

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

TESE

**Solos Arenosos da Região Oeste do Paraná:
Agregação e Matéria Orgânica como Indicadores de
Qualidade**

Luiz Alberto da Silva Rodrigues Pinto

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**SOLOS ARENOSOS DA REGIÃO OESTE DO PARANÁ: AGREGAÇÃO
E MATÉRIA ORGÂNICA COMO INDICADORES DE QUALIDADE**

LUIZ ALBERTO DA SILVA RODRIGUES PINTO

Sob a Orientação do Professor
Marcos Gervasio Pereira

Co-orientação dos professores

Jean Sérgio Rosset

e

Thadeu Rodrigues de Melo

Tese submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Doutor**, no
Programa de Pós-Graduação em
Agronomia – Ciência do Solo, Área de
Concentração em Manejo do Solo e
Qualidade Ambiental.

Seropédica, RJ
Abril de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P645s	<p>Pinto, Luiz Alberto da Silva Rodrigues, 1987- Solos arenosos da região oeste do Paraná: Agregação e matéria orgânica como indicadores de qualidade / Luiz Alberto da Silva Rodrigues Pinto. - Seropédica, 2024. 128 f. : il.</p> <p>Orientador: Marcos Gervasio Pereira.</p> <p>Tese (Doutorado). – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, 2024.</p> <p>1. Solos frágeis. 2. Sistemas de produção. 3. Agregados biogênicos. 4. Agricultura sustentável. I. Pereira, Marcos Gervasio, 1965-, orient. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo. III. Título.</p>
-------	--

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq) – Código do Processo 141060/2020-4 e Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – Brasil (FAPERJ) – Código do Processo 201.303/2023.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE
JANEIRO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA (CIÊNCIAS DO SOLO)



HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO Nº 9 / 2024 - CPGACS (12.28.01.00.00.27)

Nº do Protocolo: 23083.017267/2024-44

Seropédica-RJ, 02 de abril de 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

LUIZ ALBERTO DA SILVA RODRIGUES PINTO

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

TESE APROVADA EM 01/04/2024.

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Jose Luiz Rodrigues Torres. Dr. IFTM
Nivaldo Schultz. Dr. UFRRJ

David Vilas Boas de Campos. Dr. Embrapa Solos
Fabiano de Carvalho Balieiro. Dr. Embrapa Solos

(Assinado digitalmente em 02/04/2024 14:41)
MARCOS GERVASIO PEREIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.33)
Matrícula: 1060711

(Assinado digitalmente em 02/04/2024 11:50)
NIVALDO SCHULTZ
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.33)
Matrícula: 2136627

(Assinado digitalmente em 02/04/2024 14:04)
JOSE LUIZ RODRIGUES TORRES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 821.392.967-53

(Assinado digitalmente em 20/06/2024 11:26)
FABIANO DE CARVALHO BALIEIRO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 021.549.027-40

(Assinado digitalmente em 02/04/2024 10:46)
DAVID VILAS BOAS DE CAMPOS
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 030.175.957-06

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: 9, ano: 2024, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO**, data de emissão: 02/04/2024 e o código de verificação: **1092e372d4**

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Marly e Carlos Alberto,
a minha família Silva,
aos meus amigos e
as mais de 700 mil vidas brasileiras ceifadas pela Covid-19.*

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos, primeiramente a Deus, Nosso Senhor Jesus Cristo, Nossa Senhora Aparecida, São Cosme e São Damião e Meus Orixás (Xangô, Iemanjá e Oxum), por tudo que me deram nessa vida. Obrigado por fazerem de mim um instrumento de trabalho, caridade e amor.

Aos meus pais Carlos Alberto Rodrigues Pinto e Marly da Silva Rodrigues Pinto, que são meus exemplos de vida, de dignidade, de esperança, minha base, meu Norte. A vocês devo minha vida. Mãe, obrigado pelo seu amor incondicional e por me inspirar tanta paz e tranquilidade. Pai, obrigado por me mostrar que mesmo diante das adversidades da vida, no final tudo dá certo.

À minha segunda mãe, Josefa Euda Batista, por ser meu braço forte e nunca ter desistido daquilo que acreditamos, mesmo quando acreditar se tornou a última esperança.

À minha madrinha, Maria Aparecida. Entre trancos e barrancos, sobrevivemos.

Aos meu irmão Eduardo da Silva Rodrigues Pinto, por todos os momentos bons e difíceis, a vida não é fácil, mas juntos nada devemos temer, te amo.

À minha família Silva por todo o apoio, carinho e por ter entendido os momentos de ausência. “Não somos a Grande Família, mas somos uma grande família”. Em especial, aos meus tios Celso da Silva e Telmo da Silva, meus heróis hoje e sempre.

Aos meus grandes e velhos amigos Luciano Batista, Bruno José, Aline da Silva, Rossini de Santana, Jorge Claudio, Rose Cardeiro, Katiane Abreu, Kátia Ferreira por toda amizade e companheirismo, minhas paixões nessa vida e nas próximas. Amo vocês!

Aos meus sobrinhos e afilhados, Matheus Araújo e Carlos Eduardo. Que Papai do Céu esteja sempre abençoando vocês.

À minha amiga Sílvia, exemplo de mulher guerreira e vitoriosa. Deus lhe abençoe!

Aos meus amigos Celso Carlos e Raquel Vitoriano. Eu seria incapaz de traduzir em palavras o quanto vocês são fundamentais em minha vida.

À minha amiga e fiel escudeira, Melania Merlo Ziviani. Meu braço direito nas pesquisas. Obrigado por compartilhar momentos de estudo, conversas, cumplicidade, preocupação, carinho e descontração. Te amo!

Aos amigos que a Rural me presenteou durante esses anos, em especial: Igor Lucas, Christine Sanchez, Nara Brito, João Pedro Vasconcelos, William Brito, Celeste Rossi, Maria Helena, Rafael Mota, Renato Siquini, Natália Bonn, Victória Monteiro, Camila Matos, Iara Maria, Núbia Nunes, Laiz Oliveira, Lucienne Oliveira, Thassiany de Castro e Gilsonley Lopes. “Amigos, pra toda vida”.

Ao meu amigo Marcos Gervasio Pereira, pela amizade, carinho, preocupação, conselhos, alegrias, risadas, choros, caminhadas e reciprocidade. Obrigado por tudo. “Perdoa a minha inocência, mas eu ainda acredito que pequenos gestos de gentileza podem salvar o mundo”, assim você me definiu.

À minha amiga Sandra Lima (rara, cara e de coração novinho) por todos os momentos. Não foi fácil esse ciclo para ambos, mas vencemos!

Aos meus amigos, Igor de Sousa, Robert Ferreira e Wanderson Farias, por terem me ajudado com as análises. Pelo carinho e preocupação. Obrigado pela festa surpresa depois do resultado do processo seletivo do doutorado.

Aos meus amigos Sidinei Julio Beutler (Paraná), Eduardo Neto, Roni Fernandes Guareschi, Cristiane Figueira, Carlos Roberto, Otávio Queiroz, Rodrigo Câmara, Tiago Paula, Aurea Ramos, Francisco Xirlean, Amanda Sales, Cyndi Ferreira, Gabriel Coutinho, Hugo Fagundes, Priscila Matos, Camila Beatriz, Jefferson Matheus, Isabella Lopes, Matheus

Corrêa, João Scott, Luciele Miranda, pela amizade e confiança. Obrigado por me atenderem sempre que precisei.

Aos meus amigos Elias Lima, Guilherme Duarte, Raphael Terra, Robson Almeida, e mais recente, João Gabriel. Amo vocês!

Aos meus amigos e professores, Bruno Tomio, Flavia Barbosa, Domingos Rodrigues, Jussier Lourenço, Francisco Adriano, Vagner Gularte, Milton Cordova e Eng. Fagner. Agradeço ao Pai Maior o privilégio de tê-los em minha vida profissional e pessoal.

Aos meus amigos Juliano Coelho Braga, Rozaura Souza, Jean Carlos, Carla Cristina, Neide Freitas, Mariana Schutz, Sandra Regina e D. Cecília. Obrigado por toda luz.

Ao meu amigo José Paulo do Santos. Você sempre é luz e bênção. Obrigado por carregar minha “fada madrinha”.

Aos meus amigos de Riachuelo-Jacaré, em especial: Caroline Menegussi, Juliana Dourado, Karen Campos e Rodrigo Pereira, por toda preocupação, carinho e amizade. Mesmo de longe, estamos juntos.

À professora, “mãezona” e conselheira, Lúcia Anjos, exemplo de mulher cientista e profissional. Nossa representante maior na Ciência do Solo, nacional e internacionalmente.

Ao professor, amigo e orientador na graduação Nivaldo Schultz pelos ensinamentos, paciência e dedicação durante todos esses anos.

Ao meu orientador Marcos Gervasio Pereira, pela imensurável contribuição no desempenho deste trabalho. Obrigado pela orientação, paciência, cobrança, sinceridade, respeito e, principalmente a dedicação que o senhor teve por mim. Pelo exemplo de profissionalismo e pelo incentivo que muito contribuiu para minha formação e amor à Ciência do Solo.

Aos meus co-orientadores Jean Sérgio Rosset e Thadeu Rodrigues de Melo. Sem a colaboração de ambos, este estudo não poderia ser realizado. Obrigado também pela disponibilização de todas as informações necessárias. A Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS) e a propriedade agrícola, pelo fornecimento do material para o presente estudo.

À UFRRJ, meu segundo lar na vida. Ao CNPq e a FAPERJ pela concessão das bolsas de doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo (PPGA-CS/UFRRJ) pelo apoio prestado. Obrigado aos secretários, discentes, docentes, colaboradores, orientadores e coordenadores do programa pela dedicação e comprometimento.

Aos amigos e colegas dos laboratórios de Gênese e Classificação de Solos (LGCS), Indicadores Edafo-Ambientais (LIEA) e Indicadores de Sustentabilidade Ambiental (LISA) pelos bons e maus momentos que passaram juntos.

A todos os funcionários do Departamento de Solos.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA

Luiz Alberto da Silva Rodrigues Pinto nasceu no Município de Seropédica (RJ), no dia 7 de junho de 1987. Em 2005 concluiu o ensino médio no Colégio Estadual Professor Waldemar Raythe. Após conclusão do ensino médio foi trabalhar no comércio, onde aprendeu sobre conceitos relacionados à como lidar com o próximo. Em 2011 ingressou no curso de graduação em Licenciatura em Ciências Agrícolas na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), posteriormente em 2012 fez reopção interna e iniciou seus estudos no curso de graduação em Agronomia, e concluindo-o em 2017. Durante o período de graduação foi bolsista de Iniciação Científica (PROVERDE/JB/PROPPG) no período de 2015–2017. E no período de novembro de 2014 a março de 2015 exerceu o cargo de monitor na disciplina de Física do Solo desta instituição. Em março de 2018 ingressou no mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Ciência do Solo (PPGA-CS/UFRRJ), defendendo sua dissertação em fevereiro de 2020. No mês seguinte, iniciou seu doutorado no mesmo programa, com defesa prevista para a última semana do mês de fevereiro de 2024.

RESUMO GERAL

PINTO, L. A. S. R. **Solos arenosos da região oeste do Paraná: Agregação e matéria orgânica como indicadores de qualidade.** 2024. 128 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

Sistemas de produção agrícola com uma grande diversidade de espécies vegetais podem proporcionar a manutenção ou melhoria da qualidade dos solos, principalmente os de textura arenosa. O monitoramento do impacto dessas formas de uso e manejo pode ser realizado através da análise das propriedades do solo, que podem funcionar como indicadores de qualidade. Esse monitoramento possibilita avaliar as modificações nos atributos do solo, decorrentes da adoção destes sistemas agrícolas e a sustentabilidade ambiental que pode ser promovida pelos mesmos quando estes são realizados de maneira correta. O estudo das vias de formação (ou origens) dos agregados e dos atributos associados à agregação (matéria orgânica do solo, MOS) tem sido utilizado na avaliação da qualidade dos solos de áreas de produção. O presente estudo foi dividido em três capítulos com diferentes objetivos. No capítulo I foi verificado i) se o uso e manejo do solo afeta a proporção de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy); e ii) se a agregação Bio promove melhorias de natureza química em comparação à agregação Phy. O capítulo II avaliou i) se agregação Bio proporciona maior estabilização de macro e microagregados; e ii) se agregados Bio estão associados a maiores teores de carbono orgânico lábil e glomalina. O capítulo III teve como intuito i) verificar a relação entre os atributos químicos associados a fertilidade de agregados Bio e Phy; ii) avaliar os teores totais de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio e suas respectivas razões estequiométricas nestes agregados; e iii) analisar as interações entre as frações de fósforo e vias de formação Bio e Phy. Foram avaliadas 3 áreas sob distintos sistemas de produção e 1 área de referência, a saber; pastagem permanente (PP); sistema plantio direto (NT); sistema plantio direto + *Urochloa* (NT+B); e um fragmento florestal do bioma Mata Atlântica (NF). Em cada área amostral foram coletadas amostras indeformadas na camada superficial, de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, com textura arenosa nos horizontes superficiais. As amostras foram secas ao ar, e posteriormente submetidas a peneiramento utilizando-se 2 conjuntos de peneiras de 9,7–8,0, e 8,0–4,0 mm de malha, selecionando-se os agregados retidos nesses intervalos. Os agregados foram separados, identificados e classificados quanto à sua origem através da análise de sua morfologia. No capítulo I verificou-se que a vegetação de gramínea forrageira perene (funcionalidade do sistema radicular, aporte de resíduos orgânicos e mistura do material no solo) foi mais eficiente do que a diversidade de espécies vegetais para favorecer a formação de agregados Bio; que o efeito benéfico da braquiária foi observado quando adotada no consórcio com o milho; e que os agregados Bio favoreceram maiores valores das frações mais lábeis da MOS, o que sugere melhoria na qualidade do solo na camada superficial. No capítulo II constatou-se que sistemas de produção de grãos, pastagem e ambientes com baixo grau de antropização influenciaram de maneira diferenciada a agregação e os teores das frações orgânicas associadas à estabilidade dos agregados. No capítulo III verificou-se que os atributos químicos dos agregados Bio e Phy foram afetados de forma distinta entre os sistemas de produção agrícola; e que os resultados verificados para os agregados Bio reiteram a importância do estudo das vias de formação na avaliação da qualidade química do solo, em áreas de manejo conservacionista.

Palavras-chave: Solos frágeis. Sistemas de produção. Agregados biogênicos. Agricultura sustentável.

GENERAL ABSTRACT

PINTO, L. A. S. R. **Sandy soils in the Western region of Paraná: Aggregation and organic matter as quality indicators.** 2024. 128 p. Thesis (Doctor Science in Agronomy, Soil Science), Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

Agricultural production systems with a wide variety of plant species can maintain or improve the quality of soils, especially those with a sandy texture. Monitoring the impact of these forms of use and management can be done by analyzing soil properties that can act as quality indicators. This monitoring makes it possible to assess the changes in soil attributes resulting from the adoption of these agricultural systems and the environmental sustainability that can be promoted by them when they are carried out correctly. The study of the formation pathways (or origins) of aggregates and the attributes associated with aggregation (soil organic matter, SOM) has been used to assess the quality of soils in production areas. This study was divided into three chapters with different objectives: Chapter I verified whether soil use and management affects the proportion of biogenic (Bio) and physicogenic (Phy) aggregates; and whether Bio aggregation promotes chemical improvements compared to Phy aggregation. Chapter II assessed whether Bio aggregation provides greater stabilization of macro- and microaggregates; and whether Bio aggregates are associated with higher levels of labile organic carbon and glomalin. Chapter III aimed to i) to verify the relationship between the chemical attributes associated with the fertility of Bio and Phy aggregates; ii) to evaluate the total carbon, nitrogen, phosphorus and potassium contents and their respective stoichiometric ratios in these aggregates; and iii) to analyze the interactions between the phosphorus fractions and the Bio and Phy formation pathways. Three areas under different production systems and one reference area were evaluated, namely: permanent pasture (PP); no-tillage system (NT); no-tillage system + *Urochloa* (NT+B); and a forest fragment in the Atlantic Forest biome (NF). In each sampling area, undeformed samples were collected from the surface layer of a *Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico*, with a sandy texture in the surface horizons. The samples were air-dried and then sieved using two sets of sieves with mesh sizes of 9.7-8.0 and 8.0-4.0 mm, selecting the aggregates retained in these intervals. The aggregates were separated, identified and classified according to their origin by analyzing their morphology. Chapter I found that the vegetation of perennial forage grasses (functionality of the root system, contribution of organic waste and mixing of the material in the soil) was more efficient than the diversity of plant species in favoring the formation of Bio aggregates; that the beneficial effect of *Urochloa* was observed when adopted in a consortium with maize; and that the Bio aggregates favored higher values of the more labile fractions of SOM, which suggests an improvement in soil quality in the surface layer. Chapter II found that grain production systems, pasture and environments with a low degree of anthropization had a different influence on aggregation and the content of organic fractions associated with aggregate stability. Chapter III found that the chemical attributes of the Bio and Phy aggregates were affected differently between the agricultural production systems; and that the results found for the Bio aggregates reiterate the importance of studying the pathways of formation in assessing the chemical quality of the soil in conservation management areas.

Keywords: Fragile soils. Production systems. Biogenic aggregates. Sustainable agriculture.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização do município de Terra Roxa, Paraná (Sul do Brasil) (A) e as áreas de estudo (B-E). Fonte: Elaborado pelo autor. Área de pastagem permanente com capim Coast-cross para o pasto (B); área de sistema plantio direto com milho como cultura de inverno à direita da foto (C); área de sistema plantio direto + *Urochloa* com milho-braquiária como culturas de inverno (D); e área de referência com vegetação do bioma Mata Atlântica (E). 16
- Figura 2.** Vias de formação dos agregados de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; ^aANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; e ^bTeste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher..... 20
- Figura 3.** Placas de Petri com a fração mineral areia + matéria orgânica particulada de agregados biogênicos (Bio) e Fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil. (A) Phy da pastagem permanente; (B) Bio da pastagem permanente; (C) Phy do sistema plantio direto; (D) Bio do sistema plantio direto; (E) Phy do sistema plantio direto + *Urochloa*; (F) Bio do sistema plantio direto + *Urochloa*; (G) Phy da vegetação do bioma Mata Atlântica; e (H) Bio da vegetação do bioma Mata Atlântica. 22
- Figura 4.** Filtro de fibra de vidro com a fração leve livre da MOS de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil. (A) Phy da pastagem permanente; (B) Bio da pastagem permanente; (C) Phy do sistema plantio direto; (D) Bio do sistema plantio direto; (E) Phy do sistema plantio direto + *Urochloa*; (F) Bio do sistema plantio direto + *Urochloa*; (G) Phy da vegetação do bioma Mata Atlântica; e (H) Bio da vegetação do bioma Mata Atlântica..... 23
- Figura 5.** Análise de componentes principais integrando o conteúdo de carbono orgânico total e as frações físicas da MOS de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil na camada de 0-0,05 m. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; TOC: Carbono orgânico total; C13: Abundância natural de ¹³C; POC: Carbono orgânico particulado; MAOC: Carbono orgânico associado aos minerais; FLFC: Carbono da fração leve livre; e ILFC: Carbono da fração leve intra-agregado..... 24
- Figura 6.** Análise de componentes principais integrando o conteúdo de carbono orgânico total e as frações físicas da MOS de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do na camada de 0,05-0,10 m. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; TOC: Carbono orgânico total; C13: Abundância natural de ¹³C; POC: Carbono orgânico particulado; MAOC: Carbono orgânico associado aos minerais; FLFC: Carbono da fração leve livre; e ILFC: Carbono da fração leve intra-agregado..... 25
- Figura 7.** Exemplos da diferenciação morfológica de agregado biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) em áreas sob diferentes sistemas de manejo e mata nativa no Sul do Brasil. (a) Phy da pastagem permanente; (b) Phy do sistema plantio direto; (c) Phy do sistema plantio direto + *Urochloa*; (d) Phy da vegetação nativa de bioma Mata Atlântica;

(e) Bio da pastagem permanente; (f) Bio do sistema plantio direto; (g) Bio do sistema plantio direto + *Urochloa*; e (h) Bio da vegetação nativa de bioma Mata Atlântica..... 45

Figura 8. Diâmetro médio ponderado (MWD) de agregados biogênicos e fisiogênicos de áreas sob diferentes sistemas de manejo, região subtropical do Brasil. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não indicam diferenças entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado. Mesma letra maiúscula não indica diferenças entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado (ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados; e Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher). (A) camada de 0–0,05 m; (B) camada de 0,05–0,10 m. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; e NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica..... 47

Figura 9. Análise de componentes principais integrando o estado de agregação e as frações orgânicas associadas à estabilidade de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo na camada de 0–0,05 m, região subtropical do Brasil. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; MWD: Diâmetro médio ponderado; WDC: Argila dispersável em água; WRC: Argila refloculável em água; NDC: Argila não dispersável; POXC: Carbono orgânico lábil; GRSP-EE: Glomalina facilmente extraível; e GRSP-T: Glomalina total..... 50

Figura 10. Análise de componentes principais integrando o estado de agregação e as frações orgânicas associadas à estabilidade de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo na camada de 0,05–0,10 m, região subtropical do Brasil. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; MWD: Diâmetro médio ponderado; WDC: Argila dispersável em água; WRC: Argila refloculável em água; NDC: Argila não dispersável; POXC: Carbono orgânico lábil; GRSP-EE: Glomalina facilmente extraível; e GRSP-T: Glomalina total..... 51

Figura 11. Análise de componentes principais integrando a caracterização dos atributos químicos, razões estequiométricas e frações de fósforo de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo, camada de 0–0,10 m, região subtropical do Brasil. NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; K: Potássio trocável; P: Fósforo disponível; H+Al: Acidez potencial; TC: Carbono total; TN: Nitrogênio total; TP: Fósforo total; TK: Potássio total; C/N: Relação carbono e nitrogênio; C/P: Relação carbono e fósforo; N/P: Relação nitrogênio e fósforo; $_{SOL}P$: Fração de P solúvel com solução de $CaCl_2$; $_{M3}P$: Fração de P disponível com solução de extratora Mehlich 3; $_{OH}Pi$: Fração de P inorgânico extraído com solução de NaOH; $_{OH}Po$: Fração de P orgânico extraído com solução de NaOH; $_{HCl}P$: Fração de P inorgânico extraído com HCl; e $_{OCL}P$: Fração de P ocluso. 95

Figura 12. Análise de agrupamento hierárquico integrando a caracterização dos atributos químicos, razões estequiométricas e frações de fósforo de agregados biogênicos (bio) e fisiogênicos (phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo, camada de 0–0,10 m, região subtropical do Brasil. a) Dois clusters; b) Três clusters; e c) Quatro clusters. NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; K: Potássio trocável; P: Fósforo disponível; H+Al: Acidez potencial; TC: Carbono total; TN: Nitrogênio total; TP: Fósforo total; TK: Potássio total; C/N:

Relação carbono e nitrogênio; C/P: Relação carbono e fósforo; N/P: Relação nitrogênio e fósforo; SOLP : Fração de P solúvel com solução de CaCl_2 ; M_3P : Fração de P disponível com solução de extratora Mehlich 3; OH-Pi : Fração de P inorgânico extraído com solução de NaOH; OH-Po : Fração de P orgânico extraído com solução de NaOH; HClP : Fração de P inorgânico extraído com HCl; e OCLP : Fração de P ocluso..... 96

Figura 13. Análise de agrupamento hierárquico integrando os atributos indicadores associados a agregados biogênicos (bio) e fisiogênicos (phy) com elevados valores de correlação de Pearson ($-0,70 \geq r \geq 0,70$) na camada de 0–0,05 m, região subtropical do Brasil. (A) Dois clusters; (B) Três clusters; e (C) Quatro clusters. NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica; TOC: Carbono orgânico total; ^{13}C : Abundância natural de ^{13}C ; MAOC: Carbono orgânico associado aos minerais; FLFC: Carbono da fração leve livre; POXC: Carbono orgânico lábil; GRSP-EE: Glomalina facilmente extraível; GRSP-T: Glomalina total; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; K: Potássio trocável; H+Al: Acidez potencial; TC: Carbono total; TN: Nitrogênio total; TP: Fósforo total; C/P: Relação carbono e fósforo; SOLP : Fração de P solúvel com solução de CaCl_2 ; M_3P : Fração de P disponível com solução de extratora Mehlich 3; OH-Pi : Fração de P inorgânico extraído com solução de NaOH; OH-Po : Fração de P orgânico extraído com solução de NaOH; e OCLP : Fração de P ocluso..... 119

Figura 14. Análise de agrupamento hierárquico integrando os atributos indicadores associados a agregados biogênicos (bio) e fisiogênicos (phy) com elevados valores de correlação de Pearson ($-0,70 \geq r \geq 0,70$) na camada de 0,05–0,10 m, região subtropical do Brasil. NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica; TOC: Carbono orgânico total; ^{13}C : Abundância natural de ^{13}C ; POC: Carbono orgânico particulado; MAOC: Carbono orgânico associado aos minerais; MWD: Diâmetro médio ponderado; POXC: Carbono orgânico lábil; GRSP-EE: Glomalina facilmente extraível; GRSP-T: Glomalina total; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; K: Potássio trocável; TC: Carbono total; TN: Nitrogênio total; TP: Fósforo total; TK: Potássio total; C/N: Relação carbono e nitrogênio; N/P: Relação nitrogênio e fósforo; SOLP : Fração de P solúvel com solução de CaCl_2 ; M_3P : Fração de P disponível com solução de extratora Mehlich 3; OH-Pi : Fração de P inorgânico extraído com solução de NaOH; HClP : Fração de P inorgânico extraído com HCl; e OCLP : Fração de P ocluso..... 120

Figura 15. Área de pastagem permanente. (A) Capim "coast-cross" (*Cynodon dactylon* L.) para o pasto; e (B) momento da coleta na área amostral. Foto: Jean Sérgio Rosset (2020). 121

Figura 16. Área de sistema plantio direto. (A) milho como cultura de inverno à direita da foto; e (B) momento da coleta na área amostral. Foto: Jean Sérgio Rosset (2020)..... 121

Figura 17. Área de sistema plantio direto + *Urochloa*. (A) milho e braquiária como culturas de inverno; e (B) momento da coleta na área amostral. Foto: Jean Sérgio Rosset (2020). 121

Figura 18. Área de vegetação nativa de bioma Mata Atlântica. (A) visão interna do fragmento de Floresta; e (B) momento da coleta na área amostral. Foto: Jean Sérgio Rosset (2020). ... 122

Figura 19. Soja em crescimento, semeada após a amostragem. (A) sistema plantio direto + *Urochloa*; e (B) sistema plantio direto. Foto: Jean Sérgio Rosset (2020)..... 122

Figura 20. Coleta das amostras indeformadas nas áreas amostrais, Terra Roxa-PR. (A) pastagem permanente; (B) sistema plantio direto; (C e D) sistema plantio direto + *Urochloa*; e (E e F) mata nativa. Foto: Jean Sérgio Rosset (2020). 122

- Figura 21.** Esquema do processo de secagem ao ar. (A) amostras indeformadas (torrões) expostas à temperatura ambiente para redução da umidade; e (B) visão geral dos torrões da área de pastagem permanente. Foto: Luiz Alberto da Silva Rodrigues Pinto (2020). 123
- Figura 22.** Imagens representativas de agregados do solo na fração 8,0–9,7 mm. A, B e C, agregados biogênicos; e D, E e F, agregados fisiogênicos de áreas sob diferentes sistemas de manejo na região subtropical do Brasil. Foto: Presente no artigo “Soil aggregation and associated organic matter under management systems in sandy-textured soils, subtropical region of Brazil” referente ao 1º capítulo da tese publicado na Revista Environmental Monitoring and Assessment. 123
- Figura 23.** Resumo gráfico (Graphical Abstract) do artigo “Stability, labile organic carbon, and glomalin of biogenic aggregates in sandy soils under management systems in the subtropical region of Brazil” referente ao 2º capítulo da tese publicado na Revista Brasileira de Ciência do Solo. 124
- Figura 24.** Localização do município de Terra Roxa (PR), região subtropical do Brasil (A); e histórico de uso da terra das áreas amostradas (B). NT: Sistema de plantio direto; NT+B: Sistema de plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; e NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica (B). Fonte: Referente ao 3º capítulo da tese submetido como artigo na Revista Brasileira de Ciência do Solo. 127
- Figura 25.** Resumo gráfico (Graphical Abstract) referente ao 3º capítulo da tese submetido como artigo na Revista Brasileira de Ciência do Solo. 128

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Histórico, descrição e localização das áreas amostrais.....	17
Tabela 2. Caracterização dos atributos químicos e físicos do solo na camada de 0–0,10 m nas áreas do estudo, região subtropical do Brasil.	17
Tabela 3. Carbono orgânico total (TOC) e abundância isotópica de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil.....	21
Tabela 4. Carbono orgânico particulado (POC) e associado aos minerais (MAOC) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil.	22
Tabela 5. Carbono orgânico das frações leve livre (FLFC) e leve intra-agregado (ILFC) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil.	23
Tabela 6. Argila dispersável em água (WDC), argila refloculável em água (WRC) e argila não dispersável (NDC) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo, região subtropical do Brasil.	48
Tabela 7. Carbono orgânico lábil (POXC), glomalina facilmente extraível (GRSP-EE) e glomalina total (GRSP-T) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo, região subtropical do Brasil.....	49
Tabela 8. Teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^{+}) trocáveis, fósforo disponível (P) e acidez potencial (H+Al) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de produção, região subtropical do Brasil.....	85
Tabela 9. Teores totais de carbono (TC), nitrogênio (TN), fósforo (TP) e potássio (TK) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de produção, região subtropical do Brasil.	91
Tabela 10. Razões estequiométricas entre carbono, nitrogênio e fósforo (C/N, C/P e N/P, respectivamente) em suas concentrações totais de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de produção, região subtropical do Brasil.	92
Tabela 11. Teores das frações de fósforo (P; mg kg^{-1}) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de uso e manejo, região subtropical do Brasil.	93
Tabela 12. Contribuição relativa de cada fração de fósforo em relação à concentração de fósforo total (TP) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de uso e manejo, região subtropical do Brasil.....	94
Tabela 13. Matriz da análise de componentes principais (ACP). A contribuição relativa corresponde a correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com as variáveis, camada de 0–0,10 m.	95
Tabela 14. Matriz da análise de componentes principais (ACP). A contribuição relativa corresponde a correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com todas as variáveis do estudo.....	118

LISTA DE SÍMBOLOS

% Agregados: Proporção de cada classe de agregado
%_{HCl}P: Porcentagem da fração de P inorgânico extraído com HCl
%_{M3}P: Porcentagem da fração de P disponível com solução de extratora Mehlich 3
%_{OCL}P: Porcentagem da fração de P ocluso
%_{OH}Pi: Porcentagem da fração de P inorgânico extraído com solução de hidróxido de sódio
%_{OH}Po: Porcentagem da fração de P orgânico extraído com solução de hidróxido de sódio
%_{SOL}P: Porcentagem da fração de P solúvel com solução de cloreto de potássio
¹³C ou $\delta^{13}\text{C}$: Abundância natural de ¹³C
¹⁵N: Abundância natural de ¹⁵N
ACP: Análise de componentes principais
Al³⁺: Alumínio trocável
ANOVA: Análise de variância
Bio ou bio: Agregado biogênico
C/N: Relação carbono e nitrogênio
C/P: Relação carbono e fósforo
C: Carbono
Ca²⁺ ou Ca: Cálcio trocável
C-CO₂: Carbono potencialmente mineralizável
Cfa: Clima do tipo úmido subtropical
COCAMAR: Cooperativa agroindustrial
CO_{Op} ou POC: Carbono orgânico particulado
COT ou TOC: Carbono orgânico total
EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
F1: Fração oxidável mais solúvel
FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations
FLF: Fração leve livre da MOS
FLFC: Carbono da fração leve livre
GRSP: Proteína do solo relacionada à glomalina
GRSP-EE: Glomalina facilmente extraível
GRSP-T: Glomalina total
H+Al: Acidez potencial
_{HCl}P: Fração de P inorgânico extraído com ácido clorídrico
ILF: Fração leve intra-agregado da MOS
ILFC: Carbono da fração leve intra-agregado
K⁺ ou K: Potássio trocável
_{M3}P: Fração de P disponível com solução de extratora Mehlich 3
MAOC: Carbono orgânico associado aos minerais
Mg²⁺ ou Mg: Magnésio trocável
MOS: Matéria orgânica do solo
MWD: Diâmetro médio ponderado
N/P: Relação nitrogênio e fósforo

