosidade desempenham papéis complementares, sendo a primeira essencial para a drenagem e a aeração, e a segunda, para a retenção de água, especialmente em solos argilosos. Neste estudo, foram analisadas as variações de macroporosidade e microporosidade entre diferentes tratamentos e sistemas de manejo (consorciado e monocultura), fornecendo insights sobre como práticas de manejo e tipos de adubação influenciam a estrutura porosa do solo.

4.4.1. Macroporosidade

A macroporosidade, responsável pelo fluxo de ar e pela rápida drenagem de água, apresentou valores entre 14,16% e 22,96%, sendo maiores no sistema consorciado em comparação ao sistema de monocultura. A média de macroporosidade foi de 15% no sistema consorciado e 14% na monocultura, o que sugere que a presença da braquiária no sistema consorciado favoreceu a formação de macroporos, possivelmente devido à ação de suas raízes profundas e ramificadas, que contribuem para a descompactação do solo e o aumento dos espaços porosos maiores.

Esses valores estão em conformidade com os dados de Carvalho et al. (2003), que observaram macroporosidade variando de 3 a 29% em Argissolos e Latossolos, indicando que os valores deste estudo refletem condições típicas de solos argilosos e são adequados para a aeração do solo e para o crescimento do milho para silagem (Figura 8).

Figura 8: Valores médios da macroporosidade para diferentes tratamentos e sistemas de manejo do solo.



Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Os resultados também indicam diferenças significativas de macroporosidade entre alguns tratamentos, particularmente para Ureia, Controle e SemNitro. Esse comportamento pode estar relacionado ao efeito específico de cada fonte de nitrogênio na estrutura do solo. Diferentes tipos de fertilizantes nitrogenados influenciam a atividade microbológica e a agregação do solo de maneiras distintas, o que pode explicar a variação na formação de macroporos. Em solos tratados com ureia, por exemplo, o processo de nitrificação pode contribuir para a formação de agregados menores e aumentar a quantidade de macroporos, enquanto a ausência de nitrogênio (SemNitro) pode reduzir a atividade biológica, favorecendo uma estrutura menos porosa.

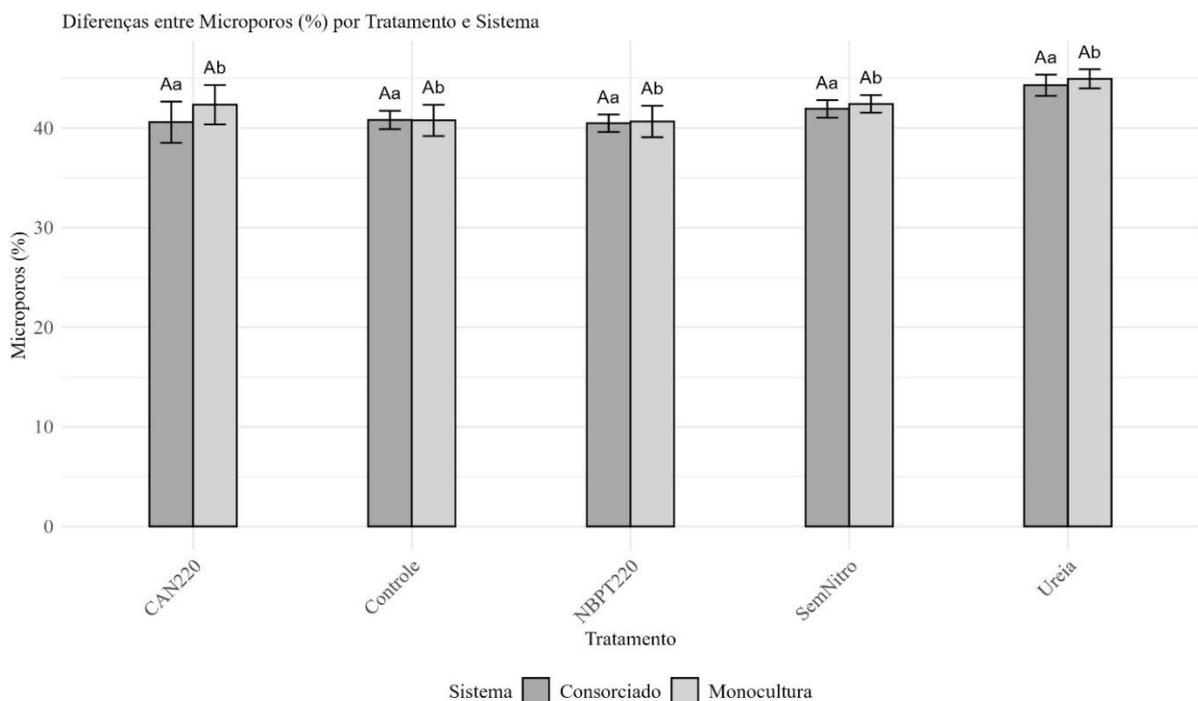
Os valores de macroporosidade encontrados em ambos os sistemas de manejo (consorciado e monocultura) foram adequados para o cultivo de milho, uma vez que Bayer et al. (1972) recomendam um mínimo de **10%** de macroporosidade para assegurar a aeração e o crescimento das plantas. Assim, tanto o sistema consorciado quanto o monocultura atenderam a esse critério, com o consórcio apresentando uma vantagem ligeira na formação de macroporos. Esse resultado reforça a hipótese de que o consórcio com braquiária pode ser

benéfico para a estrutura física do solo, melhorando a porosidade de forma a favorecer a aeração e o desenvolvimento radicular.

4.4.2. Microporosidade

A microporosidade, que desempenha um papel importante na retenção de água no solo, apresentou valores que variaram até um máximo de 45,75%, com um mínimo de 39,30% (Figura 9).

Figura 9: Valores médios da microporosidade para diferentes tratamentos e sistemas de manejo do solo.



Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

A análise estatística revelou que não houve diferenças significativas na microporosidade entre os tratamentos e sistemas de manejo. Esse resultado sugere que a composição argilosa do solo experimental exerceu uma influência dominante na microporosidade, de modo que a adição de diferentes fontes de nitrogênio ou a presença de braquiária não afetaram substancialmente o arranjo dos microporos. Esses achados corroboram com os resultados de Ribeiro et al. (2007), que observaram microporosidade estável em diferentes tratamentos de manejo de Latossolo Vermelho-Amarelo, indicando que solos argilosos tendem a manter uma estrutura microporosa resiliente, independente de práticas de manejo a curto prazo. A ausência de diferenças significativas na microporosidade entre tratamentos e sistemas sugere que, em

solos argilosos, as mudanças na estrutura dos microporos podem exigir um período maior ou intervenções de manejo mais intensivas para que sejam observadas alterações significativas. Em outras palavras, a microporosidade desses solos permanece relativamente estável mesmo sob diferentes práticas de manejo e adubações, o que pode ser vantajoso em termos de retenção de água em períodos de déficit hídrico.

A adoção de práticas de manejo conservacionistas é benéfica para a boa manutenção dos atributos físicos do solo. Chen et al (2021) observou que raízes finas desempenharam um papel fundamental na formação de macro e microporos em Argissolo Vermelho em sistema de rotação de cultura. Molla et al. (2021) observaram que áreas de manejo mínimo sob cultivo rotacionado de soja e milho em Nitossolo tiveram acréscimo nos valores de microporosidade (1,7 vezes) e macroporosidade (2,7 vezes) quando comparadas com manejo convencional. Esses valores são característicos de solos argilosos, onde a predominância de partículas pequenas favorece a formação de microporos em detrimento dos macroporos. Em solos com alta quantidade de argila, os espaços entre as partículas são menores, o que aumenta a capacidade de retenção de água, mas pode limitar a aeração e o fluxo rápido de água. A distribuição do tamanho dos poros no solo estudado apresentou-se dentro dos limites adequados para a aeração e a retenção de água, especialmente em termos de macroporosidade, que atingiu valores superiores ao mínimo recomendado para o cultivo de milho para silagem. A influência da braquiária no sistema consorciado foi visível na tendência de maior macroporosidade, o que pode indicar um potencial benéfico do consórcio para a manutenção de uma estrutura de solo mais adequada ao cultivo. No entanto, a estabilidade da microporosidade reflete a resiliência do solo argiloso a mudanças a curto prazo, indicando que, para modificar substancialmente essa fração porosa, pode ser necessário um manejo mais prolongado ou específico.

4.5. Estabilidade de agregados

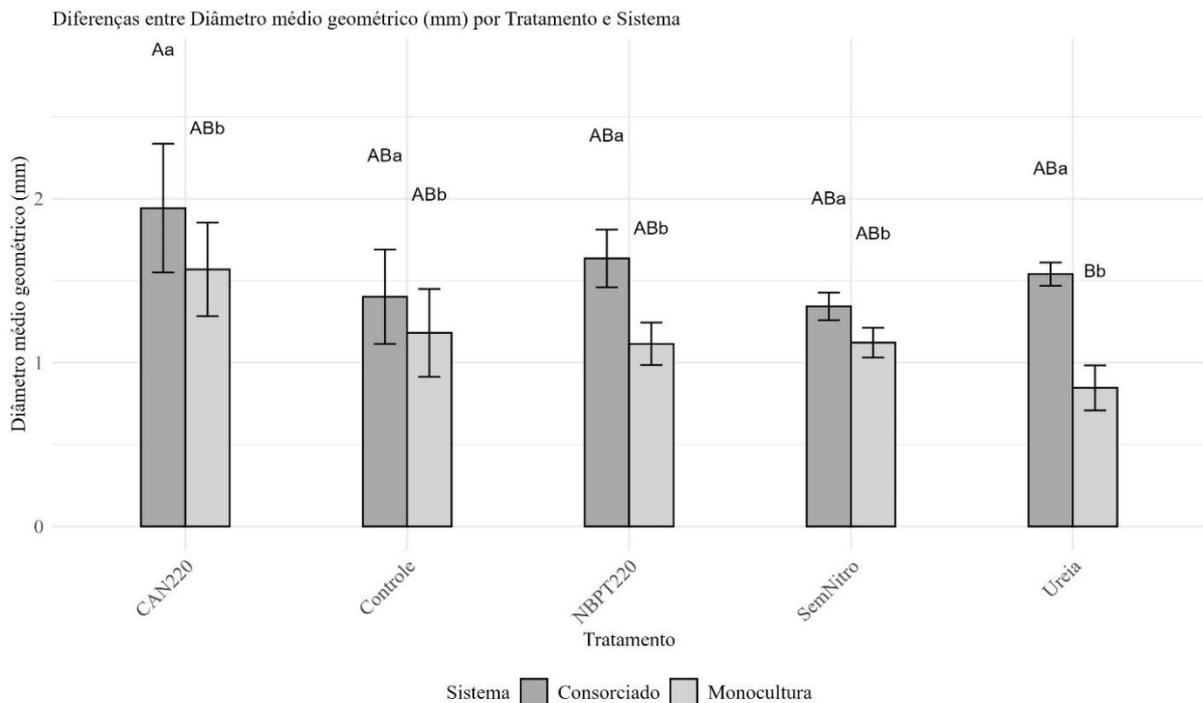
A estabilidade dos agregados do solo é uma propriedade crucial para a qualidade estrutural do solo, influenciando diretamente sua capacidade de infiltração de água, resistência à erosão e suporte à atividade radicular. Duas métricas principais foram utilizadas para avaliar essa estabilidade: o diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados.

4.5.1. Diâmetro Médio Geométrico (DMG)

O DMG é um indicador da proporção de agregados estáveis de diferentes tamanhos, fornecendo informações sobre a resistência dos agregados à desagregação sob forças externas,

como a ação da água e do manejo agrícola. Neste estudo, observou-se uma diferença significativa no DMG entre os sistemas de manejo (consorciado e monocultura), com o sistema consorciado apresentando, em média, valores de DMG mais elevados em comparação à monocultura (Figura 10). Essa diferença foi especialmente notável nos tratamentos CAN220 e SemNitro, onde o consórcio mostrou agregados maiores e, portanto, mais estáveis, como evidenciado pela diferenciação estatística entre letras (ex.: Aa, ABa, ABb).

Figura 10: Valores médios do DMG para diferentes tratamentos e sistemas de manejo do solo.



Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

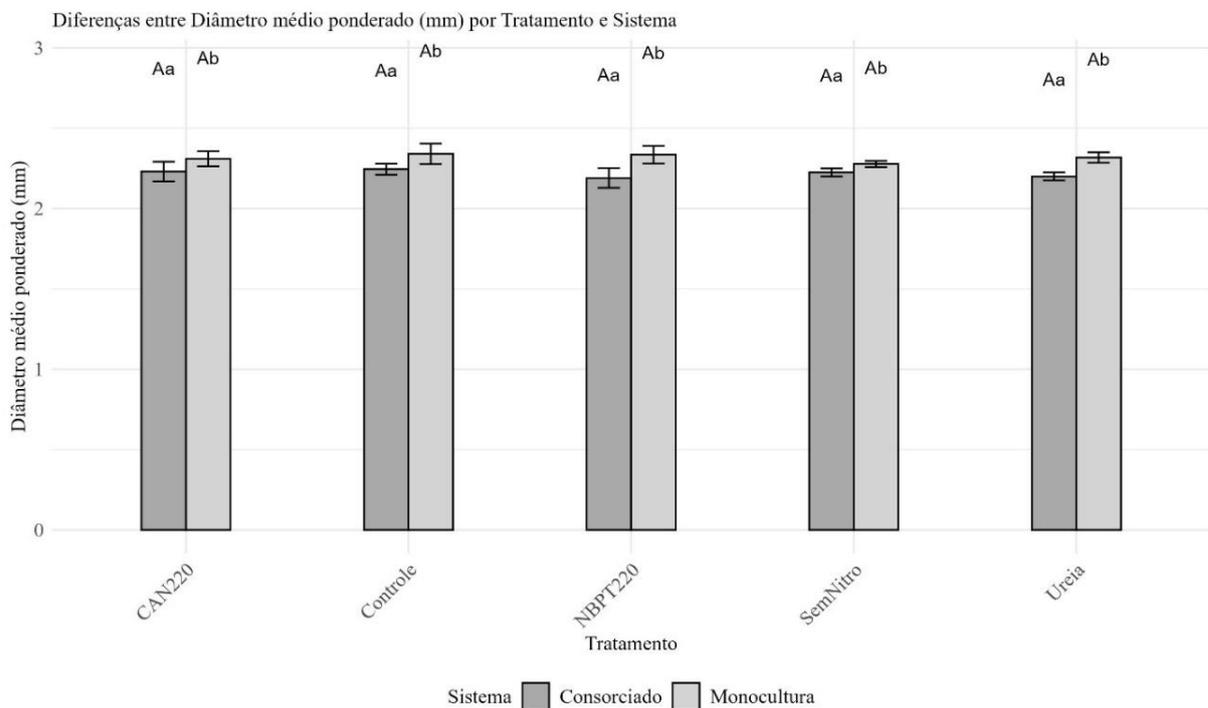
Os resultados obtidos corroboram com estudos anteriores, como o de Campos et al. (1995), que encontraram maior estabilidade de agregados em água na faixa de 1,00 a 0,21 mm em solos manejados com consórcios. Isso sugere que o sistema consorciado com braquiária tem um efeito positivo na agregação do solo, promovendo uma estrutura mais resistente. A presença da braquiária pode contribuir para esse efeito devido ao seu sistema radicular fibroso e extenso, que não só ajuda a consolidar os agregados do solo, mas também libera exsudados radiculares que atuam como agentes cimentantes, facilitando a formação e estabilização dos agregados (Tonon-Debiasi et al., 2024).

