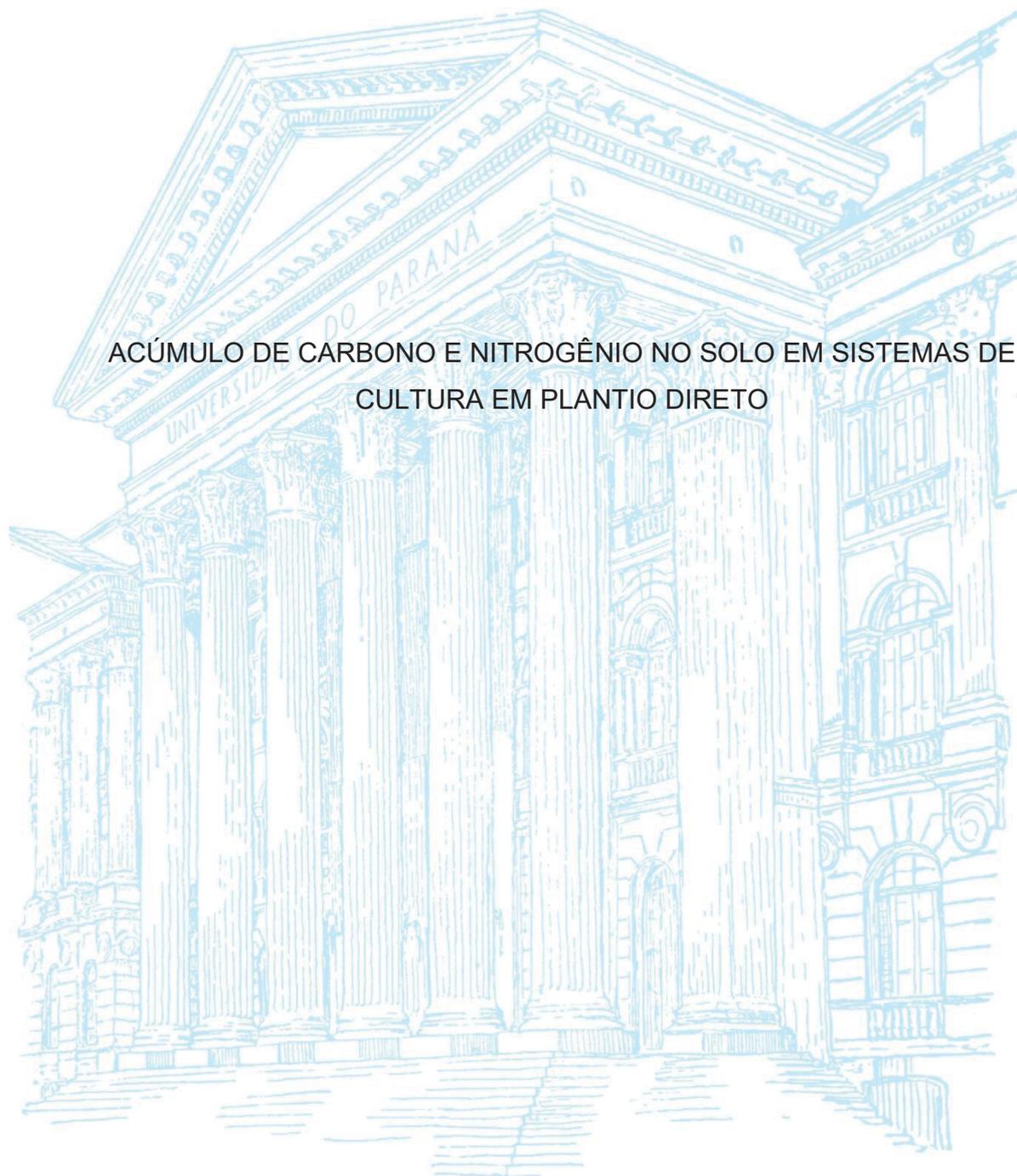


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KAUANNA TRINDADE VIEIRA RIBERSKI

ACÚMULO DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM SISTEMAS DE
CULTURA EM PLANTIO DIRETO



CURITIBA

2025

KAUANNA TRINDADE VIEIRA RIBERSKI

ACÚMULO DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM SISTEMAS DE
CULTURA EM PLANTIO DIRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente.

Orientador: Prof. Jeferson Dieckow

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a. Bruna Ramalho

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Riberski, Kauanna Trindade Vieira

Acúmulo de carbono e nitrogênio no solo em sistemas de cultura em plantio direto / Kauanna Trindade Vieira Riberski. – Curitiba, 2025.

1 recurso online: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Bruna Ramalho

1. Produtividade agrícola. 2. Sequestro de carbono. 3. Agricultura sustentável. 4. Milho. I. Dieckow, Jeferson. II. Ramalho, Bruna. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

Bibliotecária: Ana Camila Quaresma Moura CRB-9/2212



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **KAUANA TRINDADE VIEIRA RIBERSKI** intitulada: **ACÚMULO DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM SISTEMAS DE CULTURA EM PLANTIO DIRETO**, sob orientação do Prof. Dr. JEFERSON DIECKOW, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Fevereiro de 2025.


JEFERSON DIECKOW
Presidente da Banca Examinadora


BRUNA RAMALHO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TUIUTI DO PARANÁ)


DANIEL HANKE
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)


GABRIEL BARTH
Avaliador Externo (FUNDAÇÃO ABC)

À Deus, meu esposo Edgar, meu filho Nicolas, meus pais, avós, sogros e
família. Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tamanha bondade e misericórdia. Este trabalho, como toda minha vida e minhas ações, será para honra e glória do Teu Santo Nome.

Ao meu esposo Edgar e ao meu filho Nicolas, por se manterem firmes ao meu lado, unidos por um propósito. Vencemos mais uma etapa das nossas vidas.

À minha mãe Gislaine Ortega Vieira, ao meu pai Edson Wilson Riberski, à minha avó Vanda Ortega Vieira, ao meu avô Getúlio de Assis Vieira, à minha sogra Sandra Marli Trindade e a minha avó Odila da Trindade. Vocês nunca perderam a esperança em mim. Cada um a sua maneira sacrificou-se para que eu pudesse realizar sonhos.

À minha professora e amiga, Dr^a Bruna Ramalho, que acreditou em meu potencial, me deu todo apoio e conhecimento nas horas mais improváveis, sempre com doçura e gentileza.

Ao meu orientador Professor Dr^o Jeferson Dieckow, por me acolher e transmitir com paciência, suas experiências e conhecimentos sobre os mais diversos temas conversados nesse período.

A todos os professores do PPG Ciência do Solo e da Universidade Tuiuti do Paraná, pelo incentivo, carinho, esclarecimentos e apoio dados no início, durante e ao fim do meu mestrado.

À minha família, que compreendeu minha ausência em alguns momentos e por compartilharem da mesma alegria e satisfação dessa etapa vencida.

Aos meus amigos que a UFPR me agraciou, Laura, Henrique, Rodrigo, Giovanni, Regiane, Rafaela, Rafael e Vanessa, pelas risadas e experiências compartilhadas. Vocês tornaram os dias mais leves.

Às técnicas de laboratório Maria Aparecida, Heila, Fabiane e Josiane, por todo apoio e compreensão dispensados durante cada etapa nos laboratórios.

Aos estimados Professor Dr. Cimélio Bayer e ao técnico Heron, pela gentileza e parceria nas análises do carbono e nitrogênio nos laboratórios da UFRGS.

Aos colegas da iniciação científica pelo apoio e tempo cedidos para condução de todas as etapas.

À Denise, pela firmeza em me conduzir para cada passo, por cada palavra proferida para meu crescimento e autoconhecimento.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

São tantas pessoas que passam por nossas vidas diariamente, e diante disso prefiro refletir na frase de O Pequeno Príncipe: “Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós.” (Antoine de Saint-Exupéry).

À todas estas e mais, meus sinceros agradecimentos. Deus os abençoe.

“Tudo quanto fizerdes, fazei-o de todo o coração, como para o Senhor e não para os homens”. (Colossenses 3,23)

RESUMO

O sequestro de carbono da atmosfera está associado também ao manejo da matéria orgânica do solo, a qual possui o carbono como principal constituinte. Um dos principais desafios da produção agrícola sustentável é melhorar os sistemas de culturas manejados em plantio direto para maximizar a produção primária líquida e promover sequestro de carbono no solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade de sistemas de culturas em acumular carbono e nitrogênio no solo até 3 m de profundidade. O estudo foi realizado a partir de um experimento de longa duração (34 anos), composto por sete sistemas de culturas sob plantio direto, em um Latossolo Vermelho do subtropico brasileiro (Ponta Grossa PR). A sucessão [i] trigo (*Triticum aestivum* L.) - soja (*Glycine max* L. Merr.) foi a referência, melhorada com a inclusão de plantas de cobertura e milho nos sistemas [ii] aveia preta (*Avena strigosa*) - milho (*Zea mays*) - trigo - soja, [iii] ervilhaca (*Vicia sativa* L.) - milho - trigo - soja e [iv] ervilhaca - milho - aveia preta - soja -trigo - soja; ou modificada com a inclusão de forrageiras de inverno para feno nos sistemas [v] azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) - milho - azevém - soja, [iv] alfafa (*Medicago sativa* L.) por 2,5 anos - milho, ou pelo [iv] sistema "aberto" com trigo, soja, aveia, milho. O sistema trianual Er-Mi-Av-So-Tr-So apresentou maior estoque de C em relação ao Tr-So até as profundidades de 30 cm (78,9 Mg C ha⁻¹) e 100 cm (163,3 Mg C ha⁻¹) e maiores estoques de N até 300 cm (14,04 Mg N ha⁻¹) em relação a sucessão. Os sistemas de culturas com forrageiras para corte, Az-Mi-Az-So (226,2 Mg C ha⁻¹) e Alf-Mi (231,9 Mg C ha⁻¹), apresentaram aumento de carbono no solo para a camada de 0-200 cm, quando comparados ao sistema de sucessão trigo-soja (215,1 Mg C ha⁻¹), e até mesmo em relação aos sistemas com plantas de cobertura de inverno e milho no verão (Av-Mi-Tr-So: 222,7 Mg C ha⁻¹; Er-Mi-Tr-So: 214,2 Mg C ha⁻¹; e Er-Mi-Av-So-Tr-So: 221,0 Mg C ha⁻¹). O sistema Alf-Mi apresentou eficiência em estocar N (14,59 Mg N ha⁻¹) até 300 cm de profundidade em relação ao Tr-So e aos demais sistemas, exceto Er-Mi-Tr-So (14,05 Mg N ha⁻¹) e Er-Mi-Av-So-Tr-So (14,04 Mg N ha⁻¹). Esses resultados proporcionam uma compreensão aprofundada da dinâmica do carbono no solo em função dos diferentes sistemas de cultivo implementados e em profundidade além de 1 metro.