N: Nitrogênio
NDC: Argila não dispersável
NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica
NIRS: Near Infrared Spectrometry
NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*
OCLP: Fração de P ocluso
OH_{Pi}: Fração de P inorgânico extraído com solução de hidróxido de sódio
OH_{Po}: Fração de P orgânico extraído com solução de hidróxido de sódio
P ou P disponível: Fósforo disponível
P: Fósforo
PC: Componente principal
PD: Plantio direto
PDB: Padrão internacional Pee Dee Belemnite
pH: Acidez ativa
Phy ou phy: Agregado fisiogênico
Pi: Forma inorgânicas de fósforo
PIB: Produto Interno Bruto
Po: Forma orgânica de fósforo
POXC: Carbono orgânico lábil
PP: Pastagem permanente
S: Soma de bases
SAF: Sistema agroflorestal
SBCS: Sociedade brasileira de ciência do solo
SBSA: Simpósio brasileiro de solos arenosos
SCC: Sistema de cultivo convencional
SCO: Sistema de cultivo orgânico
SIPA: Sistema integrado de produção agropecuária
SOLP: Fração de P solúvel com solução de cloreto de cálcio
SPD ou NT: Sistema plantio direto
T: Capacidade de troca catiônica
TC: Carbono total
TFSA: Fração terra fina seca ao ar
TK: Potássio total
TN: Nitrogênio total
TP: Fósforo total
UEM: Universidade Estadual de Maringá
UEMS: Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
UNOESTE: Universidade do Oeste Paulista
V: Saturação por bases
WDC: Argila dispersável em água
WRC: Argila refloculável em água

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA GERAL	3
2.1. Solos Arenosos do Oeste do Paraná: Composição Granulométrica e Principais Ordens	3
2.2. Principais Atividades Agrícolas e Sistemas de Produção da Região.....	3
2.3. Indicadores de Qualidade do Solo: Matéria orgânica do Solo.....	5
2.4. Indicadores de Qualidade do Solo: Agregação	6
2.5. Alguns Estudos sobre a Gênese de Agregados em Cronossequência.....	7
3. CAPÍTULO I AGREGAÇÃO DO SOLO E MATÉRIA ORGÂNICA ASSOCIADA SOB SISTEMAS DE MANEJO EM SOLOS DE TEXTURA ARENOSA, REGIÃO SUBTROPICAL DO BRASIL.....	11
3.1. RESUMO.....	12
3.2. ABSTRACT.....	13
3.3. INTRODUÇÃO	14
3.4. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.4.1. Localização, clima e solo da área de estudo	16
3.4.2. Histórico das áreas avaliadas	16
3.4.3. Coleta das amostras e separação dos agregados	17
3.4.4. Análises de MOS nos agregados.....	18
3.4.5. Análises estatísticas.....	19
3.5. RESULTADOS	20
3.5.1. Impactos dos sistemas de manejo nas vias de formação dos agregados.....	20
3.5.2. Efeito dos sistemas de manejo e agregação na manutenção e origem do carbono armazenado	20
3.5.3. Influência dos sistemas de manejo e agregação na proteção da MOS	21
3.5.4. Dissimilaridade entre as áreas manejadas e a área de referência	24
3.6. DISCUSSÃO	26
3.7. CONCLUSÕES	32
3.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
4. CAPÍTULO II ESTABILIDADE, CARBONO ORGÂNICO LÁBIL E GLOMALINA DE AGREGADOS BIOGÊNICOS EM SOLOS ARENOSOS SOB SISTEMAS DE MANEJO NA REGIÃO SUBTROPICAL DO BRASIL.....	38
4.1. RESUMO.....	39
4.2. ABSTRACT.....	40
4.3. INTRODUÇÃO	41
4.4. MATERIAL E MÉTODOS	44
4.4.1. Localização, clima e solo da área de estudo	44
4.4.2. Histórico das áreas avaliadas	44
4.4.3. Coleta das amostras e separação dos agregados	44

4.4.4. Análises de estabilidade de macroagregados e microagregados.....	44
4.4.5. Análises de carbono orgânico lábil e glomalina	45
4.4.6. Análises estatísticas.....	46
4.5. RESULTADOS	47
4.5.1. Efeito dos sistemas de manejo e vias de formação sobre o estado de agregação .	47
4.5.2. Influência dos sistemas de manejo e vias de formação nas frações orgânicas.....	48
4.5.3. Dissimilaridade entre os sistemas de uso e manejo do solo avaliados.....	49
4.6. DISCUSSÃO	52
4.6.1. Efeito dos sistemas de manejo e vias de formação sobre o estado de agregação .	52
4.6.2. Influência dos sistemas de manejo e vias de formação nas frações orgânicas.....	56
4.7. CONCLUSÕES	59
4.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
 5. CAPÍTULO III SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA REGIÃO SUBTROPICAL DO BRASIL: AGREGADOS BIOGÊNICOS NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SOLOS DE TEXTURA ARENOSA	 65
5.1. RESUMO.....	66
5.2. ABSTRACT.....	67
5.3. INTRODUÇÃO	68
5.4. MATERIAL E MÉTODOS	70
5.4.1. Localização, clima e solo da área de estudo	70
5.4.2. Histórico das áreas avaliadas	70
5.4.3. Coleta das amostras e separação dos agregados	70
5.4.4. Atributos químicos associados a fertilidade.....	70
5.4.5. Carbono, nitrogênio, fósforo e potássio total e razões estequiométricas	70
5.4.6. Fracionamento do P	70
5.4.7. Análises estatísticas.....	71
5.5. RESULTADOS	72
5.5.1. Caracterização dos atributos químicos associados a fertilidade	72
5.5.2. Carbono, nitrogênio, fósforo e potássio em suas concentrações totais.....	72
5.5.3. Razões estequiométricas	91
5.5.4. Fracionamento do fósforo	92
5.5.5. Análises multivariadas	94
5.6. DISCUSSÃO	97
5.6.1. Influência dos sistemas de produção e da origem dos agregados na fertilidade do solo e nos teores TC, TN, TP e TK.....	97
5.6.2. Influência dos sistemas de produção e da origem dos agregados nos valores das razões estequiométricas.....	99
5.6.3. Influência dos sistemas de produção e da origem dos agregados nos teores de P lábil, moderadamente lábil e não lábil	101
5.6.4. Dissimilaridade entre os sistemas de produção e as vias de formação dos agregados	103

5.7. CONCLUSÕES	105
5.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
6. CONCLUSÕES GERAIS	111
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS.....	113
9. ANEXOS	118

1. INTRODUÇÃO GERAL

Historicamente, os solos que apresentam textura arenosa na camada superficial foram colocados em segundo plano no tocante à exploração para fins agrícolas, pois eram considerados de aptidão limitada às culturas anuais e/ou perenes. A crescente demanda mundial para a produção de alimentos, e a utilização de terras que apresentavam menores limitações, fez com que essas áreas, apesar dessas características, fossem inseridas na cadeia produtiva. Outro fato que contribuiu para esta inclusão foi o desenvolvimento de novas práticas e tecnologias para ambientes de baixa capacidade produtiva. A partir da adoção de práticas conservacionistas, o cultivo de grãos, algodão, melão, manga, madeira para celulose, entre outros produtos, foram introduzidas e/ou intensificadas nestas áreas. As áreas com solos de textura arenosa vêm sendo apontadas atualmente como as novas fronteiras agrícolas do país, sendo recomendadas para produtores que utilizam técnicas de manejo classificadas como de média a muito altas (DEMATTE e DEMATTE, 2024a).

A principal característica desse grupo de solos é a elevada participação da fração areia em comparação às frações silte e argila; sendo esta fração constituída principalmente pelo mineral quartzo. Os maiores teores de areia são observados nos horizontes superficiais, o que acarreta uma série de problemas de natureza física (p. ex., alta fragilidade estrutural, baixa capacidade de retenção e armazenamento de água, e elevada susceptibilidade à erosão) e química (p. ex., baixa fertilidade natural, altos teores de alumínio fitotóxico, e reduzidos teores de matéria orgânica) (DONAGEMMA et al., 2016; ŠIMANSKÝ et al., 2019); que, todavia, são passíveis de serem amenizados ou resolvidos. Tendo em vista que existem importantes diferenças entre os solos de textura arenosa do país, a incorporação dos mesmos na cadeia de produção deve ser precedida de diagnóstico quanto às suas propriedades (DEMATTE e DEMATTE, 2024b); especialmente na “camada arável”, em que são mais facilmente perceptíveis as modificações que as áreas estão sendo submetidas.

A maneira mais efetiva e hábil de monitorar o impacto dos sistemas de uso e manejo das terras, principalmente quando inseridos em solos de textura arenosa é analisar as propriedades do solo que podem funcionar como indicadores de qualidade. Esse monitoramento permite avaliar as modificações nos atributos edáficos decorrentes da adoção destes sistemas agrícolas; e assegura inferir sobre a sustentabilidade ambiental que pode ser promovida pelos mesmos, quando o manejo está sendo realizado de maneira correta e apropriada. Faz-se imprescindível então esse monitoramento constante, uma vez que a degradação dos solos de textura arenosa é desencadeada quando a resistência do sistema ao distúrbio antrópico é ultrapassada (REICHERT et al., 2016).

A utilização de duas propriedades do solo de forma associada tem sido empregada na avaliação da qualidade dos solos de áreas de produção, sendo estas: i) as vias de formação (ou origens) dos agregados; e ii) a matéria orgânica do solo associada à agregação (MOS-associada). Os agregados do solo protegem e conservam a MOS, funcionando como núcleos de energia e nutrientes às plantas (BRONICK e LAL, 2005), por outro lado, a MOS é um dos principais agentes cimentantes para a formação e estabilização dos agregados.

O emprego do método de separação visual dos agregados através da análise de sua morfologia em biogênicos (fatores bióticos) e fisiogênicos (fatores abióticos) (PEREIRA et al., 2021) tem se mostrado uma maneira prática, simples, eficaz e econômica de avaliar a estrutura do solo e especialmente a agregação; que, com sucesso mensura, determina e monitora a qualidade estrutural do solo sob diferentes estratégias e tecnologias de gerenciamento (LAVELLE et al., 2014; SUÁREZ et al., 2019; PEREIRA et al., 2021).

A partir dessa contextualização, este estudo teve como hipótese central que sistemas de produção agrícola com maior diversidade de espécies vegetais podem proporcionar a manutenção ou melhoria da qualidade dos solos, especialmente nos de textura arenosa. Esse efeito benéfico pode estar relacionado à formação de agregados biogênicos. A via biogênica de formação pode alterar a dinâmica da MOS-associada à agregação; modificar o estado de agregação; e promover maior acúmulo e disponibilidade de nutrientes em comparação à via fisiogênica. Para avaliar as hipóteses a tese foi dividida em 3 capítulos com diferentes objetivos:

O Capítulo I intitulado “Agregação do solo e matéria orgânica associada sob sistemas de manejo em solos de textura arenosa, região subtropical do Brasil”, teve como objetivos i) verificar se o uso e manejo do solo afetam a proporção de agregados biogênicos e fisiogênicos; e ii) verificar se a agregação biogênica promove melhorias de natureza química na “camada arável” em comparação à agregação fisiogênica.

O Capítulo II intitulado “Estabilidade, carbono orgânico lábil e glomalina de agregados biogênicos em solos arenosos sob sistemas de manejo na região subtropical do Brasil”, tem como objetivos i) verificar se agregação biogênica proporciona maior estabilização de macro e microagregados; e ii) avaliar se agregados biogênicos estão associados a maiores teores de carbono orgânico lábil e glomalina.

O Capítulo III intitulado “Sistemas de produção na região subtropical do Brasil: agregados biogênicos na avaliação da qualidade de solos de textura arenosa”, teve como objetivos i) verificar a relação entre os atributos químicos associados a fertilidade de agregados biogênicos e fisiogênicos em áreas de pastagem, sistemas plantio direto e vegetação típica de Mata Atlântica; ii) avaliar os teores totais de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio e suas respectivas razões estequiométricas nestes agregados; e iii) analisar as interações entre as frações de fósforo e vias de formação biogênica e fisiogênica.

2. REVISÃO DE LITERATURA GERAL

2.1. Solos Arenosos do Oeste do Paraná: Composição Granulométrica e Principais Ordens

Solos de textura arenosa cobrem aproximadamente 8,0% do território brasileiro (DONAGEMMA et al., 2016). Ocupando cerca de 15% dos solos do bioma Cerrado, mais especificamente nas regiões do Brasil Central e Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), com percentual de aproximadamente 11,0% de Neossolos Quartzarênico. Entretanto, tais solos encontram-se presentes em todos os estados do Brasil, associados ou não a Formação Geológica, como no estado do Paraná (Arenito Caiuá) e em São Paulo (Arenito Botucatu e Bauru) (DEMATTE e DEMATTE, 2024c).

Os solos arenosos normalmente são profundos, bem drenados, apresentando-se em relevo plano a suave ondulado. Geralmente possuem baixa capacidade de retenção de água e fertilidade natural; elevados valores de acidez trocável; e baixíssimos teores de matéria orgânica do solo (MOS). Comumente, são suscetíveis à erosão hídrica e aos processos de degradação. As principais classes de solos desse tipo de ambiente são os Latossolos, Neossolos Quartzarênicos e Argissolos de textura areia/média, segundo Demattê e Demattê (2024d). As áreas onde ocorrem essas classes de solos foram, no passado, consideradas marginais à produção agrícola. Em muitos casos graças ao uso de novas práticas e tecnologias tais áreas estão sendo inseridas com sucesso ao sistema produtivo brasileiro. Exemplificando a produção de grãos, fibras, materiais energéticos, cana-de-açúcar, silvicultura e pastagens.

A região Oeste do Paraná está situada no Terceiro Planalto do estado, ocupando uma área de aproximadamente 2.290.859 ha, correspondendo a 11,5% do território do estado (IPARDES, 2003; SEIDEL et al., 2023). Abrange 50 municípios, com destaque para Toledo, Cascavel e Foz do Iguaçu, que são os mais expressivos em termos de habitantes. Faz limite ao Sul com a Argentina e com a região Sudoeste paranaense e a Oeste com o Paraguai. Os rios Piquiri, Paraná e Iguaçu definem as principais divisas dentro do estado. Este Planalto é caracterizado pela predominância das rochas basálticas do Grupo Serra Geral (Mesozóico), além de rochas vulcânicas ácidas (riolitos e riodacitos) na região de Palmas (ARIOLI e LICHT, 2014; LICHT e ARIOLI, 2018) e rochas sedimentares como os arenitos neocretáceos suprabasálticos do grupo Arenito Caiuá no setor Noroeste (MINEROPAR, 1989; FERNANDES e COIMBRA, 2000; FERNANDES, 2004; SEIDEL et al., 2023).

As principais classes de solos que predominam nesta região, seguindo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (SANTOS et al., 2018) são Latossolos, Nitossolos, Cambissolos, Neossolos (Regolíticos e Litólicos), Argissolos, Gleissolos e Organossolos. Neste contexto, destaque para a classe dos Argissolos em termos de uso e manejo do solo: a textura predominantemente arenosa dos horizontes superficiais, conjugada à presença de gradiente textural, desfavorece o fluxo hídrico no perfil do solo e favorece a ocorrência dos processos erosivos. A combinação das características parentais, associadas às condições climáticas (elevadas temperaturas e precipitações), culmina em solos distróficos e com baixos teores de MOS.

2.2. Principais Atividades Agrícolas e Sistemas de Produção da Região

A região Oeste do Paraná é atualmente reconhecida por sua grande participação na cadeia produtiva do estado; sendo responsável por cerca de 25% do Produto Interno Bruto (PIB) agropecuário. Porém, até alcançar este patamar significativo várias fases se sucederam desde a década de 1950; iniciando pela exploração florestal, seguida pelas culturas de grãos e

pecuária extensiva e de subsistência. Chegando aos dias atuais com o aumento das criações intensivas de suínos, aves e bovinos; acompanhadas do crescimento das agroindústrias, visando mercados nacionais e internacionais (RIBEIRO et al., 2019). A agropecuária da região se destaca pela produção de suínos e aves, além da produção de grãos (milho e soja) (WELTER et al., 2020); concentrando 68% da criação e abate de suínos, 31% da produção paranaense de avicultura, e 34 e 22% da produção de milho e soja do estado, respectivamente.

Nas áreas de produção agrícola da região, especialmente em condições de solos de textura arenosa as formas de uso e manejo das terras mais comumente verificadas correspondem ao plantio direto (oriundo da Inglaterra e EUA de onde essa prática foi importada em 1969, sob o enfoque de simples método alternativo de preparo reduzido de solo) (CERETTA et al., 2007) e sistema plantio direto (naturalmente brasileiro, que surgiu em meados dos anos 1980 e conceituado como um complexo de preceitos conservacionistas destinado à exploração de sistemas agrícolas) (DENARDIN et al., 2019); a integração lavoura-pecuária; o sistema agroflorestal, incluindo integração lavoura-pecuária-floresta; as culturas isoladas como florestas; e pecuária de elevado nível de manejo (DONAGEMMA et al., 2016). Em geral, essas formas de manejo permitem maior produção de biomassa e incremento de MOS propiciando maior disponibilidade de nutrientes e água nos solos arenosos.

Neste contexto, vale exemplificar e destacar o estudo realizado por Franchini et al. (2016) na propriedade agropecuária “Fazenda Flor Roxa” no Noroeste do estado, com características edáficas e ambientais semelhantes a região Oeste (p. ex., solos arenosos, clima quente e pastagens com alto nível de degradação). Na ocasião, os principais problemas que foram verificados na propriedade incluíam a reduzida produção e qualidade da pastagem, com alta infestação de plantas invasoras; a baixa produtividade da soja; e a elevada degradação das propriedades físicas e químicas do solo. A solução encontrada para amenizar tais problemas foi a diversificação de espécies vegetais nas áreas de produção.

O modelo preponderante no estudo de Franchini et al. (2016) é baseado na utilização das áreas de produção por dois anos com culturas anuais (soja e milho) intercalados com três ou quatro anos com pastagem perene (*Urochloa brizantha* ou *Panicum maximum*). Verificou-se ao longo dos anos de adoção do modelo o beneficiamento das condições químicas do solo, geradas pelo cultivo da soja; permitindo maior produção do milho em consórcio com a forragem (*Urochloa ruziziensis*) em sucessão à cultura oleaginosa. Os autores evidenciaram que houve sinergia expressiva entre os cultivos de pastagem e soja. A pastagem perene melhorou a estrutura do solo, aumentando os teores de MOS e reduzindo a sobrevivência de doenças necrotróficas e algumas pragas da cultura. Paralelamente, a soja propiciou a melhoria dos atributos químicos do solo, favorecendo o milho (segunda safra ou safrinha) e a braquiária, cultivadas juntas no período seco.

A preocupação com a sustentabilidade das áreas de produção agroalimentares inseridas em solos de textura arenosa ou “camada arável” arenosa no Brasil, motivou a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS) em assumir o desafio científico e técnico de organizar e reunir profissionais, produtores, pesquisadores, docentes e discentes com diferentes expertises no tema. Neste sentido, foi criado o Simpósio Brasileiro de Solos Arenosos (SBSA). O I SBSA foi realizado pela UNOESTE na cidade de Presidente Prudente (SP) em 2014. O II SBSA foi realizado em 2017, em conjunto a V Reunião Paranaense de Ciência do Solo, coordenados pela UEM e COCAMAR na cidade de Maringá (PR). O tema central dessa edição foi “Solos do Arenito: usos, desafios e sustentabilidade”. O III SBSA aconteceu na cidade de Campo Grande (MS) em 2017, tendo como responsáveis pela organização a Embrapa e UEMS, cujo tema central foi “Intensificação Agropecuária Sustentável em Solos Arenosos” (TEIXEIRA e DONAGEMMA, 2019). Eventos como esses

são essenciais para as recomendações de sistemas de manejo em regiões de maior ocorrência dessa classe de solos no país.

O uso consciente do solo implica basicamente no reconhecimento de suas limitações e a possibilidade através de sistemas de manejo de tentar atenuá-las ou até mesmo superá-las (DEMATTÊ e DEMATTÊ, 2024a). O aprimoramento dos sistemas de produção indica que os desafios em relação ao manejo dos solos arenosos têm buscado soluções viáveis a sua utilização; ao nível de manejo compatível às atividades agrícolas. Entretanto, não se pode esquecer que, devido as características inerentes a classe textural, tais como maior fragilidade estrutural, alta permeabilidade, baixa capacidade de armazenamento de água e nutrientes (ŠIMANSKÝ et al., 2019) e alta susceptibilidade à erosão e contaminação das águas subterrâneas (DONAGEMMA et al., 2016), esses solos devem ser manejados por meio de práticas e/ou sistemas conservacionista; e, principalmente, sua superfície precisa estar constantemente coberta por plantas, palhadas ou ambas.

2.3. Indicadores de Qualidade do Solo: Matéria orgânica do Solo

A qualidade do solo relaciona-se à capacidade deste em sustentar a produtividade biológica, preservando a qualidade do ambiente e promovendo a saúde da flora e da fauna, abrangendo a concepção de qualidade do alimento e segurança alimentar e nutricional (DORAN e PARKIN, 1994; 1996). Assim, indicadores de qualidade do solo são, portanto, atributos mensuráveis que indicam a capacidade do solo de sustentar e promover a qualidade ambiental, podendo ser classificados em físicos, químicos e biológicos (MURPHY et al., 2006). Todavia, somente por meio de um conjunto de indicadores edáficos e suas interações, é possível monitorar e avaliar o impacto dos diferentes sistemas manejo e condições ambientais sobre a qualidade do solo (LIMA et al., 2013).

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO) publicou um documento ressaltando um conjunto de indicadores edáficos recomendados à avaliação do manejo sustentável dos solos levando em consideração sua eficiência, praticidade e baixo custo-benefício (FAO-ITPS, 2020). Neste, a FAO destaca o carbono orgânico do solo (ou MOS) como um indicador comumente reconhecido que reflete a qualidade química, física e biológica do solo, respondendo às mudanças através da implementação de práticas mais sustentáveis. Para os autores, a MOS apresenta relação direta com outros atributos do solo, como a disponibilidade de nutrientes; estrutura e agregação; porosidade; capacidade de retenção de água; e presença de macro, meso e micro fauna.

A medição dos indicadores recomendados no protocolo da FAO fornece uma avaliação da capacidade dos solos em manter os serviços ecossistêmicos prioritários e, consequentemente, melhorar a produtividade e o rendimento dos agricultores de forma mais sustentável. O guia de Diretrizes Voluntárias à Gestão Sustentável do Solo (Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management) desenvolvido pela Parceria Global pelo Solo (Global Soil Partnership) e adotado pela FAO (FAO, 2017) e seus países membros considera o manejo sustentável do solo como:

“O manejo do solo é sustentável se os serviços de apoio, fornecimento, regulação e culturais prestados pelo solo são mantidos ou melhorados sem prejudicar significativamente as funções edáficas que permitem esses serviços ou a biodiversidade.

O equilíbrio entre os serviços de apoio e fornecimento implicam na produção vegetal. Os serviços regulatórios que o solo presta à qualidade e disponibilidade da

água, e à composição dos gases de efeito de estufa na atmosfera é uma preocupação especial (...)" (FAO, 2017).

Alguns aspectos devem ser considerados antes de escolher um determinado indicador de qualidade do solo. Podendo ser citadas algumas características baseadas no estudo de Doran e Parkin (1996) e fortalecidas pelo protocolo da FAO (FAO-ITPS, 2020): i) Facilidade de medição e viabilidade econômica: mensurado em laboratório; ii) Sensibilidade as mudanças nas formas de uso e manejo das terras: passíveis as alterações após a aplicação do manejo sustentável dos solos, por exemplo; e iii) Amplamente utilizado pela comunidade científica internacional: eficiente para explicar os processos do ecossistema e os limites claros entre condições de sustentabilidade e não sustentabilidade. Além da MOS, já destacada no protocolo da FAO, ressalta-se a agregação devido a sua elevada sensibilidade as modificações proporcionadas pelas ações antrópicas e relação direta com a MOS (composição química e estrutural, e quantidade).

2.4. Indicadores de Qualidade do Solo: Agregação

Os agregados, ou unidades estruturais, são porções de solo nas quais as partículas estão dispostas obedecendo mais ou menos um padrão de organização. Ao formar um agregado partículas minerais (areia, silte e argila), orgânicas e íons estão ligados entre si com força superior a força que existe entre as superfícies de agregados vizinhos em contato. Sendo assim, a interface que delimita os agregados recebe o nome de superfície de fraqueza. O estado de agregação resulta do equilíbrio entre as forças ou processos que promovem a agregação e as forças e processos que tendem a provocar sua desagregação (LIMA e KAISER, 2023). A formação dessas unidades estruturais é fundamental à correta funcionalidade de propriedades do solo podendo ser exemplificadas a infiltração, retenção e movimentação de água no solo; a aeração e trocas gasosas; o crescimento radicular; a atividade da fauna edáfica; a estabilização e acúmulo de MOS; e a ciclagem de nutrientes.

Na formação dos agregados a aproximação das partículas (força de união) e sua estabilização (força de cimentação) envolvem processos ou mecanismos físicos, químicos e biológicos, que são influenciados pelo clima, granulometria, composição química e mineralógica, atividade biológica e ações antrópicas. Entretanto, esses processos ou mecanismos não ocorrem de modo isolado no ambiente edáfico, ambos estão associados e ocorrem de forma integrada e contínua no solo (LIMA e KAISER, 2023). Os agregados do solo são analisados e agrupados inicialmente segundo sua organização hierárquica. Ou seja, os processos de agregação do solo podem ser explicados pela teoria do modelo organizacional hierárquico com diferentes estágios de agregação (TISDALL e OADES, 1982; OADES, 1984). Na qual essas unidades estruturais são formadas sequencialmente. Inicialmente, microagregados ($\varnothing < 0,25$ mm) são formados e, posteriormente, funcionam como a matéria-prima para a formação de macroagregados ($\varnothing \geq 0,25$ mm) (SIX et al., 2004).

Quanto a sua origem ou vias de formação, essas unidades estruturais podem ser classificadas em: biogênicos ou de origem biogênica (formados por processos biológicos, com destaque para a atividade das raízes e da meso e macrofauna); fisiogênicos, fisicogênicos ou de origem fisiogênica (resultante de processos físicos e químicos, como formação de complexos organo-minerais, floculação, ciclos de secagem e umedecimento, entre outros) (PULLEMAN et al., 2005; VELASQUEZ et al., 2007; BATISTA et al., 2013; LOSS et al., 2014); ou intermediários, sem a evidência definida de uma origem ou via de formação específica (PEREIRA et al., 2021), uma vez que comumente engloba aqueles que não

puderam ser classificados como biogênicos ou fisiogênicos (PULLEMAN et al., 2005; BATISTA et al., 2013; FERREIRA et al., 2020).

Neste contexto, recentemente foram publicados três importantes artigos de revisão científica Lavelle et al. (2020), Pereira et al. (2021) e Guhra et al. (2022). Ambos baseados em estudos nacionais (PEREIRA et al., 2021) e internacionais (LAVELLE et al., 2020; GUHRA et al., 2022) sobre o uso da agregação biogênica como um indicador mais sensível, eficiente, econômico e confiável na avaliação da qualidade do solo em diferentes condições edafo-ambientais. Adicionalmente, os estudos mencionados trazem importantes informações e relatos sobre a compreensão e entendimento das interações entre a dinâmica de agregação e as transformações da MOS.

2.5. Alguns Estudos sobre a Gênese de Agregados em Cronossequência

Na literatura, estudos que tentam explicar os aspectos qualitativos e quantitativos relacionados à origem dos agregados em função das condições ambientais ainda são escassos. Provavelmente devido à complexidade e dificuldade de referências que permitam a identificação mais precisa dos processos de formação (LOSS et al., 2014). Dentre os primeiros estudos, destacam-se inicialmente os trabalhos de Pulleman et al. (2005), Velásquez et al. (2007; 2012), Jouquet et al. (2009), Cécillon et al. (2009), Silva Neto et al. (2010), e Batista et al. (2013).

Sob áreas de pastagem permanente (PP), sistema de cultivo orgânico (SCO) e convencional (SCC) na Holanda, Pulleman et al. (2005) desenvolveram um procedimento para a separação de agregados biogênicos (coprólitos) e fisiogênicos. Os autores desse estudo identificam os agregados com base em suas características morfológicas (BULLOCK et al., 1985) e avaliaram a influência da agregação na MOS promovida pela ação da macrofauna edáfica em comparação aos agregados fisiogênicos. Foram observados nos agregados biogênicos das áreas de PP e SCO maiores teores de carbono orgânico total (COT) em comparação aos fisiogênicos. Entretanto, padrão inverso foi verificado nos agregados da área de SCC.

Estudando agregados biogênicos e fisiogênicos de áreas de floresta e pastagem no estado do Pará (Brasil) e no município de San Dionísio (Nicarágua), Velásquez et al. (2007) propuseram um novo protocolo para a identificação da origem dos agregados separados manualmente a partir de critérios visuais. Aplicando a técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS) os autores observaram a presença de assinaturas espectrais específicas nos diferentes tipos de agregados, independentemente do efeito do solo e da vegetação. Foram verificadas diferenças nas assinaturas por meio de NIRS nos tipos morfológicos de agregados, indicando prováveis diferenças em suas origens. O método apresentou limitações quanto ao tamanho da área de estudo, entretanto, permitiu a clara identificação do organismo responsável pela formação do agregado.

Ao comparar diferentes abordagens na separação dos tipos morfológicos de agregados, Jouquet et al. (2009) objetivaram identificar as limitações dos métodos utilizados para classificar as vias de agregação. Os autores avaliaram a diferenciação entre agregados biogênicos e fisiogênicos em vários graus de fragmentação ou classes de tamanho usando características visuais, físicas e químicas. Tais agregados foram coletados em uma área experimental sob Argissolo no Nordeste do Vietnã. Após a fragmentação, foi verificado que os agregados biogênicos ficaram ocultos e, embora a grande dificuldade de identificá-los visualmente dos fisiogênicos, os mesmos apresentaram características químicas específicas.

Na França, Cécillon et al. (2009) classificaram agregados formados por diferentes vias em áreas sob condições distintas de microclima usando a identificação visual e a técnica de

NIRS; e investigaram as relações de cada tipo morfológico de agregado a possíveis modificações que o solo possa vir a ser submetido que promovam alterações como redução nos teores de MOS e erodibilidade. Os autores verificaram que os teores de carbono orgânico particulado (COp) nos agregados biogênicos foram numericamente (mas não significativamente) maiores do que os observados nos fisiogênicos. Tais resultados evidenciam a importância dos organismos para o equilíbrio e manutenção da MOS.

Em estudo envolvendo agregados biogênicos (coprólitos) e fisiogênicos de áreas de gramíneas sob Latossolo Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo, Luvissolo Crômico e Nitossolo Vermelho no Estado da Paraíba (Brasil), Silva Neto et al. (2010) verificaram que os biogênicos apresentaram maior estabilidade física quando submetidos a peneiramento úmido e melhor qualidade dos atributos químicos em comparação aos fisiogênicos. Os resultados sugerem a importância dos agregados biogênicos como indicadores de qualidade do solo mais eficientes.

No que concerne ao tipo de cobertura vegetal, Velásquez et al. (2012) estudaram o efeito de diferentes vegetais nos agregados biogênicos e fisiogênicos de áreas sob pastagem no estado do Pará. A presença de *Arachis pinto*i aumentou em 87% a quantidade de agregados biogênicos produzidos a partir da ação de minhocas em comparação à ausência da espécie; e a *Urochloa brizantha* favoreceu a gênese de agregados biogênicos (maior presença de raízes finas), o que elevou a proporção em comparação às áreas sem a braquiária. Tal fato demonstrou que a composição das espécies vegetais pode impactar as propriedades do solo por efeitos mediados pela fauna edáfica, enfatizando a necessidade de considerar a macrofauna do solo no manejo de agroecossistemas.

No Cerrado mato-grossense brasileiro, Batista et al. (2013) avaliaram a influência física e biológica na gênese dos agregados do solo, bem como verificaram quais os fatores do ambiente que determinam as características dos agregados em áreas de produção sob sistema integração lavoura-pecuária. Os autores observaram que os agregados biogênicos apresentaram correlação positiva com os teores de COT e COp, e com a macrofauna edáfica, em especial as minhocas. Assim, os diferentes tipos de agregados formados além de apresentarem características morfológicas distintas, também possuem diferenças quanto às características químicas.

Posteriormente, outros estudos constataram diferenças nos atributos físicos, químicos, biológicos e morfológicos dos diferentes tipos de agregados, podendo ser destacados os trabalhos de: Loss et al. (2014; 2017; 2020), Rossi et al. (2016), Silva Neto et al. (2016), Fernandes et al. (2017), Ventura et al. (2018), Suárez et al. (2019), Mergen Junior et al. (2019), Melo et al. (2019), Moura et al. (2019), Pinto et al. (2019), Schultz et al. (2019), Ferreira et al. (2020) e Lima et al. (2020).

Sob áreas de sistema plantio direto, sistema preparo convencional, pastagem permanente e floresta secundária no estado do Paraná (Brasil), Loss et al. (2014) estudaram a abundância isotópica de ^{13}C e ^{15}N nos diferentes tipos morfológicos de agregados. Os autores quantificaram valores menos negativos de ^{13}C e maiores valores de ^{15}N nos agregados fisiogênicos. Os dados de Loss et al. (2014) corroboraram aos encontrados por Jouquet et al. (2009), e possivelmente estão relacionados aos processos de decomposição e humificação (estabilização) da MOS nesses agregados, o que proporciona maior enriquecimento isotópico em ^{13}C nos biogênicos quando comparados aos fisiogênicos. Os autores sugerem que o conteúdo de ^{13}C e ^{15}N reflete a importância ecológica da fauna edáfica e, portanto, podem ser eficientes indicadores para diferenciar as vias de formação dos agregados.