Esse aumento na estabilidade dos agregados no consórcio é importante para o manejo do solo, pois os agregados estáveis são menos propensos à desagregação sob condições de umidade e, portanto, conferem ao solo uma maior resistência à erosão e melhor capacidade de infiltração de água. Dessa forma, o consórcio com braquiária pode ser uma prática recomendada para áreas susceptíveis à erosão ou para aqueles solos que exigem maior conservação da estrutura física..

4.5.2. Diâmetro Médio Ponderado (DMP)

O DMP representa outra medida da estabilidade dos agregados do solo, onde valores mais altos de DMP indicam maior estabilidade e resistência dos agregados. Diferente do DMG, os resultados para o DMP não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas de manejo (consorciado e monocultura) ou entre os tratamentos aplicados (Figura 11).

Figura 11: Valores do diâmetro médio ponderado (DMP) do solo.



Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Essa ausência de variação significativa no DMP indica que, para a estabilidade dos agregados em termos ponderados, tanto o sistema consorciado quanto a monocultura mantiveram uma estabilidade estrutural similar. Também, a ausência de diferenças significativas no DMP pode estar associada à textura argilosa do solo estudado. Conforme

Avanzi et al. (2011), solos com maior teor de argila tendem a apresentar maior estabilidade dos agregados devido ao efeito "cimentante" das partículas de argila, que facilitam a coesão entre os agregados. Assim, o teor de argila no solo experimental pode ter contribuído para a manutenção de uma estrutura agregada estável, independentemente do sistema de manejo ou do tipo de adubação aplicado. Esse comportamento estável é benéfico para a conservação do solo, pois solos com agregados estáveis em água são menos suscetíveis à desagregação e perda de estrutura, o que reduz a probabilidade de erosão superficial e promove uma infiltração mais eficiente de água.

Os valores de DMG e DMP observados no solo experimental indicam uma elevada estabilidade estrutural, o que é essencial para a resistência do solo à erosão e para o suporte ao desenvolvimento radicular. Agregados estáveis permitem uma maior porosidade e uma distribuição mais equilibrada de macro e microporos, o que, por sua vez, facilita a infiltração de água e reduz o risco de escoamento superficial, conforme destacado por Stumpf et al. (2018). Em condições de seca, essa estrutura agregada estável é ainda mais vantajosa, pois contribui para a retenção de umidade e a preservação da capacidade de suporte do solo.

A tendência de maior estabilidade de agregados no sistema consorciado, especialmente no DMG, reforça a recomendação do consórcio com braquiária como uma prática de manejo sustentável que melhora a estrutura física do solo e sua resistência a processos de degradação. A presença de uma cobertura vegetal diversa, como no sistema consorciado com braquiária, oferece um suporte adicional para a conservação da estrutura dos agregados e, portanto, para a proteção do solo contra processos erosivos.

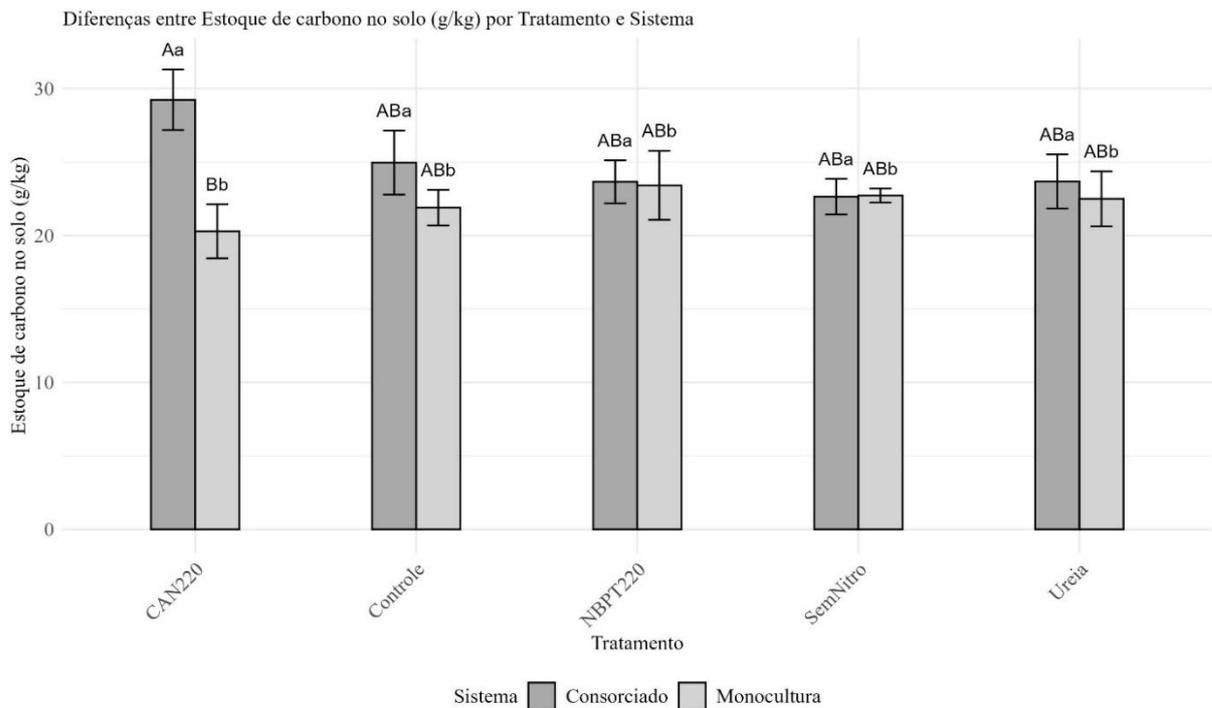
4.6. Carbono orgânico no solo

A matéria orgânica do solo é considerada um fator determinante para a fertilidade e saúde do solo, impactando diretamente a estrutura física, a capacidade de retenção de água e o ciclo de nutrientes. O carbono orgânico no solo (COS) é uma medida importante da qualidade do solo, e sua dinâmica é influenciada por fatores climáticos, práticas de manejo e mudanças no uso da terra (Kock et al., 2013). Avaliar as variações nas frações de carbono, como o carbono orgânico total (COT) e o carbono da matéria orgânica leve (C-MOL), permite identificar o impacto de diferentes práticas agrícolas e sistemas de manejo no acúmulo de carbono no solo, como demonstrado por Sales et al. (2017).

4.6.1. Estoque de Carbono no Solo (0-5 cm)

Os valores de estoque de carbono no solo, estimados para a camada de 0 a 5 cm, revelaram diferenças significativas entre os sistemas consorciado e de monocultura ($p < 0,05$), com destaque para o tratamento CAN220 no sistema consorciado, que apresentou o maior valor de estoque de carbono (28 g/kg) (Figura 12).

Figura 12: Valores médios do armazenamento de carbono no solo (g/kg).



Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

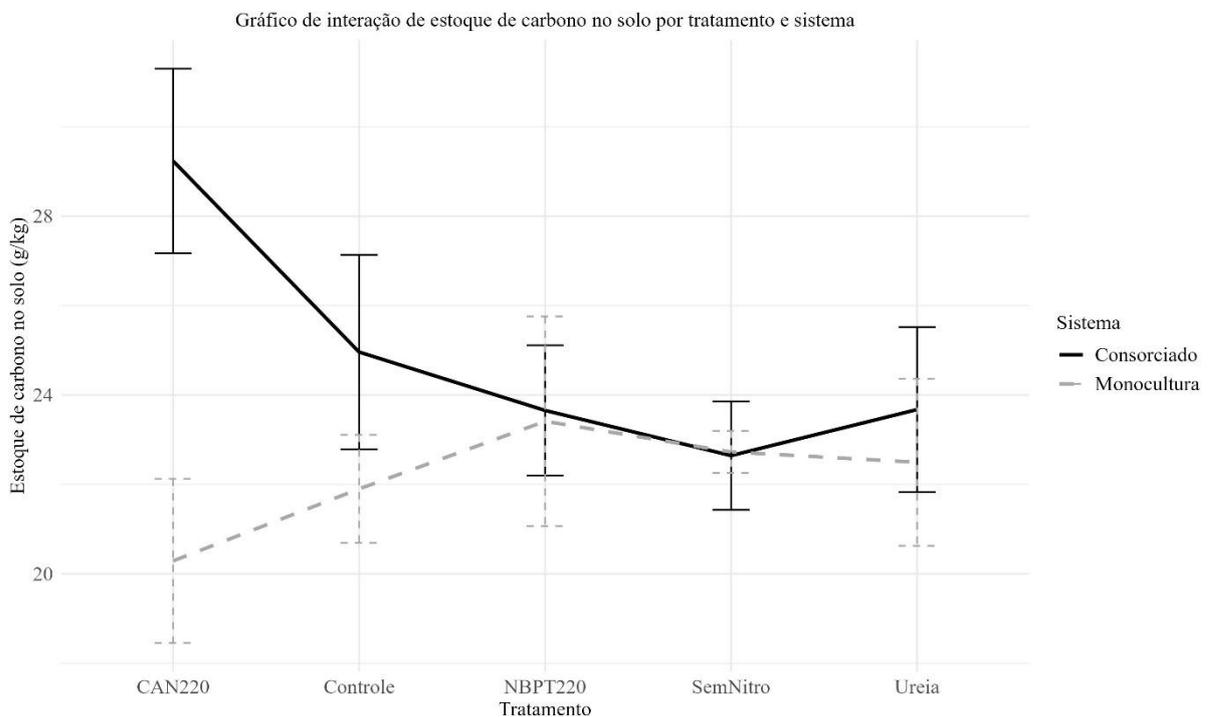
Observou-se uma variação no estoque de carbono, com valores entre 20,13 g/kg e 28 g/kg, sendo os menores valores encontrados no sistema de monocultura. Esses resultados estão em concordância com os achados de Besen et al. (2024), que reportaram maiores teores de carbono em sistemas com cobertura vegetal, reforçando que o uso de plantas de cobertura, como a braquiária, aumenta o estoque de carbono no solo em comparação com sistemas de monocultura.

Essa tendência de maior acúmulo de carbono no sistema consorciado pode ser atribuída à maior deposição de resíduos orgânicos e biomassa radicular promovida pela braquiária. Essas contribuições orgânicas fornecem matéria orgânica ao solo, que, ao se decompor, forma

agregados estáveis e aumenta o estoque de carbono (Sales et al., 2018). No entanto, é importante considerar que a duração do experimento foi de apenas dois anos, o que pode não ter sido suficiente para observar o potencial máximo de acúmulo de carbono em sistemas consorciados, especialmente em condições tropicais, onde o calor e a atividade biológica aceleram a decomposição da matéria orgânica.

O gráfico de interação (Figura 13) demonstrou que o sistema consorciado apresentou, em média, estoques de carbono mais elevados do que o sistema de monocultura, com variações dependendo do tipo de tratamento. Essa interação positiva indicou que o consórcio com braquiária é uma prática eficaz para aumentar os níveis de carbono no solo. Em áreas tropicais, onde a decomposição da matéria orgânica é acelerada, sistemas com maior aporte de resíduos, como o consórcio, tendem a acumular mais carbono a longo prazo.

Figura 13: Interação dos sistemas e dos tratamentos no estoque de carbono do solo.

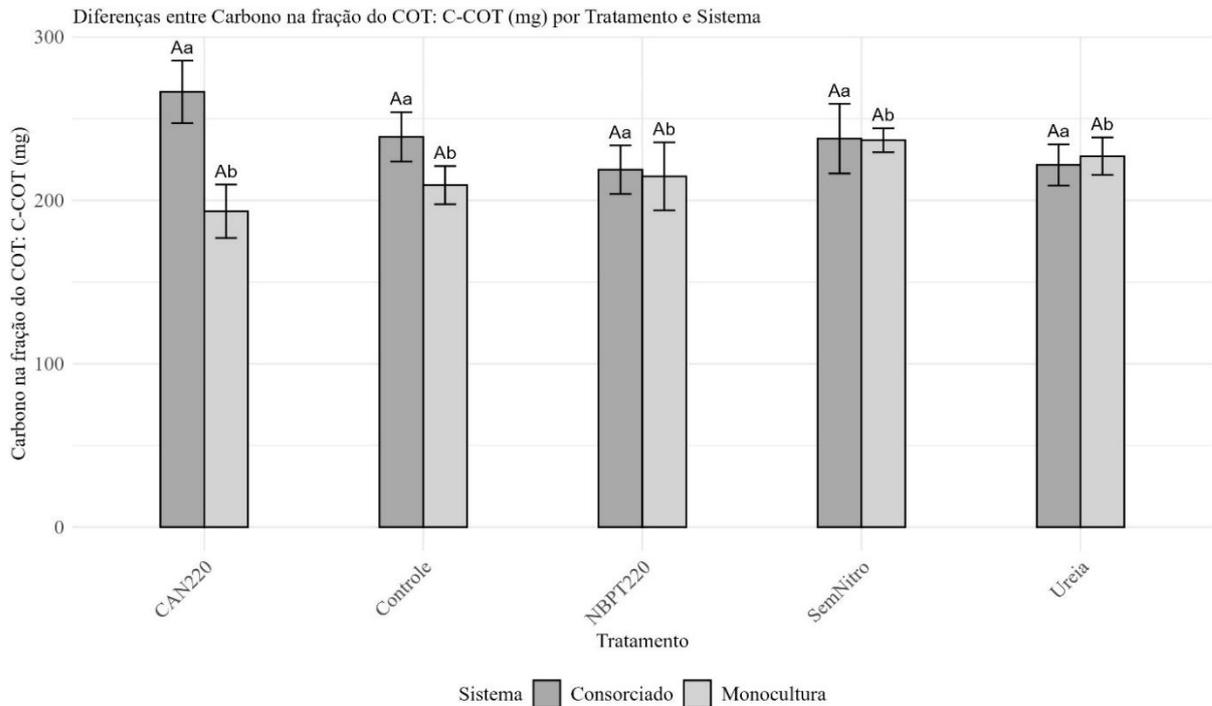


Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

4.6.2. Carbono Orgânico Total (COT) e Matéria Orgânica Leve (MOL)

Em geral, a análise do carbono orgânico total (COT) e da fração leve de matéria orgânica (MOL) indicou uma redução de carbono na camada superficial ao longo do experimento (Figura 14 e Figura 15).