Palavras-chave: Sistema de culturas; Carbono orgânico total; Milho; Alfafa perene; Sequestro de carbono.

ABSTRACT

Carbon sequestration from the atmosphere is also associated with soil organic matter management, as carbon is its main constituent. One of the major challenges of sustainable agricultural production is to improve cropping systems under no-till management to maximize net primary production and promote carbon sequestration soil. This study aimed to evaluate the capacity of different cropping systems to accumulate carbon and nitrogen in the soil up to a depth of 3 meters. The research was conducted within a long-term experiment (34 years) consisting of seven no-till cropping systems on a Brazilian subtropical Ferralsols (Ponta Grossa, PR). The [i] wheat (*Triticum aestivum* L.) - soybean (*Glycine max* L. Merr.) succession was used as a reference and improved with the inclusion of cover crops and maize in the systems: [ii] black oat (*Avena strigosa*) - maize (*Zea mays*) - wheat - soybean, [iii] hairy vetch (*Vicia sativa* L.) - maize - wheat - soybean, and [iv] hairy vetch - maize - black oat - soybean - wheat - soybean. Additionally, modifications included the integration of winter forages for hay in the systems: [v] ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) - maize - ryegrass - soybean, [vi] alfalfa (*Medicago sativa* L.) for 2.5 years followed by maize, and [vii] an “open” system with wheat, soybean, oat, and maize. The triennial system Er-Mi-Av-So-Tr-So showed higher carbon stocks compared to the Tr-So system at depths of 30 cm (78.9 Mg C ha⁻¹) and 100 cm (163.3 Mg C ha⁻¹), as well as higher nitrogen stocks up to 300 cm (14.04 Mg N ha⁻¹). Cropping systems with forage species for cutting, Az-Mi-Az-So (226.2 Mg C ha⁻¹) and Alf-Mi (231.9 Mg C ha⁻¹), exhibited increased soil carbon storage in the 0-200 cm layer compared to the wheat-soybean succession system (215.1 Mg C ha⁻¹) and even in relation to systems incorporating winter cover crops and summer maize (Av-Mi-Tr-So: 222.7 Mg C ha⁻¹; Er-Mi-Tr-So: 214.2 Mg C ha⁻¹; and Er-Mi-Av-So-Tr-So: 221.0 Mg C ha⁻¹). The Alf-Mi system demonstrated the highest nitrogen storage efficiency (14.59 Mg N ha⁻¹) up to 300 cm depth compared to Tr-So and other systems, except for Er-Mi-Tr-So (14.05 Mg N ha⁻¹) and Er-Mi-Av-So-Tr-So (14.04 Mg N ha⁻¹). These findings provide an in-depth understanding of soil carbon dynamics in response to different cropping systems and at depths beyond 1 meter.

Keywords: Cropping system; Total organic carbon; Maize. Perennial alfalfa; Carbon sequestration.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Estoques de carbono nas camadas de 0-30 cm (A), 0-100 cm (B), 0-200 cm (C) e 0-300 cm (D) de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-avevém-soja (Az-Mi-Az-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Número dentro de cada barra indica a taxa de sequestro de carbono ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Ponta Grossa/PR. 26
- Figura 2. Estoques de nitrogênio nas camadas de 0-30 cm (A), 0-100 cm (B), 0-200 cm (C) e 0-300 cm (D) de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-avevém-soja (Az-Mi-Az-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Número dentro de cada barra indica a taxa de acúmulo ($\text{Mg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Ponta Grossa/PR. 28

LISTA DE TABELAS

- TABELA 1. Concentrações de carbono nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-75, 75-100, 100-125, 125-150, 150-200, 200-250 e 250-300 cm de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Ponta Grossa/PR.....25
- TABELA 2. Concentrações de nitrogênio nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-75, 75-100, 100-125, 125-150, 150-200, 200-250 e 250-300 cm de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Ponta Grossa/PR.....27
- TABELA 3. Taxas de sequestro de carbono ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) nas camadas de 0-30, 0-100, 0-200 e 0-300 cm de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Ponta Grossa/PR.28
- TABELA 4. Relação C/N nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-75, 75-100, 100-125, 125-150, 150-200, 200-250 e 250-300 cm de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Ponta Grossa/PR.....44
- TABELA 5. Densidade do solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-75, 75-100, 100-125, 125-150, 150-200, 200-250 e 250-300 cm de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Ponta Grossa/PR.....44

azevém-milho-azevém-soja (Az-Mi-Az-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e
aberto, por 34 anos. Ponta Grossa/PR.....45

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

Alf	- Alfafa
Av	- Aveia
Az	- Azevém
C	- Carbono
COT	- Carbono orgânico total
Er	- Ervilhaca
ha	- hectare
Mi	- Milho
N	- Nitrogênio
NT	- Nitrogênio total
So	- So
Tr	- Trigo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 HIPÓTESES E OBJETIVOS	19
1.1.1 Hipótese geral	19
1.1.1.1 Hipóteses específicas.....	19
1.1.2 Objetivo geral	19
1.1.2.1 Objetivos específicos.....	19
2 MATERIAL E MÉTODOS	20
2.1.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	20
2.1.2 COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO	21
2.1.3 AVALIAÇÃO DE ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO	22
2.1.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	23
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
3.1 PLANTAS DE COBERTURA E MILHO	23
3.2 AZEVÉM E ALFAFA PARA FENO	31
4 CONCLUSÕES	35
REFERÊNCIAS	37
ANEXO I – RELAÇÃO C/N E DENSIDADE DO SOLO	44

1 INTRODUÇÃO

O solo é uma das maiores reservas de carbono no planeta, podendo conter aproximadamente 680 bilhões de toneladas nos primeiros 30 cm de profundidade (FAO, 2018). O sequestro de carbono da atmosfera pode estar relacionado ao manejo voltado para a conservação da matéria orgânica do solo, uma vez que o carbono é o elemento predominante em sua composição, e para determinar o teor de MOS, é utilizada a conversão do carbono através do fator de van Bemmelen (1,724). (SILVA et al., 2023). O teor de MOS é visto como fator de avaliação da qualidade do solo, visto que atua em propriedades físicas e químicas do solo, influenciando na produtividade das plantas por meio do fornecimento de nutrientes e energia para a microbiota, tamponamento da acidez, capacidade de troca de cátions (CTC) (SILVA et al., 2023). A capacidade de um solo armazenar carbono é influenciada por características como topografia, classe de solo, drenagem, mineralogia e textura. Além desses fatores, o tipo de cobertura vegetal, as condições climáticas locais - especialmente temperatura e precipitação - e as práticas de manejo adotadas também desempenham um papel crucial no sequestro de carbono no solo (RUFINO et al., 2022; CORADO NETO et al., 2015; COSTA et al., 2008; SMITH, 2008; SLEUTEL et al., 2006; LAL, 2005; MACHADO, 2005).

O Estado do Paraná, localizado na região Sul do Brasil, possui um padrão de precipitação que favorece até quatro cultivos anuais, resultando em acúmulo de resíduos vegetais sobre o solo e conseqüentemente, maior acúmulo de carbono. Um dos principais desafios da produção agrícola sustentável está na implementação de melhorias nos sistemas de culturas, manejados em plantio direto, que maximizem a produção primária líquida, ao mesmo tempo em que promovam sequestro de carbono e acúmulo no solo. Os sistemas de culturas promovem benefícios ao solo ao adicionar biomassa de parte aérea e radicular que podem aumentar o teor de carbono orgânico total (COT) no solo e com isso sequestrar carbono, além de melhorar a produtividade das culturas devido ao maior teor de matéria orgânica (SECRETI, 2017). Contudo, a qualidade e quantidade de incorporação dos nutrientes no solo dependem do número e da variedade de espécies selecionadas (WINCK et al., 2014), pois o tipo de resíduo irá impactar na disponibilidade e reserva de carbono e nitrogênio no solo. A avaliação da qualidade do resíduo deve incluir sua composição química, o teor de lignina presente, o tamanho das partículas residuais e a relação C:N (JOHNSON et al., 2007).

Ao avaliar a composição química da parte aérea e das raízes do azevém, Fernandez et al. (2003) notaram que a parte aérea da cultura é menos lignificada que as raízes, por apresentar estrutura molecular semelhante, tanto na parte aérea quanto nas raízes, a quantidade de lignina é o principal fator que potencializa a degradação. Rasse et al. (2005) relataram maiores contribuições para os teores de carbono no solo do sistema radicular do que da parte aérea, constatando que o tempo médio de residência do carbono oriundo das raízes é mais longo do que o derivado das partes aéreas.

O processo de corte ou pastejo em algumas forrageiras implica na remoção parcial da parte aérea da planta, influenciando diretamente a dinâmica do sistema radicular. Após a remoção, a planta redireciona suas reservas energéticas para a regeneração da parte aérea, resultando na redução do crescimento radicular. Esse efeito leva à morte e posterior decomposição das raízes mais velhas (SILVA et al., 2014; MORAES & PALHANO, 2002), contribuindo para o aporte de carbono no solo. Esse aporte ocorre pela liberação de compostos orgânicos resultantes da decomposição radicular, influenciando a formação e o acúmulo de matéria orgânica no solo. Johnson et al. (2007) observaram que os resíduos das raízes do milho contribuíram mais para o estoque de carbono orgânico do solo do que os resíduos da parte aérea, devido à recalcitrância química, e não à relação C:N. Isso provavelmente está relacionado à composição química do tecido vegetal, que afeta o processo de decomposição, onde a mineralização inicial influencia a conversão do carbono em frações de matéria orgânica do solo (MOS) mais recalcitrantes. Além disso, os autores destacaram que a composição química também influencia a comunidade microbiana, impactando a taxa de decomposição. Gramíneas cultivadas seguidas de leguminosas apresentam aumento na produção de grãos e como consequência maior adição de resíduos vegetais contribuindo para o acúmulo de carbono e matéria orgânica do solo (ALMEIDA, 2022). Outro fator importante para o aporte de carbono no solo é o sistema de manejo adotado, como o plantio direto, o qual promove proteção da matéria orgânica por meio dos agregados estáveis devido à mínima mobilização do solo (SIX et al., 2000).

