

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Estoque de carbono e fósforo influenciam na qualidade do solo com
plantas de cobertura a longo prazo**

Hanrara Pires de Oliveira

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2024**

Hanrara Pires de Oliveira
Engenheira Agrônoma

**Estoque de carbono e fósforo influenciam na qualidade do solo com plantas de
cobertura a longo prazo**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **PAULO SÉRGIO PAVINATO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Oliveira, Hanrara Pires de

Estoque de carbono e fósforo influenciam na qualidade do solo com plantas de cobertura a longo prazo / Hanrara Pires de Oliveira. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2024.

66 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Relação C:P 2. Plantas de cobertura 3. Frações de P 4. Agregados 5. Qualidade do solo I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico essa dissertação ao meus pais, Fausto e Patrícia,
a minha irmã Leticia
e as minhas sobrinhas, Aurora e Violeta
pelo engajamento da minha trajetória profissional

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me dado vida, saúde e força para superar as dificuldades nessa jornada tão almejada.

Aos meus pais pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Agradeço a minha mãe Patrícia, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. Minha inspiração de ideias noturnas. Ao meu pai, Fausto, que apesar de todas as dificuldades me fortaleceu com suas ligações diárias, dando todo suporte necessário para meu bem-estar. A minha irmã Letícia Pires, as minhas sobrinhas Aurora e Violeta. Obrigada por estarem próximos a mim e serem meu refúgio nas horas de solidão.

À minha tia/madrinha Enésia Sirlhe, aos meus avós maternos Divino José Ferreira e Marilene Pires Ferreira e avós paternos Hermenegildo (in memoria) e Dionézia, por todo apoio, orações, encorajamento e em comemorações dos objetivos alcançados, obrigada por serem minha fonte de inspiração.

Ao meu orientador Professor Paulo S. Pavinato, pela orientação, paciência e confiança. Agradeço por fazer parte do seu grupo de pesquisa, e ao incentivo constante, apoio, amizade e até mesmo pelas correções que serviu para meu crescimento.

À Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP-ESALQ) e a todos os professores e colaboradores do Programa em Solos e Nutrição de Plantas, pelo crescimento profissional, intelectual e pessoal adquiridos no curso de mestrado, pois é motivo de muito orgulho fazer parte desta instituição tão renomada.

Aos colaboradores deste projeto de pesquisa e ao Grupo de Estudos em Fertilidade e Adubação (GEFA), por se tornarem minha família em Piracicaba-SP. Obrigada, pelos momentos de distração, companheirismo e auxílio nas análises.

Quero agradecer aos meus amigos da graduação Eduarda e Adilon. Obrigada por todos os conselhos úteis, bem como palavras motivacionais e puxões de orelha. As risadas que compartilhei durante esse momento desafiador no mestrado, também me ajudaram a passar o tempo.

À todos que direta e indiretamente contribuíram para realização desta grande conquista.

Obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO GERAL	9
Referências	11
2. DIFERENÇA NA DISTRIBUIÇÃO E DISPONIBILIDADE DAS FRAÇÕES DE FÓSFORO NOS AGREGADOS DOS SOLOS COM DIFERENTES PLANTAS DE COBERTURA	13
Resumo	13
Abstract.....	13
2.1 Introdução.....	14
2.2 Material e Métodos.....	16
2.2.1 Descrição da área.....	16
2.2.2 Desenho experimental	16
2.2.3 Manejo da área	17
2.2.4 A biomassa das plantas e análise nutricional.....	18
2.2.5 Amostragem de solo	18
2.2.6 Estabilidade dos agregados.....	18
2.2.7 Fracionamento químico de P nos agregados	19
2.2.8 Análise biológica	19
2.2.9 Análise estatística	20
2.3. Resultados.....	20
2.3.1 Fracionamento do P nos agregados	20
2.3.2 Frações de P no perfil de solo.....	25
2.3.3 Absorção de P e atividade microbiana	27
2.4 Discussão.....	28
2.4.1 Frações de P dentro dos agregados.....	29
2.4.2 Frações de P no solo homogêneo	30
2.4.3 Massa seca e acúmulo do P nos tecidos	31
2.4.4 Bulk Soil vs indicadores microbianos	33
2.5 Conclusão	33
Referências	34
Apêndices	38

3. ESTOQUES DE CARBONO, FÓSFORO E QUALIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DE PLANTA DE COBERTURA E ADUBAÇÃO FOSFATADA.....	42
Resumo	42
Abstract	42
3.1 Introdução	43
3.2 Material e Métodos	44
3.2.1 Descrição da área	44
3.2.2 Desenho experimental e tratamentos.	45
3.2.3 Indicadores químicos	45
3.2.4 Indicadores físicos.....	45
3.2.5 Indicadores biológicos	46
3.2.6 Fracionamento físico da matéria orgânica	47
3.2.7 Estoque de carbono e fósforo no solo	47
3.2.8 Indicadores de qualidade do solo	48
3.2.9 Análise estatística.....	48
3.3 Resultados	48
3.3.1 Estoque de C e P e relação C:P	48
3.3.2 Indicadores físicos.....	50
3.3.3 Indicadores microbianos	55
3.3.4 Indicadores químicos	55
3.3.5 Índice de qualidade do solo.....	57
3.4. Discussão	60
3.4.1 Estoques de C, N e P associados as plantas de cobertura	60
3.4.2 Índice de qualidade do solo.....	61
3.5 Conclusão.....	62
Referências.....	63
Apêndices.....	66

RESUMO

Estoque de carbono e fósforo influenciam na qualidade do solo com plantas de cobertura a longo prazo

Compreender a relação entre o fósforo (P) e o carbono (C) são essenciais para melhorar a qualidade do solo, promovendo aumento na ciclagem de nutrientes e aumento do estoque de C no solo. Os estudos ainda são escassos no que diz respeito das implicações do sequestro de C para a disponibilidade de P do solo. Assim, os objetivos deste estudo em primeiro lugar é determinar a influência das plantas de cobertura de inverno na estabilidade dos agregados e se essa alteração reflete na dinâmica de P nos agregados, e em segundo lugar sintetizar os resultados sobre a relação entre C e P, o impacto no estoque de C, a disponibilidade do P no sistema agrícola e a influência na qualidade do solo. Com isso, em estudo realizado na região sul do Brasil, os tratamentos são compostos por seis plantas de coberturas (ervilhaca, tremoço-branco, nabo forrageiro, azevém, aveia-preta e centeio) e um pousio com dessecação frequente das plantas espontâneas. Todas receberam adubação fosfatada solúvel (superfosfato simples – SFS) e um pousio adicional foi incluído, sem aplicação de fertilizante fosfatado. Foram coletadas amostras deformadas e semi-deformadas para avaliação dos atributos químicos, físicos e biológicos. No Capítulo 1, observou-se que as frações de P diferiram em resposta as classes de agregados. Nos macroagregados, para o Pi lábil o destaque foi para a aveia-preta com um aumento de 63,1% em relação ao pousio, enquanto no Po lábil a aveia preta apresentou baixos valores de P não diferindo do pousio. Nos microagregados, na fração do Pi lábil a aveia e o azevém se sobressaíram, com 52,8% e 48,2% ao pousio, entretanto apenas o centeio não diferiu do pousio na fração Po lábil. Na fosfatase ácida, o tremoço-branco foi superior às plantas de cobertura com maior disponibilidade de P no sistema, provocando um aumento da produção de biomassa e acúmulo de P nos tecidos foliares nas plantas de cobertura. No capítulo 2, as plantas de cobertura impactaram no estoque de C e na relação C:P do solo. Além disso, o C ligado a MOAM é favorável ao armazenamento do C ao longo de décadas. Estes resultados demonstram uma ligação entre a estabilidade dos agregados, ao estoque de C, atividade enzimática e a biomassa microbiana proporcionando sustentabilidade dos agroecossistemas interferindo no aumento do índice de qualidade do solo.

Palavras-chave: Relação C:P, Plantas de cobertura, Frações de P, Agregados, Qualidade do solo

ABSTRACT

Carbon and phosphorus stocks influence soil quality with long-term cover plants

Understanding the relationship between phosphorus (P) and carbon (C) is essential to improving soil quality, promoting an increase in nutrient cycling and an increase in C stock in the soil. Studies are still scarce regarding the implications of C sequestration for soil P availability. Thus, the objectives of this study are firstly to determine the influence of winter cover crops on aggregate stability and whether this change reflects on P dynamics in aggregates, and secondly to synthesize the results on the relationship between C and P, the impact on C stock, the availability of P in the agricultural system and the influence on soil quality. Therefore, in a study carried out in the southern region of Brazil, the treatments are composed of six cover crops (vetch, white lupine, forage turnip, ryegrass, black oat and rye) and a fallow with frequent desiccation of the spontaneous plants, all of which received soluble phosphate fertilizer (simple superphosphate – SFS) and an additional fallow without application of phosphate fertilizer. Deformed and semi-deformed samples were collected to evaluate chemical, physical and biological attributes. In Chapter 1, it was observed that the P fractions differed in response to the aggregate classes. In macroaggregates, for labile Pi, the highlight was black oat with an increase of 63.1% in relation to fallow, while in labile Po, black oat showed low P values, not differing from fallow. In microaggregates, in the fraction of labile Pi, oats and ryegrass stood out, with 52.8% and 48.2% in fallow, however only rye did not differ from fallow in the fraction of labile Po. In acid phosphatase, white lupine was superior to cover crops with greater P availability in the system, causing an increase in biomass production and P accumulation in leaf tissues in cover crops. In chapter 2, cover crops impacted the C stock and the C:P in the soil, where the C:P ratio leads to an increase in C stock in the soil, while C:N reduces it. Furthermore, MOAM-bound C is conducive to C storage over decades. These results demonstrate a link between the stability of aggregates, C stock, enzymatic activity and microbial biomass, providing sustainability of agroecosystems, interfering in increasing the soil quality index.

Keywords: C:P ratio, Cover crops, P fractions, Aggregates, Soil quality

1. INTRODUÇÃO GERAL

As estimativas preveem que até 2050 a população chegará a 9 bilhões de pessoas, para atender à exigência populacional, a produção de alimentos precisará duplicar (Food Security Information Network, 2017). A fim de aumentar a produtividade e de suprir a demanda crescente da população e os desafios da segurança alimentar, tem se intensificado o uso de fertilizantes, intenso tráfico de maquinários agrícolas no preparo do solo e o uso de monoculturas. Consequentemente, essas práticas agrícolas provocam efeitos negativos nos agroecossistemas, levando a mudanças climáticas, perdas da biodiversidade do solo e redução das funções dos ecossistêmicas (Begum et al., 2022). Um dos grandes desafios da agricultura é aumentar a produção de alimentos com custo ambiental sustentável, com a finalidade de reduzir o uso de recursos e promover benefícios e aumentando a produtividade ao mesmo tempo (Mosier; Córdova; Robertson, 2021).

O solo se destaca por possuir o maior reservatório terrestre de carbono (C) e tem se tornado alvo de pesquisa devido a sua importância na fertilidade do solo, na produtividade das culturas e na mitigação dos efeitos negativos das mudanças climáticas (Li et al., 2018). De acordo com Li et al. (2019), as entradas e saídas de C no solo são provenientes da respiração do solo, variando em taxas de 68 a 90 Pg C ano⁻¹. A respiração do solo é composta pela respiração autotrófica, provenientes das raízes e seus simbiontes, pela respiração microbiana e por meio da decomposição da matéria orgânica do solo (Li et al., 2019b; Zhu et al., 2022). Desta forma, qualquer mudança feita na respiração do solo pode acelerar ou mitigar o dióxido de carbono atmosférico e suas concentrações no solo (Zhu et al., 2022).

O sistema de manejo com plantas de coberturas diversificadas na entressafra permitem acessar diferentes labilidades de P do solo. As plantas de cobertura possuem mecanismos que modificam o ciclo do fósforo a longo prazo, liberando componentes orgânicos que competem com os sítios de adsorção, promovendo a mobilização do P para a cultura subsequente. Consequentemente, as estratégias de manejo com uso de espécies diferentes contribuem para uma melhor eficiência do P presente no solo, conhecido como o “*Legacy P*”, resultando na mitigação dos efeitos nocivos dos fertilizantes em terras agrícolas, promovendo uma agricultura sustentável (Rheinheimer et al., 2019; Soltangheisi et al., 2018).

Os mecanismos de alteração morfológicos, arquitetônicos e fisiológicos, possibilitam o acesso das plantas aos reservatórios de P no solo. A alteração nas características morfofisiológicas favorece o aumento da área da superfície específica das raízes, pela promoção do crescimento das raízes e pelo adensamento dos pelos radiculares, promovendo a elevação da captura do P pelo melhoramento da exploração do solo. A partir disso, as raízes

podem mobilizar tanto o P inorgânico quanto o P orgânico por meio da secreção de prótons (H⁺) e ativação enzimática, possibilitando a dissociação do Ca-fosfato e carboxilato, que competem com os sítios de ligação do P, em contrapartida reduz-se a adsorção nas superfícies dos minerais. O P orgânico pode ser hidrolisado pelas plantas de cobertura através da secreção da enzima fosfatase ácida, rompendo as ligações do P monoéster e diéster com o carbono (Honvault et al., 2021; Richardson et al., 2011).

De acordo como Assunção et al. (2019), o acúmulo da matéria orgânica do solo (MOS) ajudam na redução das perdas de C para o meio, em virtude da complexidade dos compostos orgânicos e à proteção física fornecida pelos constituintes inorgânicos do solo, levando a maior estabilidade do C. A recalitrância da MOS é impactada pelos agregados do solo (Mangalassery; Kalaivanan; Philip, 2019; McGill & Cole, 1981). A relação entre MOS e a agregação do solo é definida da seguinte forma: a MOS exerce influência como agente cimentante entre os agregados, enquanto a agregação atua na proteção física limitando a acessibilidades dos microorganismos e promovendo a não mineralização da MOS (Assunção et al., 2019; Sarker et al., 2018).

Portanto, a qualidade do solo deve ser relacionada com a diversas funções do solo, englobando os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, que refletem nas mudanças do uso e no manejo do mesmo (Bünemann et al., 2018). Dessa forma, realizar a avaliação da qualidade do solo deve incluir, indicadores químicos, físicos e biológicos de forma conjunta (Bünemann et al., 2018; Miguel Reichert et al., 2022; Rinot et al., 2019). Assim, o C, o nitrogênio (N) e o fósforo (P) são vitais para a estruturação dos ecossistemas e também tem a funcionalidade se fazerem parte dos componentes biogênicos mais significativos para os organismos vivos. Portanto, a estequiometria do C:N:P está correlacionado com velocidade de decomposição dos resíduos, no estoque de C e com a disponibilidade de P no sistema, sendo um indicador significativo na ciclagem de C, N e P.

Esta dissertação está organizada em dois capítulos para abordar estes temas mencionados acima. O primeiro capítulo tem o objetivo de compreender melhor a dinâmica no P dentro das classes de agregados e a ciclagem de nutrientes via uso das plantas de cobertura. E o segundo capítulo tem como finalidade o estudo do estoque de C no solo, e entendendo a maneira com que a estequiometria C:N:P impacta nos índices de qualidade do solo.

Referências

- ASSUNÇÃO, S. A. et al. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 658, p. 901–911, 25 mar. 2019.
- BEGUM, K. et al. Modeling Soil Carbon Under Diverse Cropping Systems and Farming Management in Contrasting Climatic Regions in Europe. **Frontiers in Environmental Science**, v. 0, p. 139, 8 abr. 2022.
- BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 1 maio 2018.
- HONVAULT, N. et al. Tradeoffs among phosphorus-acquisition root traits of crop species for agroecological intensification. **Plant and Soil** **2020 461:1**, v. 461, n. 1, p. 137–150, jun. 2021.
- LI, F. et al. Soil aggregate size modifies the impacts of fertilization on microbial communities. **Geoderma**, v. 343, n. January, p. 205–214, 2019.
- LI, J. et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 281–290, 1 jan. 2018.
- MANGALASSERY, S.; KALAIIVANAN, D.; PHILIP, P. S. Effect of inorganic fertilisers and organic amendments on soil aggregation and biochemical characteristics in a weathered tropical soil. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 144–151, 1 abr. 2019.
- MCGILL, W. B.; COLE, C. V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. **Geoderma**, v. 26, n. 4, p. 267–286, 1 nov. 1981.
- MIGUEL REICHERT, J. et al. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 22 abr. 2022.
- MOSIER, S.; CÓRDOVA, S. C.; ROBERTSON, G. P. Restoring Soil Fertility on Degraded Lands to Meet Food, Fuel, and Climate Security Needs via Perennialization. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 356, 11 out. 2021.
- RHEINHEIMER, D. DOS S. et al. Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. **Soil and Tillage Research**, v. 192, p. 33–41, 1 set. 2019.
- RICHARDSON, A. E. et al. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. **Plant and Soil**, v. 349, n. 1–2, p. 121–156, 3 dez. 2011.
- RINOT, O. et al. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. **Science of The Total Environment**, v. 648, p. 1484–1491, 15 jan. 2019.
- SARKER, T. C. et al. Linking organic matter chemistry with soil aggregate stability: Insight from ¹³C NMR spectroscopy. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 117, p. 175–184, 1 fev. 2018.
- SOLTANGHEISI, A. et al. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 179, p. 20–28, 1 jun. 2018.

ZHU, K. et al. Intense wet-dry cycles weakened the carbon sequestration of soil aggregates in the riparian zone. **CATENA**, v. 212, p. 106117, 1 maio 2022.

2. DIFERENÇA NA DISTRIBUIÇÃO E DISPONIBILIDADE DAS FRAÇÕES DE FÓSFORO NOS AGREGADOS DOS SOLOS COM DIFERENTES PLANTAS DE COBERTURA

Resumo

As plantas de cobertura têm o potencial de modificar a estrutura do solo, além de acessar os reservatórios de P, alterando as frações, promovendo o aumento na disponibilidade de P para as culturas comerciais. Os agregados com tamanhos diferentes podem servir como microambientes para comunidades microbianas e determinar a distribuição nutricional no solo. Entretanto, ainda são escassos os trabalhos que demonstram como e quais classes de agregados aumentam o P disponível. O objetivo do trabalho foi avaliar como as plantas de cobertura influenciam nas classes de agregados e se essa alteração interfere na dinâmica de P nos agregados. Os tratamentos são compostos por seis plantas de coberturas (ervilhaca, tremoço-branco, nabo forrageiro, azevém, aveia-preta e centeio) um pousio com dessecação frequente das plantas espontâneas, todos receberam adubação fosfatada solúvel (superfosfato simples – SFS) e um pousio adicional sem aplicação de fertilizante fosfatado. Ressaltando que foram sete anos com entrada de P no sistema e cinco anos explorando o efeito residual do fertilizante fosfatado no solo. Avaliou-se as frações de P dentro de cada classe dos agregados, e do solo homogêneo, e foram determinadas a atividade enzimática, PBM, produção de MS e o acúmulo de P nos tecidos. As plantas de cobertura alteraram as classes de agregados do solo e as frações de P dentro de cada classe. Nos macroagregados, na fração do P_i lábil, a aveia-preta se sobressaiu com um aumento de ~63,1% em relação ao pousio, ocasionando uma redução na fração P_o lábil. O comportamento do P nos microagregados, foi diferente em relação aos macroagregados. Apesar da aveia-preta e do azevém apresentarem altos valores de P na fração P_i lábil, não ocorreu redução na fração P_o lábil. Em relação ao solo homogêneo, o destaque para o P_i nas frações lábil e mod. lábil foi para o tremoço-branco, aveia, centeio e o nabo, entretanto na fração mod. lábil, não diferenciaram do pousio. A maior absorção de P foi evidenciada pela aveia-preta, sendo dependente da produção de biomassa. As plantas de cobertura melhoraram a ciclagem de P, contribuindo para a nutrição fosfatada para a cultura subsequente, independente do cenário com fertilização ou suspensão de P, desempenhando papéis fundamentais na manutenção da estrutura do solo e na função dos ecossistemas.

Palavras-chaves: Ciclagem de nutrientes, Classe de agregados, P disponível, atividade enzimática

Abstract

Cover crops have the potential to modify soil structure, in addition to accessing P reservoirs, changing fractions, promoting an increase in P availability for commercial crops. Aggregates with different sizes can serve as microenvironments for microbial communities and determine nutritional distribution in the soil. However, there is still little work demonstrating how and which classes of aggregates increase available P. The objective of the work was to evaluate how cover crops influence aggregate classes and whether this change

interferes with P dynamics in aggregates. The treatments consist of six cover crops (vetch, white lupine, forage radish, ryegrass, black oat and rye) a fallow with frequent desiccation of spontaneous plants, all received soluble phosphate fertilizer (simple superphosphate – SFS) and a fallow additional without application of phosphate fertilizer. Emphasizing that there were seven years with P input into the system and five years exploring the residual effect of phosphate fertilizer in the soil. The P fractions within each class of aggregates and homogeneous soil were evaluated, and enzymatic activity, PBM, DM production and P accumulation in tissues were determined. Cover crops altered soil aggregate classes and P fractions within each class. In the macroaggregates, in the fraction of labile Pi, for black oats stood out with an increase of ~63.19% in relation to fallow, causing a reduction in the fraction of labile Po. The behavior of P in microaggregates was different in relation to macroaggregates. Although black oat and ryegrass presented high P values in the labile Pi fraction, there was no reduction in the labile Po fraction. In relation to homogeneous soil, Pi stands out in the labile and mod fractions. labile was for white lupine, oats, rye and turnip, however in the mod. labile, did not differentiate from fallow. The highest P absorption was evidenced by black oats, being dependent on biomass production. Cover crops improved P cycling, contributing to phosphate nutrition for the subsequent crop, regardless of the scenario with fertilization or P suspension, playing fundamental roles in maintaining soil structure and ecosystem function.