Figura 14: Valores médios do Carbono na fração do COT no solo.

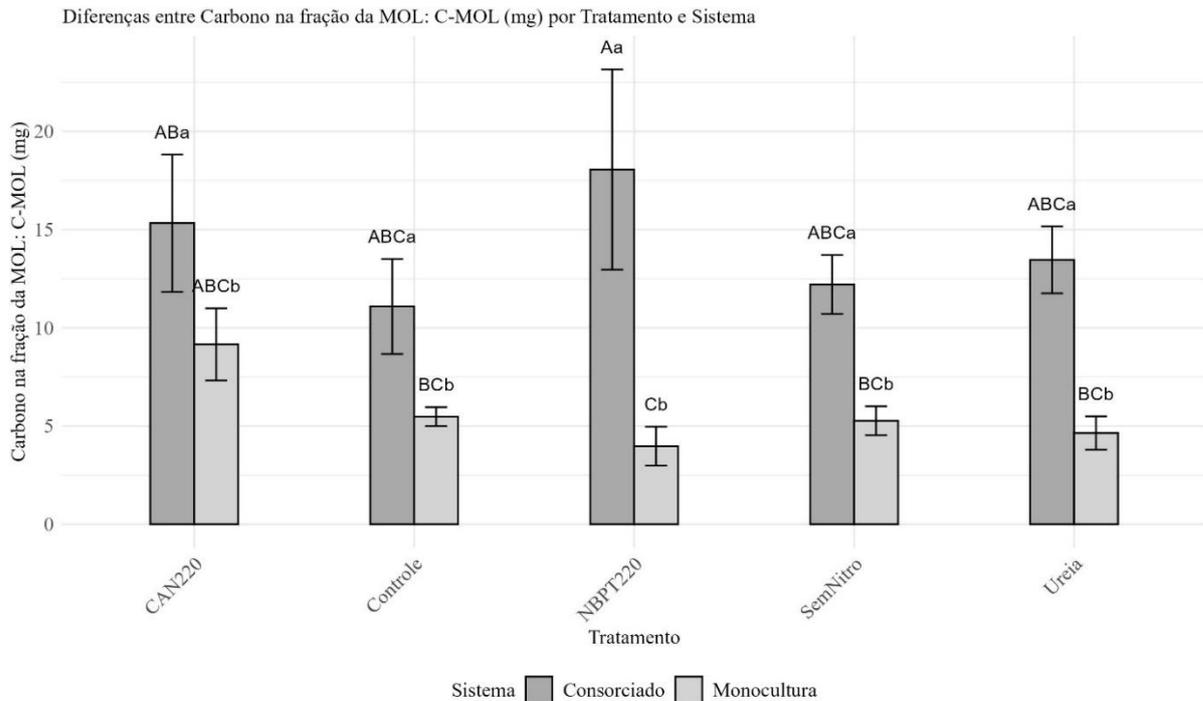


Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Isso pode ser explicado pela curta duração do estudo, uma vez que mudanças substanciais nos níveis de COT normalmente exigem períodos mais longos, como sugerido por Mendonça et al. (2001) e Barreto & Fernandes (2001). Em solos tropicais, onde o clima acelera a decomposição, práticas de manejo a longo prazo são fundamentais para aumentar o COT. Estudos em climas temperados, como o realizado por Haddix et al. (2020), mostraram aumentos significativos de carbono em sistemas com manejo adequado, destacando a importância de condições climáticas e tempo de implementação.

Embora as mudanças no COT tenham sido modestas, foram observadas diferenças significativas na fração de MOL entre tratamentos consorciados e monoculturas, com o sistema consorciado apresentando maiores concentrações de C-MOL, especialmente no tratamento NBPT220 (Figura 15).

Figura 15: Valores médios do Carbono na fração da MOL no solo (em mg).



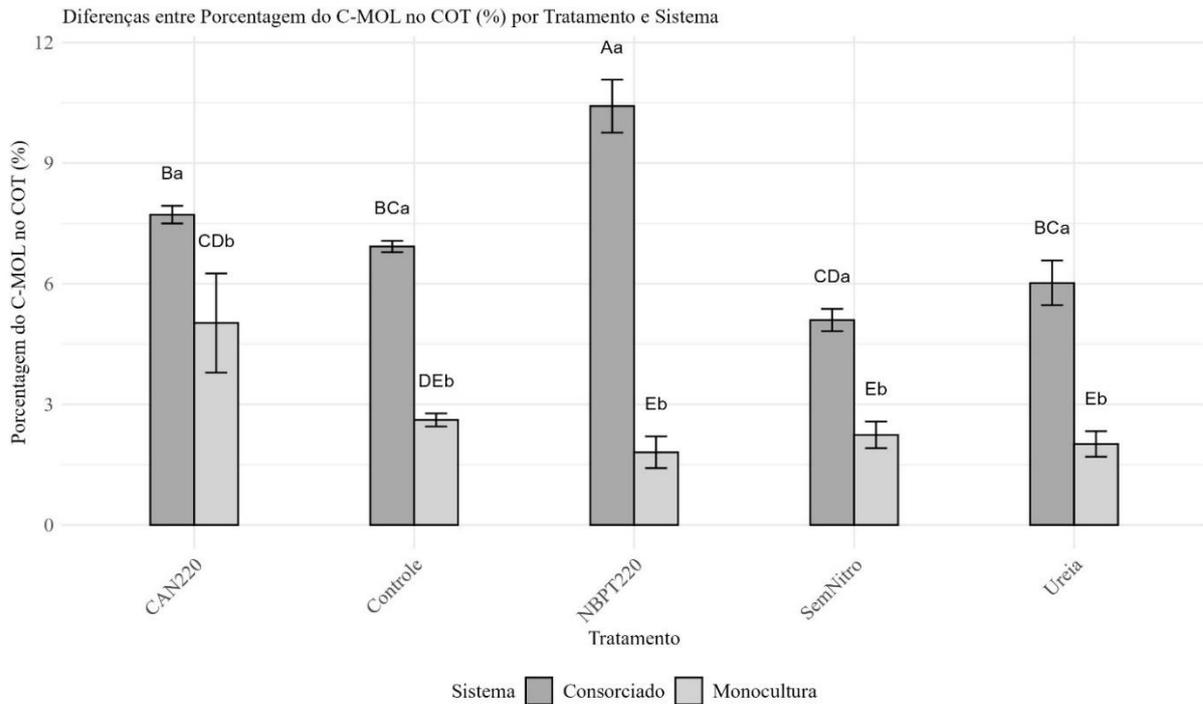
Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

O aumento de C-MOL no consórcio com braquiária sugere uma potencial melhoria na fertilidade e ciclagem de nutrientes, uma vez que a MOL é uma fração mais ativa e rapidamente disponível para os microrganismos e para a nutrição das plantas. Compton & Boone (2002) destacaram que a fração MOL é uma importante fonte de nutrientes, e o incremento dessa fração em sistemas consorciados indica um benefício a médio e longo prazo na qualidade do solo.

4.6.3. Relação entre C-MOL e COT

A proporção de C-MOL em relação ao COT é uma medida útil para avaliar a saúde e fertilidade do solo, uma vez que o C-MOL representa a fração mais lábil e de rápida decomposição. Em ambos os sistemas (consorciado e monocultura), os valores de C-MOL no COT foram relativamente baixos (Figura 16), indicando uma limitada oferta de nutrientes em curto prazo.

Figura 16: Porcentagem de C-MOL no COT por tratamento e por sistema.



Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Esse resultado pode ser influenciado pelo curto período experimental, uma vez que práticas de manejo como o consórcio podem levar anos para promover mudanças mais expressivas nas frações de carbono no solo. A literatura indica que uma proporção aceitável de C-MOL no COT em solos bem manejados varia entre 10% e 30%, dependendo do tipo de solo e do clima (Pereira et al., 2010; Valentine et al., 2022).

No entanto, o sistema consorciado com braquiária apresentou, em média, uma proporção de C-MOL no COT três vezes maior do que a monocultura, sugerindo um efeito positivo do consórcio na melhoria do teor de matéria orgânica leve. Esse aumento de C-MOL indica que o sistema consorciado está contribuindo para a sustentabilidade do solo, promovendo uma ciclagem mais eficiente de nutrientes e melhorando a qualidade estrutural do solo. Com o tempo, esses benefícios podem resultar em aumentos mais significativos no COT e na capacidade do solo de reter carbono, contribuindo para uma mitigação das emissões de CO_2 e para a conservação da fertilidade (Koven et al., 2017; Assunção et al., 2019).

Observou-se que o sistema consorciado com braquiária demonstrou maior potencial de armazenamento de carbono e maiores níveis de matéria orgânica leve (MOL) quando

comparado ao sistema de monocultura. Essa diferença é relevante para o manejo agrícola, uma vez que sistemas consorciados não apenas aumentam o carbono orgânico no solo, mas também contribuem para uma maior estabilidade estrutural e uma ciclagem de nutrientes mais eficiente. No entanto, o curto período de dois anos de experimento pode ter limitado a observação de aumentos mais significativos no COT, especialmente em solos tropicais, onde o carbono tende a ser rapidamente mineralizado devido às condições climáticas.

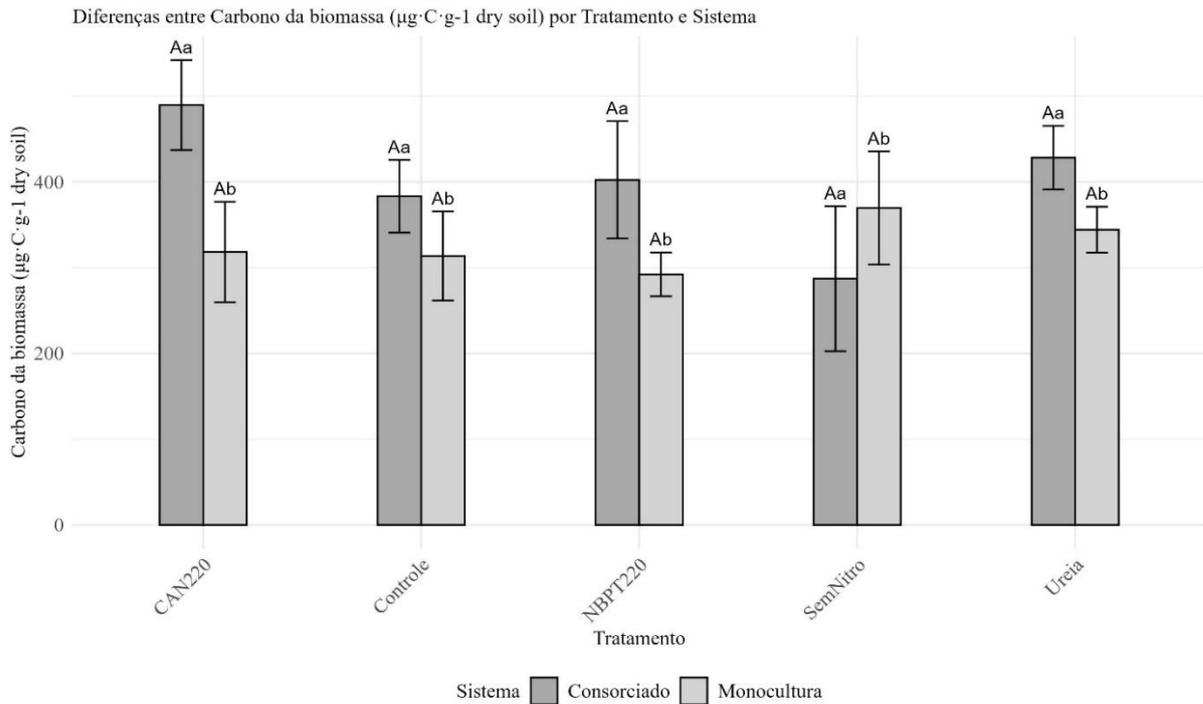
Os resultados destes indicadores sugerem que o manejo com braquiária em consórcio promove um acúmulo mais efetivo de carbono no solo e que essa prática deve ser incentivada para o aumento da sustentabilidade agrícola a longo prazo. Práticas agrícolas que aumentam o estoque de carbono no solo são essenciais para mitigar a emissão de gases de efeito estufa e melhorar a fertilidade do solo, especialmente em áreas agrícolas tropicais onde a perda de carbono é um desafio constante.

4.7. Atributos do carbono da biomassa do solo

A biomassa microbiana é uma fração lábil da matéria orgânica do solo, altamente sensível às mudanças nas práticas de manejo do solo (de Figueiredo et al., 2018). Ela é considerada a fração viva da matéria orgânica e desempenha um papel crucial em processos como decomposição, mineralização e ciclagem de nutrientes, além de servir como um reservatório facilmente disponível de nitrogênio, fósforo e energia (Moreira e Siqueira, 2013).

De maneira geral, os valores do carbono da biomassa foram mais elevados no sistema consorciado em comparação ao sistema de monocultura, exceto no tratamento SemNitro (Figura 17), pois a baixa quantidade de N disponível reduz a atividade da microbiota do solo.

Figura 17: Valores medios do carbono da biomassa no solo por tratamento e sistema.