Em 2021 a Embrapa Solos lançou novos mapas de estoque de carbono orgânico dos solos do Brasil que abrangem camadas até 200 cm de profundidade, diante da condição de que o estoque de carbono nas camadas de 0-30 cm tem relação com o manejo e uso do solo, e nas demais camadas tem influência dos sistemas

radiculares cuja função é aportar matéria orgânica e carbono em profundidade durante o tempo e de acordo com as condições climáticas e de manejo (EMBRAPA SOLOS, 2021). É conhecido que o carbono se comporta com redução dos seus teores em profundidade, estando presente de 39 a 70% na camada de 30 cm e 58 a 81% na camada até 50 cm. Entretanto, Machado (2005) ressaltou sobre o interesse de amostragem na profundidade em que se esperam teores significativos de carbono, sem que haja definição padrão para todos os solos. Albuquerque et al. (2015) avaliaram até 1 m de profundidade as relações dos sistemas de culturas para aporte de carbono e nitrogênio no solo, encontrando valores significativos para estoque de carbono entre os sistemas de culturas avaliados com máximas de 182,6 Mg C ha⁻¹ na camada de 0-100 cm e 63,6 Mg C ha⁻¹ na camada de 0-20 cm, ou seja cerca de 119 Mg C ha⁻¹ estão distribuídos em 80 cm de solo. Cerca de 35% desse carbono estocado no solo encontra-se nas camadas superficiais, o restante apresenta nas camadas mais profundas (Albuquerque et al., 2015). Um mapeamento do carbono orgânico do solo foi realizado a fim de estimar e compreender a dinâmica do carbono em profundidade, e os resultados demonstraram diminuição gradativa do conteúdo de COT entre a camada superficial e a subsolo, variando de 9,05% a 4,64%, respectivamente (AZAMAT et al., 2024). Diante do conhecimento do sistema radicular das culturas incluídas dentro dos sistemas, amentou a curiosidade em saber até que profundidade as culturas proporcionam aporte de carbono e nitrogênio no solo, será que o grande volume de trabalhos não está subestimando a capacidade das culturas em sequestrar e estocar carbono em profundidades além de 1 metro?

Em 1989 a Fundação ABC instalou um experimento com foco em avaliar os sistemas de manejo e de culturas sobre o aporte da matéria orgânica do solo, envolvendo os teores de carbono orgânico e nitrogênio. Os sistemas de culturas foram desenvolvidos em conformidade com as demandas dos produtores da região de Ponta Grossa/PR, considerando a produção de grãos e forragens, do mesmo modo objetivou aumentar os aportes e reduzir as saídas de carbono diante do potencial dos sistemas de culturas em sequestrar e estocar carbono e nitrogênio no solo dado à capacidade de fixação de nitrogênio pelas leguminosas, produção de biomassa com alta relação C/N pelas gramíneas e exploração do sistema radicular no perfil do solo.

Diante do exposto, o presente estudo foi realizado em experimento de longa duração (34 anos) com objetivo principal de avaliar o efeito dos sistemas de manejo do solo, que integram os sistemas de rotação e sucessão de culturas sob plantio

direto, nos estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) até 300 cm de profundidade de um Latossolo Vermelho Distrófico típico.

1.1 HIPÓTESES E OBJETIVOS

1.1.1 Hipótese geral

Sistemas de culturas com plantas de cobertura no inverno, milho ou forrageiras para corte contribuem para o incremento de carbono orgânico total e nitrogênio total no solo em relação à sucessão de culturas trigo-soja.

1.1.1.1 Hipóteses específicas

Sistemas de culturas com inclusão de plantas de cobertura de inverno, como aveia-preta e ervilhaca, e milho no verão aumentam os estoques de carbono orgânico total (COT) e de nitrogênio total (NT) do solo em relação a tradicional sucessão trigo-soja.

Sistemas de culturas com inclusão de forrageiras para corte, como azevém e alfafa, aumentam os estoques de carbono orgânico total (COT) e de nitrogênio total (NT) do solo em relação a tradicional sucessão trigo-soja, e em relação aos sistemas com plantas de cobertura de inverno.

Sistemas de culturas com a inclusão de plantas de cobertura ou forrageiras para corte no inverno, e milho no verão aumentam os estoques de carbono orgânico total (COT) e de nitrogênio total (NT) do solo para além de 1 metro de profundidade em relação a tradicional sucessão trigo-soja.

1.1.2 Objetivo geral

Avaliar a influência dos sistemas de culturas com plantas de cobertura no inverno, milho ou forrageiras para corte quanto ao aumento do estoque de carbono orgânico total e nitrogênio total em relação a sucessão trigo-soja.

1.1.2.1 Objetivos específicos

Analisar a interferência da introdução de culturas de cobertura no inverno, como a aveia-preta e ervilhaca, e milho no verão nos sistemas de culturas relacionando o aumento dos estoques e concentrações de COT e NT no solo.

Avaliar a influência das forrageiras para corte, como azevém e alfafa, em relação à sucessão trigo-soja quanto às concentrações e estoques de COT e NT no solo.

Avaliar a capacidade de sistemas de culturas com inclusão de plantas de cobertura de inverno, milho ou forrageiras para corte em acumular COT e NT no solo além de 1 m de profundidade, até 3 m.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi instalado em 1989, em área da Fundação ABC, no município de Ponta Grossa/PR (25°00'42" S, 50°09'13" W e 877 m de altitude, Google Earth website). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (MOLIN, 2008), com 46% de argila para a camada de 0-20 cm. O clima é subtropical úmido (Cfb, Köppen), com temperaturas médias entre 15 °C e 22 °C durante o ano, nos meses mais quentes atingindo 27 °C e nos meses mais frios 11 °C, e precipitação média anual de 1.500 mm.

A área apresenta histórico com campo nativo subtropical convertido em lavoura de cultivos anuais inicialmente sob manejo convencional. A data de implantação do experimento marcou o início do plantio direto no local, submetido à sete rotações de culturas dispostas em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições e cada parcela possuindo 147 m² (7 x 21 m). Os sistemas de culturas são:

- Tr-So: trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno e soja (*Glycine max* L. Merr.) no verão em sucessão anual para produção de grãos. Este sistema foi determinado como referência;
- Av-Mi-Tr-So: aveia-preta (*Avena strigosa*) como cobertura no inverno, milho (*Zea mays*) para grão no verão, trigo para grão no inverno e soja no verão, em sistema de rotação bianual;

- Er-Mi-Tr-So: ervilhaca (*Vicia sativa* L.) como cobertura no inverno, milho para grão no verão, trigo para grão no inverno e soja para grão no verão, em sistema de rotação bianual;
- Er-Mi-Av-So-Tr-So: ervilhaca como cobertura de inverno, milho como cultura de rendimento no verão, aveia preta como cobertura no inverno, soja como cultura de rendimento no verão, trigo como cultura de rendimento no inverno e soja como cultura de rendimento no verão, sob rotação trianual;
- Az-Mi-Az-So: azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) para produção de pré-secado no inverno, milho para produção de grãos no verão, azevém novamente no inverno e soja para produção de grãos no verão, sob rotação bianual. O azevém foi cortado de duas a três vezes por inverno e a parte aérea retirada da parcela;
- Alf-Mi: alfafa semiperene (*Medicago sativa*) para produção de feno por 2,5 anos e na sequência um cultivo de milho no verão, formando um sistema trianual. A alfafa foi cortada 7 a 9 vezes por ano. A parte aérea cortada foi retirada da parcela;
- Aberto: subsistema “aberto” com sucessão de trigo – soja – aveia – milho – aveia – soja.

2.1.2 COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO

As amostras de solo foram coletadas no mês de agosto do ano de 2023, no 34º ano do experimento, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-75, 75-100, 100-125, 125-150, 150-200, 200-250, 250-300 cm, totalizando 336 amostras. O método de escavação com uso de espátula foi aplicado para as camadas até 30 cm de profundidade, delimitado por gabarito metálico de medidas 25,0 x 50,0 x 5,0 cm. As camadas abaixo de 30 cm foram coletadas com uso de trado-escavador de 20 cm de diâmetro. Com o cuidado de manter o prumo das paredes e a delimitação exata entre uma camada e outra, foi possível saber o volume de solo escavado/amostrado em cada camada. O solo escavado foi então pesado a campo para a determinação da densidade (método da escavação), e uma subamostra foi utilizada para determinação da umidade e a devida correção. Aproximadamente 1 kg de amostra foi então separada para as análises.

2.1.3 AVALIAÇÃO DE ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO

As amostras foram homogeneizadas em campo e na sequência da chegada ao laboratório, secas em estufa a 45 °C, destorroadas com auxílio de rolo e passadas em peneira com abertura de malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca em estufa (TFSE). Destas amostras, foram pesadas 20 g para moagem em gral de ágata, passando em peneira com abertura de malha de 0,20 mm, para determinação de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) via combustão seca pelo analisador Thermo Fisher FLASH 2000, Configuração NC Soils locado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O estoque de carbono e nitrogênio foi calculado pelo procedimento de correção pela massa equivalente, usando a seguinte fórmula:

$$E = M_{trat} - [(Ma_{trat} - Ma_{ref}) * \left(\frac{C}{1000}\right)]$$

Onde:

E = Estoque de Carbono ou Nitrogênio (Mg ha⁻¹)

M_{trat} = massa do solo do tratamento (Mg ha⁻¹)

Ma_{trat} = massa acumulada do tratamento (Mg ha⁻¹)

Ma_{ref} = massa do solo do tratamento referência (Mg ha⁻¹)

C = Concentração de Carbono ou Nitrogênio (g kg⁻¹)

Para estimativa das taxas de sequestro de carbono e acúmulo de nitrogênio utilizou-se a seguinte equação:

$$Tx. = \frac{est. acum. Trat. - est. acum. Ref}{t}$$

Onde:

Tx. = taxa de sequestro de Carbono (Mg ha⁻¹ ano⁻¹) ou taxa de acúmulo de Nitrogênio (kg⁻¹ ha⁻¹ ano⁻¹)

Est.acum.Trat. = estoque acumulado do tratamento (Mg ha⁻¹)

Est.acum.Ref. = estoque acumulado do tratamento referência (Mg ha⁻¹)

T = tempo de duração do experimento, 34 anos.