Keywords: Nutrient cycling, Aggregate class, Available P, enzyme activity

2.1 Introdução

O P é um nutriente vital para todos os seres vivos. Participa na formação de estruturas de membranas fosfolipídicas, no armazenamento e processamento genético (ácidos nucleicos) e compõem moléculas de adenilato ATP, ADP e AMP que estão envolvidos em processos fundamentais da bioenergética celular (Elser, 2012). A disponibilidade do P é ditada pelo pH do solo (Da silva, I. R.; Sá mendonça, 2007; Malavolta, 2006), onde o abastecimento às plantas é por via do sistema radicular (Gatiboni, 2003). O fósforo presente no solo pode ser encontrado na forma inorgânica (Pi), sendo estrutural, ligados aos minerais ou adsorvidos aos coloides do solo e na forma orgânica (Po), compondo a biomassa microbiana e a matéria orgânica.

A forma mais comum de fornecimento do P às plantas é via fertilizantes fosfatados, onde o seu uso de formar inadequada pode limitar a produtividade agrícola (Chen et al., 2024; Withers et al., 2018). O P possui uma alta energia de ligação, principalmente com o ferro (Fe^{+2}) e alumínio (Al^{+3}) no solo, ocasionando formação de óxidos de ferro e alumínio que atuaram como sumidouro de P, que será acumulado ao longo do perfil (Oliveira Filho & Pereira, 2020). A buscar por mecanismos de redução de adsorção do P são essenciais, além de serem capazes de reduzirem o uso de fertilizantes agrícolas, sendo este um recurso limitado.

As culturas de cobertura (CC) têm diversas funcionalidades nos serviços ecossistêmicos, principalmente em capacidade de aumentar a ciclagem de P, trazendo consigo, a finalidade de melhorar a gestão do P, aportando uma redução no uso de fertilizantes fosfatados e maximizando a eficiência na absorção (Li et al., 2020; Qu et al., 2022). As raízes das CC, mobilizam o P inorgânico e P orgânico por meio da secreção de prótons (H⁺), possibilitando a dissociação do Ca-fosfato e carboxilato, que competem com os sítios de ligação do P, em contrapartida, reduzem a adsorção nas superfícies dos minerais. O P orgânico pode ser hidrolisado pelas CC através de enzima fosfatase ácida, rompendo as ligações tanto dos monoéster e diéster (Honvault et al., 2021a; Richardson et al., 2011). Consequentemente, as estratégias de manejo de espécies diferentes contribui para uma melhor eficiência de aproveitamento do P presente no solo, reduzindo o P recalcitrante no solo (ou Legacy P) (Rheinheimer et al., 2019; Soltangheisi et al., 2018).

Além das reações que ocorrem com o P no solo, Yang et al., (2023) abordam que o teor de água no solo, como também as concentrações de carbono, nitrogênio (N) e potássio (K), o tamanho dos agregados e interferências humanas são outras ações que influenciam na disponibilidade de P. O incremento no estoque de matéria orgânica do solo (MOS), via resíduos vegetais pelas CC, na via atividade microbiana e sua interação com os sequioxidos, influenciam a estabilidade dos agregados (Song et al., 2022). Os tamanhos variados da estrutura dos constituintes inorgânicos e orgânicos do solo e o grau de mineralização e atividade da MOS variam conforme o tamanho dos agregados, definindo o bom funcionamento do solo. Portanto o tamanho do agregado é fator crítico que determina a capacidade de P no sistemas (Garland; Bünemann; Six, 2017; Liao et al., 2018). Há relatos na literatura encontrando alterações nos teores de P em diferentes classes de agregados. Alguns verificaram maiores de P disponível em agregados de médio e pequeno porte do que agregados de grande porte, enquanto outros estudos demonstraram elevado P em agregados de grande porte (Song et al., 2022; Yang et al., 2023).

Tendo em vista a importância do P para sustentabilidade agrícola, as informações são limitadas no que diz respeito ao seu comportamento dentro das classes de agregados. Logo, testou-se a hipótese de que os sistemas de manejo alteram o conteúdo de P e a sua disponibilidade para as plantas de diferentes formas de acordo com o tamanho dos agregados. Com isso, o objetivo do estudo foi avaliar a influência distribuição e nas classes dos agregados, e caso essa alteração reflète na dinâmica de P nos agregados, promovidos pela estruturação do solo, em um experimento de longo prazo (12 anos) com plantas de cobertura

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Descrição da área

O estudo foi realizado em experimento de longa duração (12 anos) conduzido desde 2009 na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), município de Dois Vizinhos - PR (25° 44' 05" S, 53° 03' 31" W), a 562 m de altitude. A temperatura média nos meses mais quentes é 22 °C e nos mais frios 13 °C, com pluviosidade média anual de 2100 mm. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Argiloso, com 73% de argila, com baixo teor de fósforo resina inicial, conforme a caracterização da tabela 1. Em busca de mais detalhamento sobre a área consultar os trabalhos de (Pavinato et al., 2017; Soltangheisi et al., 2020a).

Tabela 1: Caracterização química e textural do solo no início do experimento em 2009.

Camada (cm)	pH	MO ¹	P- resina	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	V ²	Argila	Silte	Areia
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmolc dm ⁻³ -----			-----		%	%		
0-5	5,4	40,2	8,1	0,0	34,2	54,0	26,9	5,0	71,5	70,1	25,9	39,3
5-10	5,2	40,2	9,7	0,0	36,8	56,2	29,8	2,8	70,7	73,9	24,3	17,8
10-20	5,0	26,8	4,8	0,8	39,7	43,2	21,3	1,3	62,4	75,1	23,1	17,0

2.2.2 Desenho experimental

O delineamento experimental foi estabelecido em blocos casualizados, com oito tratamentos, três repetições, em parcelas 5 x 5 m (25 m²). Os tratamentos são seis plantas de coberturas (ervilhaca - *Vicia sativa*, tremoço-branco - *Lupinus albus*, nabo forrageiro - *Raphanus sativus*, azevém - *Lolium multiflorum*, aveia preta - *Avena strigosa* e centeio - *Secale cereale*), um pousio com dessecação frequente das plantas espontâneas, todos recebendo adubação fosfatada solúvel (superfosfato simples - SFS) e um pousio adicional sem aplicação de fertilizante fosfatado (Figura 1). Ressaltando que houve uma substituição da parcela de trevo branco (cultivado entre 2009/10 a 2012/13) por centeio (após safra de 20012/13).

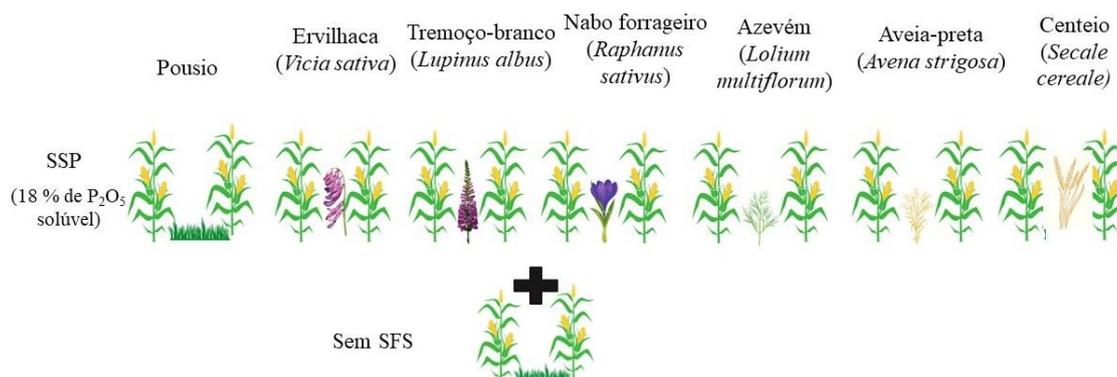


Figura 1: Desenho experimental com distribuição dos tratamentos

2.2.3 Manejo da área

Durante os 12 anos de condução do experimento, a semeadura das plantas de cobertura foi realizada na primeira quinzena de maio, de forma manual, logo após a colheita da safra de verão. A quantidade de sementes puras utilizadas foi de 70 kg ha⁻¹ de ervilhaca, 100 kg ha⁻¹ de tremoço-branco, 20 kg ha⁻¹ de nabo forrageiro, 20 kg ha⁻¹ de azevém, 60 kg ha⁻¹ de aveia preta e 4 kg ha⁻¹ centeio. As linhas de semeadura foram abertas manualmente com enxada e as sementes distribuídas ao longo da linha. As plantas de cobertura não leguminosas receberam adubação nitrogenada em cobertura, na dose de 40 kg ha⁻¹ de N (via ureia). Não houve aplicação de fertilizante potássico nas CC devido aos níveis altos de K no solo. O manejo das plantas de cobertura foi realizado conforme as recomendações para cada cultura. Ressaltando, que não houve adubação fosfatada nas plantas de cobertura, tendo como objetivo, avaliar o efeito residual sobre adubação realizada na cultura de verão. A dessecação foi realizada uniformemente em área total, na primeira quinzena de outubro de cada ano, em torno de 15-20 dias antes da semeadura das culturas de verão, com aplicação de glifosate [N-(fosfonometil) glicina] (3 L ha⁻¹).

A adubação fosfatada foi realizada anualmente ao longo das safras de 2009/10 à 2015/16 com dose média de 45,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P solúvel, sendo aplicada a lanço e sem incorporação. A fonte fosfatada utilizada foi a superfosfato simples (SFS-18% de P₂O₅ solúvel), com uma quantidade acumulada de 335 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅. Na safra de 2016/17 foi suspensa a adubação fosfatada devido aos níveis altos de P resina (>50 mg kg⁻¹) no solo. Com isso, a partir da safra de 2016/17 se permitiu avaliar o efeito residual do fertilizante fosfatado. Ou seja, sete anos com entradas de P e cinco anos explorando o P residual do solo

A semeadura das culturas de verão (milho e soja) foi realizada sempre na segunda quinzena de outubro. No período, foram oito safras cultivadas com milho e quatro safras cultivadas com soja. No milho foi aplicado sempre 120 kg ha⁻¹ de N (via ureia, 44% N) parcelado em três aplicações (semeadura, V4-V5 e V7-V8) e a soja inoculada com *Bradyrhizobium japonicum*. Quanto à adubação potássica foram aplicados 40 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O (via KCl, 60% K₂O) sempre no momento da semeadura do milho/soja em superfície, apenas para a manutenção, devido a teores de K elevados inicialmente no solo (Tabela 1). Na safra de 2012/13 não foi avaliada produtividade da soja devido ao excesso de chuva durante a colheita. Em 2018/19 os tratamentos receberam 3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico com PRNT de

92%, com a finalidade de corrigir a acidez do solo e elevar a saturação por base para níveis adequados às culturas comerciais.

2.2.4 A biomassa das plantas e análise nutricional

Nas culturas de cobertura a produção de massa seca foi determinada através da coleta de uma área cobrindo duas linhas de 0,5 m de comprimento ($0,4 \text{ m}^2$ para o tremoço e $0,2 \text{ m}^2$ demais culturas). Para tanto, foram feitas cinco subamostras de cada parcela e completamente misturadas, gerando uma amostra composta por parcela. As amostras da biomassa das culturas de cobertura foram secas em estufa a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ por 72 h (ou até peso constante), pesadas (para determinação da MS), moídas em uma peneira de 2 mm em moinho Wiley, para posterior avaliação dos teores de nutrientes do tecido.

O teor de P no tecido foliares das plantas de cobertura foram determinados após a digestão da amostra. A absorção de nutrientes foi calculada através da produção de massa seca (kg ha^{-1}) da amostra multiplicado pelo teor de nutriente encontrado no tecido foliar (Tedesco et al., 1995).

2.2.5 Amostragem de solo

Amostras de solo foram coletadas em setembro de 2021 nas profundidades 0–5, 5–10, 10–15 e 15–30 cm de cada parcela, com seis subamostras obtidas com trado holandês, que foram uniformemente misturadas para formar uma amostra composta de cada profundidade. Dessa amostra composta, 0,2 kg de cada foram armazenadas a $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ até a determinação da análise biológica.

2.2.6 Estabilidade dos agregados

Em cada parcela foi aberta uma trincheira de $20 \times 30 \times 30 \text{ cm}$, nas camadas de 0–5, 5–10 cm, coletando amostras semi-destorroadas para a avaliação da estabilidade dos agregados. Após a coleta do material no campo, as amostras foram levadas ao laboratório, destorroadas e peneiradas manualmente respeitando os pontos de fraqueza dos agregados. Na avaliação da estabilidade dos agregados, as amostras passaram por um jogo de peneiras de diferentes tamanhos de malhas 2; 0,25; 0,053 mm resultando nas classes de agregados, macroagregados grandes $> 2 \text{ mm}$, macroagregados pequenos 2 - 0,250 mm e microagregados 0,250 – 0,053 mm. Posteriormente, todas as classes de agregados foram seca em estufa de circulação á $40 \text{ }^\circ\text{C}$ pela metodologia proposta por (ELLIOTT, 1986). Ressaltando que agrupamos as classes de macroagregados grandes e pequenos em apenas uma classe para melhor interpretação dos dados.

2.2.7 Fracionamento químico de P nos agregados

O fracionamento químico do P foi realizado na classe de macroagregados (grandes e pequenos) e microagregados, apenas das camadas de 0 a 5 e 5 a 10 onde obtivemos maiores respostas. O fracionamento químico do P nos agregados, foi realizado através da extração sequencial de P proposta por (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982). Para a extração, foram utilizados diferentes extratores com diferença força de extração. O P disponível é obtido pela resina de troca aniônica ($P_{i-resina}$), após sua extração é adicionado o $NaHCO_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em pH 8,5, extraíndo o P_{i-BIC} e o P_{o-BIC} . Seguindo para o $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, obtendo o $P_{i-NaOH-0.1}$ e o $P_{o-NaOH-0.1}$; posteriormente foi adicionado o HCl 1 mol L^{-1} , extraíndo o P_{i-HCl} . E o último extrator, o $NaOH$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, sendo o mais forte dos extratores, obtém o $P_{i-NaOH-0.5}$ e o $P_{o-NaOH-0.5}$. No final, extraímos o P residual ($P_{residual}$) com o auxílio dos reagentes $H_2SO_4+H_2O_2$. O fósforo lábil é determinado pelo P disponível, P_{i-BIC} e o P_{o-BIC} , o fósforo moderadamente lábil pela fração de $P_{i-NaOH-0.1}$ e o $P_{o-NaOH-0.1}$ e P e o fósforo não lábil através do $P_{i-NaOH-0.5}$ e o $P_{o-NaOH-0.5}$ e o $P_{residual}$. Para mais detalhes verificar a metodologia proposta por Rodrigues et al. (2016). As frações de P determinado através fracionamento químico sequencial foram transformadas para $kg \text{ ha}^{-1}$ de P, considerando densidade média do solo em campo até 30 cm de profundidade.

2.2.8 Análise biológica

A atividade enzimática da fosfatase ácida foi avaliada através de amostras úmidas (manutenção da temperatura coletada em campo). Esse método baseia-se na quantificação do p-nitrofenol, liberado pela enzima quando o solo é incubado com substrato específico, o p-nitrofenil fosfato (PNF $0,05 \text{ mol L}^{-1}$). A atividade foi determinada no espectrofotômetro, ajustado para 410 nm e os resultados foram expressos em $mg \text{ p-nitrofenol kg}^{-1} \text{ de solo h}^{-1}$ (TABATABAI, 1994).

O P da biomassa microbiana (P_{mic}) foi determinado em três conjuntos de amostras de 2 g de solo fresco; apenas o primeiro foi fumigado com clorofórmio por 24 h (Brookes; Powlson; Jenkinson, 1982). As amostras foram extraídas com $NaHCO_3$ (pH 8,5) e apenas no terceiro conjunto foi adicionado 50 mg L^{-1} de P na solução extratora para uma correção de P adsorvido pelo solo do conjunto de amostras fumigadas. Os teores de P foram determinados pelo método de Murphy & Riley, (1962).

2.2.9 Análise estatística

A normalidade (*Shapiro-Wilks*) e homoscedasticidade da variância (*Bartlett*) foi verificada para cada parâmetro avaliado, quando não atendidos estes pressupostos foi aplicado a transformação Box-Cox. Em seguida, os dados foram avaliados por análise de variância (ANOVA, $p \leq 0,05$), e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), e foi aplicado o teste de Dunnett, para comparar o tratamento sem P com os demais tratamentos.

2.3. Resultados

2.3.1 Fracionamento do P nos agregados

Nas classes de agregados dos solos, notamos que os teores de P apresentaram diferença entre as formas de labilidade e entre as classes em função das plantas de cobertura. O P inorgânico (P_i) lábil nos macroagregados; teve destaque na aveia preta, com $104,59 \text{ mg kg}^{-1}$ de P, obtendo um acréscimo de 63,1% em relação ao pousio, com $38,50 \text{ mg kg}^{-1}$ de P. Ao realizar o teste de Dunett, para comparar o tratamento pousio sem mP, apresentou diferença ($p \leq 0,05$) para todos os tratamentos exceto ao comparar com o pousio com P. Para o P inorgânico moderadamente lábil, os maiores teores de fósforo foram alcançados pela aveia e o azevém ($517,42$ e $468,83 \text{ mg kg}^{-1}$ de P), com um elevado percentual de 30 e 23%, respectivamente em relação ao pousio ($359,82 \text{ mg kg}^{-1}$ de P). Também houve diferença entre todas as plantas de cobertura quando comparados com o pousio sem P. E no P inorgânico não lábil, não houve diferença ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos, no entanto, o nabo forrageiro e a aveia preta diferiram do pousio sem P (Figura 2A).

A fração lábil do P_i ; apresentou valores maiores na aveia e no azevém, $48,39$ e $44,14 \text{ mg kg}^{-1}$ de P respectivamente, na classe dos microagregados, se sobressaindo com 53 e 48% ao pousio com teor de $22,84 \text{ mg kg}^{-1}$ de P. Também relatamos que o pousio sem P se diferenciou de todas as plantas de cobertura, inclusive do pousio. Na quantificação da fração moderadamente lábil do P_i , as plantas de cobertura influenciaram fortemente nos teores de P_i no sistema, destacando a aveia ($247,94 \text{ mg kg}^{-1}$ de P) e apresentando um acréscimo de 35 e 46% em relação ao nabo ($161,10 \text{ mg kg}^{-1}$ de P) e o pousio ($132,96 \text{ mg kg}^{-1}$ de P). Apesar do nabo e o pousio apresentarem menores teores nesta fração, apenas o pousio não se distinguiu do pousio sem P. E na fração não lábil não diferenciou ao $p \leq 0,05$ entre os tratamentos e em comparação ao pousio sem P (Figura 2B).

O fósforo orgânico (P_o) analisado dentro dos macroagregados na fração lábil, expressou maior teor de P sob centeio ($74,95 \text{ mg kg}^{-1}$ de P), a partir de um acréscimo 18 e

22,4 % em comparação com o pousio (60,83 mg kg⁻¹ de P) e aveia preta (58,16 mg kg⁻¹ de P), respectivamente. E não ocorreu diferenciação com o tratamento adicional (pousio sem P) ao um nível de significância $p \leq 0,05$. A fração moderadamente lábil do Po, expressou um aumento na ervilhaca e no centeio, 366,40 e 358,26 mg kg⁻¹ de P, ultrapassando com 14,4 e 13,5% em relação ao pousio, com 309,74 mg kg⁻¹ de P. Para a o pousio sem P se diferenciou apenas da ervilhaca e do centeio. E por fim, para o Po não lábil, também, notamos que as plantas de cobertura conseguiram influenciar essa fração com $p \leq 0,05$, onde por sua vez, o nabo apresentou maior valor com 141,49 mg kg⁻¹ de P, sendo maior que o pousio (110,87 mg kg⁻¹ de P) em 21,64%, enquanto o azevém (86,41 mg kg⁻¹ de P) teve uma redução de 22 e 39% em relação ao pousio e ao nabo, respectivamente. Ressaltando, que o pousio sem P diferenciou somente do azevém (Figura 2C).