No estado do Rio de Janeiro (Brasil), Rossi et al. (2016) realizaram estudos com o objetivo de identificar e caracterizar quimicamente agregados biogênicos, intermediários e fisiogênicos sob diferentes sistemas de manejo agroecológico. Os autores verificaram que os

sistemas de manejo não produziram efeito sobre a proporção média de cada classe de agregados, e que a contribuição relativa dos agregados intermediários para a massa total de agregados foi superior à dos demais. Entretanto, não foram constatadas diferenças nos teores de COT e nos atributos químicos entre os diferentes tipos morfológicos de agregados.

Em Pinheiral no estado do Rio de Janeiro, Silva Neto et al. (2016) propuseram analisar a gênese de agregados formados por diferentes vias de formação, assim como os atributos físicos e químicos destes agregados sob áreas com diferentes coberturas vegetais. Os autores constataram maiores conteúdos de COT nos agregados biogênicos em todas as áreas do estudo, e maiores teores de carbono na fração oxidável F1 na classe biogênica em comparação à intermediária e fisiogênica. Os autores concluíram que o processo de agregação biogênica é provavelmente mais eficiente na promoção de uma maior estabilidade estrutural do solo e sequestro de carbono, sendo que estes podem ser considerados excelentes indicadores de qualidade do solo.

Analisando a proporção relativa e os teores de COT das diferentes vias de formação dos agregados obtidos em fragmentos da Mata Atlântica sob estágios de regeneração distintos, Fernandes et al. (2017) verificaram que os biogênicos se encontravam em menor proporção, porém com maiores teores de COT em comparação aos fisiogênicos e intermediários. Os autores concluíram que os agregados biogênicos têm potencial para serem utilizados como indicadores de qualidade do solo em ambientes com baixo grau de ação antrópica.

No estado de Santa Catarina (Brasil), Loss et al. (2017) investigaram a influência da aplicação de diferentes tipos e quantidades de dejetos suínos por longo tempo (2002–2012) nas vias de formação dos agregados sob áreas de sistema plantio direto com sucessão aveia preta e milho. Os autores verificaram que após dez anos das aplicações a via de formação biogênica predominou em comparação à fisiogênica, sendo que o padrão inverso foi observado na área controle (sem aplicação do dejetos).

Os teores de COT e nitrogênio total (NT), e seus respectivos valores nas frações húmicas da MOS de agregados biogênicos e fisiogênicos foram quantificados por Ventura et al. (2018) após sucessivas adições de resíduos da suinocultura sob áreas conservacionistas de um Argissolo Vermelho-Amarelo. Os autores constataram que as contínuas adições aumentaram os teores de COT, NT e na fração humina dos agregados biogênicos em relação aos fisiogênicos.

Na Amazônia Colombiana, Suárez et al. (2019) analisaram a contribuição biológica na formação de agregados sob áreas de sistemas agroflorestais (SAFs), pastagem e floresta nativa, bem como o potencial dos diferentes tipos morfológicos de agregados no estoque de carbono. Os autores verificaram que a presença de árvores e a serapilheira proveniente das mesmas foram fatores determinantes que favoreceram a atividade da macrofauna. Permitindo assim que esses organismos atuassem com maior intensidade no solo, formando estruturas biogênicas ao homogeneizar a fração mineral à orgânica. Nos agregados biogênicos dos SAFs foram verificados os maiores teores de COT em comparação aos agregados das outras áreas.

Avaliando diferentes fontes e doses de nutrientes nas vias de formação de agregados e na caracterização química dos mesmos, Mergen Junior et al. (2019) constataram que os agregados formados pela via biogênica favoreceram o aumento nos teores de N, P, K⁺, Mg²⁺ e COT em relação aos formados pela via fisiogênica. Os agregados biogênicos mostraram-se indicadores de qualidade sensíveis às mudanças decorrentes da adição de dejetos suínos ao solo.

No estado do Paraná, Melo et al. (2019) investigaram o efeito da agregação biogênica na dinâmica química e estrutural em Latossolo Vermelho após nove contínuos anos de aplicação de dejetos líquidos de suínos ou cama de frango. A partir de imagens de microtomografia computadorizada por raios-X, os autores verificaram que os agregados

biogênicos apresentaram maior proporção de poros com diâmetro $> 0,10$ mm. Aspecto este que está diretamente relacionado a atividade da fauna e crescimento do sistema radicular.

Em Seropédica no estado do Rio de Janeiro, Moura et al. (2019) analisaram os teores de fósforo (P) total e de suas formas e frações orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi) nos agregados biogênicos e fisiogênicos sob diferentes sistemas de manejo agroecológico. Nos agregados fisiogênicos foram quantificados os maiores teores de Po e Pi na maioria das áreas avaliadas. Conclui-se que as concentrações de P verificadas nos distintos tipos de agregados evidenciaram o importante papel das vias de formação na avaliação da qualidade edáfica.

Em áreas de sistema integrado de produção agroecológica, Pinto et al. (2018) propuseram a quantificação do carbono potencialmente mineralizável (C-CO₂) de agregados biogênicos e fisiogênicos sob áreas de SAF, café à pleno sol, café sombreado, aleias com flemíngia e plantio direto (PD). Foi observado que o PD sob manejo agroecológico apresentou maior acúmulo de C-CO₂ entre os sistemas avaliados nos agregados biogênicos e o menor acúmulo nos agregados fisiogênicos. Os autores atribuíram esses resultados ao tipo de carbono estocado em cada tipo de agregado, na qual o carbono estocado nos agregados fisiogênicos é mais recalcitrante quando comparado ao carbono mais lábil estocado em agregados formados pela via biogênica.

Com o objetivo de avaliar a influência da vegetação arbórea e de gramíneas nas vias de formação, estabilidade, atributos químicos e frações de carbono orgânico de agregados sob Argissolo Vermelho-Amarelo no estado do Rio de Janeiro, Schultz et al. (2019) verificaram que os agregados biogênicos, principalmente os provenientes das áreas sob espécies arbóreas proporcionaram maior proteção e estabilização do carbono. Os autores concluíram que os agregados biogênicos podem funcionar como potenciais reservatórios de nutrientes e MOS.

No município de Guaíra (Sul do Brasil), Ferreira et al. (2020) avaliaram a proporção relativa (massa) de agregados biogênicos, intermediários e fisiogênicos sob áreas de sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e área de floresta. Os autores observaram que a proporção de agregados fisiogênicos foi superior à de intermediários e biogênicos na área de SPD em fase de manutenção, com padrão inverso para a área de floresta. Tais resultados podem estar relacionados à baixa mobilização do solo e aos efeitos cumulativos da pressão de máquinas agrícolas sobre a superfície do solo.

No município de Nova Friburgo (Sudeste do Brasil), Lima et al. (2020) investigaram a eficiência do uso da aveia preta na recuperação da agregação do solo, bem como quantificaram os teores dos nutrientes nos agregados considerando as suas vias de formação sob áreas de cultivo em ambiente de montanha. Os sistemas de manejo influenciaram nas vias de formação dos agregados, sendo a classificação morfológica uma importante ferramenta para o monitoramento do manejo do solo. Os autores verificaram que a aveia preta promoveu o aumento da gênese de agregados biogênicos e estes comportaram-se como compartimentos de reservas de nutrientes.

Avaliando os teores de COT e das frações oxidáveis nos agregados biogênicos e fisiogênicos do solo de diferentes tamanhos sob áreas com aplicação de dejetos líquidos de suínos e cama sobreposta de suínos no estado de Santa Catarina, Loss et al. (2020) constataram que as frações de carbono oxidável permitiram evidenciar diferenças entre as vias de formação, sendo maiores nos agregados biogênicos.

3. CAPÍTULO I

AGREGAÇÃO DO SOLO E MATÉRIA ORGÂNICA ASSOCIADA SOB SISTEMAS DE MANEJO EM SOLOS DE TEXTURA ARENOSA, REGIÃO SUBTROPICAL DO BRASIL

PINTO, L. A. S. R.; MORAIS, I. S.; OZÓRIO, J. M. B.; MELO, T. R.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G. Soil aggregation and associated organic matter under management systems in sandy-textured soils, subtropical region of Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 253, p. 1–18, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10892-1>

3.1. RESUMO

O aumento da diversificação de espécies vegetais em áreas de produção agrícola pode favorecer a manutenção ou melhoria da qualidade dos solos, em especial os de textura arenosa; e este efeito benéfico pode estar relacionado à formação de agregados de diferentes origens. O estudo teve como objetivos i) verificar se o uso e manejo do solo afeta a proporção de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy); e ii) verificar se a agregação Bio promove melhorias de natureza química na “camada arável” em comparação à agregação Phy. Foram avaliadas três áreas manejadas (sistemas de manejo) e uma área de referência (sem indícios de ação antrópica) localizadas sob solo com textura arenosa nos horizontes superficiais, a saber; pastagem permanente (PP); sistema plantio direto (NT); sistema plantio direto + *Urochloa* (NT+B); e vegetação do bioma Mata Atlântica (NF). Em cada área amostral foram coletadas cinco pseudorepetições (amostras indeformadas) nas camadas de 0–0,05 e 0,05–0,10 m. Após a coleta, as amostras foram secas ao ar e posteriormente submetidas a peneiramento utilizando um conjunto de peneiras de 9,7 e 8,0 mm de malha, sendo selecionados somente os agregados retidos nesse intervalo. Nestes, quantificou-se o percentual de cada tipo de agregado a partir da identificação e separação dos mesmos em Bio (formados por processos bióticos) e Phy (resultante de fatores abióticos). Em sequência, foram realizadas as análises de carbono orgânico total (TOC), abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) e os fracionamentos físicos da matéria orgânica do solo: granulométrico (carbono orgânico particulado, POC; e associado aos minerais, MAOC) e densimétrico (carbono da fração leve-livre, FLFC; e leve intra-agregado, ILFC). Apenas a área de PP foi capaz de promover maior formação de agregados Bio. A área de PP também elevou os teores de TOC nos agregados e afetou o sinal isotópico de $\delta^{13}\text{C}$. O sistema de NT+B proporcionou o aumento dos teores de TOC nos seus agregados em relação aos agregados das áreas de NT e NF. Entre as vias de formação, os agregados Bio influenciaram nos maiores teores de TOC, POC, FLFC e ILFC e valores mais negativos de $\delta^{13}\text{C}$. A vegetação de gramínea forrageira perene (funcionalidade do sistema radicular, aporte de resíduos orgânicos e mistura do material no solo) foi mais eficiente do que a diversidade de espécies vegetais para favorecer a formação de agregados Bio, e o efeito benéfico da braquiária também pode ser observado quando adotado em consórcio com o milho, em sistemas de produção de grãos.

Palavras-chave: Sistema plantio direto. Agregados biogênicos e fisiogênicos. Origem e proteção do carbono.

3.2. ABSTRACT

Increasing the diversity of plant species in agricultural production areas can help the maintenance or improvement of soil quality, particularly for soils with a sandy texture. This beneficial effect may be related to the formation of aggregates of different origins. This study aimed to i) verify whether soil use and management affect the proportion of biogenic (Bio) and physicogenic (Phy) aggregates, and ii) verify whether Bio aggregation promotes chemical improvements in the “arable layer” compared to Phy aggregation. Three managed areas (where management systems were used) and a reference area with no evidence of anthropic action on soils with sandy texture in the superficial horizons were evaluated. These management systems were accordingly categorized as permanent pasture system (PP), no-tillage system (NT), no-tillage + *Urochloa* system (NT+B), and Atlantic Forest biome vegetation (NF). In each sample area, five pseudorepetitions (undeformed samples) were collected from the 0-0.05 m and 0.05-0.10 m layers. After collection, the samples were air dried and then sieved using a set of 9.7 mm and 8.0 mm sieves. Only the aggregates retained in this range were selected. The percentage of each type of aggregate was quantified by identifying and separating them into Bio (formed by biotic processes) and Phy (resulting from abiotic factors). Analyses of total organic carbon (TOC), natural abundance of $\delta^{13}\text{C}$ (‰), and the physical fractionations of soil organic matter granulometric (particulate organic carbon, POC; and mineral-associated organic carbon, MAOC) and densimetric (light-free fraction carbon, FLFC; and light intra-aggregate, ILFC) were performed. Only the PP area promoted greater aggregate formation through Bio. The PP area also increased the TOC content of the aggregates and affected the isotopic signal of $\delta^{13}\text{C}$. The NT+B system provided an increase in the TOC content of its aggregates in comparison with aggregates in the NT and NF areas. Among the formation pathways, the Bio aggregates had the highest TOC, POC, FLFC, and ILFC contents and the most negative $\delta^{13}\text{C}$ values. The vegetation of perennial forage grasses (functionality of the root system, contribution of organic waste and mixing of the material in the soil) was more efficient than the diversity of plant species in favoring the formation of Bio aggregates. The beneficial effect of *Urochloa* can also be observed when adopted in consortium with corn in grain production systems.

Keywords: No-tillage system. Biogenic and physicogenic aggregates. Carbon origin and protection.

3.3. INTRODUÇÃO

Solos de textura arenosa cobrem aproximadamente 9,0 milhões km² (900 milhões de hectares) da superfície terrestre (HARTEMINK e HUTING, 2007; SILVA et al., 2020); e representam aproximadamente 8,0% no território brasileiro (DONAGEMMA et al., 2016). A principal característica destes solos é a elevada participação da fração areia, constituída principalmente por quartzo nos horizontes superficiais. Isto explica sua elevada fragilidade textural, alta permeabilidade, baixa capacidade de armazenamento de água e nutrientes (ŠIMANSKÝ et al., 2019), alta susceptibilidade à erosão e contaminação das águas subterrâneas (DONAGEMMA et al., 2016). Por outro lado, são favoráveis à mecanização e quando manejados com práticas sustentáveis, podem propiciar a manutenção ou melhoria da qualidade das terras agricultáveis. Apesar destas características restritivas, as possibilidades para utilizá-los na agricultura podem variar de acordo com as práticas adotadas e tecnologias desenvolvidas.

Graças ao avanço das pesquisas e uso de novas práticas e tecnologias, áreas potencialmente agricultáveis sob solos de textura arenosa estão sendo incorporadas com sucesso à cadeia produtiva brasileira (FONTANA et al., 2020), tendo como exemplo a produção de grãos, fibras, materiais energéticos, cana-de-açúcar, silvicultura e pastagens. A adoção de sistemas de manejo como pastagens permanentes (PP) e sistemas conservacionistas (p. ex., sistema plantio direto, NT) pode viabilizar e aumentar a estabilidade da produção agrícola nesses solos (SILVA et al., 2020). As pastagens bem manejadas são fundamentais para o controle da erosão nos solos de textura arenosa, pois aumentam os teores de matéria orgânica (MARTINS et al., 2021), assim como aumentam as associações com fungos micorrízicos que contribuem para a melhoria na agregação do solo (DONAGEMMA et al., 2016), principalmente nas camadas superficiais.

A escolha correta do sistema de manejo do solo com rotação de culturas, e a inclusão de gramíneas forrageiras, como as braquiárias para a alimentação animal ou proteção do solo sob sistema de NT podem melhorar a sustentabilidade da produção de alimentos em regiões com alto risco agroclimático, como investigado por Silva et al. (2020) em áreas de solo de textura arenosa no Brasil. O consórcio milho-braquiária é uma tecnologia onde se cultivam as duas espécies de gramíneas juntas, tendo como objetivo a produção de grãos, palha de milho e pasto ou palha de braquiárias. A prática permite a consolidação do sistema de NT em áreas agroalimentares, com reflexos positivos sobre as culturas subsequentes, como a soja, e a conservação dos recursos naturais (CECCON, 2013).

Uma das formas mais eficientes de verificar o impacto dos sistemas de manejo dos solos, com destaque para os solos mais frágeis, é avaliar a dinâmica da agregação e da matéria orgânica do solo (MOS), principalmente a MOS-associada à agregados de diferentes origens (ou vias de formação) (FERREIRA et al., 2020). A agregação do solo protege e conserva a MOS, funcionando como um reservatório de energia e nutrientes às plantas e biota do solo (BRONICK e LAL, 2005). O emprego do método de separação visual baseado nas características morfológicas dos agregados (BULLOCK et al., 1985; PULLEMAN et al., 2005; VELASQUEZ et al., 2007; BATISTA et al., 2013; LOSS et al., 2014; FERREIRA et al., 2020) tem sido uma maneira prática, simples, eficaz e econômica de avaliar a estrutura do solo e especialmente a agregação (LAVELLE et al., 2014; PEREIRA et al., 2021) que, com sucesso, determina e monitora a qualidade estrutural do ambiente edáfico sob diferentes estratégias de gerenciamento (SUÁREZ et al., 2019).

Os agregados do solo são definidos como unidades naturais secundárias compostas por partículas unitárias (areia, silte e argila) e MOS que são ligadas entre si por substâncias orgânicas, óxidos de ferro e de alumínio, carbonatos, sílica e a própria argila (SANTOS et al.,

2015). Quando presentes na estrutura do solo podem regular diversas funções e processos como dinâmica da água e do ar; susceptibilidade à erosão; ciclagem de nutrientes; e proteção e acúmulo da MOS. Essas unidades estruturais podem ser classificadas quanto a sua origem ou via de formação em: biogênicos, ou de origem biogênica (formados por processos bióticos); fisiogênicos (fisiogênicos), ou de origem fisiogênica (resultante de fatores abióticos) (PULLEMAN et al., 2005; VELASQUEZ et al., 2007; BATISTA et al., 2013; LOSS et al., 2014); ou intermediários, sem a evidência definida de uma origem específica (PULLEMAN et al., 2005; BATISTA et al., 2013; FERREIRA et al., 2020). Em função de sua importância como indicador do manejo aplicado em áreas de produção agrícola, Pereira et al. (2021) reuniram um conjunto de imagens, dados e estudos em diferentes condições edafambientais no Brasil que apontam a agregação biogênica como um indicador de qualidade do solo mais sensível e confiável em comparação à fisiogênica. Um vez que está diretamente relacionada ao fator de formação organismo do solo

As transformações da MOS estão intimamente ligadas à dinâmica de agregação, como supõem Lavelle et al. (2020) em uma das etapas que integram seu modelo conceitual de formação de macroagregados biogênicos e fisiogênicos. Para os autores, a incorporação de matéria orgânica à matriz do solo é principalmente um processo biológico associado ao crescimento radicular, rizodeposição, e processos de cominuição, alimentação e bioturbação de invertebrados. O estudo dessas transformações envolve o conhecimento e entendimento das diferentes frações da MOS, e de seus respectivos mecanismos de estabilização, tais como recalcitrância molecular, composição e arranjo estrutural, proteção física por oclusão e formação de complexos organo-minerais (LAVALLEE et al., 2020; LEUTHOLD et al., 2024).

Mensurar e monitorar a resposta de tais indicadores (agregação e MOS) às mudanças nas formas de uso e manejo do solo é valioso para fornecer informações quanto à capacidade do sistema antrópico em melhorar a qualidade do solo, minimizando ou revertendo os processos de degradação ambiental (WEBSTER et al., 2019). Contudo, há carência nesse tipo de estudo na literatura para solos de textura arenosa, uma vez que um dos principais desafios na gestão sustentável desses ambientes está na implantação de sistemas de produção que consistam em novos arranjos e combinações de espécies no tempo-espço, com o propósito de promover benefícios relacionados ao aumento da produtividade das lavouras e melhoria da qualidade do solo (DONAGEMMA et al., 2016).

A partir do exposto, foram formuladas as seguintes hipóteses: (H₁) o aumento da diversificação de espécies vegetais em áreas de produção agrícola pode favorecer a manutenção ou melhoria da qualidade de solos textura arenosa; (H₂) esse efeito benéfico pode estar relacionado à formação de agregados biogênicos; e (H₃) a via biogênica pode alterar a dinâmica da MOS-associada à agregação. Para testar as hipóteses, o estudo teve como objetivos i) verificar se o uso e manejo do solo afeta a proporção de agregados biogênicos e fisiogênicos; e ii) verificar se a agregação biogênica promove melhorias de natureza química na “camada arável” em comparação à agregação fisiogênica.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1. Localização, clima e solo da área de estudo

O estudo foi desenvolvido no município de Terra Roxa, localizado no Oeste do estado do Paraná (Sul do Brasil) nas coordenadas 24° 11' 34" S e 54° 06' 62" W, com altitude média de 319 m (Figura 1 A). O clima da região é úmido subtropical com verões quentes (Cfa), segundo classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013). O solo da área de estudo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, com textura arenosa nos horizontes superficiais (SANTOS et al., 2018), correspondendo ao Paleudalfs no USA Soil Taxonomy (SOIL SURVERY STAFF, 2014) ou Acrisols no sistema de classificação da FAO (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015).

3.4.2. Histórico das áreas avaliadas

Foram avaliadas três áreas sob diferentes sistemas de manejo e uma área de referência, configurando quatro áreas amostrais. Os sistemas de manejo foram: pastagem permanente (PP) de Coast-cross (*Cynodon dactylon* L.); sistema plantio direto (sucessão soja/milho) (NT); e sistema plantio direto + *Urochloa* (consórcio milho-braquiária, sucessionadas com a soja) (NT+B). A área de referência corresponde a um fragmento florestal de vegetação do bioma Mata Atlântica (FN) (Figura 1 B-E) (Tabela 1). A caracterização dos atributos químicos e físicos das áreas amostrais na camada de 0–0,10 m encontra-se apresentada na Tabela 2.

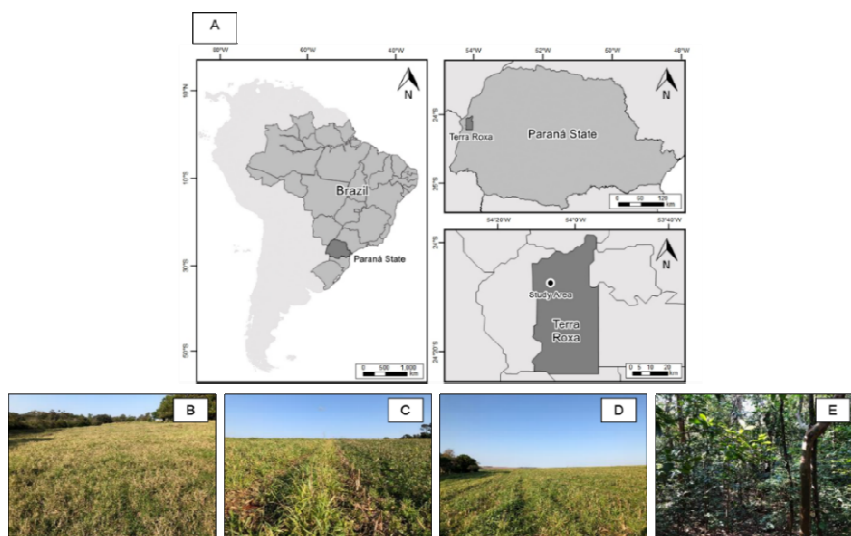


Figura 1. Localização do município de Terra Roxa, Paraná (Sul do Brasil) (A) e as áreas de estudo (B-E). Fonte: Elaborado pelo autor. Área de pastagem permanente com capim Coast-cross para o pasto (B); área de sistema plantio direto com milho como cultura de inverno à direita da foto (C); área de sistema plantio direto + *Urochloa* com milho-braquiária como culturas de inverno (D); e área de referência com vegetação do bioma Mata Atlântica (E).

A amostragem foi realizada em agosto de 2020 (final do período seco) (ver Anexo 9, item 9.2 e Figuras 15–19), sendo o milho (*Zea mays* L.) a cultura anual (segunda safra ou safrinha) que antecedeu o período de coleta nas áreas de NT e NT+B. Na área de NT+B a coleta foi realizada 35 dias após a dessecação da *Urochloa*. Em outubro de 2020 foi semeada

a soja (*Glycine max* L.) nas áreas de produção de grãos. Na área de NT+B o intervalo de tempo entre a dessecação da *Urochloa* e semeadura da soja foi de ± 90 dias. Esse procedimento é para evitar que exsudatos contendo moléculas do dessecante passem da planta alvo para as raízes da cultura principal. Todas as áreas amostrais pertencem à mesma propriedade agrícola, encontrando-se sob a mesma condição de relevo, clima e classe de solo.

Tabela 1. Histórico, descrição e localização das áreas amostrais.

Áreas amostrais	Descrição e localização
PP	$\pm 4,1$ ha; sendo 45 anos de pastagem permanente com capim Coast-cross (<i>Cynodon dactylon</i> L.), Área com lotação contínua de gado leiteiro de 2 UA ha ⁻¹ . A área foi conduzida sob esse manejo por 45 anos, sendo reformada a cada 15 anos com aplicação de calcário de aproximadamente 2,0 t ha ⁻¹ . Coordenadas: 24° 11' 34,86" S e 54° 06' 49,06" O. Altitude: 312 m.
NT	± 28 ha; sendo 20 anos de sistema de cultivo convencional (CT) + 25 anos de NT em sucessão de soja (verão) e milho (inverno). A correção do solo é efetuada mediante recomendações periódicas com base nas análises de solos, com aplicação de calcário calcítico ou dolomítico e gesso agrícola a cada 3 ou 4 anos, na quantidade de 2,0 e 1,0 t ha ⁻¹ , respectivamente. A área recebe adubação de base com aproximadamente 200 kg ha ⁻¹ na semeadura da soja com formulado NPK na proporção de 04-30-10, e com formulado 10-15-15 na semeadura do milho em segunda safra, seguindo recomendações em função de análises de solo. Coordenadas: 24° 11' 31,34" S e 54° 06' 52,04" O. Altitude: 322 m.
NT+B	± 28 ha; sendo 20 anos de CT, posteriormente 19 anos de NT em sucessão de soja (verão) e milho (inverno) e nos últimos seis anos consórcio milho e <i>Urochloa</i> em cultivos de inverno (25 anos de NT+ <i>Urochloa</i> no total). A área recebe aplicação de calcário para correção a cada 4 anos, com aplicação de aproximadamente 2,0 t ha ⁻¹ . Para a semeadura da soja aplica-se o formulado de 15-15-15, e 200 kg ha ⁻¹ de NPK mais cloreto de potássio em cobertura. Na semeadura do milho em segunda safra a área recebe aplicação de 240 kg ha ⁻¹ de NPK na proporção de 15-15-15 e sulfato de amônia em cobertura. Coordenadas: 24° 11' 28,30" S e 54° 06' 50,60" O. Altitude: 322 m.
FN	± 28 ha; área de vegetação do bioma Mata Atlântica - Floresta Estacional Semidecidual, sem indícios de ação antrópica. Coordenadas: 24° 11' 15,22" S e 54° 06' 47,46" O. Altitude: 310 m.

PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; e NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica.

Tabela 2. Caracterização dos atributos químicos e físicos do solo na camada de 0–0,10 m nas áreas do estudo, região subtropical do Brasil.

Áreas	pH H ₂ O	Ca ²⁺ ----- -----	Mg ²⁺ ----- -----	H+Al cmol _c dm ⁻³	S	T	K ⁺ ----- -----	P mg dm ⁻³	V --- % ---
PP	5,80	4,30	2,20	2,30	7,00	9,30	203	51	75
NT	6,80	3,20	1,10	0,20	4,70	4,90	100	42	96
NT+B	6,60	3,10	1,30	0,50	5,00	5,40	171	41	92
FN	5,50	1,30	0,70	1,80	2,20	3,90	50	23	56
Áreas	TOC	Areia ----- -----	Silte g kg ⁻¹	Argila	Classe textural				
PP	16,10	610	190	200	Francoarenosa				
NT	5,90	750	130	120	Areia franca				
NT+B	8,30	770	120	110	Areia franca				
FN	7,00	670	210	120	Francoarenosa				

PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; S: Soma de bases trocáveis; T: Valor T, corresponde a CTC à pH 7,0; V: Saturação por bases; e TOC: Carbono orgânico total.

3.4.3. Coleta das amostras e separação dos agregados

Em cada área amostral foram demarcadas cinco glebas de 400 m², nas quais foram coletadas amostras indeformadas (torrões) (ver Anexo 9, item 9.2 e Figuras 20 e 21), sendo

que cada gleba representou uma pseudorepetição, totalizando cinco pseudorepetições. Foram coletadas cinco pseudorepetições nas camadas de 0–0,05 e 0,05–0,10 m em quatro áreas amostrais (sistemas de manejo e área de referência), perfazendo um conjunto de 40 unidades amostrais. Após a coleta, as amostras foram secas ao ar e posteriormente submetidas a peneiramento, utilizado um conjunto de peneiras de 9,7, 8,0 e 4,0 mm de malha, sendo selecionados somente os agregados retidos nos intervalos $9,7 > \varnothing \geq 8,0$ e $8,0 > \varnothing \geq 4,0$.

Os agregados de $9,7 > \varnothing \geq 8,0$ mm obtidos foram levados para laboratório, examinados sob lupa binocular e classificados quanto a sua origem. Para o estudo, foram identificadas e avaliadas duas classes (biogênicos e fisiogênicos) a partir dos padrões morfológicos estabelecidos por Bullock et al. (1985), mediante protocolo adaptado por Pulleman et al. (2005) e validado pelos estudos reunidos em Pereira et al. (2021). A diferenciação obedeceu aos seguintes critérios: *biogênicos* – aqueles em que é possível a visualização de formas arredondadas, providas do trato intestinal dos indivíduos da macrofauna do solo, principalmente Oligochaeta (minhocas) ou aqueles em que é possível visualizar a presença e atividade de raízes; e *fisiogênicos* (ou *fisicogênicos*) – definidos por aqueles que apresentaram formas angulares resultantes da interação entre carbono, argila, cátions e ciclos de umedecimento e secagem do solo. Após a identificação, determinou-se a contribuição relativa (% em massa) de cada tipo de agregado em cada área amostral (ver Anexo 9, item 9.3 e Figura 22).

3.4.4. Análises de MOS nos agregados

Os agregados de cada classe (biogênicos e fisiogênicos) foram destorroados e passados por peneira de 2,0 mm de malha, e este material foi utilizado para as análises de matéria orgânica (TEIXEIRA et al., 2017). O carbono orgânico total (TOC) foi determinado via oxidação úmida da matéria orgânica por dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) na concentração de $0,167 \text{ mol L}^{-1}$, em meio sulfúrico e quantificado por titulação usando solução de sulfato ferroso amoniacal $((NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O \text{ } 0,2 \text{ mol L}^{-1})$ como titulante e ferroin como indicador (YEOMANS e BREMNER, 1988).

A abundância isotópica de $\delta^{13}C$ ($^{13}C/^{12}C$) foi determinada em $\pm 300 \text{ mg}$ de cada amostra de agregados macerados em almofariz e passado por peneira de 100 mesh ($149 \mu\text{m}$). As amostras foram avaliadas por meio de um espectrômetro de massa Delta V Advantage (Thermo Fisher Scientific, Bremen, Alemanha) no Laboratório de Pesquisa em Biotransformações de C e N (LABCEN), Santa Maria (RS). Os resultados foram expressos na forma de $\delta^{13}C$ (‰), sendo o carbono em relação ao padrão internacional Pee Dee Belemnite (PDB) (FAURE e MENSING, 2005) como na Equação 1.

$$\delta^{13}C = \left(\frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{PDB}}}{R_{\text{PDB}}} \right) \times 10^3 \text{ ‰} \quad (1)$$

Onde: $\delta^{13}C$ é a abundância isotópica; R_{sample} é a taxa isotópica de $^{13}C/^{12}C$; e R_{PDB} é a taxa do padrão internacional PDB.

Para o fracionamento físico granulométrico foi utilizado o método proposto por Cambardella e Elliot (1993), que consiste na separação da MOS em duas frações: matéria orgânica particulada (POM, relacionada à fração areia do solo) e matéria orgânica associada aos minerais (MAOM, relativa às frações argila e silte) com o auxílio de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio $(NaPO_3)_n \text{ } 5,0 \text{ g L}^{-1}$.

O fracionamento físico densimétrico (SOHI et al., 2001; MACHADO, 2002) foi utilizado para obtenção das frações leve livre (FLF) e leve intra-agregado (ILF) da MOS extraídas por meio de solução de iodeto de sódio (NaI) $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ ($\pm 0,02$). A determinação dos teores de carbono orgânico das frações particulada (POC), leve livre (FLFC) e leve intra-agregado (ILFC) da MOS também foi realizada segundo Yeomans e Bremner (1988). O carbono orgânico da fração associada aos minerais (MAOC) da MOS foi quantificado pela diferença entre o TOC e o POC.

3.4.5. Análises estatísticas

Para cada camada de solo, os dados foram inicialmente testados quanto aos pressupostos da análise de variância (ANOVA) de normalidade dos resíduos e de homocedasticidade. Nos casos em que os pressupostos não foram atendidos, as variáveis foram transformadas de acordo com Teste de Box-Cox e os pressupostos foram novamente testados. Nos casos em que os pressupostos foram atendidos (variáveis transformadas ou não), prosseguiu-se com a análise de variância em esquema fatorial 4×2 (quatro áreas avaliadas \times duas vias de formação de agregados) em delineamento inteiramente casualizado.