2.1.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados inicialmente foram submetidos ao teste de Bartlett para avaliação de homogeneidade e na sequência a análise de variância (ANOVA). Para comparação de médias utilizou-se o Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas por meio do software RStudio® 4.2.3.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PLANTAS DE COBERTURA E MILHO

As concentrações de carbono no solo até 3 metros de profundidade não diferiram entre os sistemas de culturas Tr-So, Av-Mi-Tr-So, Er-Mi-Tr-So e Er-Mi-Av-So-Tr-So; sendo que a concentração média de 35,92 g C kg⁻¹ na camada de 0-5 cm nestes sistemas diminuiu gradualmente para 2,65 g C kg⁻¹ na camada mais profunda de 250-300 cm (TABELA 1). Com exceção da camada de 75-100 cm, onde os sistemas Er-Mi-Tr-So (9,7 g C kg⁻¹) e Er-Mi-Av-So-Tr-So (9,5 g C kg⁻¹) demonstraram valores superiores a referência (9,2 g C kg⁻¹) e ao Av-Mi-Tr-So (9,1 g C kg⁻¹) (TABELA 1). Consequentemente, os estoques de carbono no solo também não evidenciaram um padrão consistente de diferença entre estes mesmos sistemas (Figura 1); com média de 76.2 Mg C ha⁻¹ até 30 cm de profundidade (Figura 1a) e 252.4 Mg C ha⁻¹ até 300 cm (Figura 1d). O sistema Av-Mi-Tr-So até teve maior estoque de C em relação ao sistema controle Tr-So nas camadas de 0-30 cm (Figura 1a) e 0-300 cm (Figura 1d), mas curiosamente não nas camadas de 0-100 cm ou 0-200 cm (Figura 1b-c). Quanto ao sistema com leguminosa Er-Mi-Tr-So, seu estoque de C não diferiu do estoque em Tr-So em nenhuma das camadas avaliadas (Figura 1a-d). Já o sistema trianual Er-Mi-Av-So-Tr-So apresentou maior estoque de C em relação ao Tr-So até as profundidades de 30 cm (Figura 1a) e 100 cm (Figura 1b), mas não até 200 cm ou 300 cm (Figura 1c-d). Nota-se, portanto, que não houve um padrão claro e conclusivo de diferença ou acúmulo de estoque de C nos sistemas de culturas com plantas de cobertura e milho em relação à referência Tr-So. Cabe ser destacado, porém, que houve uma certa tendência de aumento do estoque de C nestes sistemas de culturas em relação ao Tr-So, e nenhuma evidência de redução.

Quanto às concentrações de nitrogênio, houveram diferenças entre os sistemas para algumas camadas, com destaque para as camadas de 5-10 e 200-250 cm onde os sistemas Er-Mi-Av-So-Tr-So (1,87 g N kg⁻¹ e 0,17 g N kg⁻¹, respectivamente) e Er-Mi-Tr-So (1,76 g N kg⁻¹ e 0,18 g N kg⁻¹, respectivamente) apresentaram superioridade com relação ao Tr-So (1,64 g N kg⁻¹ e 0,14 g N kg⁻¹, respectivamente) e Av-Mi-Tr-So (1,59 g N kg⁻¹ e 0,15 g N kg⁻¹, respectivamente) (TABELA 2). Os estoques de N, assim como observado para os de C, também não evidenciaram um padrão claro de diferença entre estes sistemas (Figura 2). Os estoques de N em Av-Mi-Tr-So não diferiram dos de Tr-So nas camadas de 0-30 cm, 0-100 cm e 0-300 cm; mas foi maior em 0-200 cm (Figura 2). No sistema Er-Mi-Tr-So, os estoques de N foram similares aos do Tr-So nas camadas de 0-30 cm e 0-100 cm, mas maiores em 0-200 e 0-300 cm. A exceção foi o sistema trianual Er-Mi-Av-So-Tr-So, cujos estoques de N foram maiores aos de Tr-So em todas as camadas (Figura 2).

Tendo como referência o sistema de sucessão Tr-So, a taxa de sequestro de carbono (Mg ha⁻¹ ano⁻¹) até 30 cm variou de 0,14 no sistema Er-Mi-Av-So-Tr-So a perdas de 0,01 no sistema Er-Mi-Tr-So (TABELA 3). Com destaque apenas para o sistema Er-Mi-Av-So-Tr-So (0,19 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) na camada de 0-100 cm. Seguindo a mesma tendência dos resultados anteriores para concentrações e estoques, estes também não forneceram padrão claro sobre as taxas de sequestro de C para as demais camadas avaliadas.

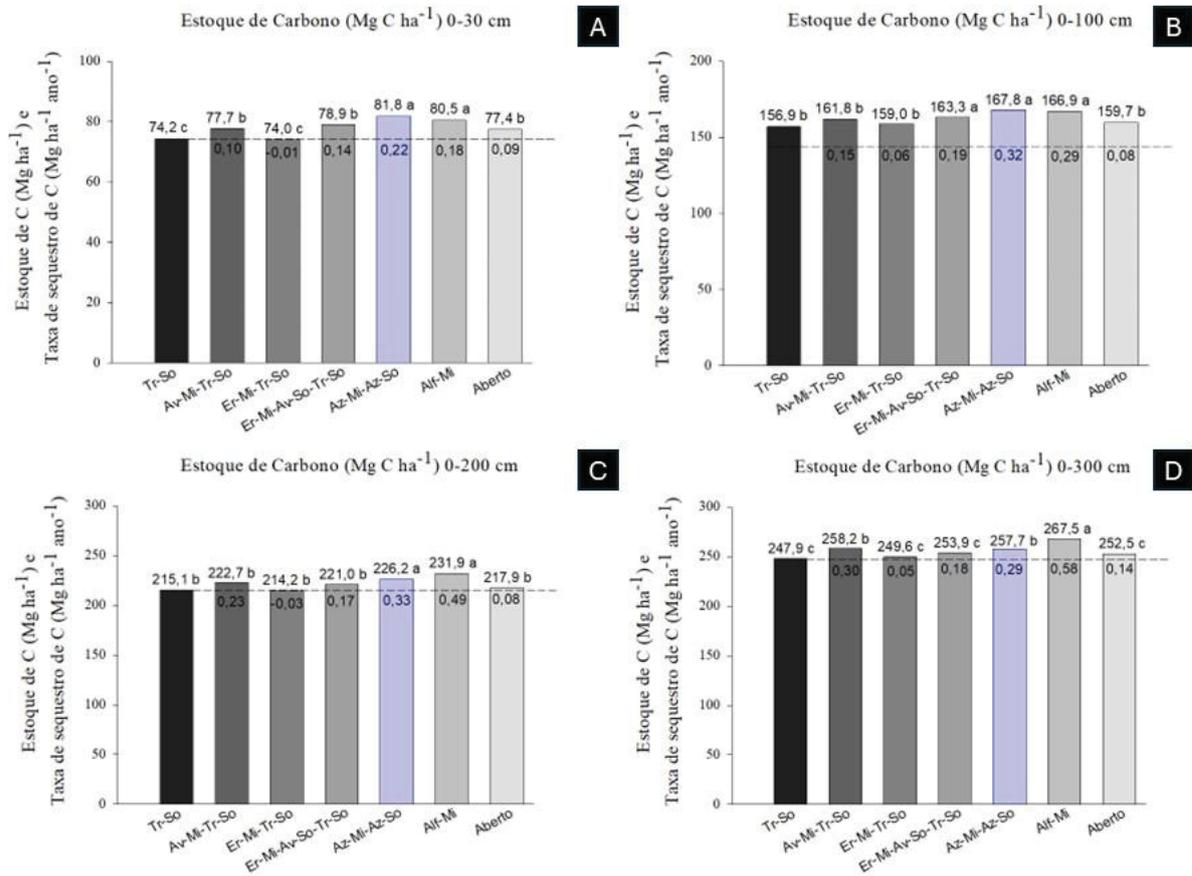
TABELA 1. Concentrações de carbono nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-75, 75-100, 100-125, 125-150, 150-200, 200-250 e 250-300 cm de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-avevém-soja (Az-Mi-Az-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Ponta Grossa/PR.

Layer (cm)	Tr-So	Av-Mi-Tr-So	Er-Mi-Tr-So	Er-Mi-Av-So-Tr-So	Az-Mi-Az-So	Alf-Mi	Aberto
Concentração de Carbono (g C kg ⁻¹)							
0-5	33,6 a	37,9 a	36,0 a	36,2 a	40,6 a	35,7 a	35,3 a
5-10	23,1 b	24,1 b	23,2 b	24,6 b	27,1 a	23,8 b	24,7 b
10-20	18,1 b	19,2 b	18,6 b	19,3 b	20,4 a	20,9 a	19,4 b
20-30	16,5 a	16,2 a	14,9 a	17,1 a	16,3 a	18,1 a	16,6 a
30-50	12,8 n.s.	13,4 n.s.	14,0 n.s.	13,5 n.s.	13,7 n.s.	13,7 n.s.	13,4 n.s.
50-75	11,1 n.s.	11,3 n.s.	10,4 n.s.	10,8 n.s.	11,4 n.s.	11,2 n.s.	10,6 n.s.
75-100	9,2 b	9,1 b	9,7 a	9,5 a	9,6 a	9,9 a	9,3 b
100-125	7,0 b	7,0 b	6,5 b	7,2 b	7,6 a	8,0 a	7,0 b
125-150	5,1 n.s.	5,7 n.s.	5,3 n.s.	5,5 n.s.	5,3 n.s.	5,8 n.s.	5,2 n.s.
150-200	4,2 a	4,4 a	3,9 b	3,8 b	3,8 b	4,7 a	4,4 a
200-250	2,9 n.s.	3,3 n.s.	3,3 n.s.	3,0 n.s.	2,8 n.s.	3,0 n.s.	3,1 n.s.
250-300	2,6 n.s.	2,7 n.s.	2,7 n.s.	2,6 n.s.	2,4 n.s.	3,0 n.s.	2,7 n.s.

* significativo em relação ao tratamento testemunha com o sistema de culturas Tr-So em sucessão. n.s.: não significativo. As letras minúsculas demonstram as diferenças entre os tratamentos ($p < 0,05$).

FONTE: A autora (2024).

Figura 1. Estoques de carbono nas camadas de 0-30 cm (A), 0-100 cm (B), 0-200 cm (C) e 0-300 cm (D) de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-avevém-soja (Az-Mi-Az-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Número dentro de cada barra indica a taxa de sequestro de carbono ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Ponta Grossa/PR.



Fonte: A autora (2024).