Para o Po presentes nos microagregados do solo, maioria das plantas de cobertura apresentaram elevado valores de Po lábil, onde a ervilhaca se destaco, com maior média de 40,40 mg kg⁻¹ de P, diferenciando apenas do centeio (26,53 mg kg⁻¹ de P) e pousio (24,84 mg kg⁻¹ de P) com um excedente de 34 e 38,5%, respectivamente. Também, observamos resultado semelhante quando comparou o sem SFF com cada tratamento, se diferenciando apenas do pousio e do centeio. Para a fração moderadamente lábil do Po, não houve diferença entre os tratamentos, no entanto, ao realizar o teste de Dunett, compara o pousio sem P, a partir de cada tratamento isoladamente, houve diferença em relação ao pousio e a aveia preta. O Po não lábil, obteve maiores teores entre as plantas de cobertura, com destaque do nabo, 81,60 mg kg⁻¹ de P, com um elevado percentual de 24% em relação ao pousio com menor média de 62,18 mg kg⁻¹ de P. Observamos também que o centeio (65,16 mg kg⁻¹ de P) e o tremoço (62,62 mg kg⁻¹ de P) atingiu menores média, não se diferenciando ($p \leq 0,05$) do pousio. Em virtude, do comportamento das plantas de cobertura e do pousio, onde nas sete primeiras safras teve entrada de P no sistema, se diferiu tratamento do pousio sem P, que não houve entrada de P e com ausência de plantas de cobertura (Figura 2D).

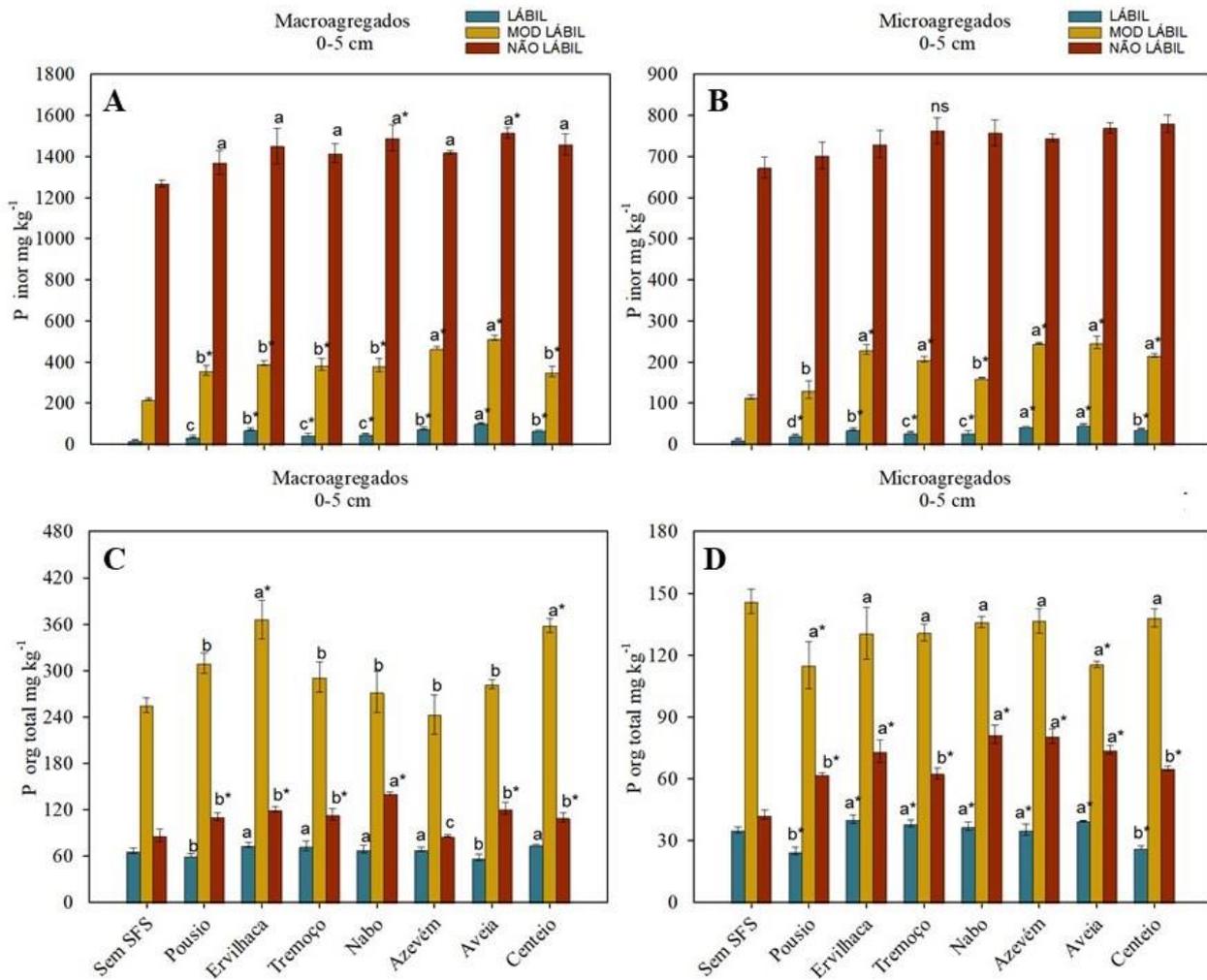


Figura 2: Teores de P inorgânico e orgânico nas classes de macroagregados (A e C) e microagregados (B e D) em efeitos das plantas de cobertura após 12 safras na camada de 0 a 5 cm. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o Sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

Avaliando a dinâmica do P na camada de 5 a 10 cm dentro das classes de agregados e das diferentes labilidades. Os maiores teores de P dentro dos macroagregados no P_i lábil foi para o centeio e aveia, 480,84 e 412,24 mg kg^{-1} de P, atingindo um elevado percentual de 95 e 94% sendo respectivamente, superior a ausência de plantas de cobertura, com 25,40 mg kg^{-1} de P. E notamos, o tratamento pousio sem P se diferenciou de todos os tratamentos com plantas de cobertura, não diferenciando do pousio. O P_i moderadamente lábil destacou-se no centeio, 403,21 mg kg^{-1} de P, tendo um acréscimo de 47% ao comparar com o pousio (212,52 mg kg^{-1} de P). Em virtude, da dinâmica de P dentro dos agregados e entre as diferentes plantas de cobertura, o pousio sem P apresentou diferença entre todos os tratamentos realizados no sistema. Em contrapartida, não houve resposta significativa ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos e quando compara o pousio sem P com cada um no P_i não lábil (Figura 3A).

letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunnett, para comparar o Sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

O fósforo orgânico é importante para a ciclagem de nutriente no solo. O Po lábil, que é a fração facilmente disponível para plantas atingiu maiores valores entre o centeio (69,73 mg kg⁻¹ de P) e a aveia (67,90 mg kg⁻¹ de P), contabilizando um aumento de 23 e 21% ao pousio (53,47 mg kg⁻¹ de P). Também, obteve-se resultados semelhantes ao pousio sem P, que se diferenciou apenas do centeio e da aveia. O azevém (290,04 mg kg⁻¹ de P) e o nabo forrageiro (272,82 mg kg⁻¹ de P) foram enfatizados no Po moderadamente lábil, pelo incremento de 23 e 19%, em relação ao pousio (221,53 mg kg⁻¹ de P), respectivamente. Em virtude dessa relação, notamos um comportamento semelhante ao compara o pousio sem P com os tratamentos, se permitindo diferenciar, do azevém e do nabo, somente. Para o Po não lábil, os maiores teores foram encontrados na aveia e no centeio, 118,59 e 111,62 mg kg⁻¹ de P, por meio de um aumento de 32 e 28% ao correlacionar ao pousio, 80,23 mg kg⁻¹ de P, respectivamente ($p \leq 0,05$). Lembrando, que entre as culturas de cobertura, a ervilhaca apresentou menor média, não se diferenciando ($p \leq 0,05$) do pousio. O pousio sem P se diversificou apenas da aveia e do centeio (Figura 3C).

O Po presente dentro dos microagregados se diferenciaram quando correlacionados com os tratamentos. A partir a influência das plantas de cobertura possuíram característica que ajudam a acessar formas moderadas e não lábeis de P, e impulsiona a ciclagem de nutrientes no sistema. Através desse comportamento, observamos que a aveia, 53,44 mg kg⁻¹ de P se destacou sobre os demais tratamentos, com um aumento de 44%, ao correlacionar com pousio, 29,76 mg kg⁻¹ de P. Com o teste de Dunnett, avaliando o pousio sem P com cada tratamento isoladamente, se distinguiu apenas da aveia preta ao um nível de $p \leq 0,05$. Já para o Po moderadamente lábil com destaque para o centeio (127,82 mg kg⁻¹ de P), tendo um aumento de 23,93%, em relação ao pousio (97,23 mg kg⁻¹ de P). O pousio sem P teve um comportamento semelhante ao Po lábil, onde se distinguiu apenas da aveia preta, que retratou o menor teor (70,24 mg kg⁻¹ de P) ($p \leq 0,05$). E por fim, o Po não lábil, se sobressaindo a ervilhaca com menor teor, 29,42 mg kg⁻¹ de P, com redução de 41% ao compara com o pousio, 49,94 mg kg⁻¹ de P, com significância 5%. E o pousio em P, diferenciou de todos os tratamentos, exceto da ervilhaca (Figura 3D).

2.3.2 Frações de P no perfil de solo

As plantas de cobertura influenciaram nos teores P no solo, interferindo nas labilidades. No entanto, o Pi lábil apresentou diferença estatística, apenas na camada de 0 a 5 cm, ressaltando que na camada de 10 a 15 cm, não houve diferença entre os tratamentos, mas quando comparado com o pousio sem P, verificou diferença. Também para o Po lábil, teve comportamento semelhante ao Pi lábil, em contrapartida foi camada de 10 a 15 cm que os tratamentos destacaram do pousio sem P. O moderadamente lábil tanto o inorgânico quanto o orgânico, só não apresentaram diferença significativa na camada de 10 a 15 cm, ressaltando que o Pi na camada de 15 a 30 os tratamentos também não se diferiram. Já para o Pi e Po não lábil, não foi verificado diferença entre os tratamentos e dentro de cada tratamento nas camadas de 5 a 10 e 10 a 15 cm do solo.

O comportamento do Pi lábil do solo, apontou entre as maiores médias o tremoço, tendo $44,65 \text{ mg kg}^{-1}$ de P promovendo um aumento de $\sim 35\%$ em comparação com pousio, $28,92 \text{ mg kg}^{-1}$ de P, na camada de 0 a 5 cm do solo. O pousio sem P apresentou diferença entre todas as plantas de cobertura e pousio (Figura 4A). Na figura 4B, o Pi do moderadamente lábil, na camada de 0 a 5 o pousio sem P diferiu de todos os tratamentos, enquanto na camada de 5 a 10 cm apenas a ervilhaca destacou. A aveia e o nabo, apresentaram maiores teores, $892,10$ e $889,69 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pi não lábil, com acréscimo de $\sim 6,6\%$, em relação ao pousio, $859,69 \text{ mg kg}^{-1}$ de P. O tremoço ($835,15 \text{ mg kg}^{-1}$ de P), obteve a menor teor, mas não apresentou diferença estatística ($p \leq 0,05$) do pousio. Todos os tratamentos se diferenciaram do pousio sem P (Figura 4C).

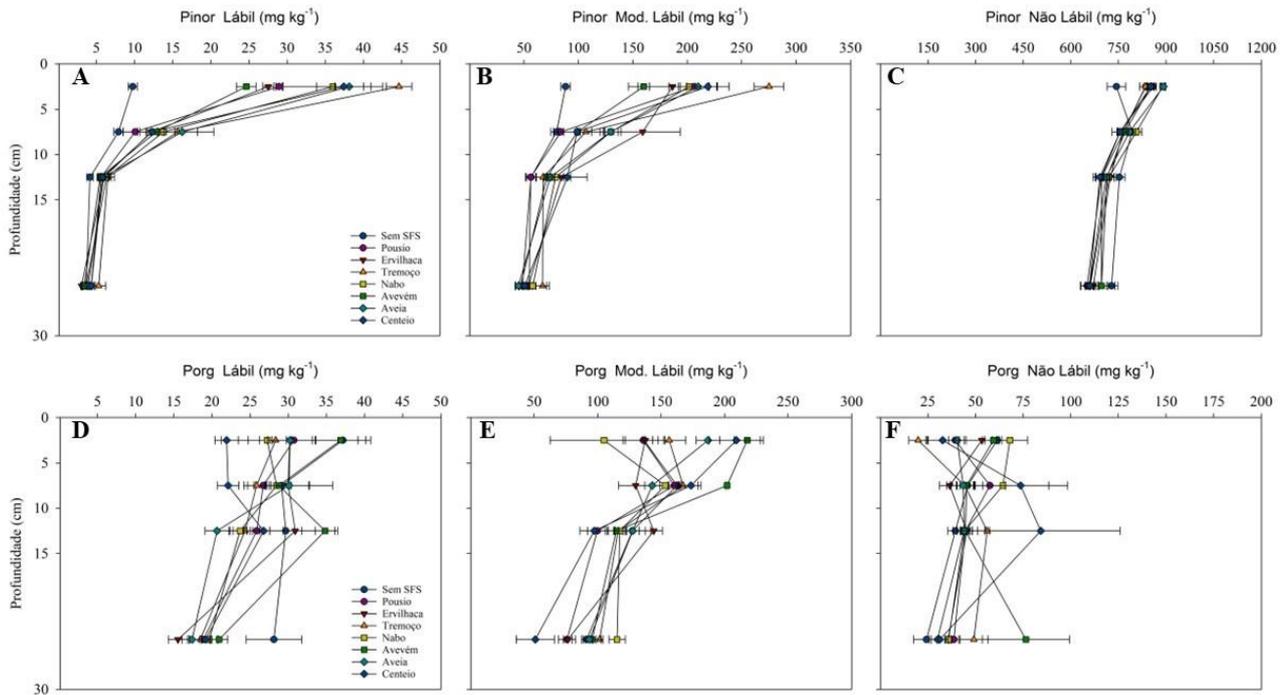


Figura 4: Teores de P inorgânico (A-C) e P orgânico (D-F), dividido pelas das labilidades dentro do Bulk Soil em virtude dos efeitos das plantas de cobertura após 12 safras. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o Sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

Na figura 4E, no Po mod. lábil o azevém ($217,89 \text{ mg kg}^{-1}$ de P) se sobressaiu sobre os demais tratamentos, tendo um percentual 37,5% maior que ao pousio (136 mg kg^{-1} de P). Com o teste de Dunett, não observamos uma resposta significativa ao relacionar ao pousio sem P com os demais tratamentos, na camada de 0 a 5 cm. Na camada de 5 a 10 o destaque também foi para o azevém ($201,95 \text{ mg kg}^{-1}$ de P). E por fim, na camada de 15 a 30 cm, a ervilhaca está entre as maiores média, com $115,33 \text{ mg kg}^{-1}$ de P, atingindo um aumento de 34% em comparação ao pousio, $75,83 \text{ mg kg}^{-1}$ de P. Nessa camada, o centeio apresentou a menor média, e foi o único que diferiu estatisticamente ($p \leq 0,05$) do pousio sem P.

Na fração do Po não lábil, na camada superficial (0 a 5 cm) o tremoço apresentou menor teor de P, $19,85 \text{ mg kg}^{-1}$ de P, no entanto não diferiu do pousio, $39,36 \text{ mg kg}^{-1}$ de P. Os maiores valores foram encontrados no nabo forrageiro e no azevém. Já na camada de 15 a 30 cm, tivemos resposta ao contrário da camada superficial, o destaque foi para o azevém ($76,44 \text{ mg kg}^{-1}$ de P), e os menores teores foram encontrados na aveia e no centeio, os quais, não diferiram ($p \leq 0,05$) do pousio (Figura 4F).

2.3.3 Absorção de P e atividade microbiana

Após 12 safras, sete anos com entrada de fósforo no sistema e cinco anos explorando o P residual, a aveia preta apresentou maior produção de biomassa 46,64 e 29,47 t ha⁻¹ de MS, respectivamente aos dois cenários. Nota-se, que o centeio teve uma resposta diferentes nos dois cenários abordados, onde com a entrada de P a produção se manteve baixa, enquanto nos anos explorando o P residual, apresentou maior produção de massa seca, 33,24 t ha⁻¹ (Figura 5A).

Na figura 5B é apresentado o P acumulado pelas plantas de cobertura. No cenário com entrada de P no sistema, o maior acumulado foi para o nabo (187,03 kg ha⁻¹ de P) e aveia (160,60 kg ha⁻¹ de P). Já quando, explorando o P residual aveia (129,75 kg ha⁻¹ de P) continua com maior acúmulo juntamente com o centeio (127,87 kg ha⁻¹ de P). Em contrapartida, os últimos cinco anos (explorando o P residual), ocorre uma redução drástica no nabo forrageiro, quase equivalendo a mesma quantidade produzida pela ervilhaca nos sete primeiros anos com adubação fosfatada (Figura 5B).

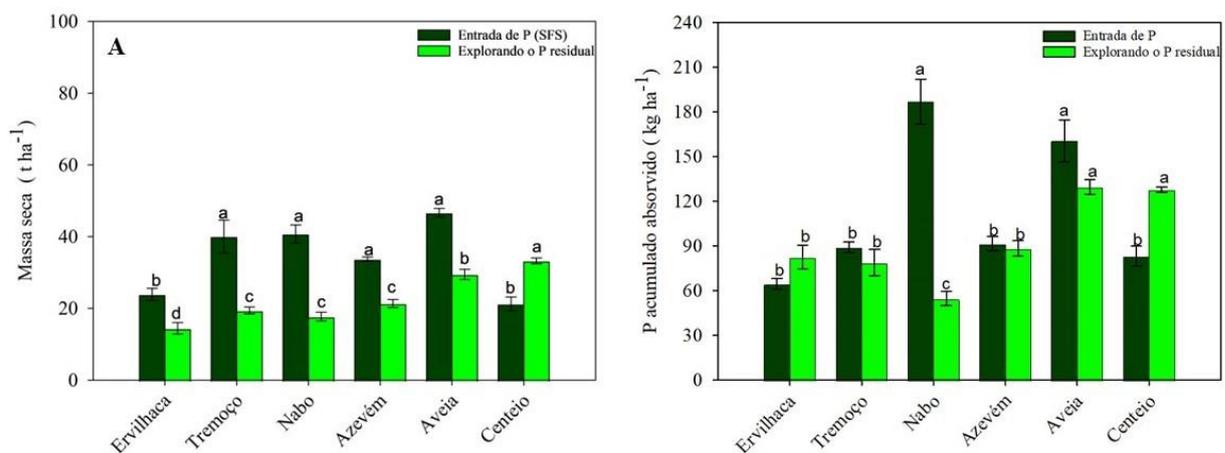


Figura 5: Produção de massa seca das plantas de cobertura (A) e o P absorvido pelas plantas de cobertura (B) após 12 safras. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo.

A atividade da enzima fosfatase está relacionada com os baixos teores de P inorgânico no solo, tendo um papel fundamental no ciclo de P, elevando a mineralização e remobilização do fosfato (PO₄³⁻). Na Figura 6A, houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) apenas na camada de 0 a 5 cm, onde o tremoço branco atingiu maior atividade enzimática, com 1832,94 g PNF. g⁻¹ solo h⁻¹, com elevado percentual de ~58%, em relação ao pousio, com 1058,43 g PNF. g⁻¹ solo

h^{-1} . O tratamento do pousio sem P, apresentou diferença significativa ao $p \leq 0,05$ entre cada tratamento, exceto ao pousio.

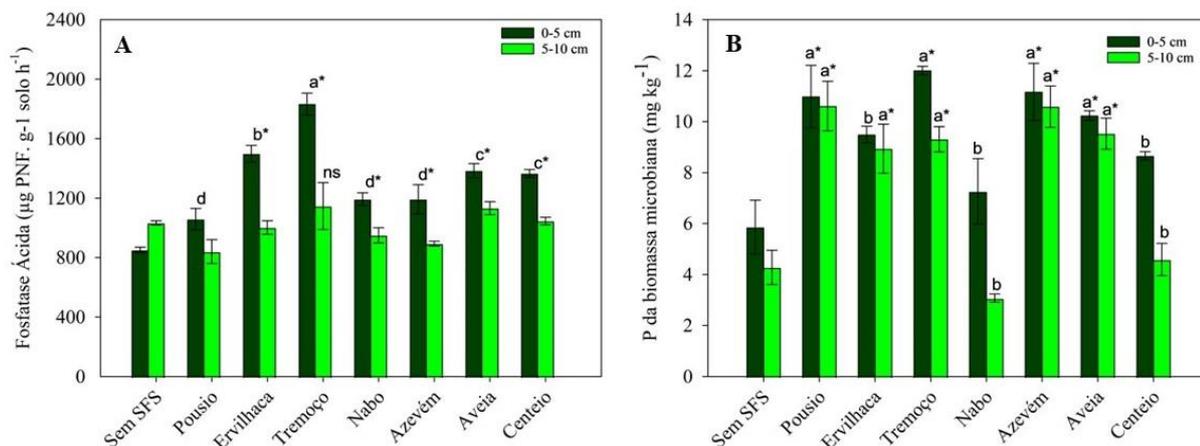


Figura 6: Fosfatase ácida (A) e P da biomassa microbiana (B) sob efeitos das plantas de cobertura após 12 safras. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o Sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

O P microbiano obteve destaque para o tremoço ($12,0 \text{ mg kg}^{-1}$ de P), no entanto, não diferiu do pousio, ao um nível de $p \leq 0,05$ na camada de 0 a 5 cm (Figura 6B). Em relação a comparação do sem SFS com cada cobertura, houve, diferença expressiva, exceto da ervilhaca, nabo e centeio. E na camada de 5 a 10 cm, o pousio apresentou maior teor de P microbiano, $10,61 \text{ mg kg}^{-1}$ de P, diferindo apenas do centeio ($4,58 \text{ mg kg}^{-1}$ de P) e nabo ($3,07 \text{ mg kg}^{-1}$ de P). E o teste de Dunett realizado para o compara o pousio sem P com cada tratamentos isoladamente, não mostrou diferença significativa.