Algumas variáveis não atenderam os pressupostos da análise de variância mesmo após transformação, nesses casos, foram testadas pelo teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis mais diferença mínima significativa de Fisher. Também foi realizada a análise de componentes principais (ACP), baseada na matriz de correlação de Pearson, a partir dos atributos avaliados. Todas as análises foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2020). Todos os testes foram realizados à 5% de significância pelo Software R (R CORE TEAM, 2020).

3.5. RESULTADOS

3.5.1. Impactos dos sistemas de manejo nas vias de formação dos agregados

Na Figura 2 são apresentados os resultados das proporções de agregados biogênicos e fisiogênicos das áreas estudadas. Os impactos dos sistemas de produção sobre as vias de formação dos agregados foram mais intensos na camada superficial do solo. Apenas a área de PP foi capaz de promover maior formação de agregados biogênicos, superando tanto os seus fisiogênicos (73 e 27%, respectivamente) quanto os biogênicos das áreas de NT (14%) e NT+B (30%), e principalmente da área de NF (47%; ambiente mais estável e equilibrado) (Figura. 2; camada de 0–0,05 m). Entre as áreas de NT, NT+B e NF foi observado que o sistema de consórcio milho-braquiária favoreceu a formação de agregados de origem biogênica, aproximando seus valores aos quantificados na área de referência (NF) (Figura 2; camada de 0–0,05 m).

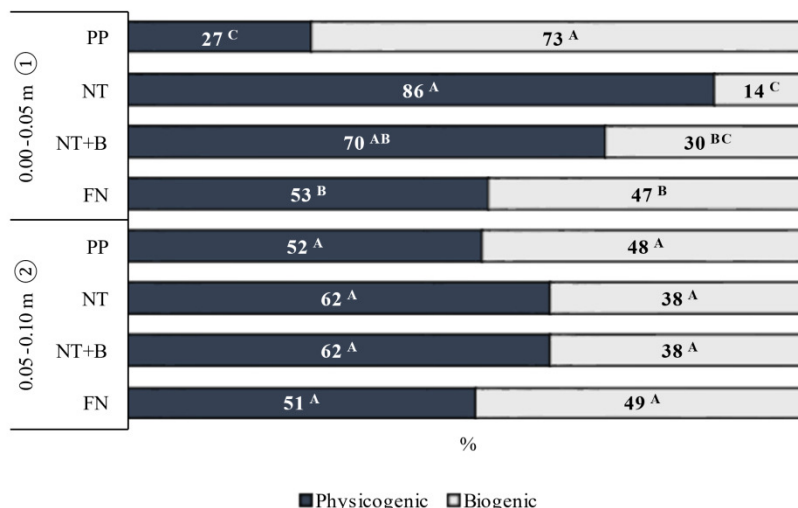


Figura 2. Vias de formação dos agregados de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; ^AANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; e ^BTeste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher.

3.5.2. Efeito dos sistemas de manejo e agregação na manutenção e origem do carbono armazenado

Os resultados de carbono orgânico total (TOC) e abundância isotópica de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) são apresentados na Tabela 3. A área de PP foi capaz de elevar os teores de carbono nos agregados, em ambas as vias de formação (camada de 0–0,05 m) e também na média geral entre as áreas (camada de 0,05–0,10 m), sendo quantificados nestes agregados os maiores teores de TOC. Assim como afetou os níveis do sinal isotópico, na qual foram verificados os valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$, variando de aproximadamente -13 a -15‰ , independentemente da classe de agregado (Tabela 3; camada de 0–0,10 m).

O sistema de NT+B proporcionou o aumento dos teores de TOC nos seus agregados em relação aos agregados das áreas de NT e NF: nos biogênicos o aumento foi de 17,9 e 38,2%, respectivamente; e nos fisiogênicos foi de 35,1 e 44,4%, respectivamente (Tabela 3;

camada de 0–0,05 m). Nos agregados dessas três áreas, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ oscilaram de –19 a –22‰ (Tabela 3; camada de 0–0,10 m).

Tabela 3. Carbono orgânico total (TOC) e abundância isotópica de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil.

----- TOC (g kg ⁻¹) -----							
Áreas	0–0,05 m			Áreas	0,05–0,10 m		
	Bio ⁽²⁾	Phy ⁽²⁾	\bar{X}_1		Bio	Phy	\bar{X}_1 ⁽¹⁾
PP	35,15 Aa	31,14 Aa	33,15	PP	24,81	21,14	22,98 A
NT	17,99 Ba	13,77 Cb	15,88	NT	10,54	10,35	10,45 B
NT+B	21,21 Ba	18,60 Ba	19,91	NT+B	13,51	13,09	13,30 B
NF	15,35 Ba	12,88 Ca	14,12	NF	12,07	11,21	11,64 B
\bar{X}_2	22,45	19,10		\bar{X}_2 ⁽¹⁾	15,23 a	13,95 a	
----- $\delta^{13}\text{C}$ (‰) -----							
Áreas	0–0,05 m			Áreas	0,05–0,10 m		
	Bio	Phy	\bar{X}_1 ⁽¹⁾		Bio ⁽²⁾	Phy ⁽²⁾	\bar{X}_1
PP	–13,82	–13,31	–13,57 A	PP	–15,53 Aa	–15,90 Aa	–15,72
NT	–20,56	–20,38	–20,47 B	NT	–22,86 Ba	–22,49 Da	–22,68
NT+B	–20,35	–19,58	–19,97 B	NT+B	–22,80 Ba	–22,06 Ca	–22,43
NF	–22,63	–20,95	–21,79 C	NF	–22,29 Ba	–21,06 Ba	–21,68
\bar{X}_2 ⁽¹⁾	–19,34 b	–18,56 a		\bar{X}_2	–20,87	–20,38	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não indicam diferenças entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado. Mesma letra minúscula na linha não indica diferenças entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; \bar{X}_1 : Média geral da área; \bar{X}_2 : Média geral do agregado; ⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; e ⁽²⁾Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher.

Em relação as vias de formação, a biogênica manifestou seu potencial de manutenção e acúmulo da MOS, bem como afetou a origem do carbono armazenado nos agregados da camada superficial do solo. Nos agregados de origem biogênica das áreas de NT, NF, NT+B e PP os teores de TOC foram 30,6; 19,2; 14,0; e 12,9% maiores em comparação aos agregados de origem fisiogênica (Tabela 3; camada de 0–0,05 m). Vale destacar que nos agregados biogênicos os valores médios gerais de $\delta^{13}\text{C}$ foram mais negativos quando comparados aos fisiogênicos (Tabela 3; camada de 0–0,05 m).

3.5.3. Influência dos sistemas de manejo e agregação na proteção da MOS

Os resultados da análise da matéria orgânica particulada (fração granulométrica) e fração leve livre da MOS (fração densimétrica) são apresentadas nas Figuras 3 e 4, respectivamente. Nas Tabelas 4 e 5 estão dispostos os resultados de carbono orgânico das frações físicas da MOS. Importante destacar que a disparidade entre os resultados muitas vezes encontrados na literatura enfatiza a necessidade de se considerar a importância de múltiplos fatores influenciadores nos mecanismos de estabilização da MOS.

As áreas manejadas sob pastagem e produção de grãos influenciaram no aumento dos teores de carbono orgânico particulado (POC): tanto nos agregados biogênicos da área de PP (Tabela 4; camada de 0–0,05 m) como na média geral entre as áreas (Tabela 4; camada de 0,05–0,10 m) foram quantificados os maiores teores de carbono, bem como nos agregados biogênicos das áreas de NT e NT+B (Tabela 4; camada de 0–0,05 m). A área de PP também elevou os teores de carbono na fração mais recalcitrante da MOS (carbono orgânico associado

aos minerais, MAOC), refletindo nas maiores médias gerais entre as áreas, 21,60 e 18,90 g kg⁻¹ (Tabela 4; camadas de 0–0,05 e 0,05–0,10 m, respectivamente).

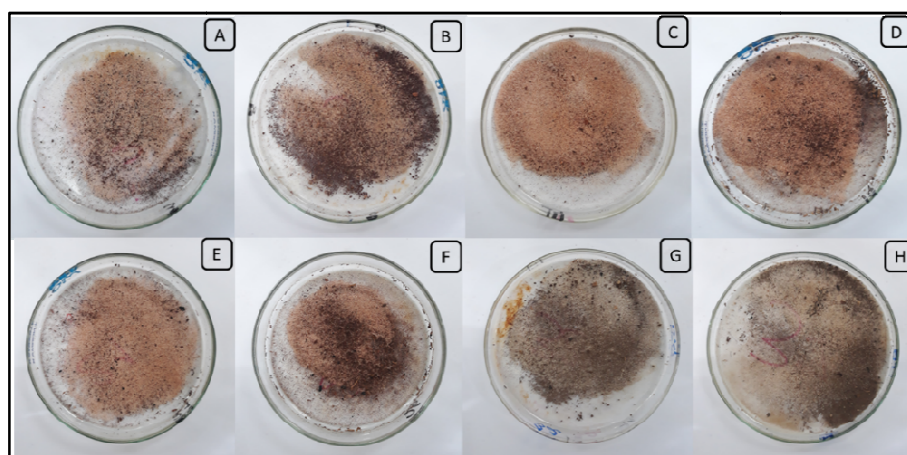


Figura 3. Placas de Petri com a fração mineral areia + matéria orgânica particulada de agregados biogênicos (Bio) e Fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil. (A) Phy da pastagem permanente; (B) Bio da pastagem permanente; (C) Phy do sistema plantio direto; (D) Bio do sistema plantio direto; (E) Phy do sistema plantio direto + *Urochloa*; (F) Bio do sistema plantio direto + *Urochloa*; (G) Phy da vegetação do bioma Mata Atlântica; e (H) Bio da vegetação do bioma Mata Atlântica.

Tabela 4. Carbono orgânico particulado (POC) e associado aos minerais (MAOC) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil.

----- POC (g kg ⁻¹) -----							
Áreas	Bio ⁽³⁾	0–0,05 Phy ⁽³⁾	\bar{X}_1	Áreas	Bio	0,05–0,10 Phy	\bar{X}_1 ⁽²⁾
PP	13,38 Aa	9,70 Aa	11,54	PP	5,20	2,95	4,08 A
NT	12,24 Aa	9,20 Ab	10,72	NT	1,36	1,42	1,39 B
NT+B	14,06 Aa	9,02 Ab	11,54	NT+B	2,00	1,43	1,72 B
NF	8,98 Ba	8,73 Aa	8,86	NF	2,37	1,39	1,88 B
\bar{X}_2	12,17	9,16		\bar{X}_2 ⁽²⁾	2,73 a	1,80 b	
----- MAOC (g kg ⁻¹) -----							
Áreas	Bio	0–0,05 Phy	\bar{X}_1 ⁽¹⁾	Áreas	Bio	0,05–0,10 Phy	\bar{X}_1 ⁽²⁾
PP	21,77	21,44	21,60 A	PP	19,61	18,19	18,90 A
NT	5,75	4,57	5,16 B	NT	9,18	8,93	9,05 B
NT+B	7,15	9,58	8,36 B	NT+B	11,51	11,66	11,58 B
NF	6,36	4,15	5,25 B	NF	9,90	9,82	9,76 B
\bar{X}_2 ⁽¹⁾	10,25 a	9,93 a		\bar{X}_2 ⁽²⁾	12,50 a	12,15 a	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não indica diferença entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado. Mesma letra minúscula na linha não indica diferença entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; \bar{X}_1 : Média geral da área; \bar{X}_2 : Média geral do agregado; ⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados; e ⁽³⁾Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher.

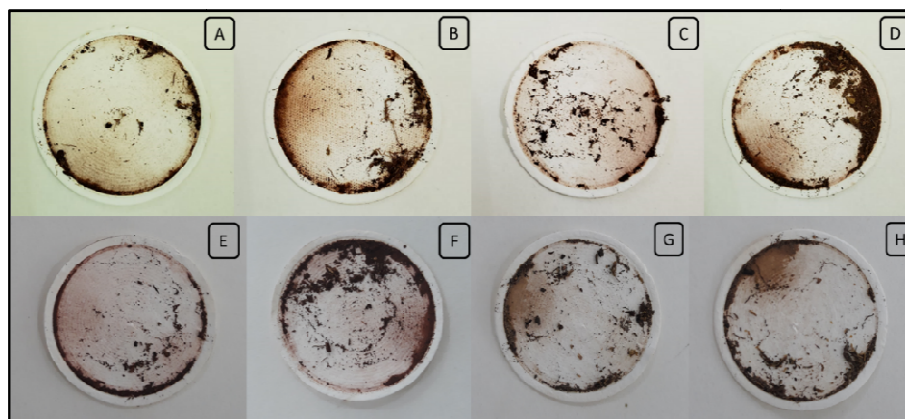


Figura 4. Filtro de fibra de vidro com a fração leve livre da MOS de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil. (A) Phy da pastagem permanente; (B) Bio da pastagem permanente; (C) Phy do sistema plantio direto; (D) Bio do sistema plantio direto; (E) Phy do sistema plantio direto + *Urochloa*; (F) Bio do sistema plantio direto + *Urochloa*; (G) Phy da vegetação do bioma Mata Atlântica; e (H) Bio da vegetação do bioma Mata Atlântica.

Tabela 5. Carbono orgânico das frações leve livre (FLFC) e leve intra-agregado (ILFC) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil.

FLFC (g kg ⁻¹)							
Áreas	0–0,05			Áreas	0,05–0,10		
	Bio ⁽²⁾	Phy ⁽²⁾	\bar{X}_1		Bio	Phy	$\bar{X}_1^{(1)}$
PP	1,20 Ba	0,85 Aa	1,02	PP	0,98	0,98	0,98 A
NT	4,55 Aa	1,34 Ab	2,94	NT	0,68	0,73	0,70 A
NT+B	3,02 Aa	1,63 Ab	2,32	NT+B	0,96	0,86	0,91 A
NF	1,38 Ba	1,43 Aa	1,40	NF	0,92	1,01	0,96 A
\bar{X}_2	2,53	1,31		$\bar{X}_2^{(1)}$	0,88 a	0,89 a	
ILFC (g kg ⁻¹)							
Áreas	0–0,05			Áreas	0,05–0,10		
	Bio	Phy	$\bar{X}_1^{(1)}$		Bio	Phy	$\bar{X}_1^{(2)}$
PP	0,49	0,45	0,47 A	PP	0,43	0,37	0,40 A
NT	0,52	0,33	0,42 A	NT	0,35	0,38	0,36 A
NT+B	0,50	0,38	0,44 A	NT+B	0,44	0,50	0,47 A
NF	0,50	0,46	0,48 A	NF	0,38	0,37	0,37 A
$\bar{X}_2^{(1)}$	0,50 a	0,40 b		$\bar{X}_2^{(2)}$	0,40 a	0,40 a	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não indica diferença entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado. Mesma letra minúscula na linha não indica diferença entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; \bar{X}_1 : Média geral da área; \bar{X}_2 : Média geral do agregado; ⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; e ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados.

As áreas de produção de grãos (NT e NT+B) também influenciaram no aumento expressivo dos teores de carbono orgânico da fração leve livre (FLFC) nos agregados da via biogênica em comparação à mesma classe de agregado da área de pastagem, e principalmente da área de referência (Tabela 5; camada de 0–0,05 m); a superioridade foi de 118,8 e 151,7% em NT+B, e 229,7 e 279,2% em NT.

Do ponto de vista de proteção da MOS, a via biogênica demonstrou sua capacidade de preservação e acúmulo das frações mais lábeis. Nos agregados biogênicos dos sistemas de NT e NT+B quantificaram-se os teores mais elevados de POC e FLFC quando comparados aos fisiogênicos (Tabelas 4 e 5; camada de 0–0,05 m): o aumento foi de 33,0 e 55,9% para POC e 85,3 e 239,5% para FLFC. Padrão que se repete na média geral dos agregados biogênicos em comparação aos fisiogênicos para POC (Tabela 4; camada de 0,05–0,10 m) e carbono orgânico da fração leve intra-agregado (Tabela 5; camada de 0–0,05 m). Não foi verificada influência da agregação biogênica nos teores de carbono da fração mais recalcitrante da MOS (MAOC) (Tabela 4; camada de 0–0,10 m).

3.5.4. Dissimilaridade entre as áreas manejadas e a área de referência

As análises de componentes principais (ACP) apresentaram variância acumulada para as componentes principais (PC) 1 e 2 de ± 82 e 78% (camadas de 0–0,05 e 0,05–0,10 m, respectivamente). Analisando a Figura 5, foi observada a formação de três grupos distintos: (1) grupo formado pelos agregados (biogênicos e fisiogênicos) da área de PP; (2) grupo formado pelos agregados biogênicos das áreas de NT e NT+B; e (3) grupo formado pelos agregados fisiogênicos das áreas de NT, NT+B e NF. Na Figura 6, apenas dois grupos foram formados, não sendo verificada clara separação entre as classes de agregados nas áreas de PP (1º grupo); e NT, NT+B e NF (2º grupo).

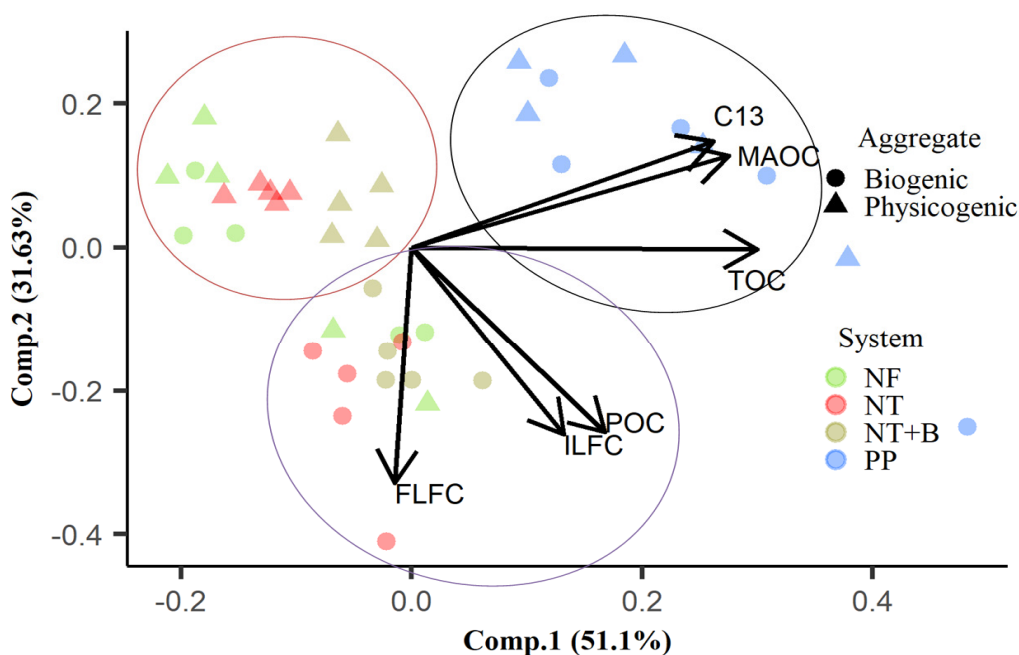


Figura 5. Análise de componentes principais integrando o conteúdo de carbono orgânico total e as frações físicas da MOS de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do Brasil na camada de 0-0,05 m. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; TOC: Carbono orgânico total; C13: Abundância natural de ^{13}C ; POC: Carbono orgânico particulado; MAOC: Carbono orgânico associado aos minerais; FLFC: Carbono da fração leve livre; e ILFC: Carbono da fração leve intra-agregado.

Em ambas as ACPs, a área de PP foi separada das áreas de NT, NT+B e NF ao longo da PC1 (eixo principal) com ± 51 e 56% ; tendo como variáveis discriminantes (coeficiente de correlação $\geq 0,50$) ^{13}C (0,50), TOC (0,57 e 0,53) e MAOC (0,52 e 0,50) (Figuras 5 e 6, respectivamente). Na camada de 0–0,05 m, a PC2 com 31,63% (eixo de menor relevância), separou principalmente os agregados biogênicos dos fisiogênicos nas áreas de NT e NT+B; as variáveis POC (–0,50), FLFC (–0,62) e ILFC (–0,50) apresentaram correlação média e negativa ($\leq -0,50$) com a PC-2, estando diretamente associadas à agregação biogênica (Figura 5). A ACP mostrou que a dinâmica de agregação e da MOS em solos de textura arenosa esteve mais relacionada aos sistemas de produção agrícola do que à área de vegetação do bioma.

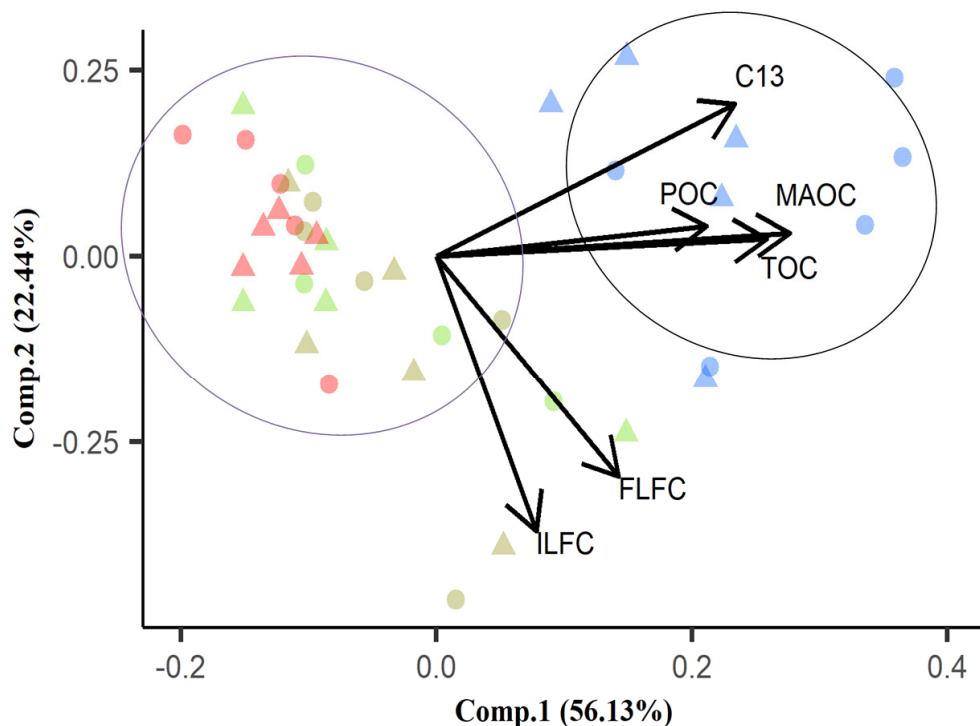


Figura 6. Análise de componentes principais integrando o conteúdo de carbono orgânico total e as frações físicas da MOS de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo em região subtropical do na camada de 0,05-0,10 m. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; TOC: Carbono orgânico total; C13: Abundância natural de ^{13}C ; POC: Carbono orgânico particulado; MAOC: Carbono orgânico associado aos minerais; FLFC: Carbono da fração leve livre; e ILFC: Carbono da fração leve intra-agregado.

3.6. DISCUSSÃO

Estudos envolvendo diferentes sistemas de manejo e métodos de avaliação baseados na identificação através da análise morfológica de agregados são escassos na literatura. Na Bélgica, Moncada et al. (2014) verificaram relações promissoras entre métodos visuais (avaliações visuais do solo, estrutura e tipo de agregado) e propriedades do solo (físicas e hidráulicas); enfatizando a possibilidade do emprego da avaliação edáfica por meio de características morfológicas à critério de prevenção. O padrão dos dados de proporção de agregados biogênicos observados no estudo para a área de PP (Figura 2; camada de 0–0,05 m), assemelha-se ao verificado por outros autores (PULLEMAN et al., 2005; LOSS et al., 2014; SUÁREZ et al., 2019; PINTO et al., 2021b); e pode estar relacionado com a função do sistema radicular das gramíneas, em especial das forrageiras.

Na formação inicial de macroagregados as raízes atuam na aproximação e aprisionamento das partículas minerais e microagregados do solo por meio de processos mecânicos e produção de exsudatos radiculares (substâncias orgânicas de baixo peso molecular e alta energia), que funcionam como agentes ligantes estimulando também a atividade microbiana (SIX et al., 2002). No Norte do Brasil, Velasquez et al. (2012) constataram em áreas experimentais de pastagem que a presença de *Urochloa brizantha* favoreceu a formação de agregados biogênicos formados pelas raízes elevando a proporção em comparação às áreas sem a braquiária.

As gramíneas forrageiras, sobretudo as braquiárias, promovem maior adição de carbono ao solo *via* renovação do sistema radicular, propiciando melhores condições à fauna edáfica e a formação de agregados de origem biogênica (LOSS et al., 2014; MERGEN JUNIOR et al., 2019; PINTO et al., 2021b). Esse efeito favorece a atividade dos invertebrados do solo (os *engenheiros do ecossistema* – minhocas, cupins, formigas, e outros macroorganismos) que constroem bioestruturas (galerias, canais ou câmaras) via bioturbação e produzem pelotas fecais (coprólitos) que podem se tornar macroagregados altamente estáveis; e compreender uma grande proporção de agregados biogênicos ao solo, principalmente em horizontes superficiais (ZANGERLÉ et al., 2011; LAVELLE et al., 2020; PEREIRA et al., 2021). Segundo Velásquez e Lavelle (2019), a presença de agregados biogênicos, bem como invertebrados e raízes demonstra alta atividade biológica, o que indica provavelmente uma elevada qualidade nos processos do solo e uma regulação biológica ideal no funcionamento do mesmo.

O padrão verificado na área de PP (73% de agregados biogênicos) não foi constatado na área de NT+B no estudo entre as classes de agregados (Figura 2; camada de 0–0,05 m). Tal fato pode estar associado ao tempo de adoção do consórcio milho-braquiária (inverno), visto que a gramínea forrageira (*Urochloa ruziziensis*) foi introduzida há aproximadamente seis anos na área. Na mesma região do estudo, Rosset et al. (2019) identificaram que o consórcio milho-braquiária com quatro anos de instalação foi eficiente na melhoria da agregação do solo sob Latossolo Vermelho (*Ferritic Ferralsol*). Para os autores, os dados evidenciam o aumento da qualidade estrutural do solo pela ação do sistema radicular mais abundante e agressivo da braquiária em consórcio com o milho. O consórcio milho-braquiária é uma prática agrícola que pode ser adotada em diferentes sistemas de produção para minimizar os problemas relacionados ao solo, através da sua cobertura com plantas; melhorar sua capacidade produtiva; e proporcionar o estabelecimento de novos pastos (CECCON, 2013). Justificando também os valores semelhantes de proporção de agregados biogênicos do sistema de NT+B em relação à área não antropizada (NF) (Figura 2; camada de 0–0,05 m).

O pool de carbono no solo representa uma grande e importante parte da estrutura do reservatório total de carbono em ambiente terrestre, desempenhando papel fundamental no

ciclo global do carbono (PAUL et al., 2008; CHENG et al., 2015). Esse pool é mais importante para solos de textura arenosa devido à sua natureza estrutural frágil e dificuldade em aumentar as concentrações de MOS (REICHERT et al., 2016). Nesses solos a MOS é um dos agentes cimentantes mais importantes na formação e estabilização dos agregados (BRONICK e LAL, 2005; ŠIMANSKÝ et al., 2019). Quanto aos resultados de TOC nos agregados da área de PP (Tabela 3; camada 0–0,10 m), estes são decorrentes da interação de fatores intrínsecos e extrínsecos à área, como baixos níveis de perturbação do solo; manutenção da biomassa radicular durante todo o ano, devolvendo uma grande porcentagem de resíduos orgânicos; defecação regular do gado (LAL et al., 2003); e textura do solo menos arenosa (Tabela 2; camada de 0–0,10 m).

O manejo adequado do gado na pastagem pode favorecer o aumento nos teores de carbono no solo via adição constante de esterco, como verificado por Moncada et al. (2014). Entretanto, os mesmos autores também constataram que esse aumento foi mais significativo na área de pastagem sob solo de textura francossiltosa em comparação à francoarenosa (27,8 e 13,4 g kg⁻¹, respectivamente). No estudo, a área de PP apresenta diferença textural (francoarenosa) em comparação às áreas de NT e NT+B (areia franca) (Tabela 2; camada de 0–0,10 m). Os maiores teores de argila verificados nesta área podem estar colaborando para a maior conservação da MOS possivelmente por meio de associações entre a matéria orgânica transformada e as partículas minerais, formando complexos organo-minerais (SIX et al., 2004). Esse mecanismo de estabilização química da MOS pode ser facilitado pela formação dos agregados, possibilitando a proteção e o acúmulo em seu interior de TOC e suas frações mais estáveis.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ identificados nos agregados da área de PP (Tabela 3; camada de 0–0,10 m) indicam predominância de carbono originado de plantas de ciclo fotossintético C₄ (–6 a –19‰; SMITH e EPSTEIN, 1971). Esse padrão é resultante de espécies vegetais que fixam CO₂ através da enzima PEPcase. Loss et al. (2014) observaram valores de $\delta^{13}\text{C}$ sob área de pastagem oscilando de aproximadamente –16 a –17‰ para agregados biogênicos; e –16 a –18‰ para fisiogênicos. Os níveis de $\delta^{13}\text{C}$ verificados nos agregados da área de PP no estudo estão menos negativos que os observados por Loss et al. (2014) na mesma região do estudo. Tal fato pode estar relacionado à espécie de gramínea utilizada para compor o sistema de pastagem; neste estudo, a área de PP está estabelecida com *Cynodon dactylon* há aproximadamente 45 anos, e na área em que foi desenvolvido o trabalho de Loss et al. (2014) com *Axonopus compressus* em torno de 30 anos.

Além de elevar os teores de carbono nos agregados, a área de PP também afetou os níveis de $\delta^{13}\text{C}$. A combinação entre os maiores teores de TOC e os valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ sugere uma possível relação direta entre esses dois indicadores no sistema de pastagem (ou seja, a mistura do material no solo: C3 original, C4 novo mais resistente e maior quantidade de carbono), como também verificado nos dados da análise de componentes principais (ACP) (Figuras 5 e 6).

Para os resultados de TOC nos agregados da área de NT+B em comparação às áreas de NT e NF (Tabela 3; camada 0–0,05 m), padrão distinto foi verificado por Rosset et al. (2019). Os autores identificaram que após quatro anos de consórcio milho-braquiária os teores de TOC não foram significativamente maiores aos quantificados nas áreas de sistema de NT com diferentes tempos de instalação na sucessão soja (verão) e milho (inverno); sugerindo ser necessário um maior tempo de adoção para que fossem observadas alterações significativas. No presente estudo, o consórcio milho-braquiária avaliado apresenta em torno de seis anos, estando instalado sob solo com menos argila quando comparado à área de PP (Tabela 2; camada de 0–0,10 m). Esses fatores podem ter influenciado nos valores mais elevados de TOC observados nos agregados desse sistema (estatisticamente e proporcionalmente) em

relação às áreas de referência e milho sem a braquiária (NF e NT, respectivamente). O uso de gramíneas, especialmente de braquiárias, tem sido um fator chave para a viabilidade dos sistemas de produção de grãos e fibras, e para a sustentabilidade da agropecuária em solos de textura arenosa (DONAGEMMA et al., 2016).

Os níveis de $\delta^{13}\text{C}$ identificados nos agregados das áreas de NT, NT+B e NF (Tabela 3; camada de 0–0,10 m) caracterizam plantas de ciclo C_3 em superfície (–24 a –34‰; SMITH e EPSTEIN, 1971). Os resultados assemelham-se aos verificados por Assunção et al. (2019) em amostras de terra de áreas de floresta nativa (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual Aluvial), sistema de NT (sucessão soja/milho) e manejo convencional (sucessão aveia/feijão) sob Latossolo Vermelho (*Ferritic Ferralsol*) na mesma região subtropical (aproximadamente –26‰). Os autores justificaram seus dados à diversidade de espécies vegetais nessas áreas, mudando o sinal isotópico das plantas de ciclo fotossintético C_4 para o sinal das plantas C_3 , com o empobrecimento do isótopo estável ^{13}C .

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ nos agregados das áreas de NT e NT+B (Tabela 3; camada de 0–0,10 m) apontam pouca contribuição do carbono das gramíneas (milho e braquiária) com maior conservação do carbono original da área de NF. Ressalata-se que os níveis de $\delta^{13}\text{C}$ nos agregados da área de NF (aproximadamente –22‰) estão menos negativos quando comparados aos comumente encontrados em ambientes florestais brasileiros (–27‰). Possivelmente por contaminação com gramíneas nativas (internamente) e/ou resíduos de gramíneas oriundos da área de PP posicionada um pouco mais acima da área de NF no relevo.