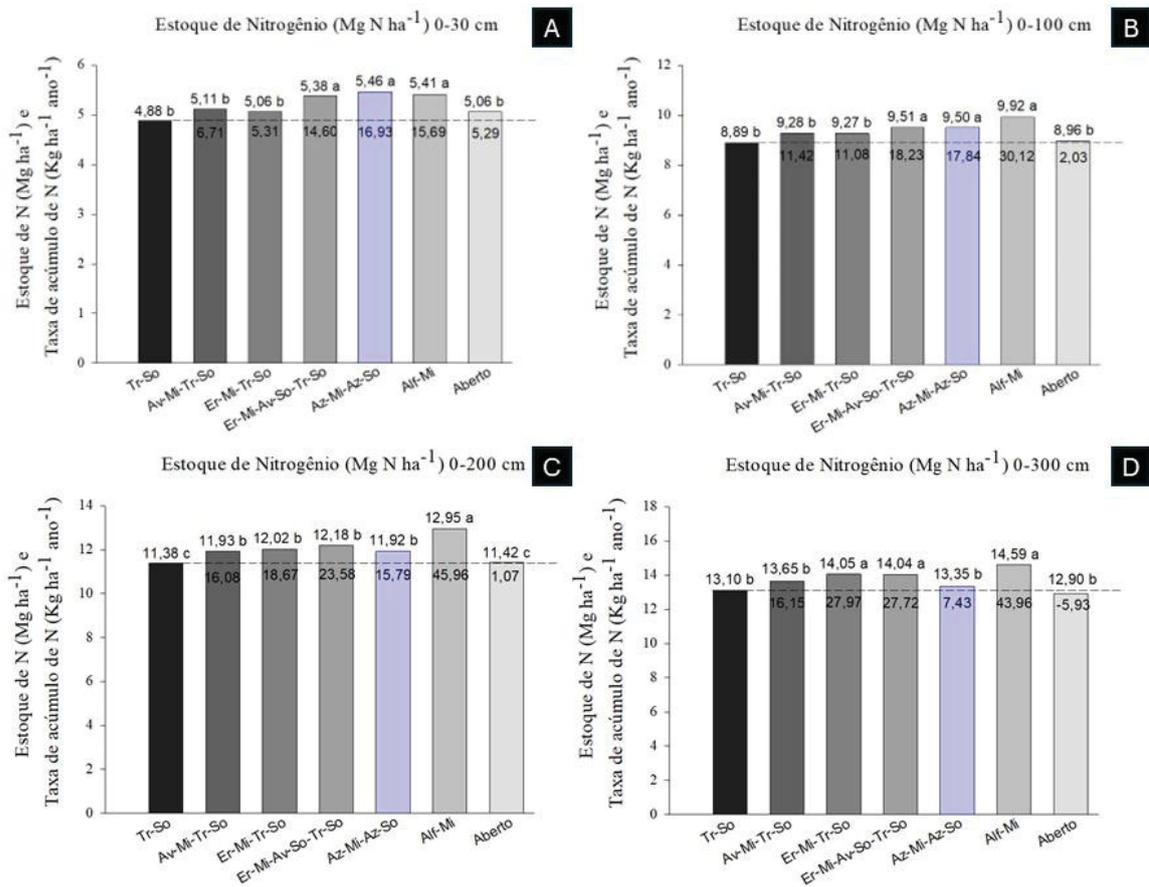
TABELA 2. Concentrações de nitrogênio nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-75, 75-100, 100-125, 125-150, 150-200, 200-250 e 250-300 cm de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-avevém-soja (Az-Mi-Az-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Ponta Grossa/PR.

Layer (cm)	Tr-So	Av-Mi-Tr-So	Er-Mi-Tr-So	Er-Mi-Av-So-Tr-So	Az-Mi-Az-So	Alf-Mi	Aberto
Concentração de Nitrogênio (g N kg ⁻¹)							
0-5	2,84 b	3,10 b	2,96 b	3,08 b	3,45 a	3,27 a	2,88 b
5-10	1,64 c	1,59 c	1,76 b	1,87 b	2,03 a	1,80 b	1,80 b
10-20	1,08 b	1,14 b	1,15 b	1,19 a	1,20 a	1,26 a	1,14 b
20-30	0,90 n.s.	0,96 n.s.	0,86 n.s.	0,95 n.s.	0,89 n.s.	0,96 n.s.	0,91 n.s.
30-50	0,67 b	0,71 b	0,76 a	0,68 b	0,70 b	0,74 a	0,67 b
50-75	0,55 b	0,55 b	0,51 b	0,56 b	0,53 b	0,61 a	0,52 b
75-100	0,39 b	0,42 b	0,43 b	0,42 b	0,41 b	0,48 a	0,39 b
100-125	0,29 n.s.	0,31 n.s.	0,31 n.s.	0,33 n.s.	0,31 n.s.	0,37 n.s.	0,30 n.s.
125-150	0,22 b	0,26 a	0,23 b	0,23 b	0,22 b	0,27 a	0,23 b
150-200	0,18 b	0,18 b	0,21 a	0,19 b	0,16 b	0,22 a	0,17 b
200-250	0,14 b	0,15 b	0,18 a	0,17 a	0,12 b	0,13 b	0,13 b
250-300	0,15 a	0,14 a	0,16 a	0,15 a	0,11 b	0,14 a	0,12 b

* significativo em relação ao tratamento testemunha com o sistema de culturas Tr-So em sucessão. n.s.: não significativo. As letras minúsculas demonstram as diferenças entre os tratamentos (p<0,05).

FONTE: A autora (2024).

Figura 2. Estoques de nitrogênio nas camadas de 0-30 cm (A), 0-100 cm (B), 0-200 cm (C) e 0-300 cm (D) de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-avevém-soja (Az-Mi-Az-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Número dentro de cada barra indica a taxa de acúmulo ($\text{Mg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Ponta Grossa/PR.



Fonte: A autora (2024).

TABELA 3. Taxas de sequestro de carbono ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) nas camadas de 0-30, 0-100, 0-200 e 0-300 cm de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-avevém-soja (Az-Mi-Az-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Ponta Grossa/PR.

Camada (cm)	Tr-So	Av-Mi-Tr-So	Er-Mi-Tr-So	Er-Mi-Av-So-Tr-So	Az-Mi-Az-So	Alf-Mi	Aberto
0-30	0,0	0,10 *	-0,01 n.s.	0,14 *	0,22 *	0,18 *	0,09 *
0-100	0,0	0,15 n.s.	0,06 n.s.	0,19 *	0,32 *	0,29 *	0,08 n.s.
0-200	0,0	0,23 n.s.	-0,03 n.s.	0,17 n.s.	0,33 *	0,49 *	0,08 n.s.
0-300	0,0	0,30 *	0,05 n.s.	0,18 n.s.	0,29 *	0,58 *	0,14 n.s.

* significativo em relação ao tratamento testemunha com o sistema de culturas Tr-So em sucessão. n.s.: não significativo. As letras minúsculas demonstram as diferenças entre os tratamentos ($p < 0,05$).

FONTE: A autora (2024).

Alguns fatores podem explicar o fato de não ter havido um padrão claro de efeito de sistemas de culturas com plantas de cobertura e milho sobre os estoques de carbono e nitrogênio no solo em relação ao trigo-soja. O primeiro fator pode ser o teor originalmente alto de matéria orgânica do solo (MOS) do local, em torno de 4% nos primeiros 20 cm (considerando a média ponderada de concentração de C nas camadas até 20 cm do Tr-So, Tabela 1), o que dificulta o incremento adicional de carbono ao solo. Regiões subtropicais frias e altitude elevada, como da área experimental (temperaturas médias durante o ano entre 15 °C e 22 °C; altitude de 877 m), favorecem o acúmulo de matéria orgânica no solo devido à baixa atividade microbiológica reduzindo a taxa de decomposição da biomassa, que sofre influência de temperatura e umidade. Em temperaturas mais baixas, os microrganismos decompositores, como fungos e bactérias, têm sua atividade metabólica menos eficiente, postergando a mineralização do carbono. É fundamental destacar o papel da microbiota do solo no ciclo do carbono, participando de forma ativa e direta nos processos de ciclagem de nutrientes e nos fluxos de gases, como o CO₂. A liberação do carbono do solo para a atmosfera ocorre por meio da respiração microbiana, processo intensificado pelo aumento da temperatura, que acelera a decomposição (MENDES et al., 2017). Considerando que a quantidade de matéria orgânica no solo é determinada pelo balanço entre a adição de material orgânico e a taxa de decomposição, o aumento da incorporação de carbono ao solo pode modificar esse balanço, resultando em um incremento em seus teores. No entanto, esse efeito ocorre apenas se as perdas de carbono decorrentes do manejo do solo forem inferiores à quantidade adicionada (GONÇALVES & CERETTA, 1999).

Outro fator pode ter sido a declividade baixa de 3,4% da área, o que deve ter reduzido consideravelmente o risco e a ocorrência de erosão hídrica. Logo, o fato de apresentar risco baixo para erosão, leva à preservação da matéria orgânica do solo. Entende-se como risco de erosão a probabilidade de ocorrência de erosão de maneira acelerada a curto prazo, ou seja, o quão suscetível o solo está a este processo, e o risco de erosão do solo é conferido aos fatores como relevo, uso e cobertura do solo e erosão natural (TORRES et al., 2014; PIRES et al., 2023). Wang et al. (2019) relataram que as perdas ou ganhos de matéria orgânica incrementada via cultivo são dependentes da posição topográfica.

Esses fatores, juntamente com os demais mencionados, sugerem que os sistemas de culturas com inclusão de plantas de cobertura no inverno e milho no verão

não apresentaram diferenças significativas em comparação à sucessão trigo-soja o que também pode ser atribuído ao bom manejo em toda a área experimental, caracterizado pela ausência de revolvimento do solo devido ao plantio direto e pelo constante incremento de biomassa proporcionado pela rotação de culturas. Hernani et al. (1999) compararam diferentes sistemas de manejo do solo, relatando que o plantio direto perdeu cerca de 6 vezes menos fósforo e matéria orgânica do solo, comparado com a utilização de gradagem, reforçando que o manejo inadequado acarreta perdas de MOS tanto via erosão hídrica, quanto por decomposição. Esse fato reforça que, em condições conservacionistas, mesmo sistemas de culturas com menor diversidade e menor aporte de biomassa, como trigo-soja, podem exercer influência significativa no sequestro e no acúmulo de carbono no solo.