2.4 Discussão

A introdução de matéria orgânica através da implantação de plantas de cobertura no sistema, trouxe diversas alterações na estrutura do solo, nas frações de P, na produção de biomassa e no impacto da microbiota do solo, interferindo na exsudação da fosfatase e o acúmulo de P na biomassa microbiana do solo. De acordo com Song et al. (2022) a matéria orgânica do solo (MOS) contém diversos compostos, os polissacarídeos provenientes do material decomposto e da microbiota do solo, são importantes, principalmente, para formação dos macroagregados do solo, além de afetar a atividade microbiana (Wan et al., 2020). Através do manejo com plantas de cobertura pode-se interferir na composição química e na estrutura da MOS, sendo fundamentais para a ciclagem de nutrientes e a fertilidade do solo

(Li et al., 2020). Estudos relataram que os agregados são o fator chave para a acumulação de nutrientes nos solos.

2.4.1 Frações de P dentro dos agregados

As diferenças nas frações de P foram significativamente influenciadas pela classe de agregados. Nos macroagregados, a concentração de P reduziu à medida que aumentou a profundidade, com exceção do Pi-lábil. Em relação os microagregados, observamos um comportamento inverso. Em ambas as classes, a aveia apresentou maior Pi em todas as labilidades, em contrapartida o Pi não lábil, presente nos microagregados, não diferiu estatisticamente entre os tratamentos.

Nos macroagregados encontramos maiores concentrações de P biodisponíveis em relação aos microagregados (Fig. 2 e 3 e tab. 1). Alguns estudos, demonstram que o uso de esterco e fertilizantes fosfatados promoveram uma maior acúmulo de P disponível aos microagregados (Zhang; Ni, 2018), apesar de não alterar os reservatórios da MOS participa da modificam da composição molecular, influenciado mudanças na estabilidade agregados (Song et al., 2022). Embora, após cinco anos que foi suspensa a adubação fosfatada, o efeito residual do fertilizante permanece no solo. Em contrapartida, essa eficiência foi potencializada pelas plantas de cobertura.

Os macroagregados auxiliam no crescimento de raízes e hifas por meio dos poros maiores que ficam emaranhadas. Outra associação das hifas, principalmente se tratando das micorrizas, fazem parte da extensão do sistema radicular, atuando na produção de micélios, penetrando em agregados menores. E por fim, a presença de microorganismos com fibras e flagelos, tem a capacidade de ocupar os espaços das argilas e partículas, acarretando na estabilização de microagregados (Oades, 1984).

Os efeitos dos resíduos vegetais nos solos podem reduzir o grau de compactação, devido aumento de bioporos no solo, gerando um ambiente favorável para a atuação de microorganismos aeróbios (Tonon-Debiasi et al., 2024). De acordo com Kan et al. (2022) as plantas de cobertura tem o potencial de adquirir P de forma indireta, mediante a simbiose com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e outros microorganismos solubilizadores de P. A literatura aponta, que a formação de agregados do solo está intimamente correlacionada com os FMA, que possuem a capacidade de produzir uma proteína, conhecida como glomalina, importante na ligação dentre partículas do solo (Wan et al., 2020). Scavo et al. (2022) afirmou que os FMA aumentam os reservatórios de P orgânico do solo.

O fósforo orgânico disponível nos macroagregados, foi menor para aveia se equiparando estatisticamente ao pousio. Pode ser explicado pela alta mineralização, transformando o P orgânico em inorgânico através de excreções da enzima fosfatase que provoca o rompimento das ligações monoésteres e diésteres (Honvault et al., 2021b; Richardson et al., 2011) em formas biodisponíveis para as plantas. Contudo, observamos um comportamento ao contrário no microagregados, que por sua vez, as concentrações de P permanecem elevadas em relação ao pousio.

Apesar das frações orgânicas lábil e mod. lábil diferirem do pousio (que apresentou menores valores), as plantas não se diferenciaram do pousio sem P. Esse comportamento é proveniente dos cinco anos sem adubação, atingiu o balanço de P negativo do solo (Soltangheisi et al., 2020b). Para os macroagregados na fração lábil não, os tratamentos não diferiram do pousio sem P, já na fração mod. lábil a diferença foi apenas na ervilhaca e no centeio, enquanto a fração não lábil todos se distinguiram, exceto o azevém. Contudo, a avaliação da dinâmica de P dentro das classes dos agregados foi fundamental para melhor visualização e um melhor embasamento do efeito da aveia na produção de massa seca e no acúmulo de P em ambos os cenários (com e sem entrada de P).

2.4.2 Frações de P no solo homogêneo

Não foi destacada diferença no P total (Tabela S2) entre os tratamentos (com e sem plantas de cobertura), exceto em relação ao sem SFS. Em contrapartida, entre as frações de P no solo, foi observada diferenças entre os tratamentos. Os estudos demonstram, que há diferentes reservatório de P e com diferentes disponibilidades para cada cultura, que por sua vez, aborda diferentes frações de P no solo, ajudando a direcionar e a detectar alterações em comparação com o teor de P total no solo (Gatiboni, 2003; Li et al., 2020).

Após 12 anos de condução do experimento, sete anos com adubação com P e cinco anos sem adubação, os dados demonstram que as plantas de cobertura promoveram modificações nas frações de Pi lábil, moderadamente lábil e não lábil. Isso se deve ao fato de que as culturas de cobertura tem o potencial de acessar os reservatórios de P, ocasionado por uma melhor exploração do solo, onde os rizodépósitos, nódulos e pelos radiculares foram inclusos como facilitadores na liberação de P no sistema (Hallama et al., 2019; Hansen et al., 2022), gerando um fornecimento ininterrupto de energia para os organismos presente na rizosfera (Li et al., 2020).

O maior acúmulo de P disponível, foi verificado no tremoço seguindo pela aveia preta, centeio e o nabo forrageiro, esse comportamento foi observado nos estudos datados no início do experimento, correspondendo de os anos 2009 a 2011 (Pavinato et al., 2017); e também no

trabalho reportado por (Tiecher et al. 2012). No entanto, a resposta aos tratamentos em modificar as frações de P_i foi encontrada apenas na camada superficial. De acordo com Rodrigues et al. (2016) e Soltangheisi et al. (2018) os solos tropicais contém quantidade elevadas de óxidos de Fe e Al estabilizados (como hematita e gibbsita), com a capacidade de reter P nas camadas próximas à superfície, explicando o resultados de não encontrar diferença nas frações inorgânicas de P. A diferença encontrada apenas na camada de 10 a 15, onde apenas o tremoço se diferenciou do sem P, em consequência da capacidade ampla exploração do solo, do tremoço, por raízes grossas e profundas (Scavo et al., 2022).

Um dos papéis fundamentais das gramíneas na aquisição P no sistema e por meio da criação de um ambiente que facilita a proliferação de fungos micorrizo arbusculares (FMA), importantes impulsionadores na ciclagem de P no sistema. À literatura relata, que esse efeito é devido a razão do crescimento das áreas radiculares, através de hifas extrarradiculares, promovendo exploração mais ampla do solo, acarretando uma melhor absorção de P. Como o aumento da FMA, alteram as frações de P, provocando um aumento no reservatório de P_o lábil na camada superficial do solo em relação ao pousio (Scavo et al., 2022), tendo uma elevação no P disponível para a cultura seguinte. Em contrapartida, nossos estudos não observaram alterações no P_o disponível, porém provocaram alteração na fração P moderadamente lábil, com destaque ao azevém, a aveia, o centeio e o tremoço diferindo do pousio, mas não do tratamento do pousio sem P.

Apesar das plantas de cobertura não ter influenciado de P orgânico lábil no solo após 12 anos, podemos aferir que os teores de P_o se igualaram ao tratamento sem aplicação de superfosfato simples. A razão é proveniente da alta solubilidade do SFS, que acarreta o esgotamento das reservas de P a curto prazo, se equiparando ao tratamento sem SFS. Observamos um comportamento diferente no estudo realizado por (Soltangheisi et al., 2020b), com destaque na ervilhaca, aveia e tremoço, é importante ressaltar, que anos avaliados foi de 2009 a 2017, sendo que os dois últimos anos foi suspensa a adubação fosfatada devido a saturação de P no solo. Portanto, quando comparamos os teores de P_o entre plantas de cobertura e o pousio, foi evidenciada diferença estatística, enfatizando o efeito das culturas de cobertura na dinâmica de P no solo (Wang et al., 2023). Em relação aos efeitos em profundidade não constataram diferença, exceto na fração lábil na camada de 15 a 30 cm.

2.4.3 Massa seca e acúmulo do P nos tecidos

O comportamento das culturas pode alterar sob diferentes cenários de mudanças edafoclimáticas, variando de acordo com as espécies de culturas de cobertura. As gramíneas

possuem um alto potencial de produção de biomassa em relação as outras culturas de coberturas, além de apresentar características que reduz a erosão e a perda de nutrientes (Kaur et al., 2024).

Como resposta, a absorção de P pelas culturas de inverno se diferenciou entre si e foi correspondida pela produção de massa seca. Os dados coletados, nos anos com entrada de P (2009 a 2015) e explorando o P residual (2016 a 2021), constataram que a aveia preta permaneceu em destaque na alta produção de biomassa, refletindo no acúmulo de P em ambos os cenários avaliados. É notório, que nos anos explorando o P residual, a maior média de produção desencadeada pela cultura do centeio. Apesar de o nabo ter apresentado alta produção de massa seca nos anos com entrada de P, teve um declínio na produção MS nos anos explorando o P residual no solo, em consequência, o acúmulo de P absorvido nos últimos cinco anos reduziu.

O fornecimento de P disponível aumenta os rendimentos de produção das culturas e facilitar a translocação do nutriente para parte econômica, em consequência, gera um acúmulo de nutrientes em seus tecidos (Li et al., 2020). Os dados obtidos nesse estudo, revelou que a concentração de P disponível e moderadamente disponível (Pi lábil e mod. lábil) acompanhou a produção de MS e o acúmulo de P nos tecidos (tab. S3 e fig. 5). Calegari et al., (2013), afirmam que cultura que tem alta capacidade de absorção de P irá criar um cenário de maior ciclagem de P.

Em situações, em que há entrada de fertilizantes fosfatados, tanto o nabo quanto a aveia preta acumula elevada quantidade de P. Pavinato et al., (2017) relatam a mesmo efeito devido a uma maior exsudação de ácido málico. Já em relação, a aveia preta teve um melhor desempenho em ambos os cenários (com e sem entrada de P). Além disso, o centeio também apresentou um melhor desempenho nos anos explorando o P residual, podendo ser explicado pelos altos teores de Pi lábil, mod lábil e do Po mod lábil que podem ter contribuído pelo aumento do P. Constatamos resultados semelhantes, onde o nabo se sobressaiu ao tremoço no acúmulo de P (Hansen et al., 2022).

Apesar do tremoço-branco apresentar elevadores teores nas frações do Pi lábil e moderadamente lábil, não implicaram no aumento de massa seca e no acúmulo de P nos tecidos. Estudos retrata que tremoço apresenta elevadas concentrações de P, devido a capacidade de exalar grandes quantidades de carboxilatos para mobilizar e adquirir o P que estão pouco disponíveis para as plantas (Qu et al., 2022). Este efeito, ocorre pela mobilização de P inorgânico moderadamente solúvel, que ocorre por exsudação de ânions orgânicos, H^+ e acidificação da rizosfera, e promovendo a mineralização do P orgânicos por meio da

exsudação da fosfatase (Kan et al., 2022). Sendo assim, contribuindo para os aumentos dos indicadores microbianos.

2.4.4 Bulk Soil vs indicadores microbianos

O comportamento da atividade da fosfatase ácida está relacionada a concentração de P no solo, sendo prejudicadas em condições de alta disponibilidade de P e estimuladas em condições limitantes deste nutriente (Silva et al., 2017). No entanto, observamos que o tremoço se destacou sobre as demais plantas de cobertura, tanto para a atividade da fosfatase ácida quanto para a concentração do P microbiano. Observamos resultados semelhantes (Chen et al., 2023; Li et al., 2020; Teles et al., 2017), onde demonstraram que a alta heterogeneidade química dos exsudado radiculares no tremoço, promoveram maior atividade enzimática e concentração de P na biomassa microbiana.

Para as culturas de cobertura que apresentaram valores mais elevados de P presente na biomassa microbiana, não notamos diferença em relação ao pousio, no entanto, foi detectada diferença aos tratamentos sem P. Esse efeito se deve ao fato dos fertilizantes ser uma fonte de nutrientes para a microbiota do solo.

2.5 Conclusão

As plantas de cobertura influenciaram na dinâmica de P dentro de cada classe de agregados. Essa influência é devido ao aumento da ciclagem de P no sistema, através do acesso ao P residual do solo, levando a alterações nas frações de P. Portanto, promove o acúmulo de P em seus tecidos e posteriormente a sua disponibilidade para a cultura comercial.

Nos macroagregados e nos microagregados, a aveia se destacou das demais plantas de cobertura e em relação ao pousio e ao pousio sem P. Comportamento semelhante ocorreu no solo como um todo, no entanto, também tivemos destaque para o tremoço branco. Nos fatores de produção de biomassa e acúmulo de P absorvido o destaque foi para aveia e o centeio, nos anos com entrada de P e explorando o P residual, respectivamente. Vale salientar que nos anos com entrada de P o nabo se destacou, enquanto nos anos explorando o P residual, a resposta foi melhor para o centeio.

O tremoço branco se destacou em ambos os indicadores microbianos. No entanto, apesar de ter apresentado elevada massa seca, os teores de acumulados de P no tecido foram baixos. Ressaltando que aveia preta também apresentou elevado teor de P na biomassa microbiana.

Referências

- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services — A global review. **Geoderma**, v. 262, p. 101–111, 15 jan. 2016.
- ANDRADE, A. P. et al. Physical properties of a Humic Cambisol under tillage and cropping systems after 12 years. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 1, p. 219–226, 2010.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945–1962, 1 nov. 2004.
- BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 86, n. 2, p. 237–245, 2006.
- BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, n. 4, p. 319–329, jan. 1982.
- BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 1 maio 2018.
- CALEGARI, A. et al. Soil & Tillage Research Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. v. 133, p. 32–39, 2013.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.
- CARLOS, F. S. et al. Long-term cover crops and no-tillage in Entisol increase enzyme activity and carbon stock and enable the system fertilization in southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 34, n. August, 2023.
- CHEN, S. et al. Changes in Soil Phosphorus Availability and Microbial Community Structures in Rhizospheres of Oilseed Rapes Induced by Intercropping with White Lupins. **Microorganisms**, v. 11, n. 2, 2023.
- CHEN, X. et al. Deep phosphorus fertilizer placement increases maize productivity by improving root-shoot coordination and photosynthetic performance. **Soil and Tillage Research**, v. 235, n. November 2022, p. 105915, 2024.
- COTRUFO, M. F. et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 12, p. 989–994, 2019.
- DA SILVA, I. R.; SÁ MENDONÇA, E. **Livro de Fertilidade.pdf**, 2007.
- DE MORAES, J. F. L. et al. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, v. 70, n. 1, p. 63–81, 1 mar. 1996.
- DEXTER, A. R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 31, n. 2, p. 139–147, 1 fev. 1985.

- DOS REIS, C. E. S. et al. Carbon sequestration in clay and silt fractions of Brazilian soils under conventional and no-tillage systems. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 4, p. 292–301, 2014.
- DROBNIK, T. et al. Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. **Ecological Indicators**, v. 94, p. 151–169, 1 nov. 2018.
- DU, J. et al. Organic carbon distribution and soil aggregate stability in response to long-term phosphorus addition in different land-use types. **Soil and Tillage Research**, v. 215, p. 105195, 1 jan. 2022.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529–538, 1995.
- ELLIOTT, E. . Aggregate Structure and Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Native and Cultivated Soils sp. nov. **Canadian journal of zoology**, v. 50, n. 11, p. 627–633, 1986.
- ELSER, J. J. Phosphorus: A limiting nutrient for humanity? **Current Opinion in Biotechnology**, v. 23, n. 6, p. 833–838, 2012.
- GARLAND, G.; BÜNEMANN, E. K.; SIX, J. New methodology for soil aggregate fractionation to investigate phosphorus transformations in iron oxide-rich tropical agricultural soil. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 115–125, 2017.
- GATIBONI, L. C. UFSM Tese de Doutorado DISPONIBILIDADE DE FORMAS DE FÓSFORO DO SOLO ÀS PLANTAS. 2003.
- HALLAMA, M. et al. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. **Plant and Soil**, v. 434, n. 1–2, p. 7–45, jan. 2019.
- HANSEN, V. et al. Differences in cover crop contributions to phosphorus uptake by ryegrass in two soils with low and moderate P status. **Geoderma**, v. 426, n. August, 2022.
- HASHIMI, R. et al. No-tillage and rye cover crop systems improve soil water retention by increasing soil organic carbon in Andosols under humid subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, v. 234, n. August, p. 105861, 2023.
- HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 5, p. 970–976, set. 1982.
- HIGASHI, T. et al. Tillage and cover crop species affect soil organic carbon in Andosol, Kanto, Japan. **Soil and Tillage Research**, v. 138, p. 64–72, 2014.
- HONVAULT, N. et al. Tradeoffs among phosphorus-acquisition root traits of crop species for agroecological intensification. **Plant and Soil**, v. 461, n. 1–2, p. 137–150, 1 abr. 2021a.
- JIAN, J. et al. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 143, n. January, p. 107735, 2020.

- JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. R.; COLEMAN, K. Chapter 1 Soil Organic Matter: Its Importance in Sustainable Agriculture and Carbon Dioxide Fluxes. **Advances in Agronomy**, v. 101, p. 1–57, 1 jan. 2009.
- KAN, A. et al. Relationship between soil phosphorus dynamics and low-phosphorus responses at specific root locations of white lupine. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 68, n. 5–6, p. 526–535, 2022.
- KAUR, H. et al. Cover crop impacts water quality in a tile-terraced no-till field with corn-soybean rotation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 360, n. June 2023, p. 108794, 2024.
- LI, Z. et al. Green manure incorporation with reductions in chemical fertilizer inputs improves rice yield and soil organic matter accumulation. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, n. 7, p. 2784–2793, 2020.
- LIAO, H. et al. Contrasting responses of bacterial and fungal communities to aggregate-size fractions and long-term fertilizations in soils of northeastern China. **Science of The Total Environment**, v. 635, p. 784–792, 1 set. 2018.
- LIU, K. et al. Response of soil aggregate-associated potassium to long-term fertilization in red soil. **Geoderma**, v. 352, n. November 2018, p. 160–170, 2019.
- MALAVOLTA, E. **Nutrição Mineral De Plantas** *Nutrição mineral de plantas*, 2006.
- MIGUEL REICHERT, J. et al. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 22 abr. 2022.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, n. C, p. 31–36, jan. 1962.
- OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, v. 76, n. 1–3, p. 319–337, 1984.
- PAVINATO, P. S. et al. Effects of cover crops and phosphorus sources on maize yield, phosphorus uptake, and phosphorus use efficiency. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 3, p. 1039–1047, 2017.
- PENG, Y. et al. Maximizing soil organic carbon stocks under cover cropping: insights from long-term agricultural experiments in North America. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 356, n. June, 2023.
- QU, J. et al. Impact of Phosphorous Fertilization on Rape and Common Vetch Intercropped Fodder and Soil Phosphorus Dynamics in North China. **Agriculture (Switzerland)**, v. 12, n. 11, 2022.
- RICHARDSON, A. E. et al. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. **Plant and Soil**, v. 349, n. 1–2, p. 121–156, 3 dez. 2011.
- RINOT, O. et al. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. **Science of The Total Environment**, v. 648, p. 1484–1491, 15 jan. 2019.
- RODRIGUES, M. et al. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 1050–1061, jan. 2016.