Quanto aos resultados de TOC entre as classes de agregados, o padrão verificado no estudo reforça a hipótese de que sistemas conservacionistas tendem a aumentar a estabilização do carbono devido à maior formação e manutenção de agregados biogênicos (BRUSSAARD et al., 2007; SUÁREZ et al., 2019). Esse padrão é confirmado pelos maiores valores desse atributo nos agregados biogênicos das áreas de NT (estatisticamente), e NF, NT+B e PP (proporcionalmente) em comparação aos fisiogênicos (Tabela 3; camada de 0–0,05 m). Os dados verificados no estudo corroboram aos encontrados por outros autores (PULLEMAN et al., 2005; BATISTA et al., 2013; LOSS et al., 2014; 2017). Os agregados de origem biológica contribuem mais efetivamente na proteção da MOS, reduzindo suas taxas de decomposição e elevando o potencial de sequestro de carbono pelo solo, como relatado por Silva Neto et al. (2010).

Nos agregados biogênicos dos sistemas agroflorestais, Suárez et al. (2019) constataram maiores teores de carbono em comparação aos agregados das demais áreas; os autores relacionaram esses resultados à presença de árvores e serrapilheira, favorecendo a atividade da macrofauna. Elevados teores de carbono nos agregados biogênicos também foram verificados por Pinto et al. (2021a) em áreas de sistema de manejo conservacionista em relação ao convencional; os autores enfatizaram com seus resultados à importância da agregação biogênica na preservação do carbono em áreas agricultáveis submetidas a diferentes sistemas de manejo. Resultados similares foram observados por Melo et al. (2019) e Ferreira et al. (2020) na mesma região do estudo. Segundo Melo et al. (2019), quanto maior a entrada de carbono mais intensa será a formação dos agregados biogênicos; e para Ferreira et al. (2020), os agregados biogênicos além de indicarem maior atividade biológica também favorecem a manutenção e o acúmulo de carbono no solo.

A respeito dos valores mais negativos de $\delta^{13}\text{C}$ identificados nos agregados de origem biogênica (Tabela 3; camada de 0–0,05 m), outros autores também verificaram padrão semelhante. Pinto et al. (2021b) em áreas de sistema de NT com idades de 6 e 18 anos tendo como plantas de coberturas braquiária e crotalária (*Crotalaria spectabilis*), respectivamente; e Loss et al. (2014) em áreas de sistema de NT e floresta secundária. Entretanto, Loss et al. (2017) não verificaram diferenças no sinal isotópico de ^{13}C entre as vias de formação dos

agregados. Correlações lineares entre $\delta^{13}\text{C}$ e acúmulo de carbono aportado em monocultivo de milho ou milho rotacionado com soja ou trigo (*Triticum aestivum* L.) foram verificadas por Qiao et al. (2015). Os níveis mais negativos de $\delta^{13}\text{C}$ nos agregados biogênicos indicam maior conservação do carbono original, rápida decomposição do material novo ou maior humificação nos agregados fisiogênicos.

Pastagens permanentes, cultivadas ou melhoradas podem fornecer uma deposição contínua de resíduos orgânicos (via resíduos vegetais) e biomassa de raízes (via rizodeposição), favorecendo as entradas das frações mais lábeis de carbono e estimulando a atividade microbiana e ciclagem de nutrientes (GERAEI et al., 2016). Justificando os resultados de POC nos agregados biogênicos (Tabela 4; camada de 0–0,05 m) e na média geral dos agregados na área de PP (Tabela 4; camada de 0,05–0,10 m). Por estas razões, frações da MOS como POC e carbono oxidável por permanganato, por exemplo, são indicadores mais sensíveis na avaliação dos efeitos do manejo de pastagens sobre a dinâmica do material orgânico (WEBSTER et al., 2019). A área de PP também influenciou no aumento dos teores de MAOC como verificado nos valores das médias gerais dos agregados entre as áreas (Tabela 4; camada de 0–0,10 m). Vale ressaltar que as variáveis MAOC, TOC e ^{13}C foram as que mais contribuíram para a discriminação das áreas na camada de 0–0,10 m na avaliação da ACP (Figuras 5 e 6). Reforçando a hipótese da existência de uma possível relação direta entre esses indicadores no sistema de pastagem; que pode estar associada aos mecanismos de estabilização e acúmulo de MOS a partir de um material orgânico enriquecido com o isótopo estável ^{13}C .

No estudo, destaque especial para as práticas realizadas nos sistemas de produção de grãos (NT e NT+B), como i) rotação, sucessão e consorciação de espécies vegetais (soja/milho e milho-braquiária/soja); ii) menor revolvimento da camada arável; iii) maior aporte, retenção e manutenção da biomassa à superfície do solo; e iv) qualidade e frequência desses resíduos orgânicos aportados. Essas ações realizadas em conjunto proporcionaram condições microclimáticas ideais aos agentes biológicos do solo (macrofauna e raízes) que enriqueceram os agregados biogênicos principalmente com as frações da MOS de maior labilidade, como POC e FLFC (Tabelas 4 e 5; camada de 0–0,05 m). Esse enriquecimento pode ter origem i) do material orgânico proveniente de raízes finas e grossas mortas e exsudatos radiculares de atividades rizosféricas; ii) de detritos orgânicos de origem radicular ocasionalmente ingeridos por invertebrados (p. ex., minhocas) e inclusos em seus coprólitos; e/ou iii) do material orgânico derivado de serrapilheira transformado por processos de cominuição e compostagem natural, e progressivamente incorporado ao solo por processos de digestão e bioturbação associados às atividades de alimentação de macroinvertebrados e perda de matéria orgânica dissolvida (LAVELLE et al., 2020).

A diversidade e arranjo espaço-temporal das espécies vegetais (ou seja, espaço – consórcios; e tempo – rotação de culturas) em sistemas de produção agrícola (p. ex., sistema plantio direto, integrações lavoura-pecuária ou lavoura-pecuária-floresta) pode promover uma série de benefícios ao ambiente edáfico, destaque para o aumento da diversidade de fungos micorrízicos arbusculares e grupos da macrofauna invertebrada do solo (VILELA et al., 2011); e a elevação da relação carbono/nitrogênio (C/N) do material orgânico no solo (acima de 25/1), com propósito de que a relação fique fora da taxa C/N requerida pelos microrganismos decompositores edáficos (30/1), que sob condições igualmente ideais de umidade, temperatura e aeração, aceleram a decomposição da MOS, resultando na rápida transformação do material orgânico do solo em CO_2 , consequentemente refletindo em baixo potencial de sequestro de carbono e menor formação e estabilização de agregados (DENARDIN et al., 2012).

A rotação de culturas é uma prática recomendada que deve ser conduzida em sistema plantio direto com plantas de cobertura de alta produção de biomassa, consorciadas com o milho, conforme relatado por Silva et al. (2020). A menor mobilização da camada arável preserva os agregados, diminuindo a exposição da MOS aos processos microbianos e reações enzimáticas (LAL et al., 2003). A dinâmica dos resíduos culturais sobre a superfície do solo no sistema plantio direto (deposição, acúmulo, preservação e transformação) está intimamente ligada aos fatores bióticos (p. ex., entradas de MOS e atividade dos organismos edáficos) e abióticos (p. ex., fracionamento e distribuição uniforme da palhada, água, temperatura, textura do solo, e interações organo-minerais). O manejo da palhada sob sistema plantio direto está relacionado basicamente a duas práticas do sistema: química, realizada com herbicidas ou dessecantes; e mecânica, onde se utiliza máquinas e implementos de cultivos para triturar e lançar o material orgânico sobre a superfície do solo. Tais fatores em associação aos agentes biológicos do solo favoreceram o expressivo enriquecimento dos agregados biogênicos com o FLFC (Tabela 5; camada de 0–0,05 m).

Sistemas de manejo que preconizam a recuperação ou sustentabilidade ambiental, bem como os agregados biogênicos provenientes desses ambientes podem proporcionar maior proteção das frações mais lábeis da MOS em seu interior após o encapsulamento do material orgânico. Os dados de POC, FLFC e ILFC nos agregados biogênicos em comparação aos fisiogênicos (Tabelas 4 e 5; camada de 0–0,05 m) evidenciam o predomínio de material orgânico de maior labilidade (maior biodisponibilidade), sendo que a incorporação e manutenção desse material é favorecida em agregados biogênicos em virtude da fauna do solo e do sistema radicular das plantas, principalmente sob sistema plantio direto (LOSS et al., 2014; MERGEN JUNIOR et al., 2019; PINTO et al., 2021a). Outros autores observaram resultados semelhantes avaliando os mesmos atributos, Pulleman et al. (2005) e Loss et al. (2014) com POC; e Pinto et al. (2021a) com POC e FLFC. No estudo da ACP, as variáveis POC, FLFC e ILFC foram as que mais contribuíram para a separação dos agregados biogênicos e fisiogênicos na camada de 0–0,05 m (Figura 5); corroborando aos resultados dos testes estatísticos univariados aplicados.

Em termos de labilidade e proteção, a fração leve livre da MOS (ou FLFC) (Figura 4 e Tabela 5) é considerada mais lábil e menos protegida em comparação a matéria orgânica particulada (ou POC) (Figura 3 e Tabela 4) e a fração leve intra-agregado da MOS (ou ILFC) (Tabela 5). O POC é uma fração significativa da MOS, que corresponde a todo material orgânico que possui tamanho de partícula de 53-2000 μm (LEUTHOLD et al., 2024). Segundo Lavallee et al. (2019), o POC é mais prontamente disponível, porém sua utilidade ou qualidade para decompositores pode variar em função de sua composição química e nutricional que geralmente segue a qualidade dos insumos das plantas. Já o FLFC possui composição compatível àquele de materiais vegetais com alto grau de labilidade cuja estabilização está diretamente relacionada ao tempo de deposição ou recalctrância intrínseca da molécula orgânica. Ao contrário do ILFC, que compreende um diverso conjunto de compostos orgânicos com grau de decomposição mais avançado e estabilidade proveniente da recalctrância da biomolécula e, principalmente, da proteção física decorrente da sua oclusão no interior dos agregados, como descrito por Conceição et al. (2008).

Sugere-se então que as frações lábeis da MOS são indicadores mais sensíveis e eficientes associados à agregação do solo; e que tais frações são importantes para a manutenção e regulação de diversos processos no solo. Por exemplo, elevados teores de POC em agregados biogênicos podem favorecer a formação de agregados menores (microagregados) e como consequência promover a estabilização do carbono recentemente incorporado (PULLEMAN e MARINISSEN, 2004; SIX et al., 2004; LOSS et al., 2014); ou uma vez fisicamente protegida após o encapsulamento em agregados maiores, as frações

lábéis da MOS também podem eventualmente se tornar substrato para a microfauna do solo. Os resultados de POC, MAOC, FLFC e ILFC verificados no estudo (Tabela 4 e 5) ressaltam que os teores de carbono nessas frações são oriundos das interações entre *i*) os mecanismos de estabilização da MOS (p. ex. recalcitrância molecular, oclusão dentro de agregados e adsorção em minerais); *ii*) as diferentes formas de uso e manejo do solo (p. ex. ambiente não antropizados e sistemas agroalimentares); e *iii*) os processos químicos, físicos e biológicos do solo responsáveis pela formação dos diferentes tipos de agregados.

O estudo evidencia a importância da avaliação da origem dos agregados, bem como da compartimentalização da MOS na mensuração da qualidade edáfica de ambientes antropizados, especialmente quando instalados sob solos de natureza mais frágeis. Uma vez que a degradação destes solos é desencadeada quando a resistência do sistema ao distúrbio antrópico é ultrapassada (REICHERT et al., 2016). Tornando necessário e imprescindível o seu monitoramento por meio de indicadores edáficos mais práticos, simples, eficientes e de baixo custo.

3.7. CONCLUSÕES

A vegetação de gramínea forrageira perene (funcionalidade do sistema radicular, aporte de resíduos orgânicos e mistura do material no solo) foi mais eficiente do que a diversidade de espécies vegetais para favorecer a formação de agregados biogênicos na camada superficial do solo. Uma vez que a pastagem apresentou maior proporção destes agregados em relação aos sistemas de produção de grãos e à vegetação do bioma Mata Atlântica (ambientes mais diversos em termos de número de espécies).

Apesar dos menores teores de carbono orgânico total em relação à pastagem, o efeito benéfico da braquiária pode ser observado quando adotado em consórcio com o milho, em sistemas de produção de grãos, na qual a planta permanece menos tempo no sistema. Os sistemas de produção de grãos influenciaram na formação de agregados biogênicos com carbono orgânico de maior labilidade.

Os agregados biogênicos tenderam a favorecer maiores teores de carbono nas frações mais lábeis da matéria orgânica do solo, o que sugere melhoria na qualidade química sendo as diferenças observadas sobretudo na camada mais superficial (0–0,05 m). Os resultados deste estudo podem fornecer informações teóricas importantes para estudos futuros centrados na combinação de diferentes espécies de plantas em áreas de produção de alimentos agrícolas em solos com textura arenosa.

3.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711–728, 2013.
- ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; BERBARA, R. L. L.; GARCÍA, A. C. 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, 2019.
- BATISTA, I.; CORREIA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; MELLO, N. A. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no cerrado, MS. **Semina**, v.33, p.1–10, 2013.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v.124, p.3–22, 2005.
- BRUSSAARD, L.; PULLEMAN, M. M.; OUÉDRAOGO, E.; MANDO, A.; SIX, J. Soil fauna and soil function in the fabric of the food web. **Pedobiologia**, v.50, n.6, p.447–462, 2007.
- BULLOCK, P.; FEDEROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Albrighton, England: Waine Research Publications. 152 p. 1985.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. **Geoderma**, v.56, p.449–457, 1993.
- CECCON, G. Consórcio Milho-Braquiária. Brasília: Embrapa. 2013.
- CHENG, M.; XIANG, Y.; XUE, Z.; AN, S.; DARBOUX, F. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. **Catena**, v.124, p.77–84, 2015.
- CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p.541–549, 2008.
- DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; DENARDIN, N. D.; WIETHÖLTER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo. 2012.
- DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, 2016.
- FAURE, G. D.; MENSING, T. M. **Isotopes: Principles and Applications**. Third ed. John Wiley & Sons, New Jersey. 2005.
- FERREIRA, C. R.; SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; GUEDES, J. N.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil and Tillage Research**, v.198, p.104533, 2020.

- FONTANA, A.; FREITAS, P. L.; DONAGEMMA, K.; SALTON, J. C. Solos arenosos: a nova fronteira agrícola brasileira. **A Granja**, v.853, p.80–81, 2020.
- GERAEI, D. S.; HOJATI, S.; LANDI, A.; CANO, A. F. Total and labile forms of soil organic carbon as affected by land use change in southwestern Iran. **Geoderma**, v.7, p.29–37, 2016.
- HARTEMINK, A. E.; HUTING, J. Sandy soils in Southern and Eastern Africa: extent, properties and management. In: **Proceedings** of the International Conference on the Management of Tropical Sandy Soils, November 2005. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Khon Kaen, Thailand, p.54–59. 2007.
- IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **World Soil Res Rep** No 106 FAO Rome, 203 pp. 2015.
- LAL, R.; FOLLET, R. F.; KIMBLE, J. M. Achieving soil carbon sequestration in the United States. A challenge to policy makers. **Soil Science**, v.168, p.827–845, 2003.
- LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21 st century. **Global Change Biology**. 2019.
- LAVELLE, P.; RODRÍGUEZ, N.; ARGUELLO, O.; BERNAL, J.; BOTERO, C.; CHAPARRO, P.; GOMEZ, Y.; GUTIERREZ, A.; HURTADO, M. D.; LOAIZA, S.; PULLIDO, S. X.; RODRIGUEZ, E.; SANABRIA, C.; VELASQUEZ, E.; FONTE S. J. Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing Orinoco River Basin of Colombia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.185, p.106–117, 2014.
- LAVELLE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; BEDANO, J. C.; BLANCHART, E.; GALINDO, V.; GRIMALDI, M.; JIMENEZ, J. J.; VELASQUEZ, E.; ZANGERLÉ, A. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta Oecologica**, v.105, p.103561, 2020.
- LEUTHOLD, S., LAVALLEE, J. M., HADDIX, M. L., COTRUFO, M. F. Contrasting properties of soil organic matter fractions isolated by different physical separation methodologies. **Geoderma**, v.445, p.116870, 2024.
- LOSS, A.; LOURENZI, C. R.; DOS SANTOS, E.; MERGEN, C. A.; BENEDET, L.; PEREIRA, M. G.; PICCOLO, M. C.; BRUNETTO, G.; LOVATO, P. E.; COMIN, J. J. Carbon, nitrogen and natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in biogenic and physicogenic aggregates in a soil with 10 years of pig manure application. **Soil and Tillage Research**, v.166, p.52–58, 2017.
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. L.; BEUTLER, S. J. Soil fertility, physical and chemical organic matter fractions, natural ^{13}C and ^{15}N abundance in biogenic and physicogenic aggregates in areas under different land use systems. **Soil Research**, v.52, p.685–697, 2014.
- MACHADO, P. L. O. A. **Fracionamento físico do solo por densidade e granulometria para a quantificação de compartimentos da matéria orgânica do solo: um procedimento para a estimativa pormenorizada do sequestro de carbono pelo solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2002.
- MARTINS, L. F. B. N.; TROIAN, D.; ROSSET, J. S.; SOUZA, C. B. S.; FARIAS, P. G. S.; OZORIO, J. M. B.; MARRA, L. M.; CASTILHO, S. C. P. Soil carbon stock in different uses in the southern cone of Mato Grosso do Sul. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.7, p.86–94, 2020.

- MELO, T. R.; PEREIRA, M. G.; BARBOSA, G. M. C.; SILVA NETO, E. C.; ANDRELLO, A. C.; FILHO, J. T. Biogenic aggregation intensifies soil improvement caused by manures. **Soil and Tillage Research**, v.190, p.186–193, 2019.
- MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E.; FERREIRA, G. W.; COMIN, J. J.; LOVATO, P. E.; BRUNETTO, G. Atributos químicos em agregados biogênicos e fisiogênicos de solo submetido à aplicação com dejetos suínos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.14, n.1, p.1–8, 2019.
- MONCADA, P. M.; HELWIG PENNING, L.; TIMM, L. C.; GABRIELS, D.; CORNELIS, W. M. Visual examinations and soil physical and hydraulic properties for assessing soil structural quality of soils with contrasting textures and land uses. **Soil and Tillage Research**, v.140, p.20–28, 2014.
- PAUL, S.; VELDKAMP, E.; FLESSA, H. Soil organic carbon in density fractions of tropical Soil under forest–pasture–secondary forest land use changes. **European Journal of Soil Science**, v.59, p.359–371, 2008.
- PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BATISTA, I.; MELO, T. R.; SILVA NETO, E. C.; PINTO, L. A. S. R. Biogenic and physicogenic aggregates: formation pathways, assessment techniques, and influence on soil properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.45, p.e0210108, 2021.
- PINTO, L. A. S. R.; TORRES, J. L. R.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JÚNIOR, W. F.; LIMA, S. S.; BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G. Aggregates physicogenic and biogenic under different management systems in the Cerrado region, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.45, p.0200114, 2021a.
- PINTO, L. A. S. R.; ZIVIANI, M. Z.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JUNIOR, W. F.; LIMA, S. S.; SILVA, C. F.; TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Soil organic matter of aggregates physicogenic and biogenic in areas under no-tillage system in the Cerrado, Brazil. **Research, Society and Development**, v.10, n.5, p.e39910515012, 2021b.
- PULLEMAN, M. M.; MARINISSEN, J. C. Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. **Geoderma**, v.120, p.273–282, 2004.
- PULLEMAN, M. M.; SIX, J.; MARINISSEN, J. C. Y.; JONGMANS, A. G. Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. **Applied Soil Ecology Amsterdam**, v.29, n.1, p.1–15, 2005.
- QIAO, Y.; MIAO, S.; LI, N.; XU, Y.; HAN, X.; ZHANG, B. Crop species affect soil organic carbon turnover in soil profile and among aggregate sizes in a Mollisol as estimated from natural ¹³C abundance. **Plant and Soil**, v.392, n.1–2, p.163–174, 2015.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL
- REICHERT, J. M.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F.; SUZUKI, L. E. A. S. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandization/desertification processes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.233, p.370–380, 2016.
- ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Organic matter and soil aggregation in agricultural systems with different adoption times. **Semina**, v.40, n.6, p.3443–3460, 2019.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.;

- OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 356p. 2018.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7ª ed. revisada e ampliada, Viçosa. SBCS. 101p. 2015.
- SILVA NETO, L. F.; SILVA, I. F.; INDA, A. V.; NASCIMENTO, P. C.; BORTOLO, L. Atributos físicos e químicos de agregados pedogênicos e de coprólitos de minhocas em diferentes classes de solos da Paraíba. **Ciência & Agrotecnolog**, v.34, p.1365–1371, 2010.
- ŠIMANSKÝ, V.; JURIGA, M.; JONCZAK, J.; UZAROWICZ, Ł.; STEPIEN W. How relationships between soil organic matter parameters and soil structure characteristics are affected by the long-term fertilization of a sandy soil. **Geoderma**, v.342, p.75–84, 2019.
- SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A. History of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v.79, p.7–31, 2004.
- SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; MORALES SA, J. C.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of no-tillage. *Agronomie*, v.22, p.755e775, 2022.
- SMITH, B. N.; EPSTEIN, S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of higher. **Plant Physiol**, v.47, p.380–384, 1971.
- SOHI, S. P.; MAHIEU, N.; ARAH, J. R. M.; POWLSON, D. S.; MADARI, B.; GAUNT, J. L. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. Soil Science Society. **American Journal**, v.65, n.1, p.1121–1128, 2001.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy** 12th ed. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, US Government Printing Office, Washington DC, 360pp. 2014.
- SUÁREZ, L. R.; AUDOR, L. C. U.; SALAZAR, J. C. S. Formation of macroaggregates and organic carbon in cocoa agroforestry systems. **Floresta & Ambiente**, v.26, n.3, p.e20180312, 2019.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa, 573p. 2017.
- VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P. Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil-based ecosystem services in agricultural landscapes. **Acta Oecologica**, v.100, p.103446, 2019.
- VELASQUEZ, E.; FONTE, S. J.; BAROT, S.; GRIMALDI, M.; DESJARDINS, T.; LAVELLE, P. Soil macrofauna-mediated impacts of plant species composition on soil functioning in Amazonian pastures. **Applied Soil Ecology**, v.56, p.43–50, 2012.
- VELASQUEZ, E.; PELOSI, C.; BRUNET, D.; GRIMALD, M.; MARTINS, M.; RENDEIRO, A. C.; BARRIOS, E.; LAVELLE, P. This ped is my ped: visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. **Pedobiologia**, v.51, p.75–87, 2007.
- VILELA, L.; MARTHA JUNIOR, G. B.; MACEDO, M. C. M.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G. A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1127–1138, 2011.

WEBSTER, E.; GAUDIN, A.; PULLEMAN, M.; SILES, P.; FONTE, S. J. Improved pastures support early indicators of soil restoration in low-input agroecosystems of Nicaragua. **Environmental Management**, v.64, n.2, p.201–212, 2019.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p.1467–1476, 1988.

ZANGERLÉ, A.; PANDO, A.; LAVELLE P. Do earthworms and roots cooperate to build soil macroaggregates? A microcosm experiment. **Geoderma**, v.167, p.303–309, 2011.

4. CAPÍTULO II

ESTABILIDADE, CARBONO ORGÂNICO LÁBIL E GLOMALINA DE AGREGADOS BIOGÊNICOS EM SOLOS ARENOSOS SOB SISTEMAS DE MANEJO NA REGIÃO SUBTROPICAL DO BRASIL

PINTO, L. A. S. R.; SILVA, C. F.; MELO, T. R.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G. Stability, labile organic carbon, and glomalin of biogenic aggregates in sandy soils under management systems in the subtropical region of Brazil. **Rev Bras Cienc Solo**, v.46, p.e0220074, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220074>

4.1. RESUMO

Os agregados do solo e sua estabilidade influenciam uma ampla gama de propriedades do solo. Dessa forma este estudo teve como objetivos *i)* verificar se agregação biogênica proporciona maior estabilização de macro e microagregados; e *ii)* avaliar se agregados biogênicos estão associados a maiores teores de carbono orgânico lábil e glomalina. Foram avaliados três sistemas de manejo (pastagem permanente, PP; sistema plantio direto, NT; e sistema plantio direto + *Urochloa*, NT+B) e uma área de referência (vegetação do bioma Mata Atlântica, NF). Os agregados foram separados, identificados e classificados quanto à sua origem ou via de formação em biogênicos (formados por processos biológicos) e fisiogênicos (resultante de ações químicas e físicas). O sistema de PP proporcionou maior estabilização dos macroagregados, independentemente da via de formação, com reflexos nos maiores valores de diâmetro médio ponderado (MWD); também influenciou no grau de estabilidade dos microagregados, aumentando a força de união e reduzindo a dispersão da fração argila; e elevou os teores de carbono orgânico lábil (POXC), glomalina facilmente extraível e total (GRSP-EE e GRSP-T, respectivamente) nas duas vias de formação. O sistema de NT+B favoreceu a estabilização dos macroagregados, principalmente em subsuperfície em comparação à área de NT. Nos agregados das áreas de NT e NT+B foram observados os maiores valores de argila dispersável em água (WDC) e menores valores de argila não dispersável (NDC), padrão inverso ao verificado nos agregados das áreas de PP e NF. Nos agregados biogênicos de todas as áreas foram quantificados os maiores teores de POXC; e a agregação biogênica também aumentou proporcionalmente os valores de MWD, GRSP-EE e GRSP-T em relação à fisiogênica. Os resultados demonstram que sistemas de produção de grãos, pastagem e ambientes não antropizados influenciaram de maneira diferenciada a agregação e as concentrações das frações orgânicas associadas à estabilidade dos agregados.

Palavras-chave: Via de formação dos agregados do solo. Agregados fisiogênicos. Sistema plantio direto.

4.2. ABSTRACT

Soil aggregates and their stability affect a wide range of soil properties. This study aimed to (a) verify whether biogenic aggregation provides higher macro- and microaggregate stabilization, and (b) evaluate whether biogenic aggregates are associated with higher labile organic carbon and glomalin contents. Three management systems were evaluated (permanent pasture, PP; no-tillage system, NT; and no-tillage + *Urochloa* system, NT+B) as well as a reference area (Atlantic Forest biome vegetation, NF). According to their origin or formation pathway, the aggregates were separated, identified, and classified as biogenic (formed by biological processes) and physicogenic (resulting from chemical and physical actions). The PP system provided the greatest stabilization of the macroaggregates, regardless of the formation pathway, as reflected by a greater mean weight diameter (MWD). The PP system also influenced the degree of microaggregate stability by increasing the bond strength and reducing the dispersion of the clay fraction. Finally, the PP system elevated the contents of labile organic carbon (POXC), easily extractable glomalin (GRSP-EE), and total glomalin (GRSP-T) under both formation pathways. The NT+B system favored the stabilization of macroaggregates, especially in the subsurface soil layer, compared with the NT area. In the aggregates of the NT and NT+B areas, the highest values observed were for water-dispersible clay (WDC) and the lowest values observed were for non-dispersible clay (NDC), a pattern opposite to that observed in the aggregates of the PP and NF areas. In the biogenic aggregates of all areas, a high POXC content was quantified, and biogenic aggregation proportionally increased the values of MWD, GRSP-EE, and GRSP-T relative to physicogenic aggregation. The results showed that grain production systems, pasture systems, and non-anthropized environments differentially influenced aggregation and the concentrations of organic fractions associated with aggregate stability.

Key words: Soil aggregate formation pathway. Physicogenic aggregates. No-tillage system.

4.3. INTRODUÇÃO

Nos últimos 20 anos, a pesquisa sobre a proteção do solo tem sido focada em temas frequentemente discutidos, como intensificação dos processos erosivos; degradação estrutural; elementos potencialmente tóxicos; redução da biodiversidade e dos teores de matéria orgânica do solo (MOS). Esses fatores adversos conduzem diretamente a problemas como a degradação do solo, a redução da fertilidade natural, culminando com a diminuição de sua capacidade produtiva (HOLÁTKO et al., 2021). A qualidade do solo foi definida como a capacidade deste funcionar para manter (ou melhorar) a qualidade da água e do ar, e promover a saúde das plantas e animais (DORAN, 2002). A agregação do solo e os teores de MOS são os principais indicadores da qualidade do solo e da sustentabilidade ambiental de formas de uso e práticas de manejo agrícola.

Os agregados e sua estabilidade influenciam uma ampla gama de propriedades do solo, incluindo a estabilização do carbono; porosidade; infiltração da água e aeração; compactação e adensamento; retenção de água; condutividade hidráulica; e capacidade de resistir à erosão (CHENG et al., 2015). Muitos pesquisadores (SIX et al., 2000, 2004; BRONICK e LAL, 2005; BRIEDIS et al., 2012; TIVET et al., 2013; MELO et al., 2019a, 2021; LAVELLE et al., 2020; PEREIRA et al., 2021) consideram a estabilidade dos agregados como um reflexo da estrutura do solo e, conseqüentemente, da qualidade edáfica em geral, pois estes dependem de um equilíbrio integrado entre fatores químicos, físicos e biológicos. No entanto, uma melhor compreensão desse equilíbrio e das interações entre esses fatores pode aprimorar o entendimento sobre a restauração e/ou recuperação dos solos e, desta forma, a sua capacidade de realizar serviços que podem variar desde a produção de alimentos até outros de caráter ecossistêmicos (LAVELLE et al., 2020).

Conceitualmente, os processos de agregação do solo podem ser explicados pela teoria de uma organização hierárquica de diferentes estágios de agregação (TISDALL e OADES, 1982; OADES, 1984), na qual os agregados são formados sequencialmente. Inicialmente, microagregados são formados e, posteriormente, funcionam como a matéria-prima para a formação de macroagregados (SIX et al., 2004). Do ponto de vista de origem ou via de formação, os agregados do solo podem ser classificados em: biogênicos, ou de origem biogênica (formados por processos biológicos, com destaque para a atividade de raízes e da meso e macrofauna); e fisiogênicos, ou de origem fisiogênica (resultante de processos químicos e físicos, como formação de complexos organo-minerais, floculação, ciclos de secagem e umedecimento, entre outros) (PULLEMAN et al., 2005; VELASQUEZ et al., 2007; BATISTA et al., 2013; LOSS et al., 2014).

Alguns estudos avaliaram a existência de uma terceira classe de agregados (os denominados “intermediários”) e sua influência nas propriedades do solo (PULLEMAN et al., 2005; BATISTA et al., 2013; FERREIRA et al., 2020). Porém, para esta classe ainda não foi identificada uma origem ou via de formação específica (PEREIRA et al., 2021), uma vez que comumente engloba aqueles que não puderam ser classificados como biogênicos ou fisiogênicos. Nessas classes de agregados, frequentemente são realizadas análises físicas, químicas e biológicas com o propósito de compreender a contribuição das vias de agregação sobre as propriedades do solo. Além de compilar estudos que relataram a melhoria dos atributos do solo em razão da agregação biogênica, Pereira et al. (2021) também sugeriram o uso de outros métodos (ou indicadores) que podem ser aplicados para a avaliação da estrutura e/ou dos agregados do solo.

A estabilidade dos macroagregados é comumente determinada por peneiramento úmido com base nos primeiros trabalhos de Yoder (1936), Kemper e Koch (1966) e Kemper e Rosenau (1986), representada pelo diâmetro médio ponderado (MWD). A estabilidade dos microagregados é geralmente avaliada por métodos mais tradicionais como a análise mecânica de argila dispersável em água (RENGASAMY, 2002). Recentemente, Melo et al. (2019a) propuseram um método que permite a quantificação de três classes de argila no solo (classificadas de acordo com seu comportamento estrutural). A partir da análise, obtêm-se as classes: argila dispersável em água (WDC), que é liberada dos agregados e permanece dispersa após determinado período (tempo que pode variar em função do comportamento da argila liberada); argila refloculável em água (WRC), que é liberada dos agregados do solo, mas em função das características das partículas (p. ex., elevado ponto de carga zero) ou das condições do meio (p. ex., alta concentração eletrolítica), tende a flocular; e argila não dispersável (NDC), que não é liberada dos agregados do solo após a aplicação de forças disruptivas. Tal método demonstrou melhorar a acurácia na avaliação da estabilidade dos microagregados e na compreensão dos fenômenos de floculação da argila (MELO et al., 2019a; 2021).

A funcionalidade da MOS depende da contribuição (em termos principalmente de qualidade, e quantidade) de diferentes materiais orgânicos e frações orgânicas no solo. Por exemplo, as concentrações de carbono orgânico lábil (extraído com permanganato; POXC) no solo geralmente variam mais rapidamente em comparação às concentrações de carbono orgânico total (CULMAN et al., 2012a) e estão estreitamente associadas à mineralização e disponibilidade de nutrientes, e à estabilidade dos agregados (afetando a cimentação das partículas do solo). Características que tornam o POXC um indicador sensível da dinâmica de estabilização (p. ex., sequestro de carbono a longo prazo; HURISSON et al., 2016) e de mineralização da MOS (p. ex., disponibilidade de nutrientes a curto prazo; CULMAN et al., 2013). Outra fração orgânica importante e usualmente aplicada como um indicador da dinâmica da MOS é a glomalina, uma vez que a substância representa uma forma estável de armazenamento de carbono no solo (RILLIG, 2004). A glomalina desempenha um papel crucial na estabilização dos agregados do solo e seu efeito na estabilização do carbono orgânico do solo (WILSON et al., 2009; HOLÁTKO et al., 2021).