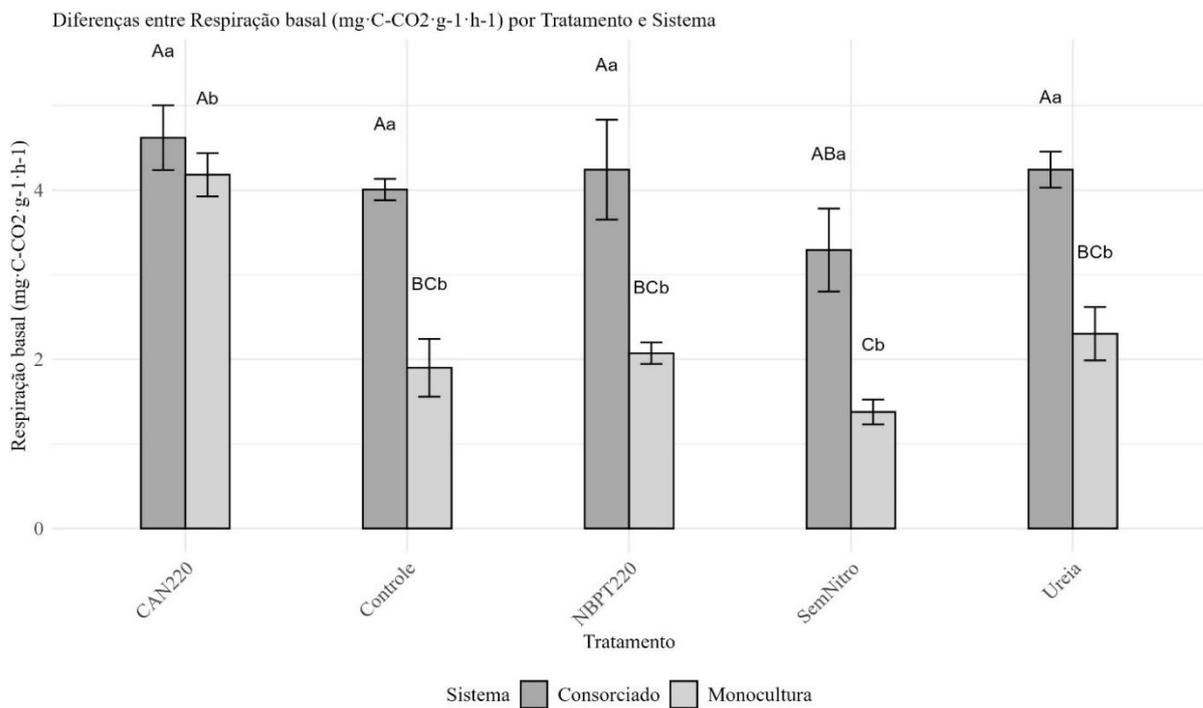
Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Dos Santos et al. (2021) encontraram, para o carbono da biomassa microbiana, no milho cultivado em associação com espécies do gênero *Urochloa* (*Marandu* e *Ruziziensis*), valores mais elevados do que no milho em monocultura, mas que não diferiam dos outros tratamentos. Isso está de acordo com os resultados do presente estudo. Esses resultados indicam que o sistema consorciado promove uma maior atividade microbiana, provavelmente devido a uma maior quantidade e diversidade de substrato orgânico fornecido pelas plantas de braquiária. O estudo de Figueiredo et al. (2018) sobre agroecossistemas do Cerrado brasileiro também encontraram diferenças significativas no teor de C da biomassa microbiana entre diferentes sistemas de uso do solo. No sistema de plantio direto com rotação de leguminosas e gramíneas, os valores médios de C da biomassa microbiana eram semelhantes aos encontrados neste estudo, girando em torno de $308 \mu\text{g}\cdot\text{C}\cdot\text{g}^{-1}$ de solo seco.

A respiração basal do solo é um processo chave na dinâmica de fonte/sumidouro de carbono (Chen e Joshua Leffler, 2024) e constitui também um meio principal de estimar a biomassa microbiana e a atividade metabólica nas amostras de solo (Breulmann et al., 2012).

O gráfico da figura 18 apresenta as diferenças na respiração basal do solo entre diferentes tratamentos e sistemas de manejo (consorciado e monocultivo) e os maiores valores de respiração foram registrados no tratamento CAN220 consorciado.

Figura 18: Valores medios da respiração da basal no solo por tratamento e sistema.



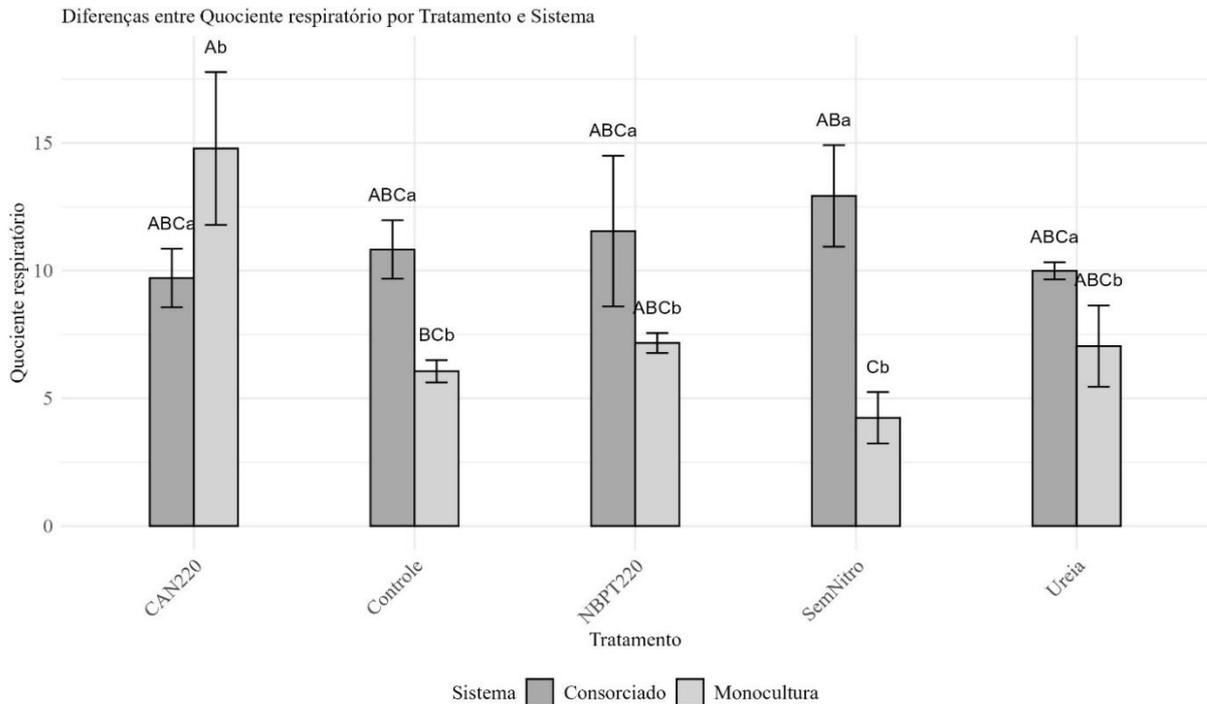
Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Observa-se que o tratamento sem nitrogênio (SemNitro) apresenta os valores mais baixos de respiração basal em ambos os sistemas. Isso pode ser explicado pela dependência da respiração microbiana na disponibilidade de nitrogênio, que é essencial para o metabolismo dos microrganismos do solo (Fierer et al., 2009; Srivastava et al., 2017).

Além disso, os valores mais elevados de respiração basal no sistema consorciado com braquiária indicam uma maior atividade microbiana, provavelmente devido à maior quantidade e qualidade do substrato orgânico fornecido por essa prática. A braquiária contribui para a adição de carbono orgânico ao solo, o que sustenta uma comunidade microbiana mais ativa (Ehrenfeld, 2003; Kirschbaum et al., 2013). A ausência de diferenças significativas entre os tratamentos dentro do sistema consorciado pode ser atribuída à composição estável das espécies

microbianas associadas à braquiária, que mantém a respiração do solo em níveis elevados (McLeod et al., 2021).

Figura 19: Valores médios de quociente metabólico microbiano (qCO_2) por tratamento e sistema.



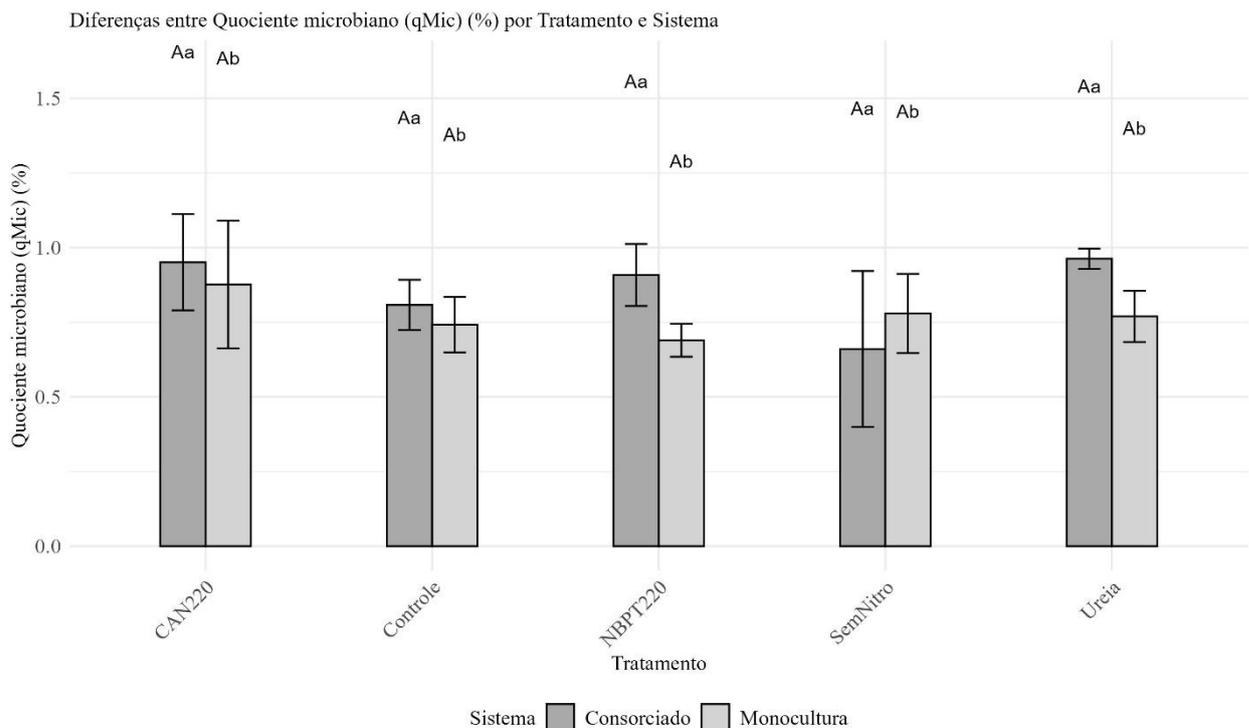
Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

O gráfico acima mostra diferenças significativas no quociente metabólico (qCO_2) entre os tratamentos e sistemas de manejo. O tratamento SemNitro no sistema consorciado apresentou o maior valor de qCO_2 , enquanto os menores valores foram observados nos outros tratamentos no sistema de monocultura. Estudos anteriores indicam que sistemas consorciados tendem a ter menores valores de qCO_2 devido a uma maior eficiência da biomassa microbiana em condições menos estressantes (Balota et al., 1998; Lima et al., 1994). No entanto, este efeito não foi observado neste estudo. A ausência de uma redução significativa no qCO_2 pode ser atribuída à recente implementação do sistema consorciado. Em condições edafoclimáticas do cerrado, é provável que o qCO_2 diminua com o tempo, à medida que a biomassa microbiana se adapta às novas condições do solo. O quociente metabólico é um indicador crucial para avaliar os efeitos das condições ambientais sobre a população microbiana do solo (Anderson e Domsch, 1993). Valores elevados de qCO_2 são geralmente encontrados em condições ambientais

estressantes, onde a biomassa microbiana utiliza mais carbono para manutenção. Segundo Gama-Rodrigues (1999), conforme a biomassa microbiana se torna mais eficiente, menos carbono é perdido como CO_2 pela respiração, com uma fração significativa sendo incorporada ao tecido microbiano. Dessa forma, solos com baixo qCO_2 estão mais próximos ao estado de equilíbrio. No entanto, é importante interpretar o quociente metabólico com cautela, pois apenas 15-30% da biomassa microbiana do solo é catabolicamente ativa (Mac Donald, 1986), enquanto a maioria dos microrganismos do solo permanece inativa ou latente (Moreira e Siqueira, 2003).

O cálculo do quociente microbiano considera o COT (carbono orgânico total) e a biomassa microbiana do solo, fornecendo uma medida integrada da eficiência microbiana. A razão entre o carbono da biomassa microbiana e o COT (qMic) geralmente compreende 2 a 4% do COT (Gama-Rodrigues, 1999) e, valores menores que estes indicam perdas de carbono do sistema. No presente estudo, a porcentagem de carbono na biomassa microbiana indicou perdas de carbono dos sistemas. As perdas observadas foram drásticas, pois, em todos os tratamentos e sistemas o carbono da biomassa microbiana não esteve em níveis satisfatórios (Figura 20).

Figura 20: Razão entre carbono da biomassa e COT por tratamento e sistema.

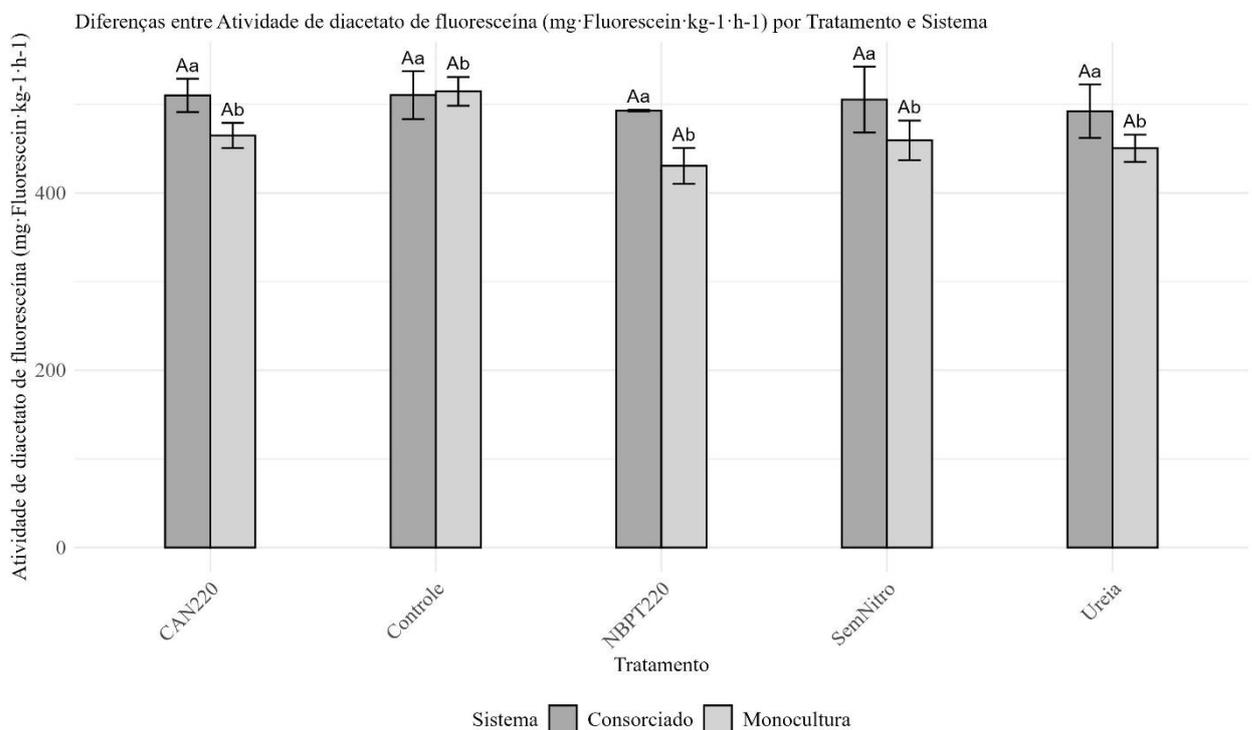


Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

No sistema consorciado, os tratamentos Ureia, CAN220 e NBPT220 mostraram as maiores porcentagens, 0,8 e 0,6%, respectivamente. Segundo Lisboa et al. (2012), maior q_{Mic} se relaciona ao acúmulo de carbono pelos microrganismos, em decorrência da maior disponibilidade de substrato. Assim, valores elevados de q_{Mic} permitem afirmar que o solo apresenta condições adequadas para o desenvolvimento microbiano, as quais dependem da adição de matéria orgânica de boa qualidade (Jakelaitis et al., 2008). Esses resultados sugerem que a adaptação dos microrganismos ao sistema consorciado pode levar a uma redução no q_{CO_2} ao longo do tempo, indicando uma melhoria na saúde do solo e na eficiência microbiana.