- SCAVO, A. et al. The role of cover crops in improving soil fertility and plant nutritional status in temperate climates. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 5, 2022.
- SILVA, V. M. DA et al. Influence of the tropical millipede, *Glyphiulus granulatus* (Gervais, 1847), on aggregation, enzymatic activity, and phosphorus fractions in the soil. **Geoderma**, v. 289, p. 135–141, 2017.
- SOLTANGHEISI, A. et al. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 179, p. 20–28, 1 jun. 2018.
- SOLTANGHEISI, A. et al. Cover Cropping May Alter Legacy Phosphorus Dynamics Under Long-Term Fertilizer Addition. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, p. 13, fev. 2020a.
- SONG, F. et al. Divergent responses of aggregate stability to long-term mineral and organic amendments between upland and paddy soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 22, n. 12, p. 2969–2981, 2022.
- SPOHN, M. Increasing the organic carbon stocks in mineral soils sequesters large amounts of phosphorus. **Global Change Biology**, v. 26, n. 8, p. 4169–4177, 1 ago. 2020.
- SPOHN, M.; SCHLEUSS, P. M. Addition of inorganic phosphorus to soil leads to desorption of organic compounds and thus to increased soil respiration. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 130, n. December 2018, p. 220–226, 2019.
- TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: WEAVER, R. W. et al. (Eds.). . **Methods of Soil Analysis: Part 2 Microbiological and Biochemical Properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. v. 2p. 775–833.
- TEAM, R. C. **R: A language and environment for statistical computing** R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria CRAN, , 2021.
- TEDESCO, M. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre, Brasil.: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual De Metodos Logico-Cuantitativos**. [s.l.: s.n.].
- TELES, A. P. B. et al. Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? **Soil Use and Management**, v. 33, n. 1, p. 34–44, 2017.
- TIECHER, T. et al. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 271–282, 2012.
- TONON-DEBIASI, B. C. et al. Microbial attributes as structural quality index for physical health of an Oxisol under compaction levels. **Soil and Tillage Research**, v. 235, n. August 2023, 2024.
- VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1 jan. 1987.

- WAN, W. et al. Soil aggregate fractionation and phosphorus fraction driven by long-term fertilization regimes affect the abundance and composition of P-cycling-related bacteria. **Soil and Tillage Research**, v. 196, n. March 2019, p. 104475, 2020.
- WANG, X. et al. Mapping cover crop species in southeastern Michigan using Sentinel-2 satellite data and Google Earth Engine. **Frontiers in Artificial Intelligence**, v. 6, 2023.
- WILLIAMS, A.; HEDLUND, K. Indicators of soil ecosystem services in conventional and organic arable fields along a gradient of landscape heterogeneity in southern Sweden. **Applied Soil Ecology**, v. 65, p. 1–7, 1 mar. 2013.
- WITHERS, P. J. A. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports 2018 8:1**, v. 8, n. 1, p. 1–13, 7 fev. 2018.
- XU, C. et al. Coupling mechanism of C:N:P stoichiometry between plant and soil after long-term reclamation in the coastal area, eastern China. **Regional Studies in Marine Science**, v. 68, n. August, p. 103178, 2023.
- YANG, Q. et al. Differences in the distribution, availability, and sorption-desorption isotherms of phosphorus fractions in soil aggregates from cut slopes with different restoration methods. **Soil and Tillage Research**, v. 234, p. 105822, 1 out. 2023.
- ZHANG, G. S.; NI, Z. W. Soil phosphorus fractions in aggregate size classes in southwestern China. **Soil Use and Management**, v. 34, n. 2, p. 266–275, 2018.
- ZHANG, Z. et al. Cover crop functional types differentially alter the content and composition of soil organic carbon in particulate and mineral-associated fractions. **Global Change Biology**, v. 28, n. 19, p. 5831–5848, 2022.
- ZHENG, F. et al. Strong links between aggregate stability, soil carbon stocks and microbial community composition across management practices in a Chinese dryland cropping system. **Catena**, v. 233, n. March, p. 107509, 2023.

Apêndices

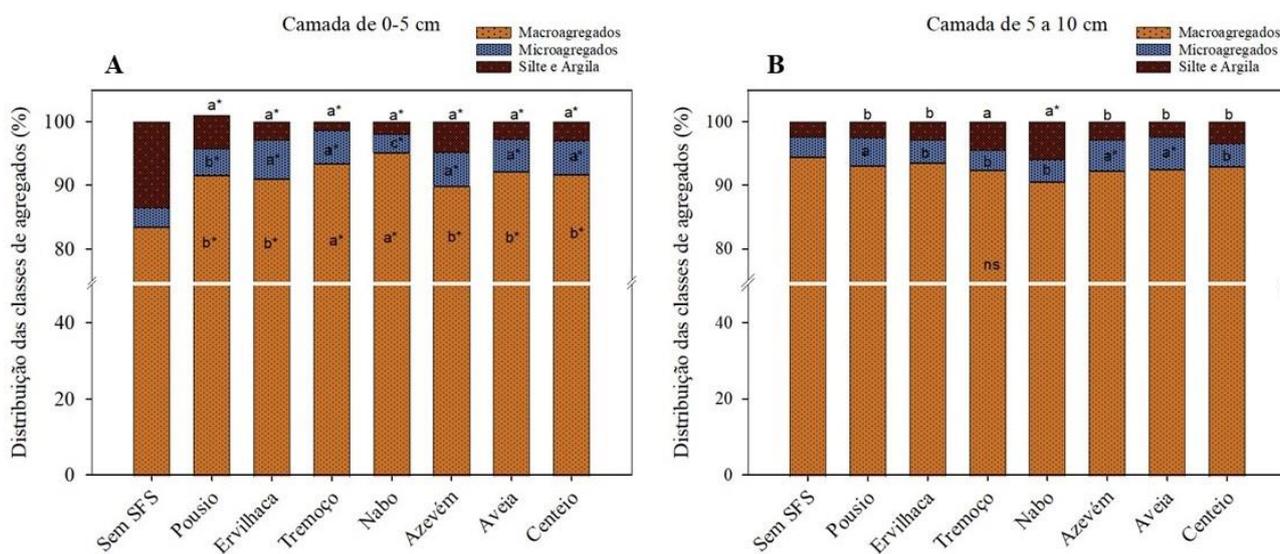


Figura 1: Macroagregados, Microagregados e Silte e Argila nas camadas de 0-5 e 5-10 cm sob efeitos das plantas de cobertura após 12 safras. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o pousio sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

Tabela S1: Teor de P total (mg kg^{-1}) na classe de agregados do solo em virtude dos efeitos das plantas de cobertura após 12 safras.

Tratamentos	P total (mg kg^{-1})	
	Macroagregados	Microagregados
	0-5 cm	
Sem SFS	1921.55	1024.86
Pousio	2251.75 a*	1060.29 b
Ervilhaca	2481.64 a*	1242.11 a*
Tremoço	2330.80 a*	1231.16 a*
Nabo	2410.70 a*	1202.33 a*
Azevém	2367.11 a*	1288.02 a*
Aveia	2600.35 a*	1295.36 a*
Centeio	2428.08 a*	1265.24 a*
5-10 cm		
Sem SFS	1966.57	944.42
Pousio	2040.91 c	1010.70 c
Ervilhaca	2062.80 c	1019.78 c
Tremoço	2266.02 b*	1123.72 a*
Nabo	2232.90 b*	1092.19 c*
Azevém	2335.92 b*	1149.32 a*
Aveia	2541.42 a*	1171.50 a*
Centeio	2643.66 a*	1258.46 a*

Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o Sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

Tabela S2: Teor de P total (mg kg^{-1}) no Bulk Soil em virtude dos efeitos das plantas de cobertura após 12 safras.

Camadas (cm)	Sem SFS	P total (mg kg^{-1})						
		Pousio	Ervilhaca	Tremoço	Nabo	Azevém	Aveia	Centeio
0-5	1077.02	1300.87 a*	1271.24 a*	1359.56 a*	1327.84 a*	1350.46 a*	1372.26 a*	1372.58 a*
5-10	1118.58	1094.13 ns	1132.92	1126.48	1196.61	1158.52	1147.32	1136.06
10-15	1010.29	928.38 ns	1035.09	968.04	990.75	984.27	983.72	995.57
15-30	924.19	843.76 b*	855.35 b	938.19 a	893.42 a	939.86 a	849.01 b*	815.62 b*

Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o Sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

Tabela S3: Teores de P inorgânico e orgânico dividido pelas labilidades dentro do Bulk Soil em virtude dos efeitos das plantas de cobertura após 12 safras.

Tratamentos	Pi lábil	Po lábil	Pi mod. lábil	Po mod. lábil	Pi não lábil	Po não lábil
0-5						

Sem SFS	9.76	37.17	88.26	136.54	743.92	61.37
Pousio	28.92 b*	30.75 ns	206.43 a*	136.04 b	859.37 b*	39.36 b
Ervilhaca	27.54 b*	30.20	186.49 a*	137.46 b	836.21 b*	53.35 a
Tremoço	44.65 a*	28.35	275.15 a*	156.39 a	835.15 b*	19.85 b
Nabo	36.02 a*	27.26	201.75 a*	105.09 b	889.69 a*	68.03 a
Azevém	24.64 b*	36.89 a	159.88 a	217.89 a	851.78 b*	59.38 a
Aveia	38.13 a*	30.24	209.95 a*	186.93 a	892.10 a*	40.41 a
Centeio	37.42 a*	21.93	218.93 a*	209.28 a	852.29 b*	32.74 b
5-10						
Sem SFS	7.90	29.14	79.90	162.53	793.23	45.86
Pousio	10.08 ns	26.73 ns	83.93 ns	160.39 c	755.42 ns	57.58 ns
Ervilhaca	12.22	30.00	159.04	129.94 c	765.26	36.46
Tremoço	15.67	25.87	106.86	167.38 b	766.32	44.37
Nabo	13.79	28.48	129.88	153.30 c	806.79	64.37
Azevém	12.85	28.79	99.10	201.95 a	770.56	45.27
Aveia	16.24	30.11	129.56	143.00 c	784.85	43.56
Centeio	12.30	22.12	98.75	173.55 b	755.71	73.63
10-15						
Sem SFS	4.15	29.68	56.37	127.39	753.27	39.42
Pousio	5.61 a	25.88 b	56.06 ns	99.76 ns	696.38 ns	44.69 ns
Ervilhaca	6.01 a	30.92 a	84.28	144.21	724.29	45.37
Tremoço	6.49 a*	24.32 b	67.51	116.16	697.44	56.12
Nabo	6.32 a	23.69 b	78.90	117.43	720.16	44.25
Azevém	5.49 a*	34.84 a	70.91	114.68	713.68	44.68
Aveia	5.95 a	20.67 b	74.02	127.63	711.40	44.03
Centeio	5.82 a	26.78 b	89.78	97.35	691.61	84.24
15-30						
Sem SFS	3.68	28.13	48.38	91.29	728.46	24.25
Pousio	4.31 ns	18.90 a*	54.65 ns	75.83 b	651.42 ns	38.64 b
Ervilhaca	3.05	15.55 a*	53.90	76.50 b	670.78	35.57 b
Tremoço	5.30	18.49 a*	67.01	101.57 a	696.72	49.10 b
Nabo	3.67	19.65 a*	57.99	115.34 a	660.94	35.84 b
Azevém	3.41	20.93 a*	46.90	95.65 a	696.53	76.44 a
Aveia	3.91	17.39 a*	44.89	93.42 a	659.39	30.01 b
Centeio	4.34	19.182 a*	50.59	50.90 c*	659.41	31.20 b

Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o Sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

Tabela S4: Análise de Solo do experimento da safra 2020/2021 sob efeito das plantas de cobertura após 12 safras.

TRAT	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³					mg dm ⁻³	%			
	pH	MO	P	K	Al	H+Al	Ca	Mg	SB	CTC	S	v	m
0-5 cm													
Sem SFS	4.86	48.00	12.63	5.56	2.40	55.40	50.47	32.53	88.56	143.96	11.63	61.60	2.66
Pousio	5.02 a	48.63 b	40.80 c*	5.18 a	0.57 ns	48.30 b	58.27 ns	30.27 a	93.72 ns	142.02 a	10.10 c	66.11 ns	0.63 ns
Ervilhaca	4.93 b	55.93 a*	39.57 c*	2.29 c*	2.00	44.23 b	52.67	29.93 a	84.89	129.13 b*	11.30 b	65.64	2.51
Tremoço	4.63 b	53.17 a	46.60 b*	3.14 c*	5.43	70.60 a	46.93	25.20 b	75.27	145.87 a	10.87 b	51.63	6.84
Nabo	5.05 a	54.33 a*	42.07 c*	5.35 a	0.57	43.83 b	48.90	30.47 a	84.72	128.55 b	12.93 a	65.86	0.73
Azevém	4.76 b	50.40 b	31.00 d*	4.24 b*	3.70	45.03 b	46.57	33.03 a	83.84	128.87 b*	9.50 c	65.32	4.17
Aveia	5.40 a*	51.40 b	48.53 b*	2.79 c*	1.73	50.13 b	54.33	32.00 a	89.12	139.25 a	11.33 b	64.04	1.98
Centeio	5.16 a	57.10 a*	56.43 a*	3.92 b*	2.20	54.83 b	59.47	22.97 b*	86.35	141.18 a	9.63 c*	61.13	2.58
5-10 cm													
Sem SFS	4.56	38.83	10.03	4.43	7.67	71.27	33.07	20.73	58.23	129.50	11.27	45.15	11.73
Pousio	4.64 a	36.17 ns	13.37 b	3.04 a*	4.10 b	63.53 ns	41.40 a	20.13 a	64.58 a	128.11 ns	9.73 b	50.43 ns	6.00 b
Ervilhaca	4.39 b	41.90	15.87 b	1.42 b*	10.93 a	78.67	31.93 b	13.60 b*	46.96 b	125.62	10.60 a	37.52	18.83 a
Tremoço	4.61 a	42.10	19.33 a*	2.27 b*	4.73 b	68.67	36.30 b	17.37 b	55.94 b	124.60	9.43 b	45.07	8.02 b
Nabo	4.85 a	39.30	19.13 a*	3.57 a	4.67 b	61.33	34.97 b	21.27 a	59.81 a	121.14	11.00 a	49.63	7.37 b
Azevém	4.40 b	36.07	14.77 b	3.32 a	6.77 b	71.23	30.90 b	20.60 a	54.82 b	126.06	9.17 b	43.70	11.14 b
Aveia	4.83 a	40.90	22.40 a*	1.85 b*	6.00 b	59.37	41.53 a	23.10 a	66.48 a	125.85	9.17 b*	52.99	8.3b
Centeio	4.70 a	40.27	21.10 a*	1.94 b*	8.93 a	73.10	41.73 a	16.27 b	59.94 a	133.04	8.20 b*	45.20	13.03 a
10-15 cm													
Sem SFS	4.73	31.33	7.50	3.02	5.17	57.27	34.97	20.30	58.29	115.55	9.40	50.57	8.05
Pousio	4.70 ns	32.20 b	10.13 ns	1.50 a*	2.60 ns	52.87 ns	44.97 ns	20.30 a	66.76 a	119.63 ns	9.93 a	55.73 ns	3.8 ns
Ervilhaca	4.52	36.67 a*	9.53	1.03 b*	4.37	66.27	35.07	12.40 b*	48.50 b	114.77	10.03 a	42.29	8.23
Tremoço	4.64	34.60 a	12.03	1.52 a*	5.70	59.97	34.80	15.40 b	51.72 b	111.68	10.47 a	46.64	10.23
Nabo	4.54	31.90 b	10.70	1.68 a*	6.27	69.90	30.47	12.83 b*	44.98 b	114.88	12.40 a*	39.31	12.03
Azevém	4.46	34.20 a	8.80	1.80 a*	5.43	58.27	36.03	15.07 b*	52.90 b	111.17	8.67 a	47.54	9.37
Aveia	4.82	30.53 b	10.63	0.89 b*	5.53	57.87	39.73	18.07 a	58.70 a	116.56	9.10 a	50.34	8.69
Centeio	4.79	32.30 b	9.90	1.02 b*	6.00	60.80	39.57	17.17 a	57.76 a	118.56	9.73 a	49.16	9.60
15-30 cm													
Sem SFS	4.78	26.77	7.00	2.05	4.37	50.63	30.87	18.47	51.38	102.01	10.73	50.49	7.86
Pousio	4.95 a	28.07 c	7.97 ns	1.00 a*	2.00 ns	48.13 ns	41.23 a*	18.20 ns	60.43 ns	108.56 ns	12.27 b	55.62 ns	3.28 ns
Ervilhaca	4.71 b	29.47 b	7.37	0.73 a*	3.77	50.93	34.40 a	11.30	46.43	97.37	14.87 a*	47.82	7.51
Tremoço	4.66 b	32.13 a	8.23	0.95 a*	5.27	58.30	36.17 a	12.97	50.08	108.38	14.13a*	46.15	9.74
Nabo	4.65 b	25.60 c	7.00	0.94 a*	5.60	55.00	32.87 a	14.57	48.37	103.37	15.40 a*	46.90	10.69
Azevém	5.17 a	26.60 c	7.00	0.83 a*	2.13	50.87	35.37 a	14.37	50.56	101.43	9.13 b	49.86	3.95
Aveia	4.97 a	27.37 c	7.77	0.6 a*	3.53	49.53	39.83 a	15.67	56.13	105.67	9.83 b	53.46	5.92
Centeio	4.93 a	29.27 b	7.63	0.67 a*	4.70	54.63	38.53 a	14.97	54.17	108.81	11.63 b	49.78	8.12

3. ESTOQUES DE CARBONO, FÓSFORO E QUALIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DE PLANTA DE COBERTURA E ADUBAÇÃO FOSFATADA

Resumo

Os estoques de C, N e P no solo desempenham papéis vitais na ciclagem de nutrientes, na manutenção da estrutura do solo e na função dos ecossistemas. A estequiométrica C:N:P variam de acordo com o tipo de vegetação influenciando na taxa de decomposição da MO e impactando na disponibilidade de nutrientes e a atividade enzimática do solo. Portanto, ainda permanece lacunas no que diz respeito as relações C:N e C:P das plantas de cobertura nos sistemas agrícolas. O objetivo foi avaliar os estoques de C e P e a alteração no índice de qualidade do solo. O ensaio de longa duração (12 anos) realizado com plantas de cobertura de inverno na entressafra, constatando com sete anos com entrada de P no sistema, via fertilizante fosfatado e cinco anos explorando o efeito residual do fertilizante. Foi realizado o fracionamento físico da MOS para a quantificação do estoque de C e N, foi avaliada a estabilidade dos agregados, atividade da enzimática, CBM e o índice de qualidade do solo. A relação C:P foi sensível ao manejo das plantas de cobertura, melhorando o aumento do estoque de carbono e a estabilidade dos agregados no sistema agrícola. O nabo, a aveia e a ervilhaca obtiveram um aumento de 14, 10 e 10,5% em relação ao pousio. Os atributos que compõe os indicadores físicos (densidade e macroagregados) e os indicadores biológicos (CBM e enzima β -glicosidase) foram fortemente correlacionados com a disponibilidade de P no sistema. Verificamos que a utilização do SMAF que gerou um índice de qualidade do solo, os maiores índices foram obtidos pela aveia, pousio sem P e tremoço, com 0,92, 0,91 e 0,91. Nossos resultados implicaram que diferentes espécies de cobertura melhoram a eficiência no estoque de C do solo promovendo melhor qualidade do solo.

Palavra-chave: Estoque de C, SMAF, Indicadores Físicos, Matéria orgânica

Abstract

C, N and P stocks in soil play vital roles in nutrient cycling, maintaining soil structure and ecosystem function. The stoichiometric C:N:P varies according to the type of vegetation, influencing the rate of OM decomposition and impacting the availability of nutrients and the enzymatic activity of the soil. Therefore, there are still gaps regarding the C:N and C:P ratios of cover crops in agricultural systems. The objective was to evaluate C and P stocks and changes in the soil quality index. The long-term test (12 years) carried out with winter cover crops in the off-season, observing seven years of P input into the system via phosphate fertilizer and five years exploring the residual effect of the fertilizer. Physical fractionation of the SOM was carried out to quantify the C and N stock, the stability of the aggregates, enzyme activity, CBM and the soil quality index were evaluated. In terms of C:P ratio, they were sensitive to the management of cover crops, improving the increase in carbon stock and the stability of aggregates in the agricultural system. Turnip, oats and vetch increased by 14,

10 and 10.5% compared to fallow. The attributes that make up the physical indicators (density and macroaggregates) and the biological indicators (CBM and β -glucosidase enzyme) were strongly correlated with the availability of P in the system. We verified that the use of SMAF generated a soil quality index, therefore the highest indexes were obtained by oats, P-free fallow and lupins, with 0.92, 0.91 and 0.91. The results implied that different cover species improve the efficiency of soil C stocks, promoting better soil quality.

Keyword: C stock, SMAF, Physical Indicators, Organic matter

3.1 Introdução

O solo tem desempenhado diversas multifuncionalidades fornecendo um fluxo de serviços ecossistêmicos (Adhikari; Hartemink, 2016; Drobniak et al. 2018), entre eles podemos relatar, melhoria na biota do solo, maior ciclagem de nutrientes e melhoria na retenção de umidade. Conseqüentemente, os componentes são dependentes das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, influenciadas pelo uso e o manejo do solo (Adhikari; Hartemink, 2016; Barrios, 2007; Ghaley; Porter; Sandhu, 2014; Goetz; Brouwer, 2009; Krishnaswamy et al., 2013; Marks et al., 2009; Van eekeren et al. 2010; Williams; Hedlund, 2013).

De maneira geral a fertilidade do solo é impactada pelos diferentes tipos de cultivo, pela quantidade e qualidade da produção agrícola (Zhang et al. 2007). O armazenamento de carbono e retenção de nutrientes são componentes substanciais para a construção e manutenção da fertilidade do solo, condicionados pela ciclagem de nutrientes (Williams; Hedlund, 2013).