A glomalina foi determinada como uma glicoproteína hidrofóbica produzida especialmente por hifas de fungos micorrízicos arbusculares (hifas intra-radiculares nas raízes e na superfície de hifas extra-radiculares na rizosfera) e, em extensão limitada, também pode ser liberada da superfície micelial para o solo (o micélio externo também é responsável pela exsudação, ou incorporação em suas paredes celulares, bem como os esporos) (WRIGHT et al., 1996; GAO et al., 2019; HOLÁTKO et al., 2021). A glomalina é operacionalmente definida e extraída do solo como “proteína do solo relacionada à glomalina” (GRSP) (RILLIG, 2004). A GRSP é considerada como uma “cola” microbiana que contribui na formação e estabilização dos agregados do solo (WRIGHT et al., 2007). Inúmeros estudos têm pesquisado a influência e ação da GRSP no modelo de hierarquização da agregação (micro, meso e macroagregados) (WRIGHT et al., 2007; WILSON et al., 2009; GAO et al., 2019; SANTOS et al., 2020; HOLÁTKO et al., 2021). Entretanto, não há trabalhos avaliando os efeitos desse agente ligante nas vias de formação dos agregados do solo, bem como sua eficiência na validação do método de separação das classes de agregados.

O papel principalmente dos indicadores WDC, WRC, NDC e GRSP na estabilização de agregados de diferentes origens em áreas agricultáveis encontra-se ainda pouco investigado. Sendo esse estudo o pioneiro na utilização desses indicadores em conjunto à macroagregação (MWD) e MOS (POXC) para uma maior compreensão da gênese dos

agregados; e avaliação das alterações dessas unidades estruturais (agregados biogênicos e fisiogênicos) quando submetidas à tipos de manejos distintos.

A partir do exposto e embasado na hipótese de que sistemas de manejo do solo (pastagens e produção de grãos) podem promover modificações no estado de agregação e nas concentrações de frações orgânicas associadas à estabilidade de agregados biogênicos e fisiogênicos em solos de textura arenosa, o estudo teve como objetivos:

- i) Verificar se a agregação biogênica proporciona maior estabilização de macro e microagregados; e
- ii) Avaliar se os agregados biogênicos estão associados a maiores teores de carbono orgânico lábil e glomalina.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1. Localização, clima e solo da área de estudo

A localização, clima e o solo da área de estudo estão apresentados no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.1.

4.4.2. Histórico das áreas avaliadas

O histórico, descrição e localização detalhada das áreas amostrais encontram-se apresentados na Tabela 1 no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2. A caracterização dos atributos físicos e químicos até 0,10 m de profundidade está apresentada na Tabela 2 no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2.

4.4.3. Coleta das amostras e separação dos agregados

A amostragem está apresentada no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.3. Após a coleta, as amostras foram secas ao ar e posteriormente submetidas a peneiramento, utilizado um conjunto de peneiras de 9,7, 8,0 e 4,0 mm de malha, sendo selecionados somente os agregados retidos nos intervalos $9,7 > \emptyset \geq 8,0$ e $8,0 > \emptyset \geq 4,0$.

Os agregados obtidos em ambos os intervalos foram examinados sob lupa binocular e separados manualmente quanto à sua origem ou via de formação a partir dos padrões morfológicos estabelecidos por Bullock et al. (1985), mediante protocolo adaptado por Pulleman et al. (2005) e validado pelos estudos reunidos em Pereira et al. (2021). A diferenciação entre ambos foi realizada com base na visualização de características morfológicas como forma, tamanho, presença de raízes, porosidade (BULLOCK et al., 1985; PULLEMAN et al., 2005; BATISTA et al., 2013; MELO et al., 2019a; PINTO et al., 2021), arranjos e junções de subunidades (PEREIRA et al., 2021). Assim, os agregados foram classificados em: *biogênicos* – aqueles em que é possível a visualização de formas arredondadas, providas do trato intestinal dos indivíduos da macrofauna do solo, principalmente Oligochaeta (minhocas) ou aqueles em que é possível visualizar a presença e atividade de raízes; e *fisiogênicos* (ou *fisicogênicos*) – definidos por aqueles que apresentaram formas angulares resultantes da interação entre carbono, argila, cátions e ciclos de umedecimento e secagem do solo (Figura 7).

4.4.4. Análises de estabilidade de macroagregados e microagregados

Após a identificação, uma fração de 25 g de agregados biogênicos e fisiogênicos com $8,0 > \emptyset \geq 4,0$ mm (macroagregados) de malha foi pesada e submetida à análise de estabilidade via úmida, utilizando-se tamisação vertical, com conjunto de peneiras de malha decrescente, a saber: 2,0; 1,0; 0,50; 0,25; e 0,105 mm, por 15 min, no aparelho de Yoder (YODER, 1936). O material retido em cada peneira foi transferido para placas de Petri, e seco em estufa, a 105 °C, até obtenção de massa constante (TEIXEIRA et al., 2017). A partir dos dados de massa de agregados, foi calculado seu diâmetro médio ponderado (MWD) de acordo com a Equação 1.

$$MWD = \sum (x_i y_i) \quad (1)$$

Em que: MWD = diâmetro médio ponderado; x_i = é o diâmetro médio da i -ésima classe de tamanho de agregados (mm); y_i = proporção da i -ésima classe de tamanho de agregados com relação ao total, ambas corrigidas quanto à umidade; e i = classes de tamanho de agregados: $8,0 \geq \varnothing > 2,0$ mm; $2,0 \geq \varnothing > 1,0$ mm; $1,0 \geq \varnothing > 0,50$ mm; $0,50 \geq \varnothing > 0,25$ mm; e $0,25 \geq \varnothing > 0,105$ mm.

Os agregados restantes de cada classe (biogênicos e fisiogênicos) foram destorroados e passados por peneira de 2,0 mm de malha e convertidos na fração terra fina seca ao ar (TFSA). Este material foi utilizado para as análises químicas (TEIXEIRA et al., 2017). Este material foi utilizado para as análises de microagregação, carbono orgânico lábil e glomalina. Para a avaliação da estabilidade de microagregados, três classes de argila foram quantificadas em 20 g de TFSA dos agregados, conforme método proposto por Melo et al. (2019), com adaptações em Melo et al. (2021), a saber: i) argila dispersável em água (WDC), classe de argila que é mecanicamente desagregável em água e não flocula em suspensão; ii) argila refloculável em água (WRC), classe de argila mecanicamente desagregável que flocula em suspensão; e iii) argila não dispersável (NDC), classe de argila que não é mecanicamente desagregável. Posteriormente os dados de WDC, WRC e NDC foram relativizados em função do teor de argila total.

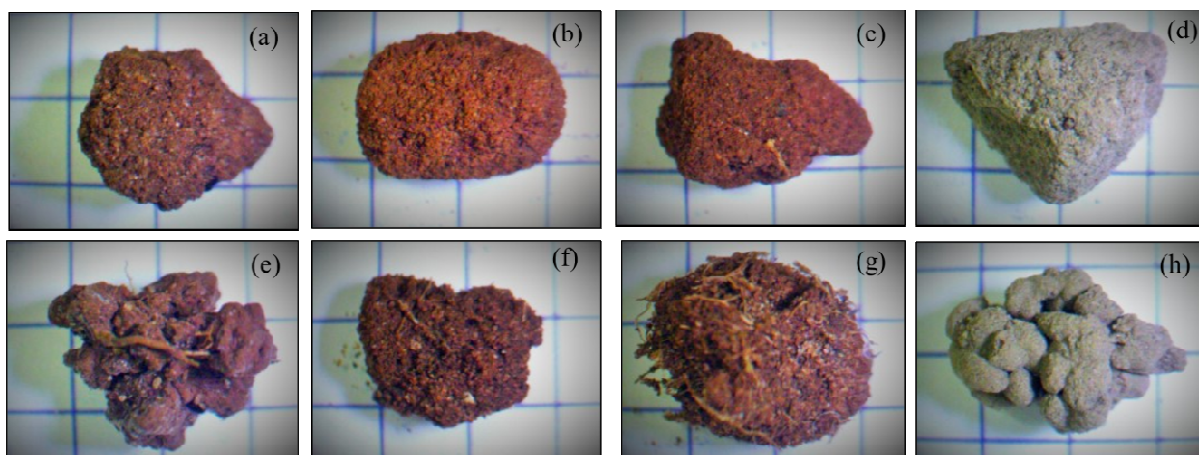


Figura 7. Exemplos da diferenciação morfológica de agregado biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) em áreas sob diferentes sistemas de manejo e mata nativa no Sul do Brasil. (a) Phy da pastagem permanente; (b) Phy do sistema plantio direto; (c) Phy do sistema plantio direto + *Urochloa*; (d) Phy da vegetação nativa de bioma Mata Atlântica; (e) Bio da pastagem permanente; (f) Bio do sistema plantio direto; (g) Bio do sistema plantio direto + *Urochloa*; e (h) Bio da vegetação nativa de bioma Mata Atlântica.

4.4.5. Análises de carbono orgânico lábil e glomalina

O carbono orgânico lábil foi quantificado via oxidação com solução de KMnO_4 0,02 mol L^{-1} (POXC) (WEIL et al., 2003; CULMAN et al., 2012b). Foram pesados 2,50 g de agregados e transferidos para tubo de centrífuga de polipropileno de 50 mL, posteriormente foram adicionados 20 mL de KMnO_4 0,02 mol L^{-1} . Em seguida, os tubos foram agitados por 2 min em agitador horizontal à 240 oscilações min^{-1} . Após a agitação, os tubos foram deixados em repouso na vertical para estabilização por 10 min. Após estabilização, 0,50 mL do sobrenadante foi pipetado e transferido para outro tubo de centrífuga de 50 mL contendo 49,50 mL de água destilada. A absorbância de cada amostra foi obtida por colorimetria a 550 nm com auxílio de espectrofotômetro. O POXC (mg kg^{-1}) foi calculado a partir da Equação 2.

$$\text{POXC} = [0.02 \text{ mol L}^{-1} - (a + b \text{ Abs})] \times (9000 \text{ mg C mol}^{-1}) \times (0.02 \text{ L Wt}^{-1}) \quad (2)$$

Em que: **POXC** = carbono orgânico lábil extraído com KMnO_4 ; $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ = é a concentração inicial da solução de KMnO_4 ; *a* é o intercepto da curva padrão; *b* é a inclinação da curva padrão; Abs é a leitura da amostra em absorbância à 550 nm; 9000 mg é a quantidade de C oxidado por um mol de MnO_4 com Mn^{7+} sendo reduzido para Mn^{4+} ou Mn^{2+} ; 0,02 L é o volume da solução de KMnO_4 que reagiu com o solo; e Wt é a massa da amostra (kg) usada na reação.

A glomalina foi quantificada como “proteína do solo relacionada à glomalina” (GRSP). A substância pode ser classificada em duas frações: GRSP facilmente extraível (GRSP-EE; representa a fração recém-produzida) e GRSP total (GRSP-T; soma da produção de proteína fúngica recente e antiga) (WRIGHT e UPADHYAYA, 1996; WRIGHT e UPADHYAYA, 1998; RILLIG, 2004). A fração GRSP-EE foi obtida a partir da extração em autoclave, utilizando-se solução de citrato de sódio 20 mM (pH 7,0) (121 °C, 30 min). Já para a fração GRSP-T foi aplicado o mesmo procedimento utilizando-se solução de citrato de sódio 50 mM (pH 8,0) (121 °C, 60 min). Quantificou-se as frações de GRSP pelo método de Bradford com modificações propostas por Wright e Upadhyaya (1996), usando como padrão soro-albumina bovina.

4.4.6. Análises estatísticas

O estudo foi analisado em esquema fatorial 4×2 (quatro áreas \times duas classes morfológicas de agregados) em delineamento inteiramente casualizado. Os dados foram testados quanto à normalidade dos erros pela análise dos resíduos de acordo com o teste de Shapiro-Wilk e quanto à homocedasticidade pelo teste de Bartlett. As variáveis que não apresentarem distribuição normal ou homocedasticidade foram transformadas de acordo com o teste de Box-Cox e foram novamente testadas.

Os dados foram avaliados por análise de variância seguido pelo teste de Tukey quando os pressupostos de normalidade dos erros e homocedasticidade foram atendidos (variáveis transformadas ou não). Nos casos em que a transformação dos dados foi ineficiente, o teste de Kruskal-Wallis seguido pelo critério de diferença mínima significativa de Fisher foram utilizados para a avaliação dos sistemas de uso e manejo do solo em cada tipo de agregado e o teste de Wilcoxon foi utilizado para comparar variáveis entre os agregados em cada sistema de uso e manejo do solo. Também foi realizada a análise de componentes principais (ACP), baseada na matriz de correlação de Pearson, a partir dos atributos avaliados. Todos os testes foram realizados à 5% de significância pelo Software R (R CORE TEAM, 2020).

4.5. RESULTADOS

4.5.1. Efeito dos sistemas de manejo e vias de formação sobre o estado de agregação

O estado de agregação do solo avaliado pela estabilidade de macro (diâmetro médio ponderado, MWD) e microagregados (argilas dispersável, refloculável e não dispersável em água, WDC, WRC e NDC respectivamente) possibilitou identificar diferenças principalmente entre os sistemas de manejo (Figura 8 e Tabela 6).

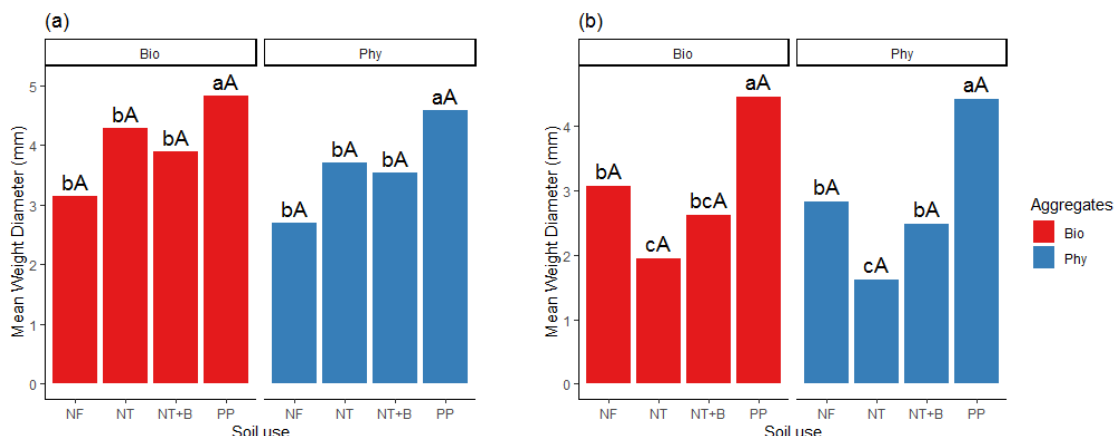


Figura 8. Diâmetro médio ponderado (MWD) de agregados biogênicos e fisiogênicos de áreas sob diferentes sistemas de manejo, região subtropical do Brasil. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não indicam diferenças entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado. Mesma letra maiúscula não indica diferenças entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado (ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados; e Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher). (A) camada de 0–0,05 m; (B) camada de 0,05–0,10 m. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; e NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica.

O sistema de pastagem proporcionou maior estabilização dos macroagregados, independente da via de formação, com reflexos nos maiores valores de MWD; que variaram de 4,83 e 4,46 mm nos agregados biogênicos e 4,59 e 4,42 mm nos fisiogênicos (Figura 8; camada de 0–0,10 m). O sistema de pastagem também influenciou no grau de estabilidade dos microagregados; em ambas as classes de agregados desse sistema foram verificados os menores valores de WDC e maiores valores de NDC (Tabela 6; camada de 0–0,10 m). Vale ressaltar que para os resultados de WDC e NDC dos agregados da área de PP foi verificado um padrão similar aos observados para os agregados da área de NF (Tabela 6; camada de 0–0,10 m); e que nas duas classes morfológicas de agregados da área de NF também foram quantificados os maiores valores de WRC em subsuperfície (Tabela 6; camada de 0,05–0,10 m).

Entre as áreas de NT, NT+B e NF foi observado que o sistema de consórcio milho-brachiária (NT+B) favoreceu a estabilização de macroagregados, principalmente em subsuperfície; sendo que os valores de MWD (2,63 e 2,48 mm, nos biogênicos e fisiogênicos, respectivamente) observados para este sistema se aproximam dos verificados na área de referência (3,07 e 2,83 mm, nos biogênicos e fisiogênicos, respectivamente). Também em

subsuperfície foram observados valores de MWD abaixo de 2,00 mm nos agregados biogênicos (1,94 mm) e fisiogênicos (1,61 mm) da área de NT (Figura 8; camada de 0,05–0,10 m). Nos agregados dos sistemas de produção de grãos (NT e NT+B) foram verificados os maiores valores de WDC e menores valores de NDC, padrão inverso ao observado para os agregados das áreas de PP e NF (Tabela 6; camada de 0–0,10 m).

Tabela 6. Argila dispersável em água (WDC), argila refloculável em água (WRC) e argila não dispersável (NDC) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo, região subtropical do Brasil.

----- 0–0,05 m -----						
Áreas	WDC (%)		WRC (%)		NDC (%)	
	Bio	Phy	Bio	Phy	Bio	Phy
PP	62,73 bcA	54,66 bcB	16,49 aA	11,36 aA	20,79 abA	33,98 abA
NT	74,28 abA	59,87 abB	14,63 aA	14,57 aA	11,09 bA	26,36 bA
NT+B	74,02 aA	72,39 aB	8,11 aA	11,09 aA	17,83 bA	16,51 bA
NF	57,62 cA	48,94 cB	6,81 aA	15,85 aA	35,57 aA	35,21 aA
----- 0,05–0,10 m -----						
Áreas	WDC (%)		WRC (%)		NDC (%)	
	Bio	Phy	Bio	Phy	Bio	Phy
PP	53,54 bA	49,20 bA	0,03 abA	0,00 bA	46,43 aA	50,80 aA
NT	83,44 aA	70,41 aA	0,00 bA	0,21 bA	16,56 bA	29,38 bA
NT+B	66,94 aA	70,10 aA	3,38 abA	0,00 bA	29,69 bA	29,90 bA
NF	47,86 bA	50,98 bA	7,27 aA	3,78 aA	44,87 aA	45,24 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado (ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados; e Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher). PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; e NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica

Entre as vias de formação, os valores de MWD quantificados para os agregados da via biogênica foram superiores aos da via fisiogênica em 5,0% (PP), 10,0% (NT+B), 16,0% (NT) e 17,0% (NF) na camada de 0–0,05 m; e na camada de 0,05–0,10 m o aumento foi de 6,0% (NT+B), 8,0% (NF) e 20,0% (NT). Nos agregados biogênicos também foram verificados os maiores valores de WDC em superfície (Tabela 6; camada de 0–0,05 m).

4.5.2. Influência dos sistemas de manejo e vias de formação nas frações orgânicas

Os resultados das frações orgânicas associadas à estabilidade dos agregados foram influenciados tanto pelos sistemas de manejo, como pelas vias de formação; com destaque para o carbono orgânico lábil (POXC) em superfície (Tabela 7; camada de 0–0,05 m).

Apenas o sistema de pastagem foi capaz de elevar os teores de POXC, glomalina facilmente extraível (GRSP-EE) e glomalina total (GRSP-T) nas duas vias de formação; sendo quantificados nesses agregados os maiores teores desses atributos (Tabela 7; camada de 0–0,10 m). O sistema de consórcio milho-braquiária proporcionou o aumento nos teores de GRSP-T nos agregados biogênicos em relação à mesma classe de agregados das áreas de NT e NF em subsuperfície (Tabela 7; camada de 0,05–0,10 m). Nos agregados fisiogênicos dos

sistemas de produção de grãos (NT e NT+B) também foram observados os maiores teores de GRSP-T em comparação aos fisiogênicos da área controle (NF) (Tabela 7; camada de 0–0,10 m).

Tabela 7. Carbono orgânico lábil (POXC), glomalina facilmente extraível (GRSP-EE) e glomalina total (GRSP-T) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo, região subtropical do Brasil.

----- 0–0,05 m -----						
Áreas	POXC (g kg ⁻¹)		GRSP-EE (g kg ⁻¹)		GRSP-T (g kg ⁻¹)	
	Bio	Phy	Bio	Phy	Bio	Phy
PP	0,96 aA	0,84 aB	1,05 aA	0,85 aA	10,15 aA	7,12 aB
NT	0,85 bA	0,53 bB	0,64 abA	0,37 bB	4,28 bA	3,45 bA
NT+B	0,77 bA	0,60 bB	0,58 bA	0,46 bA	4,12 bA	3,72 bA
NF	0,64 bA	0,43 bB	0,66 abA	0,49 bA	3,17 bA	1,73 cA
----- 0,05–0,10 m -----						
Áreas	POXC (g kg ⁻¹)		GRSP-EE (g kg ⁻¹)		GRSP-T (g kg ⁻¹)	
	Bio	Phy	Bio	Phy	Bio	Phy
PP	0,77 aA	0,61 aA	0,77 aA	0,73 aA	6,73 aA	4,89 aB
NT	0,30 bA	0,28 bA	0,35 bA	0,38 bA	2,20 cA	2,39 bA
NT+B	0,33 bA	0,35 bA	0,48 bA	0,37 bA	2,79 bA	2,70 bA
NF	0,37 bA	0,28 bA	0,49 bA	0,35 bA	1,23 cA	1,12 cA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado (ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados; e Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher). PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; e NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica.

Em relação as vias de formação, a biogênica reafirmou sua capacidade de preservação e acúmulo das frações mais lábeis e solúveis da MOS (p. ex., POXC), bem como aumentou (proporcionalmente) os teores das demais frações orgânicas avaliadas (GRSP-EE e GRSP-T), frações envolvidas nos processos de formação e estabilização dos agregados. Nos agregados biogênicos de todas as áreas foram quantificados os maiores teores de POXC em comparação aos fisiogênicos em superfície (Tabela 7; camada de 0–0,05 m). Os valores de GRSP-EE quantificados nos agregados biogênicos em relação aos fisiogênicos foram proporcionalmente maiores em 24,0% (PP), 26,0% (NT+B), 35,0% (NF) e 73,0% (NT) na camada de 0–0,05 m; e 5,0% (PP), 30,0% (NT+B) e 40,0% (NF) na camada de 0,05–0,10 m. Para GRSP-T, os valores observados nos agregados da via biogênica foram proporcionalmente 11,0% (NT+B), 24,0% (NT), 43,0% (PP) e 83,0% (NF) maiores em relação à fisiogênica na camada de 0–0,05 m; e 3,0% (NT+B), 10,0% (NF) e 38,0% (PP) na camada de 0,05–0,10 m.

4.5.3. Dissimilaridade entre os sistemas de uso e manejo do solo avaliados

Na análise de componentes principais (ACP), considerou-se apenas as duas primeiras componentes principais (Comp. 1 e Comp. 2), as quais explicaram 70,97% e 77,11% da variabilidade total dos dados nas camadas de 0–0,05 m e 0,05–0,10 m (Figuras 9 e 10, respectivamente). Por meio da análise da Figura 9, foi observado a formação de três grupos

distintos: (1) grupo formado pelos agregados (biogênicos e fisiogênicos) do sistema de pastagem; (2) grupo formado pelos agregados biogênicos dos sistemas de produção de grãos (NT e NT+B); e (3) grupo formado pelos agregados fisiogênicos também dos sistemas de produção de grãos (NT e NT+B). Através da análise da Figura 10, também se verificou a formação de três grupos, entretanto não foi observada a separação dos tipos de agregados nas áreas de PP (1º grupo), NT e NT+B (2º grupo), e NF (3º grupo).

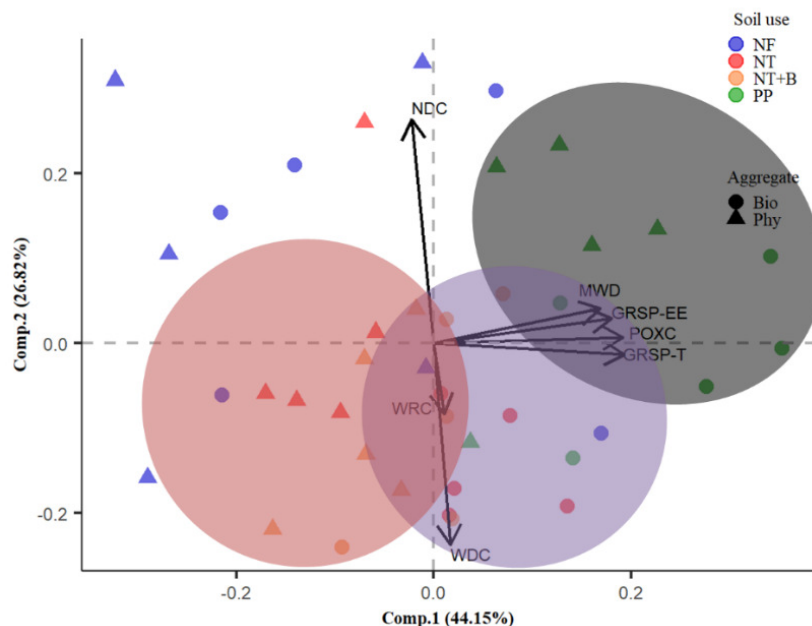


Figura 9. Análise de componentes principais integrando o estado de agregação e as frações orgânicas associadas à estabilidade de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo na camada de 0–0,05 m, região subtropical do Brasil. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; MWD: Diâmetro médio ponderado; WDC: Argila dispersável em água; WRC: Argila refloculável em água; NDC: Argila não dispersável; POXC: Carbono orgânico lábil; GRSP-EE: Glomalina facilmente extraível; e GRSP-T: Glomalina total.

O eixo principal (Comp. 1) que explica a maior dissimilaridade entre os sistemas de manejo e as vias de formação, separou os agregados biogênicos e fisiogênicos da área de PP (quadrante superior direito) e biogênicos das áreas de NT e NT+B (quadrante inferior direito) dos demais agregados, com 44,15% da variabilidade dos resultados (Figura 9). Tendo como variáveis discriminantes (coeficiente de correlação $\geq 0,45$) MWD (0,46), GRSP-EE (0,49), POXC e GRSP-T (0,52). Na Figura 10, a Comp. 1 também separou os agregados da área de PP (quadrantes superior e inferior direito) dos agregados das áreas de NT, NT+B e NF (quadrantes superior e inferior esquerdo) com 52,79% da variabilidade dos dados, apresentando coeficiente de correlação positiva ($\geq 0,45$) com os atributos MWD, GRSP-EE e GRSP-T (0,45), e POXC (0,49).

Em ambas as ACPs os atributos MWD, POXC, GRSP-EE e GRSP-T estão mais associados ao sistema de pastagem, corroborando aos resultados dos testes estatísticos univariados aplicados (Figura 8 e Tabela 7). Para os atributos WDC, WRC e NDC observou-se maior correlação com o eixo de menor relevância (Comp. 2) em ambas as ACPs (26,82%,

Figura 9; e 24,34%, Figura 10). Destacando a variável WDC que apresentou correlação média e negativa ($-0,65$; camada de $0-0,05$ m) e média e positiva ($0,65$; camada de $0,05-0,10$ m) com a Comp. 2, estando mais associada aos agregados dos sistemas de produção de grãos (NT e NT+B).

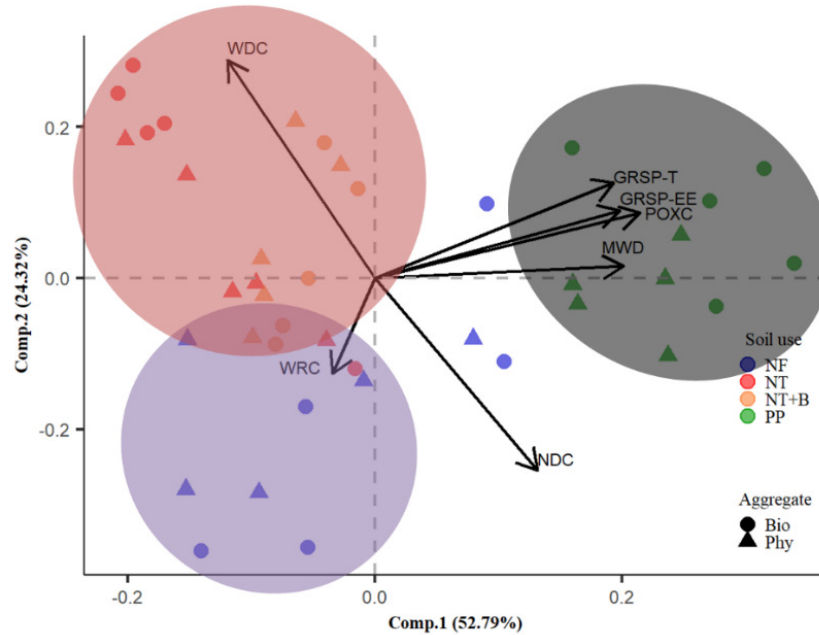


Figura 10. Análise de componentes principais integrando o estado de agregação e as frações orgânicas associadas à estabilidade de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo na camada de $0,05-0,10$ m, região subtropical do Brasil. PP: Pastagem permanente; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; NF: Vegetação do bioma Mata Atlântica; MWD: Diâmetro médio ponderado; WDC: Argila dispersável em água; WRC: Argila refloculável em água; NDC: Argila não dispersável; POXC: Carbono orgânico lábil; GRSP-EE: Glomalina facilmente extraível; e GRSP-T: Glomalina total.

4.6. DISCUSSÃO

4.6.1. Efeito dos sistemas de manejo e vias de formação sobre o estado de agregação

O uso de indicadores de estabilidade dos agregados, seja para a macro (MWD) ou microagregação (WDC, WRC e NDC), pode ser considerado uma ferramenta valiosa na mensuração dos impactos de diferentes práticas de uso e manejo do solo nos agroecossistemas. No estudo, para o sistema de pastagem foi verificado o maior efeito sobre a estabilização de macro (MWD) e microagregados (WDC e NDC), independente de sua origem (Figura 8 e Tabela 6).

Os maiores valores de MWD quantificados nos agregados da área de PP (Figura 8; camada de 0–0,10) podem estar relacionados à fatores como i) aporte de resíduos vegetais e esterco; ii) presença de raízes ativas e maior atividade biológica; iii) menor perturbação da camada superficial do solo; e iv) textura do solo com maior teor de argila (Tabela 2 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2). O aumento da quantidade de resíduos vegetais e esterco decorrentes do pastejo do gado no sistema de pastagem, além de favorecer as concentrações de carbono no solo, também podem melhorar o microhabitat em que vivem os microrganismos; facilitando assim o crescimento microbiano e contribuindo para a eficácia e o aumento da densidade das hifas fúngicas. As hifas fúngicas melhoram a estabilidade dos agregados diretamente através da reorientação das partículas de argila com polissacarídeos extracelulares (TERNAN et al., 1996); e indiretamente fornecendo carbono para outros microrganismos que produzem agentes químicos de ligação.

A formação de agregados com maior diâmetro é geralmente atribuída às gramíneas, em especial as forrageiras e de cobertura do solo (perenes ou anuais); devido ao seu sistema radicular mais abundante e à constante renovação e decomposição de seus tecidos após a colheita, manejo da cultura (STUMPF et al., 2016) ou alimentação animal. As raízes, mais especificamente as finas, têm efeito indireto na estabilidade dos agregados, através da liberação de matéria orgânica particulada; estimulando a atividade microbiana. Entretanto, as raízes ao penetrarem as camadas do solo podem danificar mecanicamente os agregados existentes (SIX et al., 2004). Isto pode ocorrer quebrando-os, seguido de sua reconstituição. Na mesma região do estudo, Stumpf et al. (2016) constataram que as raízes das gramíneas promoveram a recuperação da condição física do solo na camada mais superficial, através da formação de novos agregados; conduzindo à diminuição da densidade do solo e ao aumento da macroporosidade.

No estudo, a presença do gado no sistema de pastagem (Tabela 1 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.1) pode resultar em uma constante e bem distribuída adição de esterco, o que aumenta os teores de MOS e estimula a produção de exsudatos radiculares. Adicionalmente, na área de PP verifica-se diferença textural (francoarenosa) em comparação às áreas de NT e NT+B (areia franca) (Tabela 2 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2). Os maiores teores de argila quantificados nesta área em associação à menor perturbação do solo podem estar colaborando para a maior conservação da MOS possivelmente por meio de associações entre a matéria orgânica transformada e as partículas minerais, formando complexos organo-minerais (SIX et al., 2004). A combinação de todos os fatores mencionados pode estar favorecendo a formação de agregados mais estáveis nesse sistema, padrão que pode ser considerado para ambas as classes de agregados (biogênicos e fisiogênicos) (Figura 8; camada de 0–0,10 m). Corroborados pelos resultados de POXC, GRSP-EE e GRSP-T (Tabela 7; camada de 0–0,10 m).