A figura 21 mostra as diferenças na hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) entre tratamentos dentro de sistemas de cultivo diferentes (ConSORCIADO e Monocultura).

Figura 21: Atividade da fluoresceína diacetato (FDA) entre tratamentos dentro de sistemas de cultivo diferentes.



Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Observa-se que, dentro de um mesmo sistema, não há diferenças estatisticamente significativas na atividade do FDA entre os diferentes tratamentos, como indicado pelas letras

semelhantes acima das barras. No entanto, quando comparamos entre os sistemas de cultivo, a atividade do FDA tende a ser maior no sistema consorciado em comparação com a monocultura. Isso sugere que no sistema de cultivo de silagem do milho consorciado tem uma maior atividade microbiana no solo. Isso está em concordância com os resultados de Santos et al. (2021), que não encontraram diferenças significativas entre tratamentos porém em sistemas consorciado com *Urochloa ruziziensis* as diferenças foram significativa.

A FDA é um substrato que é hidrolisado por várias enzimas (lipases, proteases e esterases) presentes em todos os seres vivos. Porém, no solo, devido a grande quantidade de microrganismos, as enzimas que degradam a FDA mais significativamente são de origem microbiana; indicando que valores mais elevados de FDA refletem uma maior atividade enzimática e, conseqüentemente, uma maior atividade microbiana. Para o potencial heterotrófico da microbiota do solo, representado pela atividade enzimática do FDA, os sistemas com gramíneas apresentaram valores mais elevados. Isso pode ser atribuído à maior produção de massa seca dessas plantas, proporcionando uma fonte significativa de carbono e favorecendo uma maior atividade enzimática nas culturas de cobertura. Esses resultados corroboram os achados de Santos et al. (2015), que relataram valores mais elevados de FDA para a braquiária. Eles também observaram que a maior atividade enzimática no FDA está relacionada não apenas aos resíduos acumulados e à maior massa seca, mas também à maior umidade do solo, que estimula a atividade microbiana. No presente estudo, a maior atividade enzimática no sistema de manejo com Braquiária pode ser atribuída à maior retenção de umidade do solo nesse sistema, que por sua vez, estimula os processos microbianos.

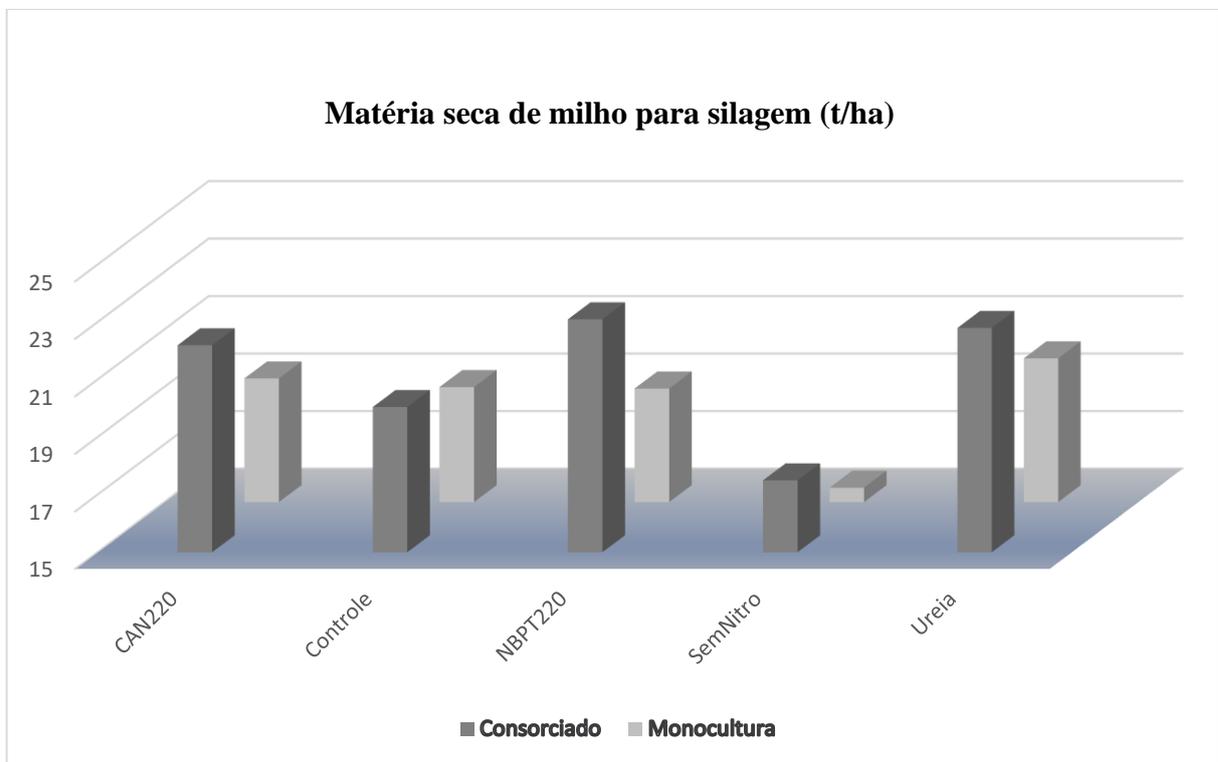
4.8. Produção do milho para silagem

As análises de variância revelaram que as fontes de fertilizantes nitrogenados e o sistema de manejo influenciaram significativamente os rendimentos de matéria seca do milho para silagem. Em 2023, embora nos tratamentos tenham recebido a mesma dose de nitrogênio (220 kg/ha), os diferentes tipos de fertilizantes (CAN220, NBPT220, Controle, SemNitro, e Ureia) impactaram os rendimentos de matéria seca de maneira significativa (Figura 22). Esses resultados destacam a importância do tipo de fertilizante na produção de biomassa.

Em 2023, os diferentes fertilizantes aplicados na mesma dose (220 kg/ha) apresentaram efeitos distintos nos rendimentos de matéria seca, com destaque para o CAN220, que obteve maiores rendimentos no sistema consorciado. Isso sugere que o nitrato de amônio cálcio (CAN) favorece o desenvolvimento vegetativo do milho em combinação com a cobertura de braquiária,

maximizando a produção de biomassa. Além disso, o tratamento SemNitro obteve os menores rendimentos de matéria seca entre todos os tratamentos, como esperado pela ausência de nitrogênio.

Figura 22: Matéria seca de milho (t/ha) por Tratamento e Sistema (2023).



Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

No ano de 2024, além dos fertilizantes, a interação entre os sistemas de manejo (consorciado e monocultura) e os tipos de fertilizantes nitrogenados mostrou-se significativa (Figura 23).

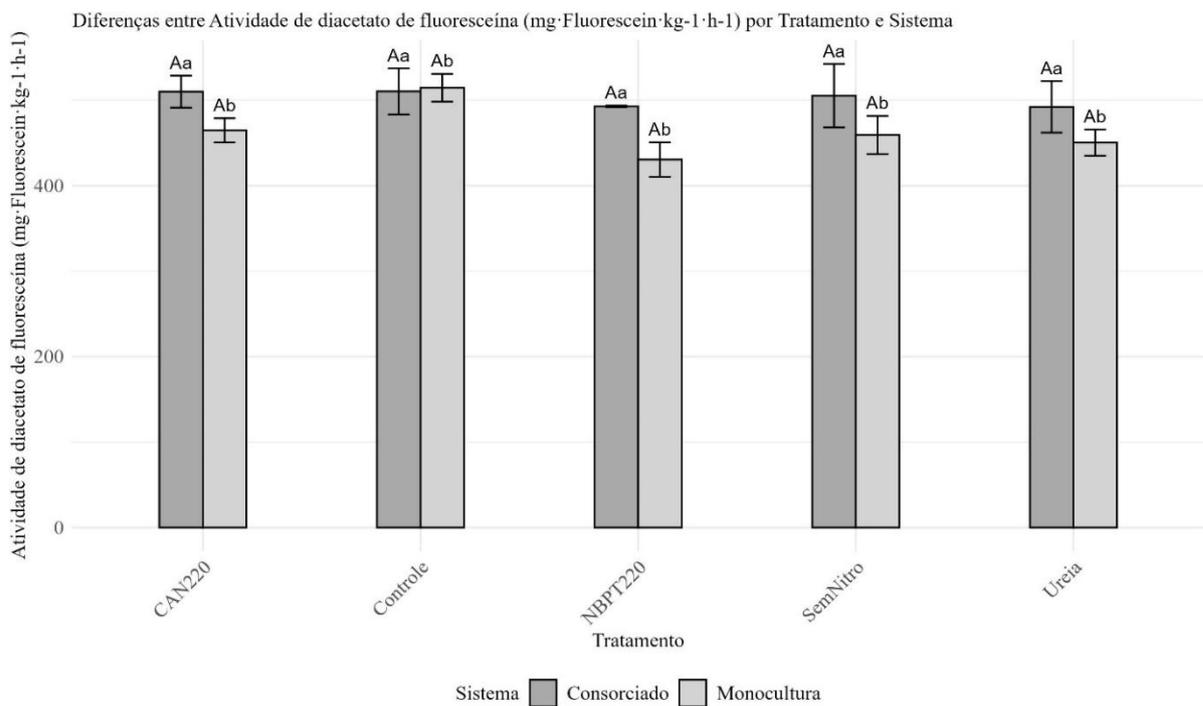
Tabela 2: Rendimentos de matéria seca (2024).

	Média (t/ha)	Desvio padrão (t/ha)	Valor de p
Tratamento	22,5	3,5	< 0,001 ***
Sistema	21,2	2,8	0,379
Tratamento X Sistema	-	-	0,006 **

Legenda: ***p < 0.001, **p < 0.01, *p < 0.05. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

Em comparação com 2023, os tratamentos Controle e SemNitro apresentaram aumentos de rendimento no sistema de monocultura, o que pode ser atribuído a variáveis ambientais, como mudanças nas condições de precipitação ou temperatura entre os anos. Essa variabilidade nos rendimentos interanuais, especialmente em tratamentos sem aplicação de nitrogênio direto, está em linha com os achados de Dhital e Raun (2016), que indicaram que as respostas ao nitrogênio em culturas como o milho podem variar de um ano para outro devido a fatores ambientais.

Figura 23: Matéria seca da silagem de milho (t/ha) por tratamento e sistema (2024).



Legenda: As barras verticais indicam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os sistemas de manejo, e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada sistema. Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

O sistema consorciado demonstrou uma maior estabilidade e resposta a determinados fertilizantes nitrogenados, evidenciando uma interação sinérgica entre a braquiária e o milho. A braquiária contribui para a melhoria da estrutura do solo, aumentando a retenção de umidade e a disponibilidade de nutrientes, o que potencializa a eficácia dos fertilizantes aplicados e o rendimento de matéria seca do milho (Greer e Pittelkow, 2018).

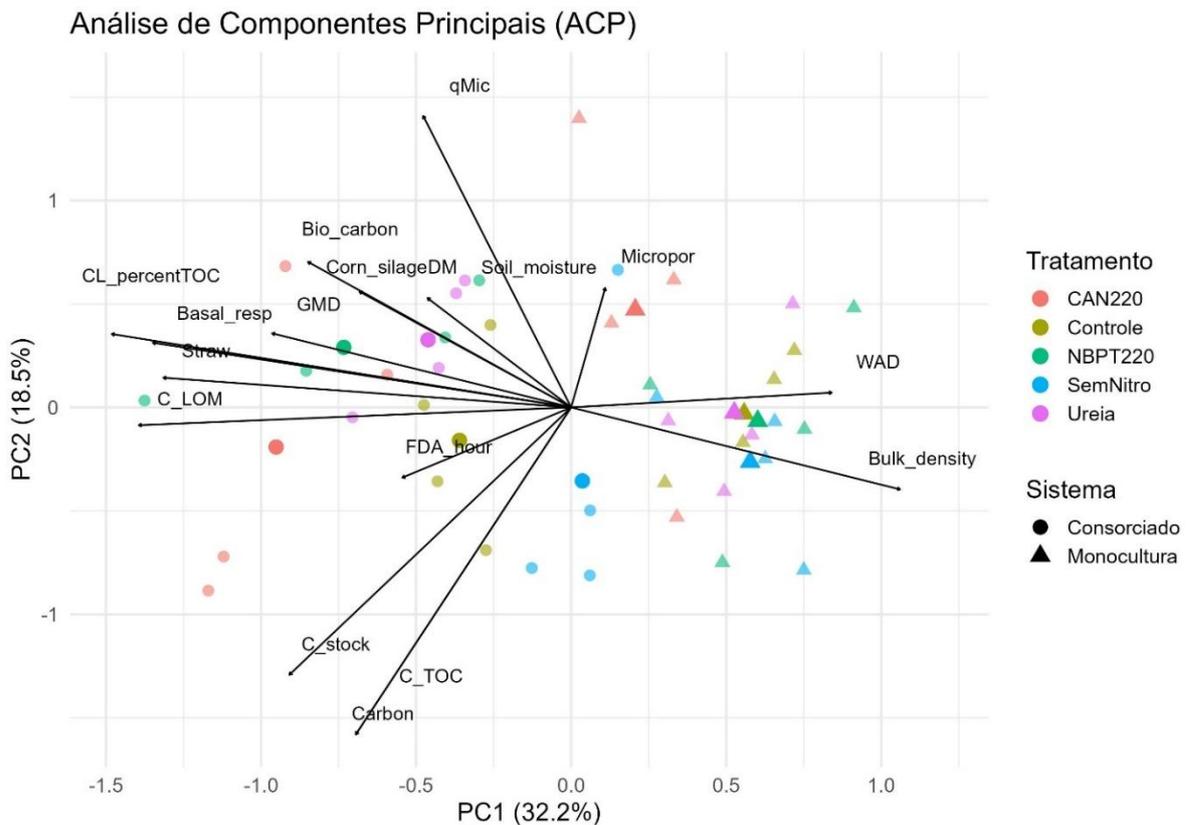
Os resultados indicam que o uso de fertilizantes nitrogenados, como CAN220 e NBPT220, combinados com o sistema consorciado, maximiza a produção de matéria seca de

milho para silagem. A aplicação de nitrogênio foi essencial para sustentar altos rendimentos, conforme demonstrado pelo baixo desempenho do tratamento SemNitro em comparação aos fertilizados. Além disso, a interação significativa entre o sistema de manejo e o tipo de fertilizante reforça a importância dos sistemas consorciados para otimizar o uso de fertilizantes e melhorar a sustentabilidade do sistema de produção.