Tendo em vista que, o carbono orgânico do solo (COS) é o constituinte primordial da MOS, sendo utilizado como recurso para as comunidades microbianas do solo, o mesmo exerce um papel importante na liberação de exsudados e na transformação dos resíduos vegetais em nutrientes para a absorção das plantas, conseqüentemente reduzindo a perda de nutrientes no sistema (Johnston; Poulton; Coleman, 2009).

De acordo com Dos reis et al. (2014), a capacidade dos solos de sequestrar o carbono está correlacionada com a formação dos organominerais. A ideia de mitigar a concentração de CO₂ na atmosfera, proporcionando o aumento de (COS) surgiu no final da década de 1980 (Spohn, 2020). Buscando cada vez mais produzir de forma sustentável, permitido um melhor aproveitamento dos recursos que os ecossistemas oferecem, tem gerado grande proporção com a finalidade de melhorar a qualidade do solo.

Os diferentes estágios de decomposição da MOS em detrimento do tamanho dos agregados, desempenham um papel importante como indicador da variação do conteúdo de fósforo (P) no solo, sobretudo para as frações orgânicas de P (Po). A biomassa microbiana é um dos componentes da MOS, que participa diretamente no Po armazenado, como P microbiano (Pmic), e conseqüentemente seu acesso é dificultado para reagir com os minerais de argilas e óxidos (GUPPY et al. 2005).

Portanto, o tamanho da estrutura dos constituintes inorgânicos e orgânicos do solo e o grau de mineralização e atividade da MOS variam conforme o tamanho dos agregados. Com isso, a biodisponibilidade do P para as plantas e a relação C:N:P são influenciadas para cada tamanho do agregado (GARLAND et al. 2017; LIAO et al. 2018). A deficiência de P pode levar a sérios danos, nas plantas, principalmente, por ser um componente principal na formação das células, como os ácidos nucleicos e fosfolípidios, biomembranas e também da ATP, conseqüente o crescimento e o desenvolvimento da planta é interrompido, provocando perdas na produtividade nos sistemas agrícolas (GATIBONI, 2003).

A qualidade do solo deve ser relacionada com a diversas funções do solo, englobando os atributos físicos, químicos e biológicos que refletem nas mudanças do uso e no manejo do solo (Bünemann et al. 2018). Dessa forma, realizar a avaliação da qualidade do solo deve incluir os indicadores químicos físicos e biológicos de forma conjunta (Miguel Reichert et al. 2022; Rinot et al. 2019).

Tendo em vista da importância do estoque de C no solo e sobre a escassez de estudos abordando interferência do acúmulo de C no ciclo P, este estudo tem como hipótese que o acúmulo de C promove maior disponibilidade de P no solo. Portanto, este capítulo objetiva explicar melhor a interação entre C e P no solo, e como isso interfere nas propriedades físicas, químicas e biológicas, impactando nos parâmetros de qualidade do solo.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Descrição da área

O estudo foi realizado em experimento de longa duração conduzido desde 2009 na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), município de Dois Vizinhos - PR (25° 44' 05" S, 53° 03' 31" W), a 562 m de altitude. A temperatura média nos meses mais quentes é 22 °C e nos mais frios 13 °C, com pluviosidade média anual de 2100 mm. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Argiloso, com 73% de argila.

3.2.2 Desenho experimental e tratamentos.

O delineamento experimental foi estabelecido em blocos casualizados, com oito tratamentos, três repetições, em parcelas 5 x 5 m (25 m²). Os tratamentos são seis plantas de coberturas (ervilhaca - *Vicia sativa*, tremoço-branco - *Lupinus albus*, nabo forrageiro - *Raphanus sativus*, azevém - *Lolium multiflorum*, aveia preta - *Avena strigosa* e centeio - *Secale cereale*), um pousio com dessecação frequente das plantas espontâneas, todos com aplicação de fertilizante fosfatado solúvel; e também um pousio adicional sem aplicação de fertilizante fosfatado durante todo ensaio (2009-2021).

A adubação fosfatada foi realizada anualmente ao longo das safras de 2009/10 a 2015/16 com dose média de 45,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P solúvel, sendo aplicada a lanço e sem incorporação. A fonte fosfatada utilizada foi a superfosfato simples (SFS-18% de P₂O₅ solúvel), com uma quantidade total de 335 kg ha⁻¹ ano⁻¹. A partir da safra de 2016/17 foi suspensa a adubação fosfatada, devido aos níveis altos de P resina (>50mg kg⁻¹) no solo, para avaliação do efeito residual do fertilizante fosfatado. Dessa forma, foram sete anos com entradas de P e cinco anos explorando o P residual do solo. Ressaltando que as plantas de cobertura no inverno não receberam fertilizante fosfatado para permitir a avaliação da absorção do P remanescente da cultura de verão.

3.2.3 Indicadores químicos

Amostras de solo foram coletadas em setembro de 2021 para avaliação dos indicadores químicos do solo, nas profundidades 0–5, 5–10, 10–15 e 15–30 cm de cada parcela, com seis subamostras que foram uniformemente misturadas para formar uma amostra composta de cada profundidade. Nos resultados aqui apresentados estão demonstrados apenas os valores de pH, P e K, pois o programa SMAF utiliza esses como indicadores químicos de qualidade do solo. Para mais detalhe dos outros componentes da análise de solo, verificar o apêndice do capítulo 2.

3.2.4 Indicadores físicos

Para os indicadores físicos foi realizado a abertura de trincheira de 20x20x15 cm para coleta de amostras indeformadas com anel volumétrico, para determinação da densidade do solo e resistência a penetração, seguindo metodologia de Teixeira et al. (2017). As amostras foram coletadas nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-30 cm. As amostras foram saturadas com água destilada por capilaridade por 48 h e posteriormente submetidas a tensão da água 30 e 100 hPa utilizando câmaras de pressão.

A cada tensão, após as amostras atingirem o equilíbrio matricial, foram pesadas e levadas para realizar a resistência a penetração no equipamento CT3 Texture Analyzer, acoplado a um computador para a obtenção dos dados proposta por (Dexter; Kroesbergen et al. (1985) e posteriormente foram secas na estufa a 105°C por 24h e novamente pesadas para a determinação da umidade gravimétrica e da densidade do solo (Ds).

Na mesma trincheira aberta; foram coletadas amostras semi-destorroadas para a avaliação da estabilidade dos agregados. Após a coleta do material no campo, as amostras foram levadas ao laboratório, destorroadas e peneiradas manualmente respeitando os pontos de fraqueza dos agregados. Na avaliação da estabilidade dos agregados, as amostras passaram por um jogo de peneiras de diferentes tamanhos de malhas 2,0; 0,250; 0,053 mm resultando nas classes de agregados, macroagregados grandes > 2,0 mm, macroagregados pequenos 2,0 - 0,250 mm e microagregados 0,250 – 0,053 mm. Posteriormente, todas as classes de agregados foram seca em estufa de circulação á 40 °C pela metodologia proposta por (Elliott, 1986). Ressaltando que agrupamos as classes de macroagregados grandes e pequenos em apenas uma classe para melhor interpretação dos dados.

Com a massa de agregados obtida pelo peneiramento, calculou-se a distribuição da classe de agregados (utilizada no fracionamento químico do P) e o diâmetro médio ponderado, pela fórmula:

$$DMP = \sum xi. yi \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde o xi: a proporção de cada classe de tamanho com relação a amostra total e o yi: diâmetro médio ponderado de cada classe de tamanho (valores médios das peneiras).

O SMAF utiliza curvas de pontuações para alguns parâmetros físicos. A parti disso, foram analisadas a densidade aparente do solo (Ds) e a estabilidades dos agregados (EA), representando os indicadores físicos.

3.2.5 Indicadores biológicos

A atividade da enzima β -glicosidase (EC 3.2.1.21) envolvidas no ciclo do C do solo foi quantificada pelo método (TABATABAI, 1994), baseado na determinação colorimétrica do p-nitrofenol (coloração amarela). Esta foi realizada em duplicatas, com um branco para cada amostra e as atividades expressas como mg p-nitrofenol kg⁻¹ de solo h⁻¹.

O carbono da biomassa microbiana foi determinado pelo método de fumigação utilizando o clorofórmio e extração no sulfato de potássio 0,5M, em relação a um extrato de solo não fumigado, proposto por VANCE; BROOKES; JENKINSON, et al. (1987).

O teor de COS utilizado no SMAF foi obtido através da conversão do teor de matéria orgânica em carbono, pela seguinte fórmula.

$$C = MO \div 1,724 \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde: C: carbono orgânico do solo, MO: matéria orgânica (proveniente da análise de solo) e 1,724 é o fator de conversão.

3.2.6 Fracionamento físico da matéria orgânica

O fracionamento físico da matéria orgânica realizado pelo método granulométrico adaptado por Cambarela e Elliot (ANO). O Hexametáfosfato de sódio foi utilizado para separar as frações, onde a fração que passou pela peneira (<0,053 mm) representa a fração de MO associado aos minerais (MOAM) e a fração que permaneceu retida na peneira (>0,053 mm), representa a matéria orgânica particulada (MOP), ambas determinadas por combustão no LECO[®] CN200 (Cambardella; Elliott, 1992), para a determinação do C.

3.2.7 Estoque de carbono e fósforo no solo

Antes de iniciar os cálculos de estoque de C foi realizada a massa de solo equivalente, com a finalidade de ajustar as diferenças na massa do solo entre as camadas coletadas em relação ao tratamento de referência de acordo com a metodologia proposta por ELLERT; Bettany, et al. (1995) e De Moraes et al. (1996). O pousio (PO) foi definido como a área de referência e a massa de solo ajustada, sendo calculada em virtude da razão entre a densidade do solo dos tratamentos e a densidade do pousio em cada camada de solo equivalente, como mostrado pela Eq (3).

$$\text{Camada equivalente} = \frac{DS_{PO}}{DS_{TRAT}} \times \text{espessura da camadas} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde: o DS_{PO} é a densidade do pousio ($Mg\ m^{-3}$) em PO em uma determinada profundidade e DS_{TRAT} é a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) em TRAT em uma determinada profundidade.

O cálculo para estoque de C do solo foi obtido pela seguinte fórmula demonstrada pela Eq. (4).

$$\text{Estoque de carbono} = C_{camada} \times DS_{camada} \times \text{camada equivalent} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde: O estoque de C está em $Mg\ ha^{-1}$: C_{camada} é o teor de C (%) nas frações de MOP e MOAM em uma determinada camada de solo e o DE_{camada} é a densidade aparente do solo ($Mg\ m^{-3}$) em uma determinada camada de solo.

O estoque de fósforo no solo foi obtido com auxílio dos valores de P provenientes do fracionamento químico do solo (utilizando os dados do 1º capítulo).

3.2.8 Indicadores de qualidade do solo

A determinação dos índices de qualidade do solo foi feita com o auxílio da ferramenta Soil Management Assessment Framework (SMAF), desenvolvido no Soil Quality Institute (Andrews; Karlen; Cambardella, 2004). sendo umas das técnicas mais difundidas para avaliar a saúde do solo, devido a flexibilidade na seleção dos indicadores. A avaliação do SMAF, consiste em três processos: i) a escolha de um banco de dados; ii) interpretação dos indicadores avaliados e por fim iii) a junção dos indicadores em um único índice geral. O banco de dados, é constituído pelos índices químicos: pH, P e K, os físicos: densidade aparente e os biológicos: carbono orgânico do solo e β -glicosidase. Dessa maneira, os indicadores foram transformados em valores que irão constituir em pontuações que variando de 0-1 utilizando curvas de pontuações não lineares na planilha SMAF. Por fim, todas as pontuações foram integradas em um índice geral de saúde do solo (SHI).

3.2.9 Análise estatística

A normalidade (*Shapiro-Wilks*) e homoscedasticidade da variância (*Bartlett*) foram verificadas para cada parâmetro avaliado, quando não atendidos estes pressupostos foi aplicado a transformação Box-Cox. Em seguida, os dados foram avaliados por análise de variância (ANOVA, $p \leq 0,05$), e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), e foi aplicado o teste de Dunnett, onde o pousio sem fósforo foi comparado com os demais tratamentos.

Em seguida, foi utilizado a técnica multivariada para analisar o conjunto de dados (PCA – *Principal Component Analysis*). Os dados e os gráficos gerados foram elaborados no programa R versão 4.0.5 (TEAM, 2021) e no SigmaPlot versão 10.

3.3 Resultados

3.3.1 Estoque de C e P e relação C:P

As concentrações de carbono no solo variaram significativamente em função das plantas de cobertura. O nabo, a aveia preta e a ervilhaca se destacaram, dos demais tratamentos, apresentando médias de 105, 101, e 101 Mg ha^{-1} de C, contabilizando um aumento de 14, 10 e 10,5%; respectivamente em comparação ao pousio com o fosfato (90,3 Mg ha^{-1} de C). Quanto ao pousio sem P, apresentou o mesmo comportamento em relação ao pousio, se diferenciando dos tratamentos com maiores valores de carbono no solo (Figura 1A). Notamos diferença significativa no estoque de P, quando comparamos com o pousio sem P isoladamente com cada tratamento, se diferenciando do tremoço, nabo, azevém e aveia preta

(Figura 1B). No estoque de N não houve diferença significativa entre os tratamentos avaliados (Figura S1).

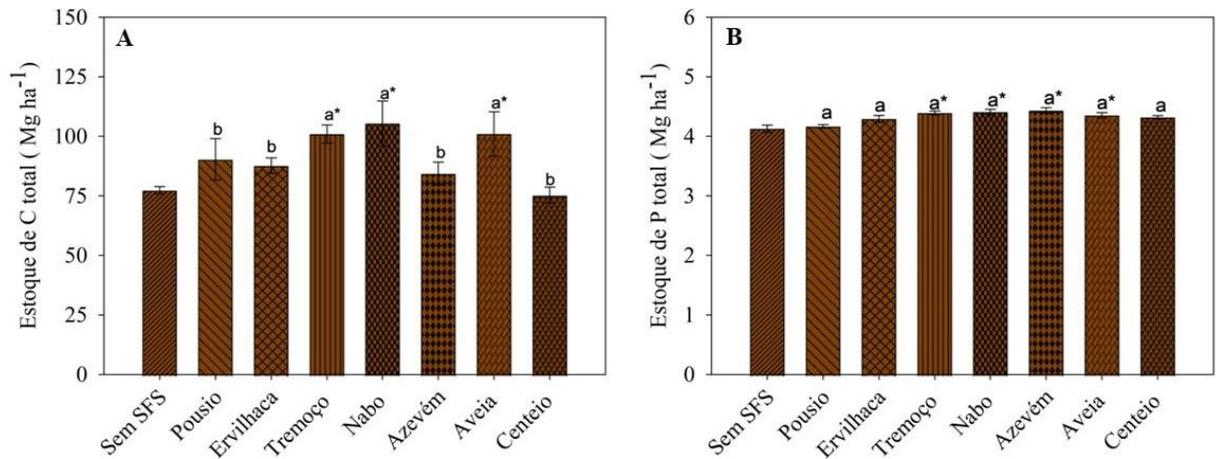


Figura 1: Estoque de C total (A) e estoque de P total (B) na camada de 0 a 30 cm sob efeitos das plantas de cobertura após 12 safras. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o pousio sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

As variações da relação C:P do solo na camada de 0 a 30 cm estão mostradas na Figura 2A. A relação C:P aumentou na aveia, nabo, tremoço e pousio, 23,7, 23,1, 23 e 21,7; respectivamente. Em comparação ao pousio sem P, não foi constatado diferença estatística ($p < 0,05$). Apesar da relação C:N ser um fator importante na influência do estoque do C no solo, não relatamos nesse estudo, diferença significativa (Figura 2B). Entretanto, nas frações MOAM e MOP, foi constatado influência no manejo com plantas de cobertura (Tab. S1).

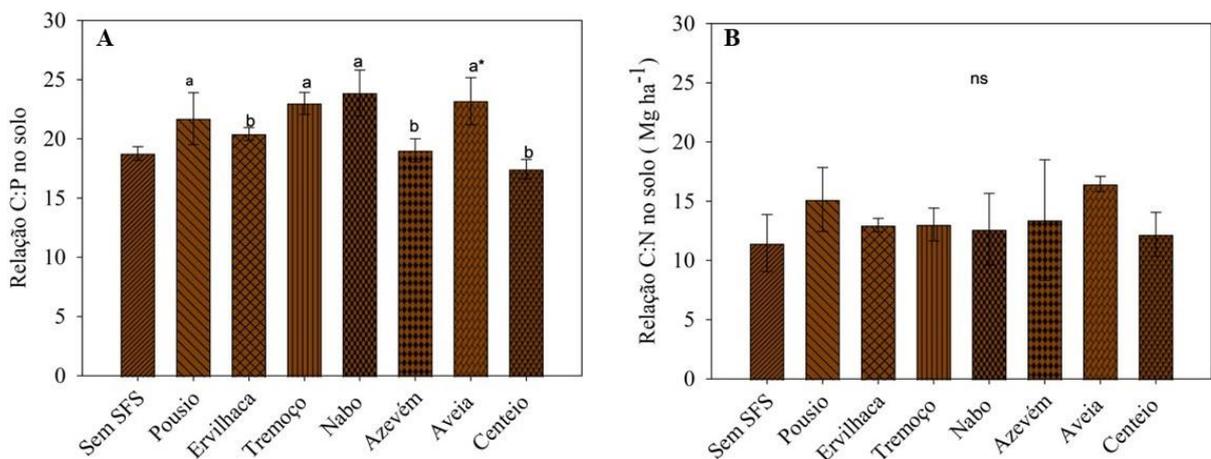


Figura 2: Relação C:P (A) e relação C:N (B) na camada de 0 a 30 cm sob efeitos das plantas de cobertura após 12 safras. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o pousio sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

3.3.2 Indicadores físicos

A densidade está relacionada a compactação do solo. As plantas de coberturas do solo com alto potencial de crescimento radicular, desempenham um papel como indicador de descompressão do solo. Após 12 safras, as plantas de cobertura de inverno alteraram a densidade do solo nas camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm, não sendo observadas diferenças nas camadas mais profundas (10 a 15 e 15-30 cm) (Figura 3).

Na camada de 0 a 5 cm a ervilhaca e o pousio, com 1,27 e 1,19 g cm^{-3} , apresentaram maiores valores de densidade. Ao comparar o pousio sem P, o mesmo se diferiu apenas da ervilhaca e do azevém (1,02 g cm^{-3}). Já em relação a camada de 5 a 10 cm, o destaque foi para o centeio (1,23 g cm^{-3}), pousio (1,22 g cm^{-3}) e aveia (1,21 g cm^{-3}), os quais, também diferiram do pousio sem P juntamente com o azevém (1,20 g cm^{-3}) (Figura 3).

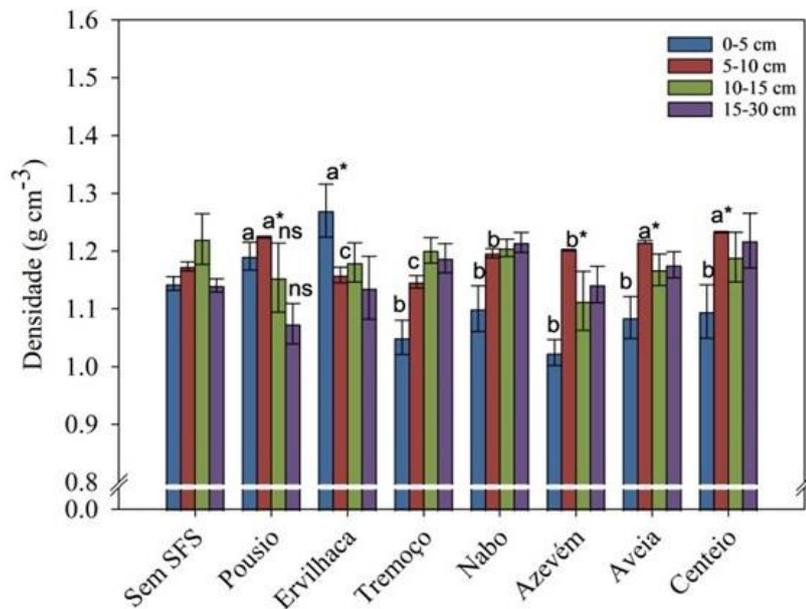


Figura 3: Densidade do solo sob efeitos das plantas de cobertura após 12 safras. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o pousio sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

A densidade do solo interfere no arranjo de partículas, ou seja, alteram o espaço poroso do solo que é formado pela macroporosidade e microporosidade. Não observamos diferença na porosidade total do solo (Fig.S1), entretanto houve diferença nos macroporos e microporos. Os macroporos aumentaram na medida que ocorreu a redução da densidade do solo sendo acompanhado pelos menores valores de microporos.

Os microporos são fundamentais para a retenção e armazenamento de água pelo solo. Na camada de 0 a 5 cm, apenas o centeio diferiu dos demais tratamentos, incluindo o pousio sem P, apresentando menor valor, $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 4A). Notamos comportamento semelhante nas camadas de 5-10 e 10-15 cm, ressaltando que apenas na penúltima camada o centeio não diferiu do pousio sem P (Figura 4 B-C). E na camada de 15-30 cm não houve diferença ($p < 0,05$) entre os tratamentos (Figura 4D).