A dispersão da fração argila é um atributo dinâmico no solo (MELO et al., 2019a); portanto, a estabilidade dos agregados é indicadora da resistência estrutural do solo frente à

agentes disruptivos, tais como gotas de chuva ou revolvimento mecânico, sob condições de campo. A análise da classe de WDC avalia como a argila do solo responde às forças mecânicas e à hidratação; logo, é uma avaliação da estabilidade dos microagregados (IGWE e OBALUM, 2013; MELO et al., 2019a). Quanto aos menores valores de WDC e maiores valores de NDC verificados nos agregados da área de PP (Tabela 6; camada de 0–0,10 m), estes podem estar relacionados à menor perturbação da camada superficial associado ao efeito benéfico do sistema radicular das gramíneas como cobertura vegetal; aumentando a força de união e reduzindo a dispersão da fração argila. Corroborando aos resultados de MWD desses agregados. Justificando também a semelhança no padrão dos resultados de WDC entre os agregados do sistema de pastagem e o ambiente não antropizado (NF) (Tabela 6; camada de 0–0,10 m).

No estudo, os teores de carbono nas áreas de PP e NF na camada de 0–0,10 m foram de 16,10 e 7,0 g kg⁻¹, respectivamente (Tabela 2 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2.). Entretanto, os valores de NDC foram similares entre os agregados das áreas (Tabela 6; camada de 0–0,10 m). Em estudo realizado na região do Sul do Brasil, com amostras de Latossolos (*Ferralsols*) de textura muito argilosa, Melo et al. (2021) observaram que o aumento inicial nos teores de carbono orgânico reduziu os valores de NDC, enquanto o aumento elevado nos teores do mesmo atributo químico conduziu ao incremento nos valores de NDC. Segundo os autores, os microagregados altamente estáveis (pseudo-silte e pseudo areia) são favorecidos tanto sob teores altos como baixos de MOS. A classe de NDC é indicativo de agregação mais forte, e pode ocorrer devido a vários mecanismos orgânicos e inorgânicos de ligação e quando a carga líquida dispersiva é supostamente zero (RENGASAMY et al., 2016; MELO et al., 2019a).

Em relação a classe de WRC, está é supostamente mais transportável do que a classe de NDC, uma vez que a primeira permanece em suspensão enquanto distúrbios mecânicos são experimentados na solução do solo (p. ex., durante a chuva) como afirmaram Melo et al. (2019a). Segundo os autores, quando os distúrbios mecânicos são reduzidos a classe de WRC tem maior potencial de agregação quando comparada à WDC. Tal fato poderia explicar os maiores valores de WRC quantificados nos agregados da área de NF (maior diversidade em termos de cobertura vegetal) na camada subsuperficial (Tabela 6; camada de 0,05–0,10 m). Contudo, a classe de WRC não é indicativo de resistência contra forças mecânicas mas apenas do balanço de cargas na superfície das partículas, comumente observado em solos extremamente oxidados, como os Latossolos (*Ferralsols*) (Melo et al., 2019a).

Entre os sistemas de produção de grãos (NT e NT+B) e a área de referência (NF), o efeito benéfico da braquiária em consórcio com o milho sobre a estabilidade de macroagregados pode ser observado através da análise de dois resultados: o primeiro, os maiores valores de MWD dos agregados biogênicos e fisiogênicos em subsuperfície, sendo estes valores semelhantes aos verificados nas mesmas classes de agregados da área de NF; e o segundo, a partir dos baixos valores de MWD (< 2,00 mm) identificados nos agregados biogênicos e fisiogênicos da área de NT (sem a braquiária) também em subsuperfície (Figura 8; camada de 0,05–0,10 m). O uso de gramíneas, especialmente de braquiárias, tem sido um fator chave para a viabilidade dos sistemas de produção de grãos e fibras, e para a sustentabilidade da agropecuária em solos de textura arenosa (DONAGEMMA et al., 2016). Além disso, diversos estudos (BRIEDIS et al., 2012; TIVET et al., 2013) têm observado que valores de MWD inferiores a 2,00 mm indicam solos em condições físicas desfavoráveis no que diz respeito a aeração; infiltração e redistribuição de água; e estabelecimento do sistema radicular.

Os maiores valores de MWD nos agregados da área de NT+B em subsuperfície (Figura 8; camada de 0,05–0,10 m) também podem estar relacionados com o intervalo de

tempo de coleta após a dessecação da forrageira anual. Geralmente as braquiárias levam mais tempo para a total desidratação, em torno de 20 dias; requerendo, assim, maior antecipação da dessecação em relação à coleta das amostras e semeadura da cultura anual (KLUTHCOUSKI et al., 2004). Tal fator favorece o aumento da umidade do solo e redução da temperatura, beneficiando a atividade da fauna edáfica e do sistema radicular. A matéria seca da parte aérea e raízes e, conseqüentemente, a matéria orgânica fornecida pelas culturas de gramíneas no sistema de NT+B melhoram a atividade microbiana, o que, juntamente com os exsudatos radiculares, resulta na melhoria da estabilidade dos agregados (ROSOLEM et al., 2016).

Na mesma região do estudo, Rosset et al. (2019) verificaram que o consórcio milho-braquiária (inverno) com quatro anos de instalação (2008–2012) foi eficiente na melhoria da agregação do solo sob Latossolo Vermelho (*Ferritic Ferralsol*). Segundo os autores, os dados evidenciam o aumento da qualidade estrutural do solo pela ação do sistema radicular mais abundante e agressivo da braquiária em consórcio com o milho. O aumento da resistência dos macroagregados às forças perturbadoras pode ser atribuído à presença de polissacarídeos que aumentam a coesão das partículas, bem como ao efeito produzido pelo emaranhamento físico derivado das raízes e hifas fúngicas. Os fungos micorrízicos arbusculares facilitam a agregação moldando a composição das comunidades vegetais, influenciando no crescimento das raízes das plantas hospedeiras (relação simbiótica, planta-fungos micorrízicos arbusculares), tendo efeito direto no crescimento do micélio (RILLIG e MUMMEY, 2006).

Os maiores valores de WDC e menores valores de NDC verificados nos agregados das áreas de NT e NT+B (Tabela 6; camada de 0–0,10 m) indicam que a mínima perturbação da camada superficial do solo sob sistema de NT está afetando mecanicamente a capacidade dos microagregados em resistir às forças disruptivas. Vale destacar que entre os indicadores de estabilidade dos microagregados, a classe de WDC foi a que esteve mais associada às áreas de NT e NT+B no estudo das ACPs (Figuras 9 e 10). Reforçando a hipótese da existência de uma relação direta entre os efeitos das práticas de manejo adotadas nos sistemas de produção de grãos e esse indicador. Na mesma região do estudo, Figueiredo et al. (2021) verificaram que o grau de dispersão da fração argila foi afetado pelos sistemas de manejo do solo sem efeito dos sistemas de cultivo; na qual para o sistema de manejo com menor perturbação do solo (plantio direto contínuo) foi observado o maior grau de dispersão de argila em comparação aos que promovem uma maior mobilização do solo, independente do implemento agrícola utilizado ou da intensidade do distúrbio do solo.

No entanto, o efeito mecânico negativo da perturbação do solo sobre a dispersão da fração argila pode ser parcialmente neutralizado pelo manejo químico do solo e pela adubação adequada do sistema de produção, como apontam Nunes et al. (2020). Os autores complementam informando que os efeitos dos sistemas agrícolas são mais complexos, e dependentes de vários fatores; e que o manejo químico do solo requer tanta atenção quanto as práticas de preparo e rotação de culturas.

O efeito das vias de formação sobre a estabilidade de macroagregados foi constatado a partir da análise dos maiores valores (proporcionais) de MWD quantificados nos agregados biogênicos em comparação aos fisiogênicos (Figura 8). O padrão dos resultados de MWD foi semelhante aos verificados por Silva Neto et al. (2021) em experimento de incubação com organismos da macrofauna (Oligochaeta) e vegetação de gramíneas (*Urochloa decumbens*) na região Sudeste do Brasil. Para os autores, diferentes fatores envolvendo esses organismos são responsáveis pela união das pequenas subunidades do solo conferindo maior estabilidade aos agregados biogênicos. No Nordeste do Brasil, Silva Neto et al. (2010) também observaram que os agregados biogênicos apresentaram maior estabilidade física em comparação aos fisiogênicos em solos cobertos por espécies de gramíneas (*Saccharum officinarum* e *Urochloa decumbens*); demonstrando o efeito da atividade biológica na gênese desses agregados.

A agregação induzida pela via biogênica ocorre em diferentes escalas e sob o impacto e interação de vários organismos. Esses agregados afetam importantes funções no solo, tais como aumento da repelência à água; maior capacidade de retenção e armazenamento de nutrientes e contaminantes; e aumento do fornecimento de habitats (GUHRA et al., 2022). Alguns fatores podem explicar a elevada estabilidade dos macroagregados biogênicos, como exsudatos biogênicos de fungos, raízes, minhocas e bactérias influenciam a repelência à água, transporte e retenção dentro de vias de fluxo preferenciais. Ou seja, o revestimento de compostos hidro-repelentes em alguns minerais ou superfícies de agregados do solo é o resultado da lenta acumulação de substâncias orgânicas potencialmente hidrofóbicas produzidas por exsudatos de raízes e ceras subsuperficiais das folhas de plantas e subprodutos microbianos (MORALES et al., 2010).

Adicionalmente, i) a estabilidade à água aumenta quando exsudatos de raiz (mucilagens) são incorporados aos agregados do solo. A exsudação radicular está envolvida na fixação da MOS em agregados e associações organo-minerais, que co-ocorrem com a liberação de carbono orgânico das superfícies minerais mediada por ligantes orgânicos (GUHRA et al., 2022); ii) durante os processos de escavação e ingestão do solo as minhocas influenciam significativamente a rotatividade dos agregados e na dinâmica da MOS, destruindo os agregados existentes e formando agregados biogênicos (macro e micro). Estes contêm matéria orgânica em partículas mais finas, fisicamente protegidas contra a degradação microbiana (PULLEMAN et al., 2005); e iii) a matéria orgânica derivada dos fungos (exsudatos e tecidos) torna-se estabilizada através de associações organo-minerais e formação de agregados, onde as hifas envolvem fisicamente as partículas do solo e os exsudatos fúngicos servem como agentes de agregação (FREY, 2019).

Através do estudo da morfologia do solo (ou vias de formação dos agregados) é possível avaliar o estado de agregação do solo que está associado a importantes propriedades deste, como estrutura, infiltração, retenção de água e armazenamento de carbono. A estrutura do solo afeta o crescimento das plantas influenciando a distribuição das raízes e, consequentemente, sua capacidade de absorver água e nutrientes (VELASQUEZ e LAVELLE, 2019). Complementarmente, o papel benéfico da biota do solo na formação e estabilização dos agregados em função do tipo de uso e manejo do solo (ou tratamento de campo) pode ser bem avaliado através da quantificação da proporção de agregados hidro-estáveis; sendo a atividade da biota do solo um fator essencial para a pedogênese, dinâmica da estrutura, renovação de nutrientes e matéria orgânica em solos (GUHRA et al., 2022).

No estudo, o efeito das vias de formação sobre a estabilidade de microagregados foi verificado com base nos resultados de WDC; com maiores valores para a via biogênica (Tabela 6; camada de 0–0,05 m). Apesar das melhorias do solo proporcionadas pela agregação biogênica, Melo et al. (2019b) também observaram aumento na dispersão potencial da fração argila nos agregados biogênicos em áreas de NT com aplicação de resíduos orgânicos (cama de frango e dejetos líquidos de suínos) em Latossolo Vermelho Eutroférico (*Rhodic Hapludox*) na mesma região do estudo. Os autores não encontraram evidências de que os maiores teores de MOS quantificados nos agregados biogênicos influenciados pela adição dos esterco fossem responsáveis pelo aumento da resistência da fração argila às forças disruptivas.

Entretanto, forte associação negativa entre a argila mecanicamente dispersável em água e os teores de Al^{3+} foi encontrada no estudo de Melo et al. (2019b). Segundo os autores, esse padrão sugere que a neutralização do Al^{3+} inibiu a refloculação das partículas, intensificando a dispersão. Tal resultado pode ser explicado pela maior proporção de cátions de menor valência (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) quando a saturação por Al^{3+} é baixa (MELO et al., 2020; PEREIRA et al., 2021). Esse fenômeno químico pode ter sido favorecido nos agregados de

origem biológica pela maior concentração de nutrientes. Vale destacar que este estudo e o trabalho de Melo et al. (2019b) são os primeiros na literatura a utilizar a técnica das classes de argila em agregados de diferentes origens. Sugerindo que devam ser feitos mais trabalhos relacionando a gênese de agregados, outros sistemas de uso e manejo do solo e o novo método de avaliação da microagregação.

4.6.2. Influência dos sistemas de manejo e vias de formação nas frações orgânicas

Estudos têm verificado que, em solos de textura arenosa localizados em ambientes de clima tropical e subtropical, a estabilização dos agregados é controlada principalmente por atividades de fungos específicos que atuam como agentes agregadores no sistema edáfico (BOSSUYT et al., 2001); embora isso também dependa da decomponibilidade da MOS (SALL et al., 2016). Neste estudo, assim como foi verificado para a macro (Figura 8) e microagregação (Tabela 6), na área de PP também foi verificado maiores concentrações de POXC, GRSP-EE e GRSP-T nos agregados (Tabela 7; camada de 0–0,10 m).

Os teores mais elevados de carbono orgânico lábil observados nos agregados da área de PP (Tabela 7; camada de 0–0,10 m), identificam o POXC como um indicador sensível das alterações induzidas pelo manejo da MOS (CULMAN et al., 2012b; 2013) e um bom preditor das transformações da MOS em relação a outras frações de carbono no solo (HURISSO et al., 2016). Na mesma região do estudo, Assunção et al. (2019) constataram resultados de POXC contrastantes aos verificados nesse estudo, com maiores teores na área de floresta nativa (Floresta Estacional Semidecidual Aluvial; 1130 mg kg⁻¹ de POXC), seguida pelas áreas de sistemas de NT (sucessão soja/milho; 980 mg kg⁻¹ de POXC) e pastagem (*Cynodon dactylon*; 900 mg kg⁻¹ de POXC). Os autores justificaram os resultados em função do maior aporte de MOS na camada superficial na área de floresta. Segundo Hurisson et al. (2016), os teores de POXC são mais influenciados por práticas de manejo orientadas para conservação, cujo principal objetivo é promover o acúmulo da MOS (sequestro de carbono a longo prazo).

As concentrações de GRSP tendem a ser positivamente correlacionadas à estabilidade dos macroagregados em água (RILLIG, 2004), variando de 2,0 a 15,0 g kg⁻¹ em solos aráveis, pastagens e ecossistemas naturais (WRIGHT e UPADHYAYA 1996; WRIGHT et al., 2000). Os teores verificados no estudo encontram-se dentro da faixa indicada pelos autores (Tabela 7; camada de 0–0,10 m). A fração GRSP-EE é considerada a proteína fúngica produzida recentemente e relativamente mais lábil; enquanto a fração GRSP-T é a soma da produção de proteína fúngica recente e antiga, e quimicamente mais recalcitrante.

Como já mencionado anteriormente, os resíduos vegetais e esterco, que são continuamente depositadas ao solo e a presença de raízes e hifas fúngicas no sistema de pastagem criam sítios de nucleação para o crescimento de fungos e outros microrganismos. Resultando em uma extensa rede e misturas de produtos de origem microbiana e vegetal (mucilagens), estando a GRSP entre eles (SANTOS et al., 2020). Justificando os maiores teores de GRSP-EE e GRSP-T identificados nos agregados da área de PP (Tabela 7; camada de 0–0,10 m). A GRSP tem sido sugerida como um indicador de alerta precoce da qualidade do solo quando as propriedades do solo são frequentemente desconsideradas, como por exemplo em solos degradados (RILLIG, 2004).

No estudo das ACPs, os atributos POXC, GRSP-EE, GRSP-T e MWD foram responsáveis principalmente por separar os agregados do sistema de pastagem dos demais sistemas avaliados (Figuras 9 e 10). Estes resultados sugerem que as associações entre os agentes ligantes e a estabilidade dos agregados são mais dependentes das concentrações de carbono e da menor perturbação da camada arável, e estão mais relacionadas com os macroagregados do que com os microagregados. Wright et al. (2007) verificaram que a GRSP

estava relacionada com o aumento da estabilidade dos agregados, e que proporcionava uma medida quantitativa de um componente específico da MOS.

Tal como foi observado para a macroagregação (Figura 8; camada de 0,05–0,10 m), o efeito benéfico do consórcio milho-braquiária sobre as concentrações de GRSP-T também pode ser verificado por meio de dois resultados, a saber: o primeiro através da identificação dos maiores valores de GRSP-T quantificados nos agregados biogênicos subsuperficiais em comparação à mesma classe de agregados das áreas de NT e NF (Tabela 7; camada de 0,05–0,10 m); e em segundo, através dos maiores valores de GRSP-T determinados nos agregados fisiogênicos, sendo estes valores semelhantes aos verificados na mesma classe de agregados da área de NT, e superiores aos quantificados nos agregados da área de NF (Tabela 7; camada de 0–0,10 m).

As espécies vegetais utilizadas nos sistemas de produção de grãos (culturas econômicas ou plantas de cobertura) fornecem carbono em superfície principalmente como tecido vegetal morto (serrapilheira), incorporado ao solo através de processos de homogeneização (bióticos e abióticos). No entanto, o material orgânico libertado pela exsudação radicular e os produtos da decomposição dos resíduos orgânicos radiculares são presumivelmente mais relevante na agregação e estabilização da MOS (GUHRA et al., 2022). Alguns estudos têm sugerido que o sistema de NT é melhor para aumentar as concentrações de GRSP e colonização por fungos micorrízicos arbusculares quando comparado ao sistema de preparo convencional (não conservacionista); uma vez que este último sistema causa uma maior perturbação mecânica na rede de hifas (HOLÁTKO et al., 2021). Dentro do sistema de NT, um parâmetro que também pode afetar as concentrações de GRSP são as práticas de rotação, sucessão e consorciação de culturas; como verificado nos resultados do atributo entre as áreas de NT, NT+B e NF (Tabela 7).

Recentemente, Guhra et al. (2022) definiram a agregação biogênica como a soma de todos os processos exercidos ou mediados pela biota do solo que desencadeiam ou alteram processos de agregação física (p. ex., compactação por estresse mecânico devido ao crescimento das raízes) e química (p. ex., por excreção de matéria orgânica que atua como revestimento ou agente de agregação). De modo geral, é possível observar no estudo que os agregados biogênicos apresentaram predominantemente valores superiores de POXC, GRSP-EE e GRSP-T em comparação aos fisiogênicos (Tabela 7; camada de 0–0,10 m).

Os maiores teores de POXC observados nos agregados biogênicos (Tabelas 7; camada de 0–0,05 m) evidenciam o predomínio de material orgânico de maior labilidade (maior biodisponibilidade), sendo que a incorporação e manutenção desse material é favorecida nos agregados biogênicos em virtude da fauna do solo e sistema radicular das plantas, principalmente sob sistema plantio direto (LOSS et al., 2014; MERGEN JUNIOR et al., 2019; PINTO et al., 2021). Esse padrão também foi verificado por outros autores avaliando diferentes frações da MOS, com destaque para: Loss et al. (2014), Melo et al. (2019b) e Ferreira et al. (2020) com carbono das frações ácido fúlvico e húmico; e Silva Neto et al. (2021) com carbono da biomassa microbiana. Reforçando a hipótese de que agregados biogênicos conduzem à melhoria da qualidade do solo, principalmente no que diz respeito a sua maior capacidade de preservação e acúmulo das frações mais solúveis da MOS.

No Sudeste do Brasil, Schultz et al. (2019) também verificaram maiores teores de POXC em agregados biogênicos das áreas de vegetação arbórea (*Caesalpinia echinata*, *Pachira aquática*, *Hevea brasiliensis* e *Matayba guianensis*) sob Argissolo Vermelho-Amarelo (*Acrisols*). Segundo os autores, os resultados de POXC em conjunto aos dados de carbono orgânico particulado e associado aos minerais indicam que os agregados biogênicos favorecem a proteção e estabilização do carbono no solo, assim como se apresentam como potenciais reservatórios de nutrientes. Comparando o POXC à outras frações da MOS,

Culman et al. (2012a) verificaram forte relação entre POXC e frações menores e mais pesadas de carbono orgânico particulado; indicando que o POXC reflete um compartimento mais processado e estabilizado do carbono lábil no solo. Os autores complementam concluindo que a sensibilidade do método e a relativa facilidade de quantificação sugerem que o POXC pode ser utilizado para avaliar rotineiramente o carbono do solo biologicamente ativo. Os maiores teores de WDC nos agregados biogênicos (Tabela 6; camada de 0–0,10 m) podem ser explicados pelos teores de POXC mais elevados (Tabela 7; camada de 0–0,05 m), uma vez que a relação entre as classes de WDC e WRC depende do balanço de carga na superfície dos minerais (MELO et al., 2021).

Os maiores teores de GRSP-EE e GRSP-T quantificados nos agregados biogênicos em comparação aos fisiogênicos (proporcionalmente; Tabela 7) estão relacionados aos agentes biológicos responsáveis pela formação desses agregados, com destaque para os fungos micorrízicos arbusculares. Estudos vêm mostrando que os fungos têm um papel mais proeminente na agregação em comparação às bactérias; pois os fungos contribuem com três mecanismos de agregação: emaranhamento físico, produção de substâncias hidrofóbicas e produção de polissacarídeos extracelulares. No Senegal, Sall et al. (2016) constataram que a atividade fúngica desempenhou um papel importante na formação de macroagregados, principalmente em solos de textura arenosa. Outro fator interessante nesses resultados está na possibilidade da validação do método de separação das classes de agregados (BULLOCK et al., 1985; PULLEMAN et al., 2005; PEREIRA et al., 2021) a partir de uma análise bioquímica semi-quantitativa (método do citrato de sódio – WRIGHT e UPADHYAYA, 1996; WRIGHT e UPADHYAYA, 1998; RILLIG, 2004).

Os fungos micorrízicos arbusculares e seus exsudatos (incluindo GRSP) podem diminuir a permeabilidade da superfície do solo, aumentando sua hidrofobicidade e estabilizando os agregados (HOLÁTKO et al., 2021); influenciando no indicador MWD. Os polissacarídeos da GRSP são pegajosos e mantêm os agregados menores juntos; os íons de ferro presentes em sua composição (2,0 a 12,0%) criam pontes ligando minerais de argila e aminoácidos alifáticos; na qual os complexos de substâncias orgânicas (GRSP ou humina) e minerais (argila) formam uma camada hidrofóbica que protege o solo, como por exemplo da erosão hídrica e eólica (NICHOLS e WRIGHT, 2004). A GRSP também contribui para o aumento do estoque de carbono orgânico e está significativamente correlacionada ao nitrogênio em todos os tipos de solo (WILSON et al., 2009).

Embora os atributos MWD, POXC, GRSP-EE e GRSP-T estejam mais associados à área de PP no estudo das ACPs (Figuras 9 e 10) os mesmos também colaboram para a separação dos agregados biogênicos (quadrante inferior direito) e fisiogênicos (quadrante inferior esquerdo) das áreas de NT e NT+B em superfície (Figura 9); padrão que não foi verificado em subsuperfície (Figura 10). Os resultados das ACPs reforçam os valores superiores desses atributos nos agregados biogênicos; e que a contribuição da via biogênica nas propriedades do solo pode ser mais expressiva em sistemas conservacionistas (p. ex., sistema plantio direto) e na camada mais superficial do solo.

4.7. CONCLUSÕES

Sistemas de produção de grãos (soja/milho e milho-braquiária/soja), pastagens e ambientes não antropizados (vegetação típica do bioma Mata Atlântica) influenciaram de maneira diferenciada a agregação e as concentrações das frações orgânicas associadas à estabilidade dos agregados. As condições edafo-ambientais do sistema de pastagem promoveram maior estabilização de macro e microagregados; e favoreceram a manutenção e armazenamento de carbono orgânico solúvel e das frações de glomalina em relação aos sistemas de produção de grãos. A adoção do consórcio milho e *Urochloa ruziziensis* após seis anos em cultivos de inverno foi eficiente no aumento da estabilidade de macroagregados e das concentrações da fração total de glomalina nos agregados biogênicos das camadas subsuperficiais em comparação à sucessão soja/milho.

A agregação biogênica proporcionou uma maior concentração de carbono orgânico lábil; e contribuiu para a elevação da estabilidade dos macroagregados e os teores da proteína do solo relacionada à glomalina. Sugerindo uma melhoria nas propriedades do solo e, conseqüentemente, na qualidade da “camada arável”.

4.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; BERBARA, R. L. L.; GARCÍA, A. C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. **Sci Tot Envir.**, v.658, p.901–911, 2019.
- BATISTA, I.; CORREIA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; MELLO, N. A. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no Cerrado, MS. **Semina**, v.34, p.1535–1548, 2013.
- BOSSUYT, H.; DENEFF, K.; SIX, J.; FREY, S. D.; MERCKX, R.; PAUSTIAN, K. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. **Appl Soil Ecol.**, v.16, p.195–208, 2001.
- BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. F.; INAGAKI, T. M.; BOER, A.; QUADROS NETO, C.; FERREIRA, A. O.; CANALLI, L. B.; SANTOS, J. B. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregates classes influenced by surface liming in a no till system. **Geoderma**, v.170, p.80–8, 2012.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, v.124, p.3–22, 2005.
- BULLOCK, P.; FEDEROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Albrighton, England: Waine Research Publications; 1985.
- CHENG, M.; XIANG, Y.; XUE, Z.; AN, S.; DARBOUX, F. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. **Catena**, v.124, p.77–84, 2015.
- CULMAN, S. W.; FREEMAN, M.; SNAPP, S. S. **Procedure for the determination of permanganate oxidizable carbon**. Hickory Corners, MI: Kellogg Biological Station-Long Term Ecological Research Protocols. 2012b.
- CULMAN, S. W.; SNAPP, S. S.; FREEMAN, M. A.; SCHIPANSKI, M. E.; BENISTON, J.; LAL, R.; DRINKWATER, L. E.; FRANZLUEBBERS, A. J.; GLOVER, J. D.; GRANDY, A. S.; LEE, J.; SIX, J.; MAUL, J. E.; MIRSKY, S. B.; SPARGO, J. T.; WANDER, M. M. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. **Soil Sci Soc Am J.**, v.76, p.494–504, 2012a.
- CULMAN, S. W.; SNAPP, S. S.; GREEN, J. M.; GENTRY, L. E. Short- and long-term labile soil carbon and nitrogen dynamics reflect management and predict corn agronomic performance. **Agron J.**, v.105, p.493–502, 2013.
- DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesq Agropec Bras.**, v.51, p.1003–1020, 2016.
- DORAN, J. W. Soil health and global sustainability: Translating science into practice. *Agric Ecosyst Env.*, v.88, p.119–127, 2002.
- FERREIRA, C. R.; SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; GUEDES, J. N.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil Till Res.**, v.198, p.104533, 2020.

- FIGUEIREDO, A.; MELO, T. R.; OLIVEIRA, J. C. S.; MACHADO, W.; OLIVEIRA, J. F.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; GUIMARÃES, M. F. The no-tillage, with crop rotation or succession, can increase the degree of clay dispersion in the superficial layer of highly weathered soils after 24 years. **Semina**, v.42, p.57–70, 2021.
- FREY, S. D. Mycorrhizal fungi as mediators of soil organic matter dynamics. *Annual Rev Ecol Evol Syst.*, v.50, p.237–259, 2019.
- GAO, W. Q.; WANG, P.; WU, Q. S. Functions and application of glomalin-related soil proteins: A review. **Sains Malays.**, v.48, p.111 – 119, 2019.
- GUHRA, T.; STOLZE, K.; TOTSCHKE, K. U. Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates. **Soil Biol Biochem.**, v.164, p.108483, 2022.
- HOLÁTKO, J.; PRICHYSTALOVA, J.; HAMMERSCHMIEDT, T.; DATTA, R.; MEENA, R. S.; SUDOMA, M.; PECINA, V.; ELBL, J.; KINTL, A.; KUCERIK, J.; DANISH, S.; FAHAD, S.; LATAL, O.; BRTNICKY, M. Glomalin: A key indicator for soil carbon stabilization. In: DATTA, R.; MEENA, R. S. (Eds.) **Soil carbon stabilization to mitigate climate change**. Singapore: Springer. p. 47–82, 2021.
- HURISSO, T. T.; CULMAN, S. W.; HORWATH, W. R.; WADE, J.; CASS, D.; BENISTON, J. W.; BOWLES, T. M.; GRANDY, A. S.; FRANZLUEBBERS, A. J.; SCHIPANSKI, M. E.; LUCAS, S. T.; UGARTE, C. M. Comparison of permanganate-oxidizable carbon and mineralizable carbon for assessment of organic matter stabilization and mineralization. **Soil Sci Soc Am J.**, v.80, p.1352–1364, 2016.
- IGWE, C. A.; OBALUM, S. E. Microaggregate stability of tropical soils and its roles on soil erosion hazard prediction, advances in agrophysical research. In: GRUNDAS, S.; STĘPNIEWSKI, A. Editors. **Advances in agrophysical research**. Rijeka, Croácia: BoD - Books on Demand. p.175–192, 2013.
- KEMPER, W. D.; KOCH, E. J. **Aggregate stability of soils from the western portions of the United States and Canada**. Washington, DC: United States Department of Agriculture, United States Government Printing Office. 1966.
- KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. Editor. **Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. p.425–442, 1986.
- KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H.; STONE, L. F.; COBUCCI, T. Integração lavoura-pecuária e o manejo de plantas daninhas. Piracicaba: Potafos; 2004. (**Informações Agrônomicas**, 106).
- LAVELLE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; BEDANO, J. C.; BLANCHART, E.; GALINDO, V.; GRIMALDI, M.; JIMENEZ, J. J.; VELASQUEZ, E.; ZANGERLÉ, A. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta Oecol.**, v.105, p.103561, 2020.
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. L.; BEUTLER, S. J. Soil fertility, physical and chemical organic matter fractions, natural ^{13}C and ^{15}N abundance in biogenic and physicogenic aggregates in areas under different land use systems. **Soil Res.**, v.52, p.685–697, 2014.
- MELO, T. R.; FIGUEIREDO, A.; TAVARES FILHO, J. Clay behavior following macroaggregate breakdown in Ferralsols. **Soil Till Res.**, v.207, p.104862, 2021.

- MELO, T. R.; PEREIRA, M. G.; BARBOSA, G. M. C.; SILVA NETO, E. C.; ANDRELLO, A. C.; FILHO, J. T. Biogenic aggregation intensifies soil improvement caused by manures. **Soil Till Res.**, v.190, p.186–193, 2019b.
- MELO, T. R.; RENGASAMY, P.; FIGUEIREDO, A.; BARBOSA, G. B. C.; TAVARES FILHO, J. A new approach on the structural stability of soils: Method proposal. **Soil Till Res.**, v.193, p.171–179, 2019a.
- MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E.; FERREIRA, G. W.; COMIN, J. J.; LOVATO, P. E.; BRUNETTO, G. Atributos químicos em agregados biogênicos e fisiogênicos de solo submetido à aplicação com dejetos suínos. **Rev Bras Cienc Agrar.**, v.14, p.e5620, 2019.
- MORALES, V. L.; PARLANGE, J-Y.; STEENHUIS, T. S. Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix? A review. **J Hydrol.**, v.393, p.29–36, 2010.
- NICHOLS, K. A.; WRIGHT, S. F. Contributions of soil fungi to organic matter in agricultural soils. In: MAGDOFF, F.; WEIL, R. Editors. **Functions and management of soil organic matter in agroecosystems**. Washington DC: CRC Press. p.179–198, 2004.
- NUNES, A. L. P.; CORTEZ, G. L. S.; MELO, T. R.; FIGUEIREDO, A.; WANDSCHEER, C. A. R.; BORTOLUZZI, J.; BROWN, G. G.; BARTZ, M. L. C.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F. Farm systems, soil chemical properties, and clay dispersion in watershed areas. **Pesq Agrop Bras.**, v.55, p.e01279, 2020.
- OADES, J. M. Soil organic-matter and structural stability - mechanisms and implications for management. **Plant Soil**, v.76, p.319–337, 1984.
- PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BATISTA, I.; MELO, T. R.; SILVA NETO, E. C.; PINTO, L. A. S. R. Biogenic and physicogenic aggregates: formation pathways, assessment techniques, and influence on soil properties. **Rev Bras Cienc Solo**, v.45, p.e0210108, 2021.
- PINTO, L. A. S. R.; TORRES, J. L. R.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JÚNIOR, W. F.; LIMA, S. S.; BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G. Aggregates physicogenic and biogenic under different management systems in the Cerrado region, Brazil. **Rev Bras Cienc Solo**, v.45, p.e0200114, 2021.
- PULLEMAN, M. M.; SIX, J.; MARINISSEN, J. C. Y.; JONGMANS, A. G. Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. **Appl Soil Ecol.**, v.29, p.1–15, 2005.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2020.
- RENGASAMY, P. Clay dispersion. In: COUGHLAN, K.; CRESSWELL, H.; MCKENZIE, N. Editors. **Soil physical measurement and interpretation for land evaluation**. Collingwood: CSIRO Publishing. p.200–210, 2002.
- RENGASAMY, P.; TAVAKKOLI, E.; MCDONALD, G. K. Exchangeable cations and clay dispersion: Net dispersive charge, a new concept for dispersive soil. **Eur J Soil Sci.**, v.67, p.659–665, 2016.
- RILLIG, M. C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. **Can J Soil Sci.**, v.84, p.355–363, 2004.
- RILLIG, M. C.; MUMMEY, D. L. Mycorrhizas and soil structure. **New Phytol.**, v.171, p.41–53, 2006.