4.9. Análise em componentes principais (ACP)

A análise de componentes principais (ACP) evidenciou a influência significativa dos sistemas de manejo e das diferentes fontes de fertilizantes nitrogenados, como CAN220, NBPT220 e Ureia, sobre a produção de biomassa de milho para silagem e sobre as propriedades do solo. As duas primeiras componentes principais, PC1 e PC2, explicaram 50,7% da variância total dos dados, sendo PC1 responsável por 32,2% e PC2 por 18,5% (Figura 24). Esse resultado indica que as variáveis analisadas estão interligadas e que os sistemas de manejo e os fertilizantes exercem um impacto importante sobre diversos parâmetros do solo e da produção.

Figura 24: Análise em componentes principais (ACP).



Identificação: carbono da biomassa (Bio_carbon); umidade atual do solo (Soil_moisture); respiração basal (Basal_resp); diâmetro médio ponderado (WAD); percentual de carbono da fração leve no carbono total (CL_percentTOC); densidade do solo (Bulk_density); biomassa microbiana (qMic); palha (Straw); matéria seca da silagem de milho (Corn_silageDM). Fonte: Altene Jean-Louis (2024).

A produção de matéria seca de milho (Corn_silageDM) apresentou uma correlação positiva com variáveis como a umidade do solo (Soil_moisture), o carbono da biomassa microbiana (Bio_carbon) e o tamanho geométrico dos agregados (GMD). Essa associação indica que condições de solo com maior retenção de umidade e com agregados maiores favorecem o desenvolvimento da cultura. Solos bem estruturados, que promovem uma boa retenção de água, criam um ambiente favorável para o crescimento radicular e para a absorção de nutrientes, resultando em maior produção de biomassa. A presença de carbono da biomassa microbiana reflete uma atividade biológica elevada, o que pode ser um indicativo de um solo mais saudável e com maior capacidade de ciclagem de nutrientes. A alta atividade microbiana também está associada a uma decomposição mais rápida da matéria orgânica, aumentando a disponibilidade de nutrientes essenciais, como o nitrogênio, que é crucial para a produção de milho para silagem.

A variável densidade aparente do solo (Bulk_density) mostrou uma relação inversa com a biomassa microbiana (qMic) e com as frações de carbono, como o carbono da fração leve (CL_percentTOC) e o carbono total (C_stock). Esse resultado sugere que solos compactados, caracterizados por uma densidade aparente elevada, dificultam a atividade microbiana e reduzem a qualidade do carbono orgânico. A compactação do solo limita o espaço poroso, reduzindo a infiltração de água e a circulação de ar, o que são condições desfavoráveis para a decomposição da matéria orgânica e a atividade microbiana. Solos menos compactados, por outro lado, apresentaram maior porosidade e condições mais favoráveis para a atividade biológica. Esse ambiente mais aerado e com maior infiltração de água facilita a ação dos microrganismos e melhora a ciclagem de nutrientes. A densidade do solo, portanto, é um fator crucial que afeta não apenas a disponibilidade de nutrientes, mas também a saúde e a qualidade do solo a longo prazo.

A ACP revelou interações complexas entre os diferentes tratamentos e sistemas de manejo. Os sistemas consorciados com braquiária mostraram uma associação com características de solo mais favoráveis, como a maior quantidade de palha (Straw) e o aumento do carbono leve (C_LOM). A presença da braquiária contribui para a formação de uma camada de resíduos orgânicos na superfície do solo, que, ao se decompor, libera nutrientes e aumenta o conteúdo de carbono do solo. Essa camada de resíduos também ajuda a manter a umidade do solo e a reduzir a compactação, criando condições mais favoráveis para o crescimento do milho. Os tratamentos com fertilizantes nitrogenados, especialmente CAN220 e NBPT220,

associaram-se positivamente com a biomassa microbiana (q_{Mic}) e o carbono da biomassa (Bio_carbon), sugerindo que esses fertilizantes promovem uma maior atividade biológica e aumentam a disponibilidade de carbono no solo. Fertilizantes de liberação controlada, como o NBPT220, permitem uma disponibilização gradual do nitrogênio, o que pode ser benéfico para a manutenção da atividade microbiana e para a ciclagem de nutrientes em sistemas consorciados.

Uma correlação positiva foi observada entre a respiração basal (Basal_resp), o percentual de carbono da fração leve no carbono total (CL_percentTOC) e a quantidade de palha (Straw). Esses resultados sugerem que a fração oxidável do carbono total, representada pela fração leve, está fortemente associada à atividade microbiana do solo. Em solos com maior quantidade de palha e carbono leve, a atividade dos microrganismos é estimulada, o que contribui para uma maior mineralização da matéria orgânica e, conseqüentemente, para a liberação de nutrientes essenciais para a cultura de milho.

A análise de componentes principais revelou que o uso de sistema consorciado com braquiária melhora a estrutura do solo e contribui para o aumento dos estoques de carbono no solo, promovendo condições favoráveis à produção sustentável de milho para silagem. Solos com maior presença de carbono, maior atividade biológica e menor densidade apresentam melhor retenção de água, maior porosidade e condições ideais para o desenvolvimento das raízes e para a absorção de nutrientes.

A implementação de práticas sustentáveis, como o consórcio de culturas, deve ser uma estratégia de longo prazo para a melhoria da qualidade do solo e da produtividade agrícola. A adoção de sistemas consorciados com braquiária é recomendada para melhorar a estrutura do solo, aumentar a atividade microbiana e promover uma ciclagem de nutrientes mais eficiente. Esses sistemas favorecem uma melhor infiltração de água, maior circulação de ar e aumentam a resistência do solo à compactação, o que contribui para a qualidade geral do solo e para a sustentabilidade do sistema agrícola.

Este estudo analisou o impacto de diferentes fontes de fertilizantes nitrogenados e sistemas de manejo (milho em monocultura e consorciado com braquiária) sobre indicadores de qualidade do solo e produtividade do milho para silagem em um Latossolo Vermelho-Amarelo do Cerrado Mineiro. Os resultados indicaram que o consórcio de milho com braquiária, aliado ao uso dos fertilizantes como CAN, NBPT e Ureia, promoveu melhorias significativas nas características estruturais, biológicas e químicas do solo, aumentando também o rendimento de matéria seca do milho.

O sistema consorciado com braquiária mostrou-se eficaz em aumentar a porosidade do solo e a capacidade de infiltração de água, criando condições favoráveis para a atividade microbiana e a decomposição da matéria orgânica. Esse aumento nos estoques de carbono, particularmente na fração leve de matéria orgânica (MOL), é promissor para o sequestro de carbono, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis no Cerrado. Esses resultados reforçam a relevância do consórcio com braquiária na resiliência e sustentabilidade do solo.

No que diz respeito à adubação nitrogenada, as diferentes fontes de nitrogênio apresentaram efeitos específicos:

- ✓ CAN foi especialmente eficaz no sistema consorciado, promovendo a estabilidade dos agregados do solo e aumentando a retenção de umidade, o que melhora a eficiência do uso de nutrientes pela cultura.
- ✓ NBPT beneficiou tanto a monocultura quanto o sistema consorciado, estimulando uma robusta atividade microbiana e mantendo o carbono na biomassa, o que sugere efeitos positivos para a qualidade do solo a longo prazo.
- ✓ Ureia mostrou-se eficiente em termos de produtividade, mas sua atuação em condições de solo compactado poderia ser investigada em estudos futuros, explorando ajustes na aplicação para maximizar o desempenho.

V. CONCLUSÃO

A integração de sistemas consorciados com braquiária e o uso estratégico de fertilizantes como CAN220 e NBPT220 mostraram-se alternativas viáveis e sustentáveis para a produção de milho para silagem no Cerrado. Estes sistemas não apenas aumentaram a produtividade, como também promoveram a resiliência do solo e a sustentabilidade a longo prazo. Incentiva-se a adoção de práticas integradas, incluindo diversificação de culturas e uso combinado de fertilizantes com adubos orgânicos, como solução para enfrentar os desafios da degradação do

solo e das mudanças climáticas, promovendo uma agricultura mais produtiva e ambientalmente equilibrada no Cerrado.

a) Recomendações práticas

Com base nos dados observados, sugere-se:

1. Uso de CAN em sistemas consorciados: a aplicação de CAN no consórcio com braquiária mostrou-se vantajosa para melhorar a estrutura do solo e aumentar os estoques de carbono, sendo uma prática recomendada para otimizar a resiliência e a qualidade do solo no Cerrado.
2. Integração de NBPT: o uso de NBPT pode ser incorporado em sistemas consorciados para potencializar a atividade microbiana e promover o sequestro de carbono, beneficiando a saúde do solo em longo prazo.
3. Aprimoramento na aplicação de Ureia: futuros estudos poderiam explorar o ajuste de doses ou métodos de aplicação de ureia para condições de solo com alta compactação ou baixa retenção de umidade, visando melhorar ainda mais a eficiência de sua utilização.

b) Limitações e perspectivas futuras

Apesar dos resultados promissores, o estudo foi limitado pela duração de dois anos, o que pode ter limitado a observação de mudanças a longo prazo. Recomenda-se, para o fortalecimento da aplicabilidade dos achados:

- ✓ Estudos de longa duração e em diferentes regiões: a realização de experimentos com períodos de estudo prolongados é importante para validar as práticas recomendadas em contextos agroecológicos variados e avaliar sua viabilidade econômica;
- ✓ Aplicação de modelos estatísticos avançados: a adoção de métodos analíticos que capturem a variabilidade espacial e temporal dos indicadores de qualidade do solo contribuirá para a construção de uma base sólida, permitindo uma implementação prática e eficiente das recomendações.

REFERÊNCIAS

- ABHILASH, P. C. et al. **Soil amendments for environmental sustainability: policy recommendations and future prospects**. In: **Soil amendments for sustainability**. CRC Press, 2018. p. 115-122.
- ABRAHÃO, G. M.; COSTA, M. H. **Evolution of rain and photoperiod limitations on the soybean growing season in Brazil: the rise (and possible fall) of double-cropping systems**. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 256-257, p. 32-45, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.031>
- ALMEIDA, B. G. **Densidade do solo**. In: TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- ALMEIDA, D. S.; ROSOLEM, C. A. **Ruzigrass grown in rotation with soybean increases soil labile phosphorus**. *Agronomy Journal*, v. 108, p. 2444-2452, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0478>
- ALMEIDA, R. E. M. *et al.* **Palisadegrass effects on N fertilizer dynamic in intercropping systems with corn**. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 89, p. 1917-1923, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160811>
- ANDERSON, J. P.; DOMSCH, K. H. **A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils**. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 10, n. 3, p. 215-221, 1978. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)
- AVANZI, J. C. *et al.* **Aggregate stability in soils cultivated with eucalyptus**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, p. 89-96, 2011.
- AWADELKAREEM, W. *et al.* **Nitrogen interactions cause soil degradation in greenhouses: their relationship to soil preservation in China**. *Horticulturae*, v. 9, n. 3, p. 340, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030340>
- BAPTISTELLA, J. L. C. *et al.* **Urochloa in tropical agroecosystems**. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 4, p. 119, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>
- BATISTA, I. *et al.* **Teores e estoque de carbono em frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo sob integração lavoura-pecuária no bioma Cerrado**. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 34, n. 1, p. 3377-3388, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6Supl1p3377>
- Beef Report 2022**. Disponível em: <https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2023-capitulo-01/>. Acesso em: 13 de agosto 2024.
- BENARD, P. *et al.* **Microhydrological niches in soils: how mucilage and EPS alter the biophysical properties of the rhizosphere and other biological hotspots**. *Vadose Zone Journal*, v. 18, p. 1-10, 2019.
- BERTI, M. T.; LUKASCHEWSKY, J.; SAMARAPPULI, D. P. **Intercropping alfalfa into silage maize can be more profitable than maize silage followed by spring-seeded alfalfa**. *Agronomy*, v. 11, n. 6, p. 1196, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11061196>.

- BESSEN, M. R. *et al.* **Cover cropping associated with no-tillage system promotes soil carbon sequestration and increases crop yield in Southern Brazil.** *Soil and Tillage Research*, v. 242, p. 106162, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106162>.
- BHATLA, S. C. *et al.* **Plant mineral nutrition.** *Plant Physiology, Development and Metabolism*, p. 37-81, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_2.
- BHATTACHARJEE, S. *et al.* **How did research on conservation agriculture evolve over the years? A bibliometric analysis.** *Sustainability*, v. 15, n. 3, p. 2040, 2023.
- BIELUCZYK, W. *et al.* **Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil.** *Geoderma*, v. 371, p. 114368, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>.
- BLANCO-CANQUI, H.; SCHLEGEL, A. J. **Implications of inorganic fertilization of irrigated corn on soil properties: lessons learned after 50 years.** *Journal of Environmental Quality*, v. 42, n. 3, p. 861-871, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0451>.
- BODDEY, R. M.; RAO, I. M.; THOMAS, R. J. **Nutrient cycling and environmental impact of Braquiária pastures.** In: MILES, J. W.; MAASS, B. L.; VALLE, C. B. do (Eds.). **Braquiária: biology, agronomy, and improvement.** Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 1996, p. 72-86.
- BORGHI, E. *et al.* **Sorghum grain yield, forage biomass production and revenue as affected by intercropping time.** *European Journal of Agronomy*, v. 51, p. 130–139, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.006>.
- BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils.** New York: John Wiley and Sons, 1964.
- BRIEDIS, C. *et al.* **How does no-till deliver carbon stabilization and saturation in highly weathered soils?** *Catena*, v. 163, p. 13-23, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.003>.
- BÜNEMANN, E. K. *et al.* **Soil quality: a critical review.** *Soil Biology and Biochemistry*, v. 120, p. 105–125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.
- BYRNES, R. C. *et al.* **Biological nitrification inhibition by Braquiária grasses mitigates soil nitrous oxide emissions from bovine urine patches.** *Soil Biology and Biochemistry*, v. 107, p. 156–163, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.029>.
- CAMPBELL, D. J. **Determination and use of soil bulk density in relation to soil compaction.** In: **Developments in Agricultural Engineering.** Elsevier, 1994, p. 113-139. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50014-3>.
- CAMPOS, B. *et al.* **Estabilidade estrutural de um Latossolo vermelho-escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 19, p. 121-126, 1995.
- CANTARELLA, H. *et al.* **Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets.** *Scientia Agrícola*, v. 65, p. 397-401, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000400011>.

CARDOSO, I. S. **Consórcio entre milho e soja; efeito da adubação arranjo de plantas e cultivares de soja na produção agrônômica e qualidade de silagem**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano), Campus Rio Verde, Rio Verde-GO.

CARDUCCI, C. E. *et al.* **Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop**. Engenharia Agrícola, v. 33, p. 291-302, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000200008>.