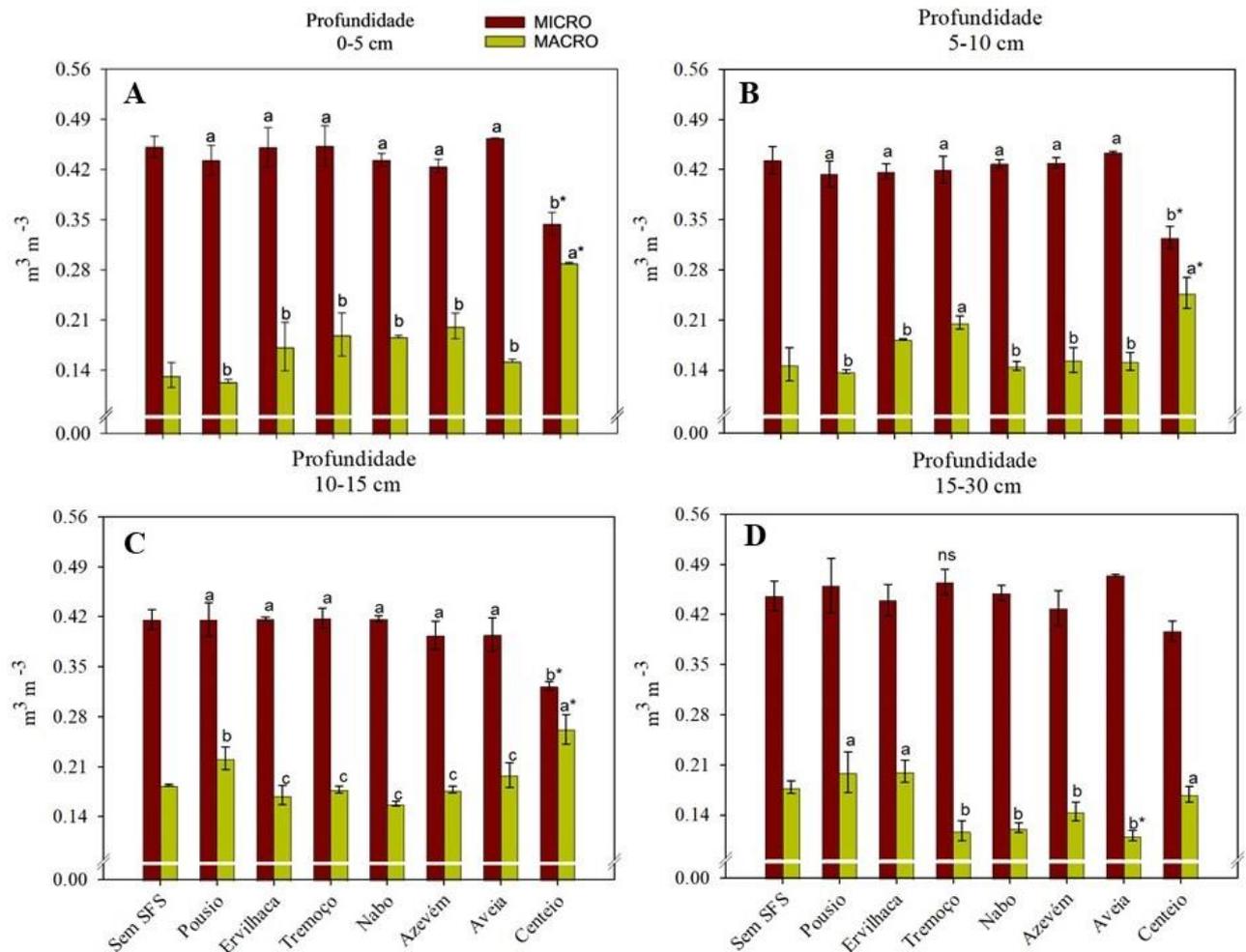


Figura 4: Macroporosidade e Microporosidade em diferentes profundidades sob efeitos das plantas de cobertura após 12 safras. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o pousio sem SFS com cada

tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

Os macroporos influenciam a infiltração, sua redistribuição e a reação do solo. O centeio altera o volume de macroporos no solo, promovendo seu aumento em todas as camadas avaliadas. O pousio sem P; se diferiu apenas do centeio nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-15 cm (Figura 4A-B-C). Ao observar o comportamento das plantas de cobertura e do pousio na camada de 15-30 cm, apenas a aveia preta se diferiu do pousio sem P, com $p < 0,05$ (Figura 4C).

A distribuição dos macroagregados foram modificadas pelas plantas de coberturas em todas as camadas, exceto na camada de 5-10 cm (Figura B). Na camada de 0 a 5 cm, o nabo (95,1%) e o tremoço (93,4%), tendo um aumento de 3,5 e 1,8 em relação ao pousio (91,64%). Retratando que todos diferiram do pousio sem P (Figura 5A). Na camada de 10 a 15 cm apenas a ervilhaca diferiu dos demais tratamentos (incluindo o pousio sem P), com menor média de 79,5% (Figura 5C). E na última camada (15 a 30cm), o destaque foi em relação a ervilha, azevém e centeio, correspondendo há 93, 93,5 e 92,2% com altas proporção de macroagregados, pelo aumento de 2,9, 2,8 e 0,03% ao se comparar com o pousio (90,9%). Enquanto, somente esses tratamentos representados, que diferenciaram do pousio sem P (Figura 5D).

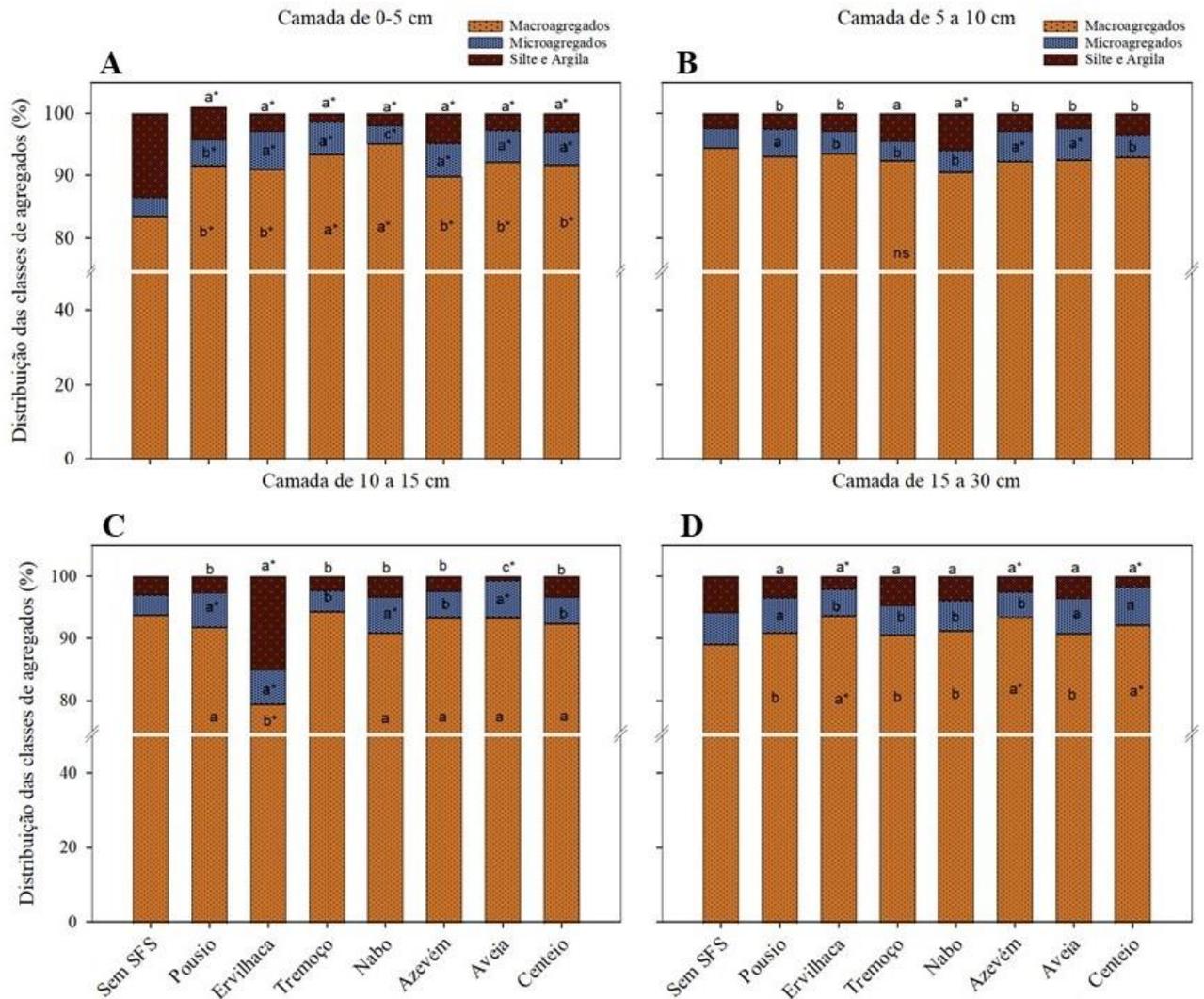


Figura 5: Macroagregados, Microagregados e Silte e Argila nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-30 cm sob efeitos das plantas de cobertura após 12 safras. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunnett, para comparar o pousio sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

Os microagregados também são componentes da estruturação do solo. Na camada de 0 a 5 cm todos as culturas foram semelhantes entre si para os microagregados, exceto o nabo que apresentou menor média, juntamente com o pousio. Porém, todos os tratamentos diferiram do pousio sem P, exceto o nabo forrageiro (Figura 5A). Enquanto o comportamento na camada de 5 a 10 cm, o destaque foi para a aveia (5,04%), azevém (4,84%) e o pousio (4,34%) em relação as demais espécies. Ao comparar com o pousio sem P, distinguiu apenas da aveia e do azevém (Figura 5B). Na camada de 10 a 15 cm, as maiores médias foram a aveia, o nabo, o pousio e a ervilhaca, sendo 5,8, 5,7, 5,4 e 5,5%, respectivamente, as quais,

também se distinguíram estatisticamente em relação ao pousio sem P (Figura 5C). E na última camada (15 a 30 cm), o centeio (6,09%), a aveia preta (6,62%) e o pousio (5,62%), apresentaram maiores médias. No entanto, não obtivemos diferença significativa ao pousio sem P (Figura 5D).

Os valores do diâmetro médio ponderado foram afetados pelos tratamentos em todas as camadas avaliadas. O nabo forrageiro, atingiu a maior média com 4,00 mm de DMP na camada de 5 a 10 cm, gerando um aumento de 28% em relação ao pousio, com 2,88 mm de DMP. Tanto o nabo, quanto o tremoço e o azevém apresentaram diferença ($p < 0,005$) ao comparar com o pousio sem P. Na camada de 5 a 10 cm, o azevém (3,59 mm) e o centeio (3,46 mm), alcançaram a maior média, sendo superior em 30 e 27%, respectivamente, ao se correlacionar com o pousio (2,51 mm). Retratando o comportamento das culturas de cobertura na camada de 10 a 15 cm, o tremoço se destacou em relação aos demais tratamentos tendo 3,55 mm de DMP, com um percentual de 49,3% superior; ao pousio, que obteve 1,80 mm de DMP. O pousio sem P se distinguiu do tremoço, pousio, nabo e aveia preta. Para finalizar, na camada de 15 a 30 cm; os tratamentos modificaram os valores do DMP, no entanto, a aveia, o pousio e o centeio, não se diferenciaram entre si, desse modo, averiguamos que nenhum dos tratamentos avaliados conseguiram diferenciar do pousio sem P (Figura 6).

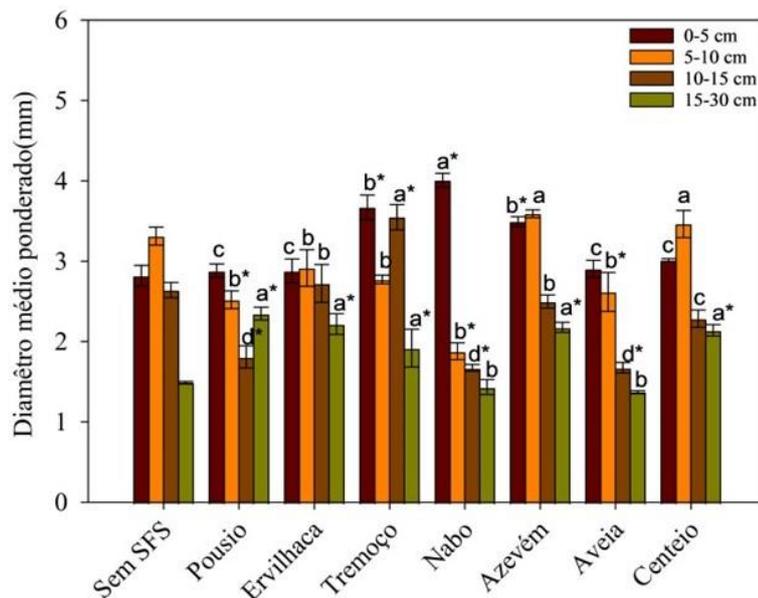


Figura 6: Diâmetro médio ponderado em diferentes profundidades sob efeitos das plantas de cobertura após 12 safras. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o pousio sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

3.3.3 Indicadores microbianos

A enzima β -Glicosidase desempenha um papel fundamental nos solos, pois está vinculada a degradação dos resíduos orgânicos nos ecossistemas. A atividade da enzima reduziu à medida que ocorreu o aumento da profundidade avaliada. Observamos que foi alterada pelas plantas de cobertura no sistema, esse efeito ocorreu apenas na camada superficial do solo (0 a 5 cm). O maior valor da atividade da enzimática foi evidenciada pelo nabo forrageiro, 526,59 $\mu\text{g PNF. g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$, atingindo um aumento de 34% em relação ao pousio 349,28 $\mu\text{g PNF. g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$. Constatamos que apenas o nabo forrageiro apresentou diferença em referência ao tratamento do pousio sem P (Figura 7A).

O C da biomassa microbiana (CBM) faz referência ao C presente na fração viva da matéria orgânica. Assim como a atividade da enzima β -Glicosidase, a concentração do CBM, também diminui com o aumento da profundidade. O centeio apresentou maior valores de atividade enzimática em ambas as camadas avaliadas, com 1195,45 e 638,61 mg kg^{-1} de CBM, com um incremento de 44 e 31%, em relação ao pousio, com 663,99 e 436,23 mg kg^{-1} , respectivamente. Ao avaliar a atividade no tratamento do pousio sem P, todos os demais tratamentos se diferenciaram, em ambas as camadas analisadas, exceto para a ervilhaca na camada de 5 a 10 cm (Figura 7B).

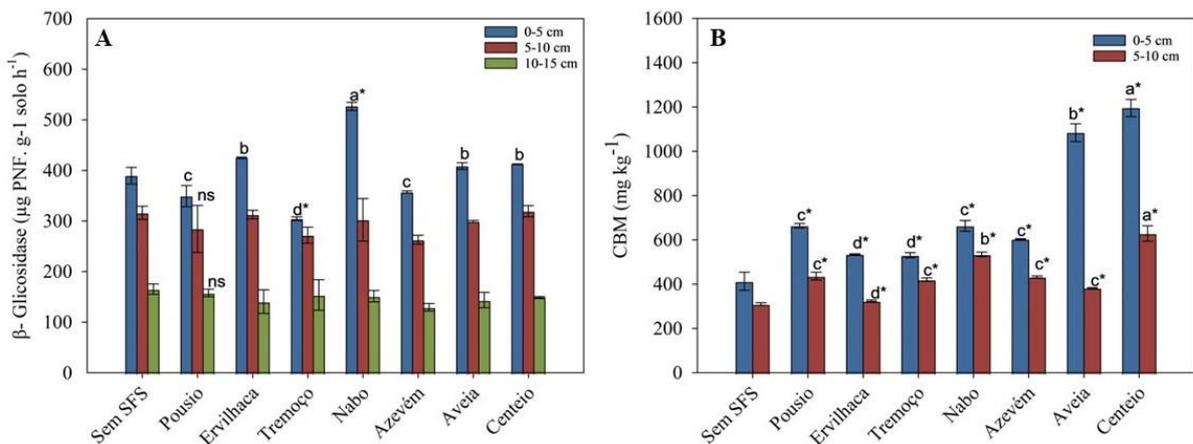


Figura 7: β - Glicosidase (A) e C da biomassa microbiana (B) sob efeitos das plantas de cobertura após 12 safras. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunnett, para comparar o pousio sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

3.3.4 Indicadores químicos

As propriedades químicas do solo sofreram alterações com as plantas de cobertura em relação ao pousio e pousio sem P, retratados pela Tabela 1. Todos os parâmetros avaliados foram reduzidos a partir do aumento da profundidade do solo. As maiores médias de pH na

camada de 0 a 5 cm foram obtidas pelas gramíneas, exceto o azevém não diferindo do pousio. Ao analisar o comportamento do pousio sem P, notamos diferença significativa em apenas em relação a aveia preta. Enquanto, na camada de 5 a 10 cm, apenas o azevém e a ervilhaca se diferenciaram dos demais tratamentos, apresentando menores valores de pH. É importante ressaltar que não houve diferença ao comparar o pousio sem P. Na camada de 10 a 15 não ocorreu alteração significativa. E na camada de 15-30 cm, o azevém, a aveia, o pousio e o centeio apresentaram maiores médias. Notamos, que o azevém se diferiu do pousio sem P.

Tabela 1: Valores de pH, fósforo (P) e potássio (K) do solo em 2021 (12° safra) sob o efeito das plantas de cobertura, Dois Vizinhos- PR.

	Tratamentos							
	Sem SFS	Pousio	Ervilhaca	Tremoço	Nabo	Azevém	Aveia	Centeio
0-5 cm								
pH CaCl ₂	4,86	5,02 a	4,93 b	4,63 b	5,05 a	4,76 b	5,40 a*	5,16 a
P mg dm ⁻³	12,63	40,80 c*	39,57 c*	46,60 b*	31,00 d*	31,00 d*	48,53 b*	56,43 a*
K mmol _c dm ⁻³	5,56	5,18 a	2,29 c*	3,14 c*	5,35 a	4,24 b*	2,79 c*	3,92 b*
5-10 cm								
pH CaCl ₂	4,56	4,64 a	4,39 b	4,61 a	4,85 a	4,40 b	4,83 a	4,70 a
P mg dm ⁻³	10,03	13,37 b	15,87 b	19,33 a*	19,13 a*	14,77 b	22,40 a*	21,10 a*
K mmol _c dm ⁻³	4,43	3,04 a*	1,42 b*	2,27 b*	3,57 a	3,32 a	1,85 b*	1,94 b*
10-15 cm								
pH CaCl ₂	4,73	4,70 ns	4,52	4,64	4,54	4,46	4,82	4,79
P mg dm ⁻³	7,50	10,13 ns	9,53	12,03	10,70	8,80	10,63	9,90
K mmol _c dm ⁻³	3,02	1,50 a*	1,03 b*	1,52 a*	1,68 a*	1,80 a*	0,89 b*	1,02 b*
15-30 cm								
pH CaCl ₂	4,78	4,95 a	4,71 b	4,66 b	4,65 b	5,17 a	4,97 a	4,93 a
P mg dm ⁻³	7,00	7,97 ns	7,37	8,23	7,00	7,00	7,77	7,63
K mmol _c dm ⁻³	2,05	1,00 a*	0,73 a*	0,95 a*	0,94 a*	0,83 a*	0,60 a*	0,67 a*

Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o pousio sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

As plantas de cobertura modificaram as concentrações de P nas camadas superficiais (0 a 5 e 5 a 10 cm), não observamos alterações significativas nas camadas subsuperficiais (10 a 15 e 15 a 30 cm). A aveia e o centeio detiveram as maiores médias em ambas as camadas. Na camada de 0 a 5 cm o centeio, 56,43 mg dm⁻³ de P, teve um aumento de 15,53 mg dm⁻³ (27,7%), em comparação ao pousio. Destacamos que todos os tratamentos diferiram do pousio sem P. Tivemos comportamento semelhante na camada de 5 a 10 cm, com destaque também para o tremoço e o nabo, o quais, juntamente com a aveia e o centeio, apresentaram as maiores médias e diferiram do pousio sem P (Tabela 1).

As variações nas concentrações de K foram semelhantes em todas as camadas, variando as maiores médias entre o nabo, pousio, azevém e o tremoço, com uma pequena

exceção na camada de 0 a 5cm, onde o tremoço apresentou menor média e na camada de 15 a 30 cm, local que não ocorreu diferença entre os tratamentos avaliados pelo teste Scott-Knott. Ao avaliar o tratamento do pousio sem P, na camada de 0 a 5 cm apenas não diferiu do nabo e do pousio, na camada de 5 a 10 cm apresentou diferença em comparação ao nabo e ao azevém, e por fim, na última camada diferiu de todos os tratamentos (Tabela 1).