Em outros estudos, como o de Neto et al. (2009), a sucessão Tr-So apresentou menor acúmulo de carbono no solo, cujo sistema apresentou estoque de carbono de aproximadamente 52 t ha^{-1} aos 22 anos de avaliação para a camada de 0 a 20 cm de profundidade, sendo inferior ao sistema de sucessão milho-trigo que obteve valores para estoque de carbono em aproximadamente 59 t ha^{-1} , o que demonstra sobre a capacidade reduzida de produção de biomassa ocasionada por culturas como a soja e o trigo. Contrariando nossos resultados, sistemas de culturas com a inclusão de plantas de cobertura leguminosas aumentaram os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total em um Latossolo da região sul do Brasil, onde o sistema com a utilização de milho + mucuna cinza obtiveram maiores estoques de carbono orgânico na camada de 0-20 cm ($61,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) diferenciando do sistema sem plantas de cobertura (BAYER et al., 2003). Qin et al. (2023) relataram o aumento de carbono orgânico total ($0,33 \pm 0,06 \text{ Mg C ha}^{-1}$) ocasionado por culturas de coberturas leguminosas e não leguminosas em Illinois, EUA.

Nesta mesma área, Albuquerque et al. (2015) reportaram taxas de sequestro de carbono ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em 0,33 no sistema Er-Mi-Tr-So na camada de 20-100 cm e perda de 0,04 neste mesmo sistema na camada de 0-20 cm. Contrariando, em termos de sequestro, os resultados obtidos para este sistema dentro desta avaliação cujo sistema Er-Mi-Tr-So não diferenciou do sistema referência para todas as camadas. Contudo, as taxas de sequestro observadas no sistema Er-Mi-Av-So-Tr-So ($0,19 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) tiveram um aumento quando comparado com o estudo anterior realizado por Albuquerque et al. (2015) ($\pm 0,12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Ao se tratar dos estoques de C, Albuquerque et al. (2015), avaliando aos 21 anos de experimento, não

encontraram diferenças entre os sistemas com uso de culturas de cobertura no inverno e milho no verão em relação a sucessão trigo-soja na camada de 0-100 cm, entretanto, aos 34 anos de avaliação (presente estudo) pôde-se observar uma tendência do sistema Er-Mi-Av-So-Tr-So em se destacar do sistema referência e dos demais com uso de culturas de cobertura + milho. Aos 21 anos de avaliação, os estoques de N também apresentaram destaque para o sistema Er-Mi-Av-So-Tr-So em relação à sucessão trigo-soja e aos demais sistemas com culturas de cobertura + milho, repetindo a tendência de destaque aos 34 anos de avaliação para a camada de 0-100 cm (ALBUQUERQUE et al., 2015). A avaliação realizada aos 21 anos considerou a camada de 0-100 cm, enquanto a avaliação atual, aos 34 anos, se estendeu até 300 cm. Os resultados para os estoques de N nos sistemas com culturas de cobertura no inverno e milho no verão revelaram tendências interessantes de aumento além de 1 metro. Na camada de 0-200 cm, todos os sistemas com culturas de cobertura apresentaram estoques de N superiores ao sistema de referência. Já na camada de 0-300 cm, destacou-se a inclusão de leguminosas nos sistemas com plantas de cobertura no inverno e milho no verão, evidenciando seu potencial na fixação de nitrogênio no solo.

3.2 AZEVÉM E ALFAFA PARA FENO

As concentrações de carbono ao longo das camadas de solo até 3 m foram similares ou maiores nos sistemas com forrageiras Az-Mi-Az-So e Alf-Mi em relação ao sistema referência Tr-So, e por vezes em relação aos sistemas com plantas de cobertura de inverno (TABELA 1). Maiores concentrações de carbono nos sistemas com forrageiras foram observadas principalmente entre 5 e 20 cm, e entre 75 e 125 cm (TABELA 1). Com isso, estoques de carbono em 0-30 cm foram estatisticamente maiores nos sistemas Az-Mi-Az-So (81,8 Mg C ha⁻¹) e Alf-Mi (80,5 Mg C ha⁻¹) em relação ao Tr-So (74,2 Mg C ha⁻¹), e também em relação aos sistemas Av-Mi-Tr-So (77,7 Mg C ha⁻¹), Er-Mi-Tr-So (74,0 Mg C ha⁻¹) e Er-Mi-Av-So-Tr-So (78,9 Mg C ha⁻¹) (Figura 1A). Mesma tendência foi observada na camada de 0-100 cm, onde os estoques de carbono foram maiores em Az-Mi-Az-So (167,8 Mg C ha⁻¹) e Alf-Mi (166,9 Mg C ha⁻¹) comparado com Tr-So (156,9 Mg C ha⁻¹), Av-Mi-Tr-So (161,8 Mg C ha⁻¹) e Er-Mi-Tr-So (159,0 Mg C ha⁻¹); com exceção do sistema Er-Mi-Av-So-Tr-So (163,3 Mg C ha⁻¹) (Figura 1B). Em 0-200 cm, os estoques de carbono também foram maiores em

Alf-Mi (231,9 Mg C ha⁻¹) e Az-Mi-Az-So em relação ao Tr-So (215,1 Mg C ha⁻¹), Av-Mi-Tr-So (258,2 Mg C ha⁻¹), Er-Mi-Tr-So (249,6 Mg C ha⁻¹) e Er-Mi-Av-So-Tr-So (253,9 Mg C ha⁻¹) (Figura 1C). Na camada de 0-300 cm, os sistemas Alf-Mi (267,5 Mg C ha⁻¹) e Az-Mi-Az-So (257,7 Mg C ha⁻¹) continuaram sendo superiores em relação aos sistemas Tr-So (247,9 Mg C ha⁻¹), Er-Mi-Tr-So (249,6 Mg C ha⁻¹) e Er-Mi-Av-So-Tr-So (253,9 Mg C ha⁻¹); com exceção do Av-Mi-Tr-So (258,2 Mg C ha⁻¹) que não diferiu de Az-Mi-Az-So (257,7 Mg C ha⁻¹) (Figura 1D).

As taxas de sequestro de carbono variaram em função dos sistemas de culturas até 3 m, sendo que os sistemas Alf-Mi (0,58 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹) e Az-Mi-Az-So (0,29 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹) obtiveram as maiores taxas comparadas aos sistemas Er-Mi-Tr-So (0,05 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹) e Er-Mi-Av-So-Tr-So (0,18 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹), exceto ao sistema Av-Mi-Tr-So (0,30 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹) (Figura 1D).

As concentrações de nitrogênio variaram de 3,45 g N kg⁻¹ a 0,11 g N kg⁻¹ até 3 m em todos os sistemas. Na camada de 0-5 cm, os sistemas Az-Mi-Az-So (3,45 g N kg⁻¹) e Alf-Mi (3,27 g N kg⁻¹) apresentaram valores significativos em relação aos demais sistemas Tr-So (2,84 g N kg⁻¹), Av-Mi-Tr-So (3,10 g N kg⁻¹), Er-Mi-Tr-So (2,96 g N kg⁻¹) e Er-Mi-Av-So-Tr-So (3,08 g N kg⁻¹), e de modo geral, o sistema Alf-Mi apresentou concentrações maiores entre as camadas de 30 a 200 cm para os demais sistemas, exceto para Av-Mi-Tr-So e Er-Mi-Tr-So em algumas camadas (TABELA 3). Os estoques de nitrogênio em 0-100 cm foram maiores para ambos os sistemas Alf-Mi (9,92 Mg N ha⁻¹) e Az-Mi-Az-So (9,50 Mg N ha⁻¹) comparados ao Tr-So (8,89 Mg N ha⁻¹), Av-Mi-Tr-So (9,28 Mg N ha⁻¹) e Er-Mi-Tr-So (9,27 Mg N ha⁻¹), com exceção do sistema Er-Mi-Av-So-Tr-So (9,51 Mg N ha⁻¹) (Figura 2B). Na camada de 0-200 cm, os estoques de N foram iguais ou maiores nos sistemas Alf-Mi (12,95 Mg N ha⁻¹) e Az-Mi-Az-So (11,92 Mg N ha⁻¹) em relação aos sistemas Er-Mi-Av-So-Tr-So (12,18 Mg N ha⁻¹), Er-Mi-So-Tr (12,02 Mg N ha⁻¹), Av-Mi-Tr-So (11,93 Mg N ha⁻¹) e Tr-So (11,38 Mg N ha⁻¹), respectivamente (Figura 2C). As taxas de acúmulo de nitrogênio variaram de -5,93 Mg N ha⁻¹ ano⁻¹ (Aberto) e 45,96 Mg N ha⁻¹ ano⁻¹ (Alf-Mi) até 3 m de profundidade (Figura 2).

Sistemas com uso de forrageiras, como azevém e alfafa para produção de feno, evidenciaram, portanto, uma capacidade em acumular carbono no solo em relação ao sistema de sucessão Tr-So, em relação aos sistemas com plantas de cobertura de inverno; possivelmente por meio da produção de biomassa da raiz e liberação de exsudados, estimulados pelo processo de corte da parte aérea de ambas

as forrageiras (azevém e alfafa), tal processo provoca o crescimento do sistema radicular. A associação de forrageiras com culturas anuais, como o milho, promove um incremento significativo na produção de biomassa, além da reciclagem e disponibilização de nutrientes (SILVA, 2023; DALLA CÔRT et al., 2021). Quando submetidas ao corte, essas forrageiras utilizam da reserva de carbono para o crescimento das novas folhas e intensifica o crescimento de raízes, logo esse carbono reservado será utilizado para o desenvolvimento radicular e para exsudação (KUZYAKOV et al., 2002). Nesse momento em que há incentivo para o desenvolvimento radicular causado pelo processo de corte, há aumento das atividades na rizosfera, explicado pelo fato de as raízes das plantas liberarem exsudados de forma contínua, estimulando a atividade microbiana no solo (SALTON & TOMAZI, 2014). Outro aspecto relevante é a qualidade do material orgânico proveniente do sistema radicular das forrageiras, caracterizado por compostos resistentes à degradação, como a lignina, resultando em menores taxas de decomposição e conseqüentemente maior aporte de carbono no solo (CAMACHO, 2021; POTTHAST et al., 2010; SOUSSANA et al., 2004).

Os resultados promissores obtidos nos sistemas que utilizam forrageiras para corte, como azevém e alfafa, no que compete à tendência de acúmulo de carbono no solo em maiores profundidades, podem ser atribuídos à capacidade específica de cada cultura, como demonstra Mwafulirwa et al. (2019) que observaram maior ganho líquido de carbono no solo (1,8 x) nos tratamentos com resíduos de raiz de azevém, do que resíduo de brotos, justificando que quando há uma proporção maior de C/N no tecido vegetal é capaz de aumentar os estoques de C ao longo do tempo. Outro estudo observou os fluxos de carbono da rizosfera do azevém, que registou entrada de carbono no solo em cerca de 930 kg C ha⁻¹ durante 47 dias de crescimento do azevém (DOMANSKI et al., 2001).