CARNEIRO, M. A. C. *et al.* **Attributes quality indicators in cerrado soils surrounding the Parque Nacional Das Emas, State of Goiás, Brazil**. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5555/20143064854>.

CARVALHO, J. L. N. *et al.* **Crop-pasture rotation: a strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado**. Agricultural and Ecosystem Environment, v. 183, p. 167–175, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.014>.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. **Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP)**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, p. 695-703, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400014>.

CARVALHO, P. C. F. *et al.* **Importância da estrutura da pastagem na ingestão e seleção de dietas pelo animal em pastejo**. A produção animal na visão dos brasileiros, p. 853-871, 2001.

CARVALHO, R. M. **Avaliação da silagem de milho em fazendas leiteiras de Patos de Minas, MG**. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinárias) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2016.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. **Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation**. Geoderma, v. 195, p. 234-242, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.006>.

CEPEA/ESALQ. **Centro de estudos avançados em economia aplicada da escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”**. PIB do agronegócio Brasileiro, 2016.

CHEN, Z.; LEFFLER, A. J. **Soil basal respiration and nitrogen mineralization from C3 and C4 grass dominated plant communities respond differently to temperature and soil water variation**. Journal of Arid Environments, v. 224, p. 105235, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105235>.

CHEN, D. *et al.* **Soil quality and microbiology in response to fertilizations in a paddy-upland rotation with multiple crops and frequent tillage**. Experimental Agriculture, v. 56, n. 2, p. 227-238, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0014479719000322>.

CHERR, C. M.; SCHOLBERG, J. M. S.; MCSORLEY, R. **Green manure approaches to crop production: a synthesis**. Agronomy Journal, v. 98, p. 302–319, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0035>.

CHRISTENSEN, A. A. *et al.* **Pursuing implementation solutions for targeted nitrogen management in agriculture – a novel approach to synthesize knowledge and facilitate sustainable decision making based on collaborative landscape modelling**. Journal of

Environmental Management, v. 246, p. 679-686, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.107>.

CORBEL, S. *et al.* **Effects of repeated soil irrigation with liquid biological paper sludge on poplar *Populus alba* saplings: potential risks and benefits.** Environmental Science and Pollution Research, v. 23, p. 21584-21593, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7383-9>.

COSKUN, D. *et al.* **Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition.** Nature Plants, v. 3, n. 6, p. 1-10, 2017.

COSTA, C. M. **Aspectos agronômicos e qualidade de silagens mistas oriundas dos consórcios de milho e crotalárias.** Dissertação (Mestrado em Zootecnia) — Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), Dourados, MS, 2019. Acesso em: 12 jun. 2021.

CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; MATEUS, G. P.; PARIZ, C. M.; MARTINS, P. O.; BORGHI, E. **Intercropping soybean and palisade grass for enhanced land use efficiency and revenue in a no-till system.** European Journal of Agronomy, v. 58, p. 53

CRUSCIOL, C. A. *et al.* **Nitrogen-fertilized systems of maize intercropped with tropical grasses for enhanced yields and estimated land use and meat production.** Frontiers in Sustainable Food Systems, v. 4, p. 544853, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.544853>.

CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* **Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisadegrass cover crops.** Agronomy Journal, v. 107, p. 2271–2280, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj14.0603>.

DA SILVA FARIAS, P. G. *et al.* **Physical fractions of organic matter and mineralizable soil carbon as quality indicators in areas under different forms of use in the Cerrado-Pantanal Ecotone.** Environmental Monitoring and Assessment, v. 194, n. 7, p. 517, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10163-z>.

DA SILVA, L. I. *et al.* **Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob diferentes manejos e métodos.** 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/rdg.v40i0.162486>.

DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of Soil Science Part 4 Physical Methods.** Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Inc., 2002.

DE CARVALHO, A. M. *et al.* **Nitrous oxide emissions from a long-term integrated crop–livestock system with two levels of P and K fertilization.** Land, v. 11, n. 9, p. 1535, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land11091535>.

DE CARVALHO, A. M. *et al.* **Understanding the Relations between Soil Biochemical Properties and N₂O Emissions in a Long-Term Integrated Crop–Livestock System.** Plants, v. 13, n. 3, p. 365, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13030365>.

DE CARVALHO, A. M. *et al.* **Chemical composition of cover crops and soil organic matter pools in no-tillage systems in the Cerrado.** Soil Use and Management, v. 38, n. 1, p. 940-952, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/sum.12746>.

- DE FIGUEIREDO, C. C. *et al.* **Relationships between soil organic matter pools and nitrous oxide emissions of agroecosystems in the Brazilian Cerrado.** *Science of the Total Environment*, v. 618, p. 1572-1582, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.333>.
- DE FREITAS, I. C. *et al.* **Agrosilvopastoral systems and well-managed pastures increase soil carbon stocks in the Brazilian Cerrado.** *Rangeland Ecology & Management*, v. 73, n. 6, p. 776-785, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.08.001>.
- DE JONG VAN LIER, Q.; WENDROTH, O. **Reexamination of the field capacity concept in a Brazilian Oxisol.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 80, n. 2, p. 264-274, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.01.0035>.
- DE SÁ, M. A. C.; DE LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N. **Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 9, p. 1825-1834, 2000.
- DE SOUZA, M.; BARCELOS, J. P. D. Q.; ROSOLEM, C. A. **Synergistic Effects of Subsoil Calcium in Conjunction with Nitrogen on the Root Growth and Yields of Maize and Soybeans in a Tropical Cropping System.** *Agronomy*, v. 13, n. 6, p. 1547, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13061547>.
- DESSART, F. J.; BARREIRO-HURLÉ, J.; VAN BAVEL, R. **Behavioural factors affecting the adoption of sustainable farming practices: a policy-oriented review.** *European Review of Agricultural Economics*, v. 46, n. 3, p. 417-471, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/erae/jbz019>.
- DHITAL, S.; RAUN, W. R. **Variability in optimum nitrogen rates for maize.** *Agronomy Journal*, v. 108, n. 6, p. 2165-2173, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2016.03.0139>.
- DIAS, P. M. S. *et al.* **Soil Attributes and Their Interrelationships with Resistance to Root Penetration and Water Infiltration in Areas with Different Land Uses in the Apodi Plateau, Semiarid Region of Brazil.** *Agriculture*, v. 13, n. 10, p. 1921, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture13101921>.
- DIAS-FILHO, M. B. **Uso de Pastagens para a Produção de Bovinos de Corte no Brasil: Passado, Presente e Futuro.** Brasília: Embrapa, 2016.
- DOS SANTOS NASCIMENTO, G. *et al.* **Soil physico-chemical properties, biomass production, and root density in a green manure farming system from tropical ecosystem, North-eastern Brazil.** *Journal of Soils and Sediments*, v. 21, p. 2203-2211, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02924-z>.
- DOS SANTOS, S. F. D. C. B. *et al.* **Soil microbiological attributes and soybean grain yield in succession to corn intercropped with forage in the Maranhão eastern Cerrado.** *International Journal of Plant Production*, v. 15, n. 4, p. 669-677, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00167-z>.
- DUMANSKI, J. *et al.* **The paradigm of conservation agriculture.** *Proceedings of World Association of Soil and Water Conservation*, v. 1, p. 58-64, 2006.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T.; GUIMARÃES, M. D. F. **Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagens no cerrado.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 1009-1016, 2008.

EHRENFELD, J. G. **Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes.** Ecosystems, v. 6, p. 503–523, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0151-3>.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2. ed. rev. atual., 1997.

EMBRAPA SIRE.; ARAGÃO, A.; CONTINI, E. **O agro no Brasil e no Mundo: uma síntese do período de 2000 a 2020.** 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Manual de Métodos de Análise de Solo.** 2. ed. rev. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Manual de métodos de análise de solo.** Capítulo 8 - Densidade de partículas, p. 76–81, 2017.

FERREIRA FILHO, M. W. **Proteção da Propriedade e seu Papel no Sucesso do Agronegócio no Brasil.** 2024. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/8165>.

FERREIRA, D. F.; CARGNELUTTI FILHO, A.; LÚCIO, A. D. **Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrição na casualização.** Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, p. 9–9, 2012.

FERREIRA, M. M. **Caracterização Física do Solo.** In: LIER, Q. J. V. (Ed.). Física do solo. Viçosa: EdSBCS, p. 1 - 28, 2010.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURTI, N. **Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 23, p. 515-524, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300004>.

FIERER, N.; GRANDY, A. S.; SIX, J.; PAUL, E. A. **Searching for unifying principles in soil ecology.** Soil Biol. Biochem., v. 41, n. 11, p. 2249–2256, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.06.009>.

FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; TOSTES, R. **Physical properties and organic matter in a Red Latosol under management systems and native cerrado.** 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.5555/20093297101>.

FLINT, L. E.; FLINT, A. L. **Porosity.** In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc., 2002. Disponível em: <https://doi.10.2136/sssabookser5.4>.

FOLEY, J. A. *et al.* **Global consequences of land use.** Science, v. 309, p. 570–574, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1111772>.

FREIRE, O. **Solos das regiões tropicais.** Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2006. 271 p.

- GHOSH, S.; WILSON, B.; GHOSHAL, S.; SENAPATI, N.; MANDAL, B. **Organic amendments influence soil quality and carbon sequestration in the Indo-Gangetic plains of India.** *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.05.009>.
- GIL, J.; SIEBOLD, M.; BERGER, T. **Adoption and development of integrated crop-livestock-forestry systems in Mato Grosso, Brazil.** *Agric. Ecosyst. Environ.*, v. 199, p. 394–406, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.008>.
- GIRI, A.; NARASU, M. L. **Transgenic hairy roots: recent trends and applications.** *Biotechnology Advances*, v. 18, n. 1, p. 1-22, 2020.
- GLEIXNER, G.; POIRIER, N.; BOL, R.; BALESSENT, J. **Molecular dynamics of organic matter in a cultivated soil.** *Organic Geochemistry*, v. 33, n. 3, p. 357-366, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(01\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(01)00166-8).
- GOEDERT, W. J. **Management of the Cerrado soils of Brazil: a review.** *Journal of Soil Science*, v. 34, p. 405-428, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1983.tb01045.x>.
- GOEDERT, W. J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C. **Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 2, p. 223-227, 2012.
- GOMEZ-PACCARD, C. *et al.* **Ca-amendment and tillage: medium term synergies for improving key soil properties of acid soils.** *Soil and Tillage Research*, v. 134, p. 195-206, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.08.009>.
- GONÇALVES, F. C.; MORAES, M. H. **Porosity and water infiltration under different management systems.** 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5555/20123329447>.
- GREER, K. D.; PITTELKOW, C. M. **Linking nitrogen losses with crop productivity in maize agroecosystems.** *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 2, p. 29, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00029>.
- GUÉRIF, J. **Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques.** In: *La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur.* Les Colloques INRA, n. 53, p. 71-90, 2020.
- GUGGENBERGER, G.; ZECH, W.; HAUMAIER, L.; CHRISTENSEN, B. T. **Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soils: II. CPMAS and solution ^{13}C NMR analysis.** *European Journal of Soil Science*, v. 46, n. 1, p. 147-158, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1995.tb01821.x>.
- GUILLAUME, T.; DAMRIS, M.; KUZYAKOV, Y. **Losses of soil carbon by converting tropical forest to plantations: erosion and decomposition estimated by $\delta^{13}\text{C}$.** *Global Change Biology*, v. 21, p. 3548–3560, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.12907>.
- GUO, H. *et al.* **Controls of organic matter bioreactivity on arsenic mobility in shallow aquifers of the Hetao Basin, PR China.** *Journal of Hydrology*, v. 571, p. 448-459, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.076>.

- GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. **Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis.** *Global Change Biology*, v. 8, n. 4, p. 345-360, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>.
- GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. **Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction.** In: *Advances in Soil Science*. New York, NY: Springer New York, p. 65-100, 1987.
- HAGHVERDI, K.; KOOCH, Y. **Effects of diversity of tree species on nutrient cycling and soil-related processes.** *Catena*, v. 178, p. 335–344, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.041>.
- HOBBS, P. R.; SAYRE, K.; GUPTA, R. **The role of conservation agriculture in sustainable agriculture.** *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 363, p. 543–555, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>.
- HOPKINS, D. W.; ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry.** *Journal of Applied Ecology*, v. 33, n. 1, p. 178, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2405027>.
- HORROCKS, C. A. *et al.* **Smart forage selection could significantly improve soil health in the tropics.** *Science of the Total Environment*, v. 688, p. 609–621, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.152>.
- IBGE. **Produção de leite no período de 01.01 a 31.12, segundo as Unidades da Federação, Mesorregiões, Microrregiões e Municípios produtores.** 2016.
- IFASTAT. **Consumption and Production of Fertilizer.** 2022. Disponível em: <https://www.ifastat.org/databases/plantnutrition>. Acesso em: 13 mar. 2024.
- IMHOFF, S. *et al.* **Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 25, p. 11-18, 2001.
- ISHIKAWA, T. *et al.* **Suppression of nitrification and nitrous oxide emission by the tropical grass *Braquiária humidicola*.** *Plant Soil*, v. 255, p. 413–419, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1026156924755>.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. **Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon.** *Biology and Fertility of Soils*, v. 27, p. 408-416, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s003740050451>.
- JANEGITZ, M. C.; INOUE, B. S.; ROSOLEM, C. A. **Formas de fósforo no solo após o cultivo de braquiária e tremoço branco.** *Ciência Rural*, v. 43, p. 1381–1386, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000800007>.
- JARVIE, D. M. **Total organic carbon (TOC) analysis: Chapter 11: Geochemical methods and exploration.** 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1306/TrHbk543C11>.
- JORGE CARLOS SOUZA JUNIOR, F.; CASTRO ASSUNÇÃO, M.; SANTOS DA SILVA, T. **Avanços da pesquisa e inovação em sistemas agrícolas: conjunturas da ciências agrárias.** 2023. Disponível em: <http://www.editoracientifica.com.br/books/isbn/978-65-5360-483-4>.