3.3.5 Índice de qualidade do solo

Os scores gerados pelo SMAF formaram um índice de qualidade do solo (IQS). Em referências aos indicadores químicos (pH, P e K), aveia apresentou maior score no pH em comparação aos demais tratamentos, e quanto que para o P todas as plantas de cobertura incluindo o pousio não diferiram entre si, mas se distinguiram do pousio sem P. Para o K, o pousio, nabo e azevém obtiveram maiores scores, contudo não diferenciaram do pousio sem P. Para os indicadores físicos, os scores gerados para a densidade o maior valor foi atribuído para o tremoço, no entanto, não diferiu do pousio sem P. Apenas a ervilhaca e o pousio se diferenciaram do pousio sem P. Os macroagregados, não representaram nenhuma diferença entre os tratamentos, os quais, conquistaram a pontuação máxima do programa.

Os indicadores biológicos, representados pelo COS, BG e CBM. Apesar de haver uma leve diferença entre o pousio e azevém com os demais tratamentos, nenhum dos envolvidos constataram diferença significativa em relação ao pousio sem P. Para a enzima BG a ervilhaca e o nabo apresentaram mais pontuações, mas não diferiram do pousio sem P, o qual diferenciou apenas do pousio, tremoço e do azevém (com menores pontuações). E por fim, o CBM teve um comportamento semelhante aos macroagregados do solo, atingindo a pontuação máxima.

O índice de qualidade do solo (IQS) obtido pela soma ponderada dos indicadores físicos, químicos e biológicos foi sensível ao manejo com as plantas de cobertura. A aveia e o tremoço apresentaram maiores pontuações, mas não diferenciaram do pousio sem P. Isso se deve ao fato de que há cinco anos foi suspensa a adubação fosfatada, onde os valores de P se igualaram ao tratamento em que não houve a aplicação, impactando nos macroagregados e nos indicadores biológicos, vale ressaltar que é um nutriente que limita a produtividade agrícola.

Tabela 2: Índice de Qualidade do Solo (IQS) gerado a partir de pontuações feitas pelo SMAF sob os efeitos das plantas de cobertura após sete anos adubação fosfatada, e cinco anos de suspensão da adubação fosfatada, Dois Vizinhos-PR.

TRAT	pH		Fósforo		Potássio		Densidade		Macroagregados		COS		BG		CBM		IQS
	CaCl2	escore	mg kg ⁻¹	escore	mg kg ⁻¹	escore	g dm ⁻³	escore	%	escore	%	escore	μg PNF g h ⁻¹	escore	mg kg ⁻¹	escore	
Sem SFS	4,71	0,73	11,33	0,89	195,37	1,00	1,16	0,89	88,98	1,00	2,52	1,00	352,78	0,85	361,55	1,00	0,91
Pousio	4,83	0,76 b	27,08	0,97 a*	160,83	0,98 a	1,21	0,78 c*	92,37	1,00 ns	2,46	0,99 b	316,80	0,74 c*	549,97	1,00 ns	0,89 b
Ervilhaca	4,66	0,10 c*	27,72	0,98 a*	72,66	0,81 d*	1,21	0,77 c*	92,30	1,00	2,84	1,00 a	368,96	0,89 a	429,78	1,00	0,82 d*
Tremoço	4,62	0,68 d*	32,97	0,99 a*	105,70	0,94 b	1,10	0,95 a	92,94	1,00	2,76	1,00 a	288,24	0,75 c*	475,55	1,00	0,91 a
Nabo	4,95	0,13 d*	30,60	1,00 a*	174,52	0,99 a	1,15	0,88 b	92,81	1,00	2,72	1,00 a	414,47	0,90 a	598,76	1,00	0,86 c*
Azevém	4,58	0,24 b	22,88	1,00 a*	147,80	1,00 a	1,11	0,89 b	91,10	1,00	2,51	0,99 b	310,17	0,78 c*	517,70	1,00	0,86 c*
Aveia	5,12	0,90 a*	35,47	1,00 a*	90,65	0,89 c*	1,15	0,86 b	92,33	1,00	2,68	1,00 a	353,81	0,82 b	733,43	1,00	0,92 a
Centeio	4,92	0,24 c*	38,77	0,99 a*	114,50	0,92 b	1,16	0,83 c	92,34	1,00	2,82	1,00 a	366,06	0,80 b	912,03	1,00	0,85 c*

Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o pousio sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

3.4. Discussão

3.4.1 Estoques de C, N e P associados as plantas de cobertura

As diferentes espécies de cobertura alteram a amplitude do sequestro de carbono no solo, ocasionada pelas características biogeoquímicas distintas das plantas como carbono da biomassa microbiana, relação C:N, entre outros (Peng et al. 2023). Além das características fisiológicas, a alta precipitação anual e o teor de argila no solo favorecem o maior aporte no estoque de carbono orgânico do solo (Jian et al. 2020). Bayer et al. (2006) relata que um Latossolo argiloso apresentou maior estoque de C quando comparado a um Latossolo franco-argiloso-arenoso. As modificações geradas pelas plantas de cobertura; consistiram em alterações nos atributos químicos, físico e biológicos, impulsionando positivamente na qualidade solo (Carlos et al. 2023).

A alta produção de biomassa provenientes das gramíneas, são mais eficazes no aumento de quantidade de carbono no solo. No entanto, por possuir alta relação C:N, apresentam baixa qualidade do resíduo, promovendo um baixo armazenamento de C estável no solo. Ao contrário, as leguminosas, geralmente, são caracterizada pela baixa relação C:N, contendo uma alta qualidade dos resíduos, entretanto, uma menor produção de biomassa em relação as gramíneas (Zhang et al. 2022).

Estudos realizados por Peng et al. (2023) e Higashi et al. (2014) demonstraram que o centeio resultou em maiores estoques de carbono em comparação com leguminosas ou mix de cobertura. Entretanto, nossos resultados mostraram os maiores estoques de C com nabo, aveia preta e o tremoço (Figura 1). Podendo ser explicado pelo maior acúmulo de biomassa ao longo dos 12 anos de cultivo de cobertura (retratado na Fig. 5A, do capítulo 2). Por outro lado, Kuneski et al. (2023) mencionado que o nabo forrageiro solteiro ou consorciado (com centeio ou aveia) teve uma alto potencial na produção de biomassa e gerou incremento na matéria orgânica, e conseqüentemente o acúmulo de carbono no solo.

Sabe-se a importância do fracionamento da MOS em MOP e MOAM para entendimento da ciclagem de carbono e nutrientes no solo. Detectamos no presente estudo, a ação positiva da aveia preta na fração da MOAM, pela sua diferença datada em relação ao pousio sem SFS (Tab. S1). A maior disponibilidade de P encontrada nesse tratamento, pode ter contribuído para a sua diferenciação do pousio sem SFS. A biodisponibilidade de P para as plantas impacta o estoque de C no solo e a relação C:N (Garland; Bünemann; Six, 2017; Liao et al. 2018). As pastagens correspondem aos maiores valores de C na fração MOAM e menos na MOP do que as florestas. Esse fator, ocorre devido a grande parte da fração MOP ser

provenientes de plantas e ser suscetíveis em sofrer alteração no armazenamento de C no sistema, influenciados pelo grande aporte de serrapilheira nas florestas (Cotrufo et al. 2019).

Observamos que a relação C:P no solo foi influenciada entre as plantas de cobertura, todavia, não em relação ao pousio. Este fato, se deve a suspensão da adubação fosfatada no solo nas últimas cinco safras, fazendo com que, os valores de C:P se igualasse estatisticamente ao pousio. A relação C:P estão relacionadas com a taxa de mineralização do fósforo orgânico do solo. O P serve como nutriente para o bom funcionamento da microbiota, sua ausência, torna um fator limitante nesse cenário (Xu et al.2023).

3.4.2 Índice de qualidade do solo

Dentre os diversos resultados já obtidos com as plantas de coberturas, nossos estudos detectaram modificações nos atributos, químicos, físicos e biológicos do solo. A ervilhaca e o pousio, apresentaram maiores valores de densidade ($1,27$ e $1,19 \text{ g cm}^{-3}$), em relação aos demais tratamentos. No entanto, não consideramos que ocorreram compactação do solo, pois os valores referencias em solos argilosos se encontra na faixa $1,0$ a $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$. Esta alteração pode estar relacionada a baixa concentração de C, nesses tratamentos. Andrade et al. (2010) identificou que os tratamentos que apresentaram menores densidades, se relacionaram com o aumento de C, devido ao efeito dos constituintes orgânicos na estrutura de agregação.

Avaliando o efeito da suspensão da adubação fosfatada, houve alteração na distribuição dos agregados do solo e no DMP. O aumento dos macroagregados foi ocasionado devido a maior disponibilidade de P no sistema. Du et al. (2022), constataram que a adição de P (tratamento com P) diminuiu significativamente a proporção de macroagregados e consequentemente aumentou a proporção de microagregados, ou seja, a adição de P pode promover a decomposição dos macroagregados. Entretanto, nosso estudo demonstra que além da presença das plantas de coberturas, o aumento da concentração de P também contribuiu para maior proporção de macroagregação no sistema. Um estudo realizado por Liu et al. (2019), verificou que a aplicação de fertilizantes químicos e orgânicos na proporção de macroagregados e reduziu os microagregados, argila e silte, explicando os resultados encontrados em nosso trabalho. Enquanto o DMP está associado ao maior estoque de C no solo. O acúmulo COS contribui para uma melhor estabilidade dos agregados, pois é um fator chave que auxilia na formação dos macroagregados, evitando sua ruptura, fornecendo proteção física a decomposição do COS e consequentemente, um melhor DMP (Hashimi et al. 2023).

O carbono da biomassa microbiana do solo aumentou de acordo com a maior concentração de P no sistema, por meio dessa ação, concluímos que a disponibilidade de P limita a biomassa microbiana (Spohn; Schleuss, 2019). O aumento do CBM pode ser explicado pelo aumento da disponibilidade de substrato e pela melhorias das condições de microhabitats, o que estimula a proliferação microbiana, a atividade e o crescimento (Zheng et al. 2023).

Este estudo confirmou que os indicadores de saúde do solo utilizados no SMAF são sensíveis às mudanças implementadas pelas práticas de manejo como o uso de plantas de cobertura. Com base na interpretação dos resultados, o pH foi um dos constituintes químicos, que apresentou maior variabilidade das pontuações, onde, por sua vez, as coberturas promoveram pH entorno de 4,8, o qual, pode a vim influenciar na disponibilidade de nutriente. No entanto, a aveia preta foi a única que contou um valor de pH 5,12, recebendo uma pontuação próximo ao nível ótimo. Enquanto as propriedades físicas, sofreram poucas modificações, por se tratar de um Latossolo muito argiloso, bem estruturado, o que explica as leves alterações. De modo, geral, todos os tratamentos apresentaram pontuações maiores que 0,85. Como retratado pelo IQS, a aveia e o tremoço foram as que contabilizaram maiores pontuações, sendo os mais próximos de atingir os níveis ideais de qualidade do solo para cada situação abordada. Contudo, não diferiram do pousio sem P, ou seja, ausência de plantas de cobertura e sem aplicação de fertilizante fosfatado nos últimos 12 anos de experimento. Como, o IQS é formado pelos três atributos do solo, e vendo que houve pouco interferências nos outros indicadores, explica a sua alta pontuação no IQS, referente ao pousio sem P.

3.5 Conclusão

A relação C:P foi sensível a rotação com as plantas de coberturas. O aumento dos estoques de carbono pode ser explicado pelo acúmulo de resíduos ao longo dos anos que favoreceu maior sequestro de C no solo. As plantas de coberturas que apresentaram melhores valores associados ao aumento do estoque de carbono no solo e melhores valores na disponibilidade de P no sistema foram a aveia preta e o tremoço branco. Dessa forma, concluímos que a maior disponibilidade de P no sistema colabora para aumentar o COS, além de pontuar com valores próximo ao nível ideal relacionados ao índice de qualidade do solo (SQI).

Referências

- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services — A global review. **Geoderma**, v. 262, p. 101–111, 15 jan. 2016.
- ANDRADE, A. P. et al. Physical properties of a Humic Cambisol under tillage and cropping systems after 12 years. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 1, p. 219–226, 2010.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945–1962, 1 nov. 2004.
- BARRIOS, E. Soil biota, ecosystem services and land productivity. **Ecological Economics**, v. 64, n. 2, p. 269–285, 15 dez. 2007.
- BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 86, n. 2, p. 237–245, 2006.
- BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 1 maio 2018.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.
- CARLOS, F. S. et al. Long-term cover crops and no-tillage in Entisol increase enzyme activity and carbon stock and enable the system fertilization in southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 34, n. August, 2023.
- COTRUFO, M. F. et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 12, p. 989–994, 2019.
- DE MORAES, J. F. L. et al. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, v. 70, n. 1, p. 63–81, 1 mar. 1996.
- DEXTER, A. R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 31, n. 2, p. 139–147, 1 fev. 1985.
- DOS REIS, C. E. S. et al. Carbon sequestration in clay and silt fractions of Brazilian soils under conventional and no-tillage systems. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 4, p. 292–301, 2014.
- DROBNIK, T. et al. Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. **Ecological Indicators**, v. 94, p. 151–169, 1 nov. 2018.
- DU, J. et al. Organic carbon distribution and soil aggregate stability in response to long-term phosphorus addition in different land-use types. **Soil and Tillage Research**, v. 215, p. 105195, 1 jan. 2022.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529–538, 1995.

- ELLIOTT, E. Aggregate Structure and Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Native and Cultivated Soils sp. nov. **Canadian journal of zoology**, v. 50, n. 11, p. 627–633, 1986.
- GARLAND, G.; BÜNEMANN, E. K.; SIX, J. New methodology for soil aggregate fractionation to investigate phosphorus transformations in iron oxide-rich tropical agricultural soil. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 115–125, 2017.
- GATIBONI, L. C. UFSM Tese de Doutorado DISPONIBILIDADE DE FORMAS DE FÓSFORO DO SOLO ÀS PLANTAS. 2003.
- GHALEY, B. B.; PORTER, J. R.; SANDHU, H. S. Soil-based ecosystem services: a synthesis of nutrient cycling and carbon sequestration assessment methods. <https://doi.org/10.1080/21513732.2014.926990>, v. 10, n. 3, p. 177–186, 3 jul. 2014.
- GOETZ, S. J. (STEPHAN J.; BROUWER, F. Soil carbon sequestration as an ecosystem service. p. 255–273, 20 out. 2009.
- GUPPY, C. N. et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, n. 2, p. 189–202, 2005.
- HASHIMI, R. et al. No-tillage and rye cover crop systems improve soil water retention by increasing soil organic carbon in Andosols under humid subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, v. 234, n. August, p. 105861, 2023.
- HIGASHI, T. et al. Tillage and cover crop species affect soil organic carbon in Andosol, Kanto, Japan. **Soil and Tillage Research**, v. 138, p. 64–72, 2014.
- JIAN, J. et al. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 143, n. January, p. 107735, 2020.
- JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. R.; COLEMAN, K. Chapter 1 Soil Organic Matter: Its Importance in Sustainable Agriculture and Carbon Dioxide Fluxes. **Advances in Agronomy**, v. 101, p. 1–57, 1 jan. 2009.
- KRISHNASWAMY, J. et al. The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: Support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis”. **Journal of Hydrology**, v. 498, p. 191–209, 19 ago. 2013.
- KUNESKI, A. C. et al. Effects of Tillage and Cover Crops on Total Carbon and Nitrogen Stocks and Particle-Size Fractions of Soil Organic Matter under Onion Crop. **Horticulturae**, v. 9, n. 7, 2023.
- LIAO, H. et al. Contrasting responses of bacterial and fungal communities to aggregate-size fractions and long-term fertilizations in soils of northeastern China. **Science of The Total Environment**, v. 635, p. 784–792, 1 set. 2018.
- LIU, K. et al. Response of soil aggregate-associated potassium to long-term fertilization in red soil. **Geoderma**, v. 352, n. November 2018, p. 160–170, 2019.
- MARKS, E. et al. Conservation of soil organic carbon, biodiversity and the provision of other ecosystem services along climatic gradients in West Africa. **Biogeosciences**, v. 6, n. 8, p. 1825–1838, 2009.
- MIGUEL REICHERT, J. et al. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 22 abr. 2022.

- PENG, Y. et al. Maximizing soil organic carbon stocks under cover cropping: insights from long-term agricultural experiments in North America. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 356, n. June, 2023.
- RINOT, O. et al. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. **Science of The Total Environment**, v. 648, p. 1484–1491, 15 jan. 2019.
- SPOHN, M. Increasing the organic carbon stocks in mineral soils sequesters large amounts of phosphorus. **Global Change Biology**, v. 26, n. 8, p. 4169–4177, 1 ago. 2020.
- SPOHN, M.; SCHLEUSS, P. M. Addition of inorganic phosphorus to soil leads to desorption of organic compounds and thus to increased soil respiration. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 130, n. December 2018, p. 220–226, 2019.
- TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: WEAVER, R. W. et al. (Eds.). . **Methods of Soil Analysis: Part 2 Microbiological and Biochemical Properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. v. 2p. 775–833.
- TEAM, R. C. **R: A language and environment for statistical computing**R Foundation for Statistical ComputingVienna, AustriaCRAN, , 2021.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual De Metodos Logico-Cuantitativos**. [s.l: s.n.].
- VAN EEKEREN, N. et al. Ecosystem services in grassland associated with biotic and abiotic soil parameters. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 9, p. 1491–1504, 1 set. 2010.
- VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1 jan. 1987.
- WILLIAMS, A.; HEDLUND, K. Indicators of soil ecosystem services in conventional and organic arable fields along a gradient of landscape heterogeneity in southern Sweden. **Applied Soil Ecology**, v. 65, p. 1–7, 1 mar. 2013.
- XU, C. et al. Coupling mechanism of C:N:P stoichiometry between plant and soil after long-term reclamation in the coastal area, eastern China. **Regional Studies in Marine Science**, v. 68, n. August, p. 103178, 2023.
- ZHANG, W. et al. Ecosystem services and dis-services to agriculture. **Ecological Economics**, v. 64, n. 2, p. 253–260, 15 dez. 2007.
- ZHANG, Z. et al. Cover crop functional types differentially alter the content and composition of soil organic carbon in particulate and mineral-associated fractions. **Global Change Biology**, v. 28, n. 19, p. 5831–5848, 2022.
- ZHENG, F. et al. Strong links between aggregate stability, soil carbon stocks and microbial community composition across management practices in a Chinese dryland cropping system. **Catena**, v. 233, n. March, p. 107509, 2023.

Apêndices

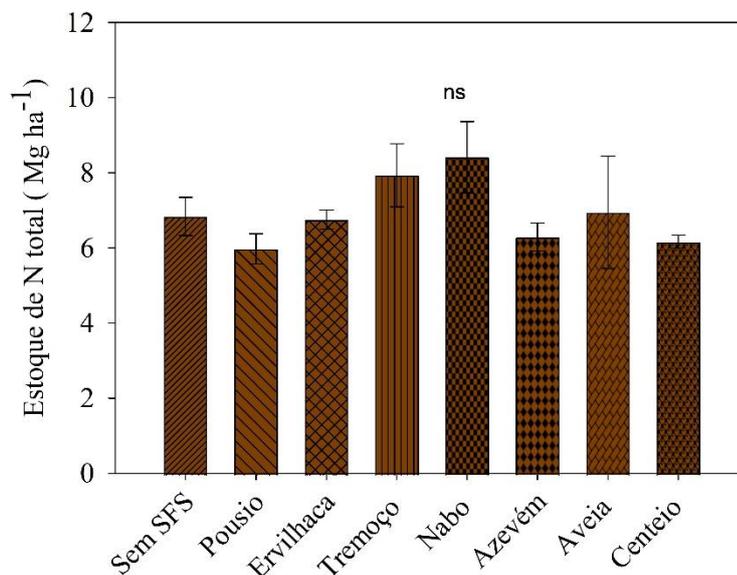


Figura S1: Estoque de nitrogênio total em virtude do efeito das plantas de cobertura de inverno, após cinco anos de supressão de adubação fosfatada. Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o pousio sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.

Tabela S1: Estoque de C, N e relação C:N nas frações da MOAM e MOP na camada de 0 a 30 cm em virtude do efeito das plantas de coberturas de inverno com 12 safras, com os últimos cinco anos de supressão de adubação fosfatada.

TRAT	MOAM			MOP		
	N	C	C:N	N	C	C:N
Sem SFS	5.35	66.53	12.44	1.49	10.88	9.60
Pousio	4.62 ns	76.23 a	16.61 a	1.49 b	14.09 ns	10.42 b
Ervilhaca	5.25	65.39 b	12.44 a	1.50 b	22.31	15.14 b
Tremoço	4.94	80.83 a	17.20 a	2.99 a	20.11	6.64 b
Nabo	5.23	77.49 a	14.84 a	3.19 a	27.92	8.47 b
Azevém	5.52	67.26 b	12.20 a	0.78 b	17.12	28.98 a
Aveia	4.22	89.00 a*	24.64 a*	2.73 a	12.04	4.45 b
Centeio	5.30	67.35 b	12.70 a	0.17 b	7.93	9.74 b

Teste de Scott-Knott a um nível de significância 5%, representado por letras, onde, letras diferentes apresentam diferença estatística e ns= não significativo. Realizado o Teste de Dunett, para comparar o Sem SFS com cada tratamento separadamente, representado pelo * quando houver diferença significativa a $p \leq 0,05$.