Acerca da cultura da alfafa, estudos demonstram sua atuação em monocultivo em comparação com consórcio com outro grupo funcional, onde a alfafa obteve produção de biomassa de raízes de 1.601,94 g/m² e estoque de carbono na biomassa das raízes de 520,64 g/m² em até 150 cm de profundidade do solo (LI et al., 2019). Os resultados deste estudo podem ser justificados possivelmente também pelo potencial da cultura da alfafa em aumentar o COT em mais de 20% (ZHOU et al., 2015; XIAOLI et al., 2010) correlacionado a sua capacidade de fixação de nitrogênio o que possibilita maior incremento de carbono no solo. Ao tratar-se do uso da alfafa,

espera-se alta eficiência na FBN, podendo fixar até 650 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ sob diferentes manejos (ISSAH et al., 2020). Em 2004, Chen et al. encontraram valores de FBN de 39,4 a 117,5 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ em cultivo a campo de alfafa e outras gramíneas. Singh et al. (2023) encontraram estoques de carbono em grandes profundidades do solo, onde a presença da alfafa em sistema de rotação, em comparação com cultivo de milho contínuo, apresentou 41,38 Mg C ha⁻¹ até 7 m de profundidade. Resultados que corroboram com os efeitos positivos da cultura da alfafa para o sequestro de carbono, tendo como principal atuação sua produção de biomassa do sistema radicular, capaz de atingir grandes profundidades no solo, quando as características deste forem favoráveis, incrementando carbono via exsudados. Outro fator que pode explicar os níveis atingidos pela cultura da alfafa é o fato de outras avaliações observarem a inclusão de leguminosa em sistemas de culturas, que ocasiona efeitos positivos nos estoques de carbono possivelmente devido ao incremento de adições de resíduos (AMADO et al., 2001; AMADO et al., 1998; BAYER et al., 2000b).

Maiores valores de entrada de carbono no solo foram observados por meio do sistema radicular, o que evidencia a importância do uso de culturas com sistemas radiculares agressivos e abundantes, como as forrageiras. Essas culturas direcionam uma parcela significativa do carbono fixado pela fotossíntese para as raízes, em comparação às culturas anuais, tornando-se, assim, mais eficientes no aumento dos estoques de carbono no solo (LOVATO et al., 2004). Correlaciona-se o estoque de carbono com a adição de raízes devido ao papel fundamental que elas desempenham se tratando de incorporação de carbono no solo, uma vez que as raízes se acumulam na matriz do solo (ALBUQUERQUE et al., 2015) onde ocorrem os processos essenciais de retenção de nutrientes e atividade microbiana. O alto teor de argila presente neste solo também pode ter contribuído para o acúmulo de carbono em profundidade, devido às interações de alta energia com os compostos orgânicos, determinando o armazenamento de matéria orgânica e contribuindo para a estabilização do carbono a longo prazo, protegido física e quimicamente (ALBUQUERQUE et al., 2015).

Os sistemas com uso de forrageiras de corte, como o azevém e a alfafa, apresentaram forte tendência em estocar carbono no solo para além de 1 m de profundidade. Tradicionalmente, o maior volume de experimentações, são realizadas amostragem em profundidades até 1 metro para avaliação do acúmulo de carbono no solo, por se tratar da área ativa do solo, ou seja, onde acontecem a maioria dos

processos biológicos. Entretanto, neste experimento a amostragem ocorreu até 3 metros para que pudesse observar as interações em grandes profundidades, haja visto que trabalhos publicados anteriormente desta mesma área, constavam amostragem até 1 m, como Albuquerque et al. (2015) que observaram maior acúmulo de carbono para o sistema Alf-Mi na camada de 0-100 cm ($182,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$) comparado ao sistema referência Tr-So ($172,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$), e o maior volume de resultados promissores para acúmulo de carbono no solo aconteceram nas camadas além de 20 cm. Estimam que a quantidade de carbono presente entre 1 e 8 m de profundidade, equivale ao carbono presente na camada de 0-30 cm, devido ao fato de diminuir as concentrações substancialmente no decorrer do perfil (TRUMBORE & DE CAMARGO, 2009; SILVA et al., 2023). Isso ocorre, principalmente, porque a maior parte da biomassa das raízes está concentrada na camada de 0-20 cm, o que faz com que a atividade biológica seja predominantemente nessa região (SILVA et al., 2023). Para determinar a profundidade a ser analisada, é necessário consultar dados anteriores e alinhá-los aos objetivos da experimentação. As evidências de que alguns sistemas de culturas têm potencial para acumular carbono em profundidades superiores a 1 metro ressaltam a importância de compreender as transformações do carbono no solo.

4 CONCLUSÕES

Não houve evidência conclusiva de que a introdução de culturas de cobertura no inverno, como aveia preta e ervilhaca, e milho no verão contribua para o aumento dos estoques de carbono e nitrogênio no solo em comparação à sucessão trigo-soja. Isso, no entanto pode estar associado ao fato de a área experimental ter solo com teores originalmente altos de matéria orgânica do solo, estar numa topografia plana e com baixo risco de erosão hídrica, e ser bem manejada mesmo no sistema referência.

Por outro lado, sistemas de culturas com uso de forrageiras para corte, como azevém e alfafa, demonstraram eficiência em acumular carbono e nitrogênio no solo em profundidades superiores a 1 metro, quando comparados ao sistema de sucessão trigo-soja, e até mesmo em relação aos sistemas com plantas de cobertura de inverno. Esse resultado destaca a influência do sistema radicular no aporte de carbono e nitrogênio em camadas profundas do solo, possivelmente em decorrência do processo

de corte e rebrote ao qual as forrageiras avaliadas foram submetidas, fator que promove o desenvolvimento radicular.

Os valores de estoque de carbono e nitrogênio encontrados em profundidades superiores a 1 metro, especialmente nos sistemas de culturas que utilizam forrageiras para corte, indicam o acúmulo de carbono em camadas mais profundas do solo devido à atuação do sistema radicular. Isso destaca a importância de avaliações em maiores profundidades para compreender melhor as transformações do carbono no solo.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M.A. DIECKOW, J. SURDO, A. PIVA, J. T. BAYER, C. MOLIN, R. PERGHER, M. RIBEIRO-JUNIOR, P. J. Carbon and nitrogen in a ferralsol under zero-tillage rotations based on cover, cash or hay crops. *Soil Use and Management*. 2015.

ALMEIDA, P. M. Efeito do cultivo de alfafa sobre a ciclagem de nutrientes para a cultura do milho. Extraído da dissertação apresentada à Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco/PR. 2022. Disponível em: <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28120/1/efeitosdocultivodealfafa.pdf>>

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:189-197, 2001.

AMADO, T.J.C.; FERNANDES, S.B.V. & MIELNICZUK, J. Nitrogen availability as affected by ten years of cover crop and tillage systems in southern Brazil. *J. Soil Water Conserv.*, 53:268-272, 1998.

AZAMAT, S.; ILGIZ, A.; RUSLAN, S.; MIRSAYAPOV, R.; ILYUSYA, G.; TUKTAROVA, I.; BELAN, L. Assessing and mapping of soil organic carbon at multiple depths in the semi-arid trans-ural steppe zone. *Geoderma Regional*, Volume 38. 2024. DOI: 10.1016/j.geodrs.2024.e00855.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L. & FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 54:101-109, 2000b.

BAYER, C.; SPAGNOLLO, E.; WILDNER, L. DO P.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. Incremento de carbono e nitrogênio num latossolo pelo uso de plantas estivais para cobertura do solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.33, n.3, p.469-475, mai-jun, 2003. DOI: 10.1590/S0103-84782003000300012.

CORADO NETO, F. da C.; SAMPAIO, F. de M. T.; VELOSO, M. E. da C.; MATIAS, S. S. R.; ANDRADE, F. R. & LOBATO, M. G. R. (2015). Variabilidade espacial dos agregados e carbono orgânico total em Neossolo Litólico Eutrófico no município de Gilbués, PI. *Revista de Ciências Agrárias*, 8(1), 75-83.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ACORDI, Z. & MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, 32(1), p. 323-332. 2008.

DALLA CÔRT, A. S.; FEITOSA, P. B.; PACHECO, L. P.; GRECO, T. M.; SILVA, I. D. F.; DE SOUZA, E. D.; SANTOS, L. F.; PETTER, F. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Accumulation and efficiency of nutrient use in crop systems in second crop under no-tillage. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v.56, e01879, 2021. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.01879.

DOMANSKI, G.; KUZYAKOV, Y.; SINIAKINA, S. V.; STAHR, K. Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne*). *J. Plant Nutr. Soil Sci*, 164, 381-387, 2001. DOI: 10.1002/1522-2624(200108)164:43.0.CO;2-5.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA SOLOS. Mapas trazem novas informações sobre estoque de carbono nos solos brasileiros. Pesquisa, desenvolvimento e inovação recursos naturais agricultura de baixo carbono. 2021. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/66040634/mapas-trazem-novas-informacoes-sobre-estoque-de-carbono-nos-solos-brasileiros>>

FERNANDEZ, I.; MAHIEU, N.; CADISCH, G. Carbon isotopic fractionation during decomposition of plant materials of different quality. *Global Biogeochem. Cy.* 17 1075. 2003.

GONÇALVES, C. N.; CERETTA, C. A. Plantas de cobertura de solo antecedendo o milho e seu efeito sobre o carbono orgânico do solo, sob plantio direto. *Revista*

Brasileira de Ciência do Solo, 23:307-313, 1999. DOI: 10.1590/s0100-06831999000200015.

HERNANI, L. C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, W. M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 23:145-154, 1999. DOI: 10.1590/S0100-06831999000100018.

ISSAH, G.; SCHOENAU, J. J.; LARDNER, H. A.; CAVALEIRO, J. D. Nitrogen fixation and resource partitioning in alfalfa (*Medicago sativa* L.), cicer milkvetch (*Astragalus cicer* L.) and sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.) using ¹⁵N enrichment under controlled environment conditions. Agronomy 2020, 10, 1438; doi:10.3390/agronomy10091438.

JOHNSON, J. M. F. BARBOUR, N. W. WEYERS, S. L. Chemical Composition of Crop Biomass Impacts its Decomposition. USDA – Agricultural Research Service North Central Soil Conserv. Res. Lab. 2007.

KUZYAKOV, Y.; BIRYUKOVA, O. V.; KUZNETZOVA, T. V.; MÖLTER, K.; KANDELER, E.; STAHR, K. Carbon partitioning in plant and soil, carbon dioxide fluxes and enzyme activities as affected by cutting ryegrass. Biol Fertil Soils, 2002. DOI 10.1007/s00374-002-0480-6.

LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management, 220, 242-258. 2005.

LI, Q.; ZHOU, D.; DENTON, M. D.; CONG, S. *Alfalfa* monocultures promote soil organic carbon accumulation to a greater extent than perennial grass monocultures or grass-alfalfa mixtures. Ecological Engineering 131 (2019) 53–62. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.03.002.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 28:175-187, 2004.

CHEN, W.; MCCAUGHEY, W. P.; GRANT, C. A. Pasture type and fertilization effects on N₂ fixation, N budgets and external energy inputs in western Canada. *Soil Biology & Biochemistry* 36 (2004) 1205–1212. DOI: 10.1016/j.soilbio.2004.04.003.

MACHADO, P. L. O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Quim. Nova*, Vol. 28, No. 2, 329-334, 2005.

MENDES, R.; TAKETANI, N. F.; TAKETANI, R. G. Efeito do aquecimento global sobre a comunidade microbiana do solo. Efeito do aquecimento global sobre a comunidade microbiana do solo. *Aquecimento Global e Problemas Fitossanitários*, Brasília, ed. 1, p. 177-203, 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1087839/1/2017CL10.pdf>

MORAES, A. & PALHANO, A. L. *Fisiologia da produção de plantas forrageiras*. UNESP. 2002.

MWAFULIRWAA, L.; BAGGSA, E. M.; MORLEYB, N.; Paterson, E. Ryegrass root and shoot residues differentially affect short-term priming of soil organic matter and net soil C-balance. *European Journal of Soil Biology* 93. 2019. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2019.103096.

NETO, M. S.; FILHO, S. de P. V.; PICCOLO, M. de C.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C.C. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). I – Sequestro de carbono no solo. Seção VI - Manejo e conservação do solo e da água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:1013-1022, 2009. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/LKFmpFWn3Y4kbmTppYWh37N/?lang=pt&format=pdf> >

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). Mapa de agência da ONU mostra quantidade de reservas de carbono nos solos do mundo. 2018. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/78831-mapa-de-ag%C3%A2ncia-da-onu-mostra-quantidade-de-reservas-de-carbono-nos-solos-do->

SECRETI, M. L. Aporte de carbono ao solo por sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas. Parte da tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal da Universidade Federal da Grande Dourados. 2017.

SILVA, J. A. G. e. Plantas de cobertura de forrageiras tropicais: produção de biomassa, ciclagem de nutrientes, alterações fisiológicas e produtividade da soja. Extraído da tese apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde/GO. 2023.

SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DE ANDRADE, C. A.; MARTIN-NETO, L.; BETTIOL, W. Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Tradução. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 788: il. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1153147/entendendo-a-materia-organica-do-solo-em-ambientes-tropical-e-subtropical>.

SILVA, G. de L. S.; CARNEIRO, M. S. de S.; FURTADO, F. M. V.; SANTOS, F. J. de S.; DA SILVA, M. S.; COSTA, N. de L.; MAGALHÃES, J. A. Algumas considerações sobre o sistema radicular de plantas forrageiras. PUBVET, Londrina, V. 8, N. 6, Ed. 255, Art. 1687, Março, 2014.

SINGH, A.; AFZAL, T.; WOODBURY, B.; WORTMANN, C.; IQBAL, J. Alfalfa in rotation with annual crops reduced nitrate leaching potential. J. Environ. Qual. 2023; 52:930–938. DOI: 0.1002/jeq2.20473.

SIX, J.; ELLIOT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. Soil Biology & Biochemistry 32 2099-2103. 2000.

SLEUTEL, S.; DE NEVE, S.; HOFMAN, G. Estimates of carbon stock changes in Belgian cropland. Soil Use and Management, 19(2), 166-171. 2006.

SMITH, P. Land use change and soil organic carbon dynamics. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 81(2), 169-178, Jun. 2008.

SOUSSANA, J. F.; LOUISEAU, P.; VUICHARD, N.; CESCHIA, E.; BALESSENT, J.; CAVALEIRO, T.; ARROUAYS, D. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management* (2004) 20, 219-230. DOI: 10.1079/SUM2003234.

TORRES, F.T.P.; PIRES, L.V.; JÚNIOR, S.A.; OLIVEIRA, N.A.; OLIVEIRA BARROS, K.; MACHADO, C.R.; SIILVA, E. A susceptibilidade à erosão como subsídio ao planejamento urbano: estudo de caso do município de Ubá-MG. *Revista Agrogeoambiental*, v. 6, n. 1, p. 87-99, 2014.

TRUMBORE, S.; DE CAMARGO, P. B. Dinâmica do carbono no solo. *Amazonia and Global Change, Geophysical Monograph Series 186*, 2009, by the American Geophysical Union. DOI: 10.1029/2008GM000741.

WANG, X.; JELINSKI, N. A.; TONER, B.; YOO, K. Long-term agricultural management and erosion change soil organic matter chemistry and association with minerals. *Science of The Total Environment*, Volume 648, 15 January 2019, Pages 1500-1510. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.110.

WINCK, B. R. VEZZANI, F. M. DIECKOW, J. FAVARETTO, N. MOLIN, R. Carbono e nitrogênio nas frações granulométricas da matéria orgânica do solo, em sistemas de culturas sob plantio direto. Parte da dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2014.

XIAOLI, F.; MINGAN, S.; XIAORONG, W.; ROBERT, H. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China. *Geoderma* 155 (2010) 31–35. DOI:10.1016/j.geoderma.2009.11.020.

ZHOU, Z.; ZHANG, X.; GAN, Z. Changes in soil organic carbon and nitrogen after 26 years of farmland management on the Loess Plateau of China. *J Arid Land* (2015) 7(6): 806–813. DOI: 10.1007/s40333-015-0051-y.

ANEXO I – RELAÇÃO C/N E DENSIDADE DO SOLO

TABELA 4. Relação C/N nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-75, 75-100, 100-125, 125-150, 150-200, 200-250 e 250-300 cm de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-avevém-soja (Az-Mi-Az-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Ponta Grossa/PR.

Layer (cm)	Tr-So	Av-Mi-Tr-So	Er-Mi-Tr-So	Er-Mi-Av-So-Tr-So	Az-Mi-Az-So	Alf-Mi	Aberto
Relação C/N							
0-5	11,9 b	12,3 a	12,2 a	11,8 b	11,8 b	10,9 c	12,3 a
5-10	14,1 a	15,2 a	13,1 b	13,1 b	13,4 b	13,2 b	13,7 b
10-20	16,8 n.s.	17,0 n.s.	16,2 n.s.	16,1 n.s.	17,0 n.s.	16,7 n.s.	17,0 n.s.
20-30	18,3 n.s.	16,9 n.s.	17,4 n.s.	18,1 n.s.	18,5 n.s.	18,9 n.s.	18,2 n.s.
30-50	19,1 b	19,0 b	18,6 b	19,9 a	19,5 a	18,6 b	19,8 a
50-75	20,2 n.s.	20,5 n.s.	20,2 n.s.	19,4 n.s.	21,3 n.s.	18,5 n.s.	20,5 n.s.
75-100	23,3 n.s.	21,8 n.s.	22,5 n.s.	22,5 n.s.	23,4 n.s.	20,8 n.s.	23,6 n.s.
100-125	23,9 n.s.	22,9 n.s.	21,3 n.s.	22,4 n.s.	24,6 n.s.	21,5 n.s.	23,0 n.s.
125-150	23,8 a	22,0 b	22,8 b	23,6 a	24,1 a	21,7 b	22,4 b
150-200	22,9 a	23,7 a	18,8 b	19,9 b	23,8 a	21,4 b	25,0 a
200-250	20,4 b	22,1 a	18,5 c	18,0 c	22,7 a	22,4 a	24,1 a
250-300	18,0 b	19,1 b	16,2 b	17,7 b	21,4 a	20,8 a	23,0 a

* significativo em relação ao tratamento testemunha com o sistema de culturas Tr-So em sucessão. n.s.: não significativo. As letras minúsculas demonstram as diferenças entre os tratamentos ($p < 0,05$).

FONTE: A autora (2024).

TABELA 5. Densidade do solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-75, 75-100, 100-125, 125-150, 150-200, 200-250 e 250-300 cm de um Latossolo sob os sistemas de culturas trigo-soja (Tr-So), aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So), ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So), azevém-milho-azevém-soja (Az-Mi-Az-So), alfafa-milho (Alf-Mi) e aberto, por 34 anos. Ponta Grossa/PR.

Layer (cm)	Tr-So	Av-Mi-Tr-So	Er-Mi-Tr-So	Er-Mi-Av-So-Tr-So	Az-Mi-Az-So	Alf-Mi	Aberto
Densidade							
0-5	0,98 a	0,94 b	0,96 a	0,98 a	0,92 b	0,93 b	0,94 c
5-10	1,28 a	1,30 a	1,30 a	1,29 a	1,17 b	1,18 b	1,30 a
10-20	1,24 n.s.	1,26 n.s.	1,25 n.s.	1,24 n.s.	1,22 n.s.	1,22 n.s.	1,25 n.s.
20-30	1,26 n.s.	1,24 n.s.	1,27 n.s.	1,25 n.s.	1,28 n.s.	1,27 n.s.	1,26 n.s.
30-50	1,12 a	1,14 a	1,11 a	1,14 a	1,10 b	1,12 a	1,10 b
50-75	1,06 n.s.	1,04 n.s.	1,05 n.s.	1,05 n.s.	1,05 n.s.	1,05 n.s.	1,05 n.s.
75-100	1,06 b	1,08 b	1,04 b	1,06 b	1,09 a	1,03 b	1,06 b
100-125	1,04 n.s.	1,09 n.s.	1,04 n.s.	1,06 n.s.	1,07 n.s.	1,05 n.s.	1,05 n.s.
125-150	1,13 n.s.	1,14 n.s.	1,14 n.s.	1,12 n.s.	1,15 n.s.	1,15 n.s.	1,14 n.s.
150-200	1,21 n.s.	1,19 n.s.	1,21 n.s.	1,21 n.s.	1,23 n.s.	1,21 n.s.	1,21 n.s.
200-250	1,24 b	1,23 b	1,26 a	1,23 b	1,24 a	1,25 a	1,25 a
250-300	1,15 n.s.	1,15 n.s.	1,15 n.s.	1,15 n.s.	1,16 n.s.	1,17 n.s.	1,14 n.s.

* significativo em relação ao tratamento testemunha com o sistema de culturas Tr-So em sucessão. n.s.: não significativo. As letras minúsculas demonstram as diferenças entre os tratamentos ($p < 0,05$).

FONTE: A autora (2024).