- ROSOLEM, C. A.; LI, Y.; GARCIA, R. A. Soil carbon as affected by cover crops under no-till under tropical climate. **Soil Use Manag.**, v.32, p.495–503, 2016.
- ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Organic matter and soil aggregation in agricultural systems with different adoption times. **Semina**, v.40, p.3443–3460, 2019.
- SALL, S. N.; MASSE, D.; DIALLO, N. H.; SOW, T. M.; HIEN, E.; GUISSSE, A. Effects of residue quality and soil mineral N on microbial activities and soil aggregation in a tropical sandy soil in Senegal. **Eur J Soil Biol.**, v.75, p.62–69, 2016.
- SANTOS, A.; SILVA, C. F.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; SALES, M.; FAUSTINO, L. L.; BARRETO-GARCIA, P. A. B. Glomalin in soil aggregates under different forest and pasture systems in the North of Rio de Janeiro state, Brazil. **Environ Sustain Indic.**, v.8, p.100088, 2020.
- SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; MELO, T. R.; CORRÊA NETO, T. A.; ANJOS, L. H. C.; CORREIA, M. E. F. How the biological activity of Oligochaeta shape soil aggregation and influence the soil functions. In: **Global Symposium on Soil Biodiversity**. p.19–22 Apr 2021; Rome, Italy. Rome: FAO HQ; 2021.
- SILVA NETO, L. F.; SILVA, I. F.; INDA, A. V.; NASCIMENTO, P. C.; BORTOLO, L. Atributos físicos e químicos de agregados pedogênicos e de coprólitos de minhocas em diferentes classes de solos da Paraíba. **Cienc Agrot.**, v.34, p.1365–1371, 2010.
- SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil Till Res.**, v.79, p.7–31, 2004.
- SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. **Soil Sci Soc Am J.**, v.64, p.1042–1049, 2000.
- STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. **Soil Till Res.**, v.161, p.71–78, 2016.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEM, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa, 573p., 2017.
- TERNAN, J. L.; ELMES, A.; WILLIAMS, A. G.; HARTLEY, R. Aggregate stability of soils in central Spain and the role of land management. **Earth Surf Proc Landf.**, v.21, p.181–193, 1996.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **J Soil Sci.**, v.62, p.141–163, 1982.
- TIVET, F.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; BORSZOWSKI, P. R.; SANTOS, J. B.; FARIAS, A.; EURICH, G.; HARTMAN, D. C.; JUNIOR, M. N. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil Till Res.**, v.126, p.203–218, 2013.
- VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P. Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil-based ecosystem services in agricultural landscapes. **Acta Oecol.**, v.100, p.103446, 2019.
- VELASQUEZ, E.; PELOSI, C.; BRUNET, D.; GRIMALD, M.; MARTINS, M.; RENDEIRO, A. C.; BARRIOS, E.; LAVELLE, P. This ped is my ped: visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. **Pedobiologia**, v.51, p.75–87, 2007.

- WEIL, R. R.; ISLAM, K. R.; STINE, M. A.; GRUVER, J. B.; SAMSON-LIEBIG, S. E. Estimating active carbon for soil quality assessment: a simplified method for lab and field use. **Am J Altern Agric.**, v.18, p.03–17, 2003.
- WILSON, G. W.; RICE, C. W.; RILLIG, M. C.; SPRINGER, A.; HARTNETT, D. C. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: Results from long-term field experiments. **Ecol Lett.**, v.12, p.452–461, 2009.
- WRIGHT, S. F.; FRANKE-SNYDER, M.; MORTON, J. B.; UPADHYAYA, A. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. **Plant Soil**, v.181, p.193–203, 1996.
- WRIGHT, S. F.; GREEN, V. S.; CAVIGELLI, M. A. Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. **Soil Till Res.**, v.94, p.546–549, 2007.
- WRIGHT, S. F.; RILLIG, M. C.; NICHOLS, K. A. Glomalin: a soil protein important in carbon sequestration. **Abstr. Pap Am Chem Soc.**, v.220, p.721–725, 2000.
- WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant Soil**, v.198, p.97–107, 1998.
- WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Sci.**, v.161, p.575–586, 1996.
- YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **J Am Soc Agron.**, v.28, p.337–351, 1936.

5. CAPÍTULO III

SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA REGIÃO SUBTROPICAL DO BRASIL: AGREGADOS BIOGÊNICOS NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SOLOS DE TEXTURA ARENOSA

Artigo submetido à revista *Experimental Agriculture* em 28/08/2024, intitulado “*Management systems in the subtropical region of Brazil: aggregation in the assessment of the chemical quality of fragile soils*”.

5.1. RESUMO

A diversidade de espécies vegetais em sistemas de produção pode afetar de forma distinta os teores de nutrientes em agregados formados a partir de diferentes vias: biogênica (formados por processos biológicos) ou fisiogênica (resultante de ações químicas e físicas). Adicionalmente, nos agregados biogênicos pode ser verificado um maior acúmulo e disponibilidade de nutrientes em comparação aos fisiogênicos. O estudo teve como objetivos a) verificar a relação entre os atributos químicos associados a fertilidade de agregados biogênicos e fisiogênicos; b) avaliar os teores totais de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio e suas respectivas razões estequiométricas nestes agregados; e c) analisar as interações entre as frações de fósforo e vias de formação biogênica e fisiogênica. Foram avaliados três sistemas de manejo (pastagem permanente, PP; sistema plantio direto, NT; e sistema plantio direto + *Urochloa*, NT+B) e uma área de referência (vegetação típica do bioma Mata Atlântica, NF) localizados sob solo com textura arenosa nos horizontes superficiais. Em cada área amostral foram coletadas amostras compostas indeformadas em duas camadas. Os agregados foram separados, identificados e classificados quanto à sua origem ou via de formação. Os resultados dos atributos químicos de fertilidade possibilitaram identificar diferenças, principalmente entre os sistemas de uso e manejo do solo, com destaque para as áreas de PP e NT+B. Somente na área de PP foi observado aumento significativo dos teores totais dos nutrientes em ambas as vias de formação, sendo quantificados nesses agregados os maiores teores de TC, TN, TP, TK e P orgânico e inorgânico. O sistema de NT+B favoreceu o aumento proporcional dos teores de TC em relação aos agregados das áreas de NF e NT, principalmente na camada subsuperficial (variando de 31 a 44%). Nos agregados biogênicos observaram-se aumentos dos teores de TC e TN em comparação aos fisiogênicos, principalmente nas áreas de produção de grãos (8 a 30% para TC; e 56 a 239% para TN). Também foi verificado nos agregados biogênicos os menores valores da relação C/N em superfície (< 30); maiores valores da relação C/P em subsuperfície (> 33); e maior participação da fração de P orgânico no TP na camada superficial (entre 26 e 42%). Os atributos quantificados nos agregados biogênicos e fisiogênicos foram afetados de forma distinta entre os sistemas de produção agrícola. Os resultados verificados para os agregados biogênicos reiteram a importância do estudo das vias de formação na avaliação da qualidade química do solo, principalmente em áreas de manejo conservacionista.

Palavras-chave: Indicadores da qualidade química. Vias de formação dos agregados. Dinâmica dos nutrientes.

5.2. ABSTRACT

The diversity of plant species in production systems can have a different effect on the nutrient content of aggregates formed by different routes: biogenic (formed by biological processes) or physicogenic (resulting from chemical and physical actions). In addition, biogenic aggregates can have a greater accumulation and availability of nutrients than physicogenic aggregates. The objectives of the study were a) to verify the relationship between the chemical attributes associated with the fertility of biogenic and physicogenic aggregates; b) to evaluate the total carbon, nitrogen, phosphorus and potassium contents and their respective stoichiometric ratios in these aggregates; and c) to analyze the interactions between the phosphorus fractions and the biogenic and physicogenic formation pathways. Three management systems were evaluated (permanent pasture, PP; no-tillage system, NT; and no-tillage system + *Urochloa*, NT+B) and a reference area (typical vegetation of the Atlantic Forest biome, NF) located on soil with a sandy texture in the surface horizons. In each sampling area, undeformed composite samples were collected in two layers. The aggregates were separated, identified and classified according to their origin or formation pathway. The results of the chemical fertility attributes made it possible to identify differences, especially between the soil use and management systems, with the PP and NT+B areas standing out. Only in the PP area was there a significant increase in total nutrient levels in both formation pathway, with the highest levels of TC, TN, TP, TK and organic and inorganic P being quantified in these aggregates. The NT+B system favored a proportional increase in TC content compared to the aggregates in the NF and NT areas, especially in the subsurface layer (ranging from 31 to 44%). In the biogenic aggregates, there were increases in the TC and TN contents compared to the physicogenic ones, especially in the grain production areas (8 to 30% for TC; and 56 to 239% for TN). Biogenic aggregates were also found to have lower C/N ratio values on the surface (< 30); higher C/P ratio values in the subsurface (> 33); and a greater share of the organic P fraction in TP in the surface layer (between 26 and 42%). The attributes quantified in the biogenic and physicogenic aggregates were affected differently between the agricultural production systems. The results verified for biogenic aggregates reiterate the importance of studying the formation pathway when assessing the chemical quality of the soil, especially in conservation management areas.

Key words: Indicators of chemical quality. Aggregate formation pathways. Nutrient dynamics.

5.3. INTRODUÇÃO

O uso eficiente de nutrientes na agricultura é vital para a sustentabilidade das áreas de produção (grãos, fibras, materiais energéticos, cana-de-açúcar, silvicultura e pastagens) e está intimamente ligado à ciclagem de nutrientes. Podendo ser otimizado através da adoção de práticas ou sistemas de manejo que tenham como objetivo a melhoria da fertilidade do solo; a manutenção da biodiversidade; o aumento do sequestro de carbono no solo; e a redução dos efeitos climáticos negativos (BAPTISTELLA et al., 2020). Neste contexto, a ciclagem de nutrientes pode ser considerada um processo favorecido em sistemas de produção baseados no modelo da Agricultura Conservacionista. Esse modelo visa aumentar o desenvolvimento sustentável da agricultura nos aspectos socioeconômicos; gerar competitividade para o agronegócio; garantir segurança e qualidade alimentar; e preservar o ambiente a qualidade das terras (KASSAM et al., 2009, 2019; DENARDIN et al., 2012; PINTO et al., 2021a).

Nas áreas agrícolas em regiões de clima tropical e subtropical, no Brasil, verifica-se uma acelerada ciclagem de nutrientes. Na região Oeste do Paraná (Brasil), a maioria dos solos das áreas de produção apresentam baixos teores de argila (inferiores a 200 g kg⁻¹) e altos valores de areia (FRANCHINI et al., 2016), considerados mais frágeis em termos de textura (DONAGEMMA et al., 2016). Adicionalmente, em grande parte dessas áreas de textura arenosa, o clima é classificado como úmido subtropical (Cfa), com verões quentes (ALVARES et al., 2013); o que proporciona elevada evapotranspiração. Essa combinação de textura e condição climática intensifica as transformações da matéria orgânica do solo (MOS); diminui a capacidade de retenção e armazenamento de água e nutrientes no solo; reduz a atividade biológica; e aumenta a suscetibilidade à erosão.

Neste cenário, a diversificação vegetal do ambiente de produção (consórcio e rotação de culturas) associada as práticas ou sistemas conservacionistas de manejo do solo (pastagens perenes, sistema plantio direto, integrações lavoura-pecuária ou lavoura-pecuária-floresta) pode minimizar esses problemas. Além de diminuir os custos de produção, manter a produtividade e mitigar os efeitos das emissões dos gases de efeito estufa (CERRI et al., 2023). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) publicou um protocolo mundial ressaltando um conjunto de indicadores edáficos recomendados para a avaliação do manejo sustentável dos solos, levando em consideração sua eficiência, praticidade e baixo custo-benefício (FAO-ITPS, 2020).

Neste documento, a FAO destaca o carbono do solo como um indicador que reflete a qualidade química, física e biológica do solo, respondendo às mudanças através da implementação de práticas mais sustentáveis. Segundo os autores, o carbono apresenta relação direta com outros atributos do solo, como a disponibilidade de nutrientes; estrutura e agregação; porosidade; capacidade de retenção de água; e presença de macro, meso e micro fauna. O estudo das vias de formação (ou origens) dos agregados também tem sido utilizado com êxito na avaliação da qualidade física, química e biológica do solo. Os mecanismos de formação dos agregados envolvem processos físicos e químicos (agregados fisiogênicos ou fisicogênicos) e biológicos (agregados biogênicos). A diferenciação entre as classes morfológicas de agregados é realizada de acordo com sua gênese, origem ou vias de formação (BULLOCK et al., 1985; PULLEMAN et al., 2005; VELASQUEZ et al., 2007; BATISTA et al., 2013; LOSS et al., 2014; PEREIRA et al., 2021).

Os agregados biogênicos podem ser física e quimicamente diferenciados dos fisiogênicos, sendo definidos como unidades estruturais formadas pela ação da MOS, raízes e exsudatos microbianos, para além da tensão mecânica (compressão) das raízes e hifas, e da

atividade da fauna edáfica (MELO et al., 2019). Esses agregados influenciam a funcionalidade de importantes processos no solo, como o aumento da repelência à água; a maior capacidade de armazenamento de nutrientes e contaminantes; e o aumento do fornecimento de habitats (GUHRA et al., 2022). Diferentes estudos demonstraram que os agregados biogênicos são importantes núcleos de estabilização e acúmulo de MOS (MERGEN JUNIOR et al., 2019; MELO et al., 2019; SUÁREZ et al., 2019; FERREIRA et al., 2020; SCHULTZ et al., 2019; PINTO et al., 2021a,b; SILVA NETO et al., 2021; FONSECA JÚNIOR et al., 2023; ROSSI et al., 2023a,b). Entretanto, pouco se sabe sobre as relações entre carbono e outros nutrientes; e as formas do fósforo (P) nos agregados biogênicos e fisiogênicos, bem como se eles podem atuar como reservatórios de P.

As razões estequiométricas C/N, C/P e N/P são indicadores da composição e qualidade dos resíduos orgânicos e MOS, especialmente quanto a eficiência dos mecanismos de equilíbrio e ciclagem de nutrientes no solo (liberação, mineralização e imobilização) (CLEVELAND e LIPTZIN, 2007; MULLEN, 2011; BUI e HENDERSON, 2013; ZINN et al., 2018; OLIVEIRA FILHO et al., 2019; ZHANG et al., 2019). O estudo da dinâmica do P é baseado na quantificação das formas (inorgânicas e orgânicas) do nutriente no solo, separadas através de técnicas de fracionamento químico sequencial em que o elemento é compartimentalizado em frações de acordo com sua labilidade, e presença ou ausência de compostos orgânicos na ligação (HEDLEY et al., 1982; GATIBONI et al., 2021). Gatiboni e Condron (2021) propuseram uma técnica alternativa de extração e quantificação de P em várias frações, que pode ser finalizada em menor tempo. Segundo os autores, a técnica proposta é fácil e de rápida execução que pode ser utilizada para investigar os impactos do uso e manejo das terras na libilidade e disponibilidade de P nos solos dos diferentes agroecossistemas.

Baseado nas considerações apresentadas, neste estudo foram estabelecidas as seguintes hipóteses: a) a diversidade de espécies vegetais em sistemas de produção agrícola pode afetar de forma distinta os teores de nutrientes em agregados formados a partir de diferentes vias; e b) nos agregados biogênicos pode ser verificado um maior acúmulo e disponibilidade de nutrientes quando comparados aos fisiogênicos.

Para testar as hipóteses, o estudo teve como objetivos: i) verificar a relação entre os atributos químicos associados a fertilidade de agregados biogênicos e fisiogênicos em áreas de pastagem, sistemas plantio direto e vegetação típica de Mata Atlântica; ii) avaliar os teores totais de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio e suas respectivas razões estequiométricas nestes agregados; e iii) analisar as interações entre as frações de fósforo e as vias de formação biogênica e fisiogênica.

5.4. MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1. Localização, clima e solo da área de estudo

A localização, clima e o solo da área de estudo estão apresentados no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.1.

5.4.2. Histórico das áreas avaliadas

O histórico, descrição e localização detalhada das áreas amostrais encontram-se apresentados na Tabela 1 no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2. A caracterização dos atributos físicos e químicos até 0,10 m de profundidade está apresentada na Tabela 2 no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2.

5.4.3. Coleta das amostras e separação dos agregados

A amostragem e a identificação das vias de formação dos agregados estão apresentadas no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.3. Os agregados de cada classe (biogênicos e fisiogênicos) foram destorroados e passados por peneira de 2,0 mm de malha e convertido na fração terra fina seca ao ar (TFSA). Este material foi utilizado para as análises químicas (TEIXEIRA et al., 2017).

5.4.4. Atributos químicos associados a fertilidade

Para a determinação dos cátions trocáveis Ca^{2+} e Mg^{2+} , foi realizada a extração com solução de cloreto de potássio (KCl) 1 mol L^{-1} (proporção solo:solução 1:10 m:v) sendo os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Ca^{2+} determinados por complexometria. O Mg^{2+} foi obtido pela diferença. Para a determinação de K^{+} trocável (K) e P disponível (P) foi utilizada a solução de ácido clorídrico (HCl) 0,05 mol L^{-1} e (H_2SO_4) 0,0125 mol L^{-1} (proporção solo:solução 1:10 m:v). Na qual K^{+} foi determinado por fotometria de chama e P disponível foi determinado por colorimetria (630 nm) após a redução do complexo fosfomolibdico com ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$), na presença de sal de bismuto. A acidez potencial do solo (H+Al) foi extraída com solução de acetato de cálcio ($\text{C}_4\text{H}_6\text{CaO}_4$) 0,5 mol L^{-1} , ajustado a pH 7,0 (proporção solo:solução 1:15 m:v) e determinada por titulação com NaOH 0,025 mol L^{-1} e fenolftaleína como indicador (TEIXEIRA et al., 2017).

5.4.5. Carbono, nitrogênio, fósforo e potássio total e razões estequiométricas

O carbono e o nitrogênio total (TC e TN) foram determinados pelo método de combustão a seco, em analisador elementar Perkin Elmer 2400 CHN. As análises foram realizadas utilizando amostras de agregados macerados em almofariz e passado por peneira de 100 mesh (149 μm) (NELSON e SOMMERS, 1996; SATO et al., 2014). Os teores de fósforo e potássio total (TP e TK, respectivamente) foram extraídos e determinados segundo Tedesco et al. (1995). Posteriormente foram calculadas as razões estequiométricas C/N, C/P e N/P.

5.4.6. Fracionamento do P

As frações de P foram extraídas de acordo com o método proposto por Gatiboni e Condron (2021). A partir de 0,50 g de TFSA foram extraídas sequencialmente cinco frações

de P com diferentes graus de labilidade e potencial de disponibilidade, a saber: P solúvel com solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} (SOLP) (lábil); P disponível com solução de extratora Mehlich 3 (MEHLICH, 1984) (M_3P) (lábil); P inorgânico e P autoclavado extraído com solução de NaOH 0,5 mol L^{-1} (OHPi e autoclaveP , respectivamente) (moderadamente lábil); e P extraído com HCl 1 mol L^{-1} (HClP) (moderadamente lábil). A determinação das concentrações de P em cada fração foi realizada por colorimetria (MURPHY e RILEY, 1962). O P orgânico extraído com NaOH (OHPo) foi obtido pela diferença entre o autoclaveP e o OHPi . Também se quantificou o P ocluso (OCLP) (não lábil) constituído pelas formas Pi e Po altamente recalcitrantes que não foram extraídos por nenhuma das soluções anteriores (CaCl_2 0,01 mol L^{-1} , Mehlich 3, NaOH 0,5 mol L^{-1} e HCl 1 mol L^{-1}). O OCLP foi obtido por digestão sulfúrica (TEDESCO et al., 1995).

5.4.7. Análises estatísticas

O delineamento utilizado foi em esquema fatorial 4×2 em delineamento inteiramente casualizado. Os dados foram testados quanto à normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, e quanto à homocedasticidade das variâncias pelo teste de Bartlett. As variáveis que não apresentaram distribuição normal ou homocedasticidade foram transformadas de acordo com o teste de Box-Cox e foram novamente testadas. Os dados, exceto proporções de P, foram avaliados por análise de variância seguido pelo teste de Tukey quando os pressupostos de normalidade e homocedasticidade foram atendidos (variáveis transformadas ou não).

Nos casos em que a transformação dos dados foi ineficiente, o teste de Kruskal-Wallis seguido pelo critério de diferença mínima significativa de Fisher foram utilizados para a avaliação dos sistemas de uso e manejo do solo em cada tipo de agregado, e o teste de Wilcoxon foi utilizado para comparar variáveis entre os agregados em cada sistema de uso e manejo do solo. Todos os testes foram realizados à 5% de significância pelo Software R (R Core Team, 2020) utilizando os pacotes “ExpDes.pt” e “Ggplot2”.

Também foram realizadas as análises multivariadas de componentes principais (ACP) e dendrograma, que é um diagrama de árvore que exhibe os grupos formados por agrupamento hierárquico (clustering) de observações em cada passo e em seus níveis de dissimilaridade, ambos construídos com base nos dados dos atributos na camada de 0–0.10 m no Software R (R Core Team 2020) com os pacotes “FactoMineR”, “Factoextra”, “Stats”, “Dendextend”, “Igraph” e “Ggplot2”.

5.5. RESULTADOS

5.5.1. Caracterização dos atributos químicos associados a fertilidade

Os resultados dos atributos químicos de fertilidade possibilitaram identificar diferenças principalmente entre os sistemas de uso e manejo do solo, com destaque para os sistemas de pastagem e consórcio milho-braquiária (Tabela 8). Nos agregados biogênicos e fisiogênicos das áreas de PP, NT e NT+B foram quantificados os maiores teores de cálcio e magnésio trocáveis (Ca^{2+} e Mg^{2+}) e fósforo disponível (P), especialmente na camada superficial (0–0,05 m). Os maiores valores de acidez potencial (H+Al) foram verificados nos agregados das áreas de PP e NF na camada de 0–0,10 m, assim como os maiores teores de potássio trocável (K^+) nas áreas de PP e NT+B.

Nos agregados biogênicos da área de PP foram quantificados os teores mais elevados de Mg^{2+} e P disponível na camada de 0,05–0,10 m e os maiores valores de H+Al na camada de 0–0,10 m em comparação aos fisiogênicos. Entre as classes de agregados das demais áreas não foram observadas diferenças nos teores dos atributos químicos associados a fertilidade.

5.5.2. Carbono, nitrogênio, fósforo e potássio em suas concentrações totais

Os teores totais de carbono (TC), nitrogênio (TN), fósforo (TP) e potássio (TK) foram mais influenciados pelos sistemas de produção agrícola (Tabela 9). Somente na área de pastagem foi verificado aumento significativo dos teores totais dos nutrientes em ambas as vias de formação, sendo quantificados os maiores teores de TC, TN, TP e TK nos agregados da camada de 0–0,10 m.

Na área de NT+B foi verificado incremento dos teores de TC em comparação aos agregados das áreas de NT e NF na camada subsuperficial, com aumento de 36 a 44% nos agregados biogênicos e de 39 a 44% nos fisiogênicos em comparação a NT; e de 10 a 44% nos biogênicos e de 29 a 31% nos fisiogênicos em comparação a NF na camada de 0–0,10 m.

Não foi constatado aumento proporcional dos teores de TN, TP e TK quantificados nos agregados da área de NT+B em comparação as áreas de NT e NF (Tabela 9). Quanto as classes de agregados, em superfície os teores dos atributos TC e TN quantificados nos agregados biogênicos em comparação aos fisiogênicos foram proporcionalmente maiores em 8% (PP), 11% (NT+B), 13% (NF) e 30% (NT) para TC; e 56% (NF), 178% (NT) e 239% (NT+B) para TN na camada de 0–0,05 m. Padrão inverso foi observado em subsuperfície, em que os teores de TN nos agregados da via fisiogênica foram proporcionalmente maiores em 50% (NT+B) e 55% (NT) em comparação à via biogênica na camada de 0,05–0,10 m.

Tabela 8. Teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) trocáveis, fósforo disponível (P) e acidez potencial (H+Al) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de produção, região subtropical do Brasil.

	Bio	Phy	Bio	Phy	Bio	Phy	Bio	Phy	Bio	Phy
Áreas	----- Ca ²⁺ -----		----- Mg ²⁺ -----		----- H+Al -----		----- K ⁺ -----		----- P -----	
	----- cmol _c dm ⁻³ -----						----- mg dm ⁻³ -----			
	----- 0-0.05 m -----									
NT	2,29 aA	1,71 abA	1,04 aA	1,32 abA	0,92 bA	0,83 bA	125 bcA	108 bA	39 abA	38 abA
NT+B	2,14 aA	1,70 abA	1,27 aA	1,26 abA	1,45 bA	1,19 bA	192 abA	199 aA	53 aA	44 aA
PP	2,67 aA	2,77 aA	2,89 aA	2,25 aA	4,75 aA	3,80 aB	250 aA	272 aA	40 abA	34 abA
NF	0,73 bA	0,91 bA	0,80 bA	0,61 bA	3,76 aA	3,47 aA	90 cA	80 bA	15 bA	15 bA
	----- 0.05-0.10 m -----									
NT	1,16 abA	1,16 bA	0,88 bA	0,73 bA	1,02 bA	1,30 bA	71 bA	88 abA	42 abA	42 aA
NT+B	1,27 aA	1,35 bA	1,06 bA	1,17 abA	1,17 bA	1,11 bA	145 aA	134 aA	35 abA	37 aA
PP	1,92 aA	2,04 aA	2,15 aA	1,68 aB	3,17 aA	2,41 aB	177 aA	140 aA	46 aA	26 aB
NF	0,81 bA	0,69 cA	0,58 bA	0,72 bA	3,23 aA	2,79 aA	62 bA	56 bA	21 bA	19 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado (ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados; e Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher). NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; e NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica.

Tabela 9. Teores totais de carbono (TC), nitrogênio (TN), fósforo (TP) e potássio (TK) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de produção, região subtropical do Brasil.

Áreas	Bio	Phy	Bio	Phy	Bio	Phy	Bio	Phy
	----- TC -----	-----	----- TN -----	-----	----- TP -----	-----	----- TK -----	-----
	----- g kg ⁻¹ -----							
	----- 0–0,05 m -----							
NT	21,06 bA	16,23 bA	0,75 bA	0,27 bA	0,37 bA	0,37 bcA	0,28 cA	0,30 cA
NT+B	23,25 bA	20,95 bA	0,78 bA	0,23 bA	0,40 bA	0,41 bA	0,37 bcA	0,34 bcA
PP	38,18 aA	35,27 aA	3,43 aA	3,29 aA	1,26 aA	1,08 aA	0,54 aA	0,45 aB
NF	17,04 bA	15,09 bA	0,86 bA	0,55 bA	0,35 bA	0,35 cA	0,39 bA	0,42 abA
	----- 0,05–0,10 m -----							
NT	11,46 bA	11,67 bA	0,33 bA	0,51 bA	0,27 bB	0,39 bA	0,23 aA	0,24 bA
NT+B	16,51 bA	15,23 bA	0,48 bA	0,72 bA	0,34 bA	0,47 abA	0,25 aA	0,32 abA
PP	29,95 aA	25,50 aA	2,99 aA	2,37 aB	0,94 aA	0,87 aA	0,34 aA	0,33 abA
NF	11,50 bA	10,54 bA	0,45 bA	0,43 bA	0,28 bA	0,35 bA	0,35 aA	0,42 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado. ^{NS} Não significativo a 5% de probabilidade (ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados; e Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher). NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; e NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica.

5.5.3. Razões estequiométricas

Os valores das razões entre TC, TN e TP (C/N, C/P e N/P) apontaram diferenças entre os sistemas de uso e manejo e as classes de agregados, especialmente através da relação C/N (Tabela 10). Na camada superficial, os maiores valores da relação C/N foram quantificados nos agregados fisiogênicos das áreas de NT e NT+B, independente dos sistemas de produção e vias de formação dos agregados (0–0,05 m). Já na camada subsuperficial, foi verificado padrão inverso dos valores da relação C/N, em particular: nos agregados biogênicos das áreas de NT e NT+B foram constatados os maiores valores da relação C/N, também independentemente dos fatores avaliados (0,05–0,10 m). Os menores valores da relação C/N foram observados nos agregados da área de PP (0–0,10 m).

Entre os sistemas, os valores mais elevados da razão C/P foram verificados nos agregados das áreas de NT, NT+B e NF somente na camada superficial (0–0,05 m). Entre as classes de agregados, nos biogênicos foram observados valores superiores da razão C/P, provenientes das áreas de NT na camada de 0–0,10 m, e NT+B e NF na camada de 0,05–0,10 m. Para a relação N/P, os maiores valores foram verificados nos agregados da área de PP, seguidos dos agregados da área de NF na camada de 0–0,05 m. Na camada de 0,05–0,10 m os valores mais elevados da relação N/P foram quantificados nos agregados da área de PP. Em relação as vias de formação, somente na camada superficial os valores da relação N/P diferiram, com maiores valores observados nos agregados biogênicos das áreas de NT e NT+B em comparação aos fisiogênicos das mesmas áreas (0–0,05 m).

Tabela 10. Razões estequiométricas entre carbono, nitrogênio e fósforo (C/N, C/P e N/P, respectivamente) em suas concentrações totais de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de produção, região subtropical do Brasil.

Áreas	Bio ----- C/N -----	Phy ----- C/N -----	Bio ----- C/P -----	Phy ----- C/P -----	Bio ----- N/P -----	Phy ----- N/P -----
0–0,05 m						
NT	28 aB	60 aA	57 aA	44 abB	2,0 abA	0,7 cB
NT+B	30 aB	91 aA	58 aA	51 aA	1,9 bA	0,6 cB
PP	11 cA	11 cA	30 bA	33 bA	2,7 aA	3,0 aA
NF	20 bA	27 bA	49 aA	43 abA	2,4 abA	1,6 bA
0,05–0,10 m						
NT	35 aA	23 aB	42 aA	30 aB	1,2 bA	1,30 bA
NT+B	34 aA	21 aB	49 aA	32 aB	1,4 bA	1,50 bA
PP	10 bA	11 aA	33 aA	29 aA	3,2 aA	2,70 aA
NF	26 aA	25 aA	41 aA	30 aB	1,6 bA	1,20 bA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado. (ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados; e Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher). NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; e NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica.

5.5.4. Fracionamento do fósforo

Quanto aos resultados das frações de fósforo (P) (Tabela 11) verificou-se padrão similar ao observado para os teores dos atributos químicos de fertilidade (Tabelas 8) e quantificação dos teores de TC, TN e TP nos agregados (Tabelas 9). Foi constatado nos agregados da área de PP os maiores teores de fósforo em comparação aos sistemas de produção de grãos e sistema não antropizado, destacando: M_3P e $HClP$ (2 a 4 vezes maior nas frações extraídas com Mehlich 3 e HCl), $OCLP$ (2 a 5 vezes maior na fração oclusa), $OHPO$ (2 a 6 vezes maior para a fração orgânica extraída com NaOH) e $OHPI$ (3 a 8 vezes maior para a fração inorgânica extraída com NaOH) na camada de 0–0,10 m.

Adicionalmente nos agregados biogênicos e fisiogênicos da área de PP a fração de $OHPI$ foi a que apresentou maior participação dos teores de TP na camada superficial (35%) (Tabela 12; camada de 0–0,05 m). Na camada subsuperficial, destaque para as frações de $OHPI$ (31%) e $OCLP$ (28%) nos agregados biogênicos; e $OCLP$ (32%) e $OHPO$ (28%) nos fisiogênicos (Tabela 12; camada de 0,05–0,10 m).

Nos agregados biogênicos da área de NT+B foram quantificados teores intermediários da fração de $HClP$ em comparação à mesma classe de agregados das áreas de PP, NT e NF; e nos agregados das áreas de NT e NT+B foram observados teores mais elevados da fração de $OCLP$ em comparação à área de NF (0–0,10 m). Adicionalmente, as frações de $OHPO$ (variando de 27 a 32%) e $OCLP$ (variando de 26 a 34%) apresentaram maiores proporções dos teores de TP nos agregados biogênicos e fisiogênicos das áreas de NT e NT+B em superfície (