- KARNPANIT, W. *et al.* **Cultivation practice on nitrate, lead and cadmium contents of vegetables and potential health risks in children.** International Journal of Vegetable Science, v. 25, n. 6, p. 514-528, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1541952>.
- KER, J. C. **Latossolos do Brasil: uma revisão.** Geonomos, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v5i1.187>.
- KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia; relação solo-planta.** São Paulo: Ceres, 1979. 263 p.
- KIRSCHBAUM, M. U. **Seasonal variations in the availability of labile substrate confound the temperature dependence of organic matter decomposition.** Soil Biol. Biochem., v. 57, p. 568–576, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.012>.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. **Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, p. 857-867, 2002.
- KLEIN, V. A. **Física do solo.** Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2012.
- KLUTE, A. **Water Retention: Laboratory Methods.** In Methods of Soil Analysis, A. Klute (Ed.). Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>.
- KÖGEL-KNABNER, I. **The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter: Fourteen years on.** Soil Biology and Biochemistry, v. 105, p. A3-A8, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.08.011>.
- KUZNETSOVA, A.; BROCKHOFF, P. B.; CHRISTENSEN, R. H. B. **lmerTest: tests for random and fixed effects for linear mixed effect models (lmer objects of lme4 package).** R package version 2.0-6, 2014.
- LAL, R. **Soil erosion research methods.** CRC Press, 1994.
- LAUDICINA, V. *et al.* **Long-term tillage and cropping system effects on chemical and biochemical characteristics of soil organic matter in a Mediterranean semiarid environment.** Land Degradation & Development, v. 26, n. 1, p. 45-53, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ldr.2293>.
- LEAL, T. A. B.; DUARTE, S. L. **Reflexos da pandemia da Covid-19 na gestão do agronegócio: desafios e oportunidades.** Revista Mineira de Contabilidade, v. 24, n. 1, p. 4-6, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.51320/rmc.v24i1.1506>.
- LEHMANN, J. *et al.* **The concept and future prospects of soil health.** Nat. Rev. Earth Environ., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>.
- LENTH, R. V. **Least-squares means: The R package lsmeans.** J Stat Softw., v. 69, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.18637/jss.v069.i01>.
- LETEY, J. **Relationship between soil physical properties and crop productions.** Advances in Soil Science, Soil Sci., 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/00010694-199005000-00010>.

- LI, N.; LEI, W.; LONG, J.; HAN, X. **Restoration of chemical structure of soil organic matter under different agricultural practices from a severely degraded Mollisol.** *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 21, n. 4, p. 3132-3145, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00594-x>.
- LI, Z. *et al.* **Global variations and controlling factors of soil nitrogen turnover rate.** *Earth-Science Reviews*, v. 207, p. 103250, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103250>.
- LIU, L.; LIU, Z.; OUYANG, Z. **Nitrogen use efficiency from manure, fertilizer, and maize root to wheat uptake in a one-year ¹⁵N labeling field study.** *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 365, p. 108931, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108931>.
- LOPES, A. S. **Solos sob “cerrado”: características, propriedades e manejo.** 1984.
- LOPES, A. S.; COX, F. R. **A survey of the fertility status of surface soils under “Cerrado” vegetation in Brazil.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 41, n. 4, p. 742-747, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100040026x>.
- LÜTZOW, M. V. *et al.* **Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review.** *European Journal of Soil Science*, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>.
- MACHADO, C. M. **Impactos da colheita de milho para silagem sobre atributos do solo.** Trabalho de conclusão de curso, curso de graduação em agronomia, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Cerro Largo, Cerro Largo-RS, 2017.
- MAIA, S. M. *et al.* **Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil.** *Soil and Tillage Research*, v. 106, n. 2, p. 177-184, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.12.005>.
- MCLEOD, M. L. *et al.* **Invasive plant-derived dissolved organic matter alters microbial communities and carbon cycling in soils.** *Soil Biol. Biochem.*, v. 156, p. 108191, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108191>.
- MENDES, I. C. *et al.* **Soil Bioanalysis (SoilBio): A Sensitive, Calibrated, and Simple Assessment of Soil Health for Brazil.** In: *Soil Health and Sustainable Agriculture in Brazil*, p. 196, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780891187448.ch10>.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises.** Viçosa: UFV, 2005. 107 p.
- MIRANDA, E. *et al.* **Long-term changes in soil carbon stocks in the Brazilian cerrado under commercial soybean.** *Land Degradation & Development*, v. 27, n. 6, p. 1586-1594, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ldr.2473>.
- MITCHELL, K. *et al.* **Biochar and its potential to increase water, trace element, and nutrient retention in soils.** In: *Biochar in Agriculture for Achieving Sustainable*

Development Goals, p. 25-33, 2022. Academic Press. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85343-9.00008-2>.

MORAES, S. D. *et al.* **Produção e composição química de híbridos de sorgo e de milho para silagem.** Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal, v. 14, n. 4, p. 624-634, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1519-99402013000400002>.

NUÑEZ, J. *et al.* **Biological nitrification inhibition activity in a soil-grown biparental population of the forage grass, Braquiária humidicola.** Plant Soil, v. 426, p. 401-411, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3626-5>.

OLIVEIRA, S. M. D. *et al.* **Contribution of corn intercropped with Braquiária species to nutrient cycling.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 49, p. e55018, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-40632019v4955018>.

PAUL, B. K. *et al.* **Improved feeding and forages at a crossroads: Farming systems approaches for sustainable livestock development in East Africa.** Outlook Agric., v. 49, p. 13-20, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0030727020906170>.

PEIXOTO, D. S. *et al.* **A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil.** Soil Tillage Res., v. 194, p. 104307, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104307>.

PENG, X. *et al.* **A laboratory evaluation of ammonia volatilization and nitrate leaching following nitrogen fertilizer application on a coarse-textured soil.** Agronomy Journal, v. 107, n. 3, p. 871-879, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj14.0537>.

PEREIRA, F. C. B. L. *et al.* **Autumn maize intercropped with tropical forages: crop residues, nutrient cycling, subsequent soybean and soil quality.** Rev. Bras. Cienc Solo, v. 40, p. 1-20, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150003>.

PETTER, F. A. *et al.* **Carbon stocks in oxisols under agriculture and forest in the southern Amazon of Brazil.** Geoderma Regional, v. 11, p. 53-61, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.09.001>.

PIMENTEL, D. *et al.* **An environmental, energetic and economic comparison of organic and conventional farming systems.** Bioscience, v. 55, p. 573, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7796-5_6.

PITTELKOW, C. M. *et al.* **Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture.** Nature, v. 517, n. 7534, p. 365-368, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature13809>.

PORTUGAL, A.F. *et al.* **Atributos químicos e físicos de um Cambissolo Háplico Tb distrófico sob diferentes usos na Zona da Mata Mineira.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 32, n.1, p. 249-258, 2008.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos.** Curitiba: Salesward-Discovery, 446 p., 1996.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S.; MIRANDA, M.A.C. **Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, vol. 35, n.5, p.929-938, 2020.

- QUINTAM, C. P. R.; ASSUNÇÃO, G. M. **Perspectivas e desafios do agronegócio brasileiro frente ao mercado internacional**. RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218, 4(7), e473641-e473641, 2023. <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i7.3641>
- R CORE TEAM. **R. A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024. URL: <https://www.R-project.org/>
- RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H.-J. **Soil structure as an indicator of soil functions: A review**. Geoderma, Volume 314, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- RAGASSI, C. F.; PEDROSA, A. W.; FAVARIN, J. L. **Aspectos positivos e riscos no consórcio cafeeiro e braquiária**. Rev. Visão Agríc. 12, 29–32, 2013.
- RAGHAVAN, R. **A method for computing unsteady flows in porous media**. Routledge, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315136387>
- RAHMAN, M. *et al.* **Variations in soil physico-chemical properties, soil stocks, and soil stoichiometry under different soil layers, the major forest region Liupan Mountains of Northwest China**. Brazilian Journal of Biology, 84, e256565, 2022. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.256565>
- RAMOS, A. M. R. *et al.* **Atributos físicos do solo em sistema consorciado e monocultivo do maracujá (*Passiflora edulis* Sims)**. Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas, 13(1), 80-87, 2019. <https://doi.org/10.18011/bioeng2019v13n1p80-87>
- RAO, I. M.; AYARZA, M. A.; GARCIA, R. **Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils I. Differences in plant growth, nutrient acquisition and nutrient utilization among C4 grasses and C3 legumes**. J. Plant Nutr. 18, 2135–2155, 1995. <https://doi.org/10.1080/01904169509365052>
- REICHERT, J. M. *et al.* **Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33, 1547-1560, 2009.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. **Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas**. Ciência & Ambiente, v. 27, 2003.
- RIBEIRO, K. D. *et al.* **Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG**. Ciência e Agrotecnologia, 31, 1167-1175, 2007.
- RIBEIRO, K. D. *et al.* **Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG**. Ciênc. agrotec., v.31, n.4, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400033>
- ROSOLEM, C. A. *et al.* **Enhanced Plant Rooting and Crop System Management for Improved N Use Efficiency**. In Chapter Five—Ed D. L. Sparks (Cambridge: Academic Press), 205–239, 2017. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.07.002>

- ROSOLEM, C. A. *et al.* **Enhanced plant rooting and crop system management for improved N use efficiency.** *Advances in agronomy*, 146, 205-239, 2017.
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.07.002>
- SALOMON, M. *et al.* **Towards an integrated nitrogen strategy for Germany.** *Environmental Science & Policy*, 55, 158-166, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.10.003>
- SANTOS, E. A. N. D. **Efeitos do manejo sobre os atributos físicos de um Latossolo vermelho-amarelo distrófico, em Poto Velho-RO.**
<https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/6031>, 2017.
- SATHYA, A. *et al.* **Plant growth-promoting actinobacteria on chickpea seed mineral density: an upcoming complementary tool for sustainable biofortification strategy.** *3 Biotech*, 6, 1-6, 2016.
- SCHAEFER, C. E. G. *et al.* **Soil and vegetation carbon stocks in Brazilian Western Amazonia: relationships and ecological implications for natural landscapes.** *Environmental Monitoring and Assessment*, 140, 279-289, 2008.
<https://doi.org/10.1007/s10661-007-9866-0>
- SCHMIDT, M. W. *et al.* **Persistence of soil organic matter as an ecosystem property.** *Nature*, 478(7367), 49-56, 2011. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- SEVERIANO, E. D. C. *et al.* **Structural changes in Latosols of the cerrado region: I- Relationships between soil physical properties and least limiting water range.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 773-782, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300013>
- SHAH, A. N. *et al.* **Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview.** *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 10056-10067, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>
- SILVA, B. M. *et al.* **Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management.** *Soil Tillage Res.*, 189, 36-43, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>
- SILVA, B. M. *et al.* **Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potential, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system.** *Soil Tillage Res.*, 154, 103-113, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.016>
- SILVA, J. R. O. *et al.* **Cultivo intercalar antecipado de milho segunda safra nas entrelinhas da soja – Antecipe.** In: *Seminário nacional de milho safrinha*, 16. Assis. Três décadas de inovações: avanços e desafios: anais. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2021, p. 33-34.
- SINGH, R.; PARIHAR, P.; PRASAD, S. M. **Sulfur and calcium simultaneously regulate photosynthetic performance and nitrogen metabolism status in As-challenged Brassica juncea L. seedlings.** *Frontiers in Plant Science*, 9, 772, 2018.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00772>

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. **Effects of Compaction on Soil Strength Parameters**. Soil Compaction in Crop Production, 191, 2013.

SOKOL, N. W.; SANDERMAN, J.; BRADFORD, M. A. **Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry**. Global Change Biology, 25(1), 12-24, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14482>

SOLOMON, D. *et al.* **Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems**. Global Change Biology, 13(2), 511-530, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01304.x>

SOLTANI, I. *et al.* **A near infrared index to assess effects of soil texture and organic carbon content on soil water content**. European Journal of Soil Science, 70(1), 151-161, 2019. <https://doi.org/10.1111/ejss.12725>

SOUZA, L. F. N. *et al.* **Maize-Braquiária grass intercropping: A meta-analysis of major productivity drivers in Brazil**. Field Crops Research, 306, 109205, 2024. <https://doi.org/10.1590/1983-40632019v4955018>

SRIVASTAVA, P. *et al.* **Organic amendment impact on SOC dynamics in dry tropics: a possible role of relative availability of inorganic-N pools**. Agriculture, Ecosystems & Environment, 235, 38-50, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.036>

SRIVASTAVA, P. *et al.* **Soil carbon dynamics under changing climate—a research transition from absolute to relative roles of inorganic nitrogen pools and associated microbial processes: a review**. Pedosphere 27(5), 792–806, 2017. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60488-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60488-0)

STEIN, L. Y.; KLOTZ, M. G. **The nitrogen cycle**. Current Biology, 26(3), R94-R98, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.12.021>

SUBBARAO, G. V. *et al.* **Evidence for biological nitrification inhibition in Braquiária pastures**. Proc. Natl. Acad. Sci., 106, 17302–17307, 2009. <https://doi.org/10.1073/pnas.0903694106>

TAIYUN WEI, M. **Visualization of a Correlation Matrix**. Statistician, 56:316-24, 2017.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**, 3 ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 577 p., 2017.

TEMKIN, A. *et al.* **Exposure-based assessment and economic valuation of adverse birth outcomes and cancer risk due to nitrate in United States drinking water**. Environmental Research, 176, 108442, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.009>

TONON-DEBIASI, B. C. *et al.* **Microbial attributes as structural quality index for physical health of an Oxisol under compaction levels**. Soil and Tillage Research, 235, 105872, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105872>

TORMENA, C. A.; DA SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. **Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach**. Soil Tillage Res., 52, 223–232, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00086-0)

- TORRES, J. L. R. *et al.* **Aggregation and dynamics of soil organic matter under different management systems in the Brazilian Cerrado.** *Soil Research*, 59(7), 715-726, 2021. <https://doi.org/10.1071/SR20230>
- UPADHYAY, S.; RAGHUBANSHI, A. S. **Determinants of soil carbon dynamics in urban ecosystems.** In *Urban Ecology* (pp. 299-314). Elsevier, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820730-7.00016-1>
- VALENTINE, K. *et al.* **Benthic biofilm potential for organic carbon accumulation in salt marsh sediments.** *Wetlands*, 42(1), 7, 2022.
- WADE, T.; CLAASSEN, R.; WALLANDER, S. **Conservation-practice adoption rates vary widely by crop and region.** 2015. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.262111>
- WANG, X. *et al.* **Excessive nitrogen fertilizer application causes rapid degradation of greenhouse soil in China.** *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(2), 2022. <https://doi.org/10.15244/pjoes/143293>
- WEI, K. *et al.* **Optimizing nitrogen and phosphorus application to improve soil organic carbon and alfalfa hay yield in alfalfa fields.** *Frontiers in Plant Science*, 14, 1276580, 2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1276580>
- WICKHAM, H. **Package “tidyverse.”** Cran-R, 2017:1-5.
- WIESMEIER, M. *et al.* **Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales.** *Geoderma*, 333, 149-162, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- WILLEM, H. **Caractéristiques physiques du sol.** Département du travail du sol, Université agronomique, Wageningen, Pays-Bas, 2017.
- XIAO, X. *et al.* **Hydrophobicity-dependent electron transfer capacities of dissolved organic matter derived from chicken manure compost.** *Chemosphere*, 222, 757-765, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.173>
- YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. **A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil.** *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19(13), 1467-1476, 1988. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>
- ZHU, X. *et al.* **The soil microbial carbon pump: From conceptual insights to empirical assessments.** *Global Change Biology*, 26(11), 6032-6039, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.15319>
- ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. **Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil.** *Soil and Tillage Research*, 84(1), 28-40, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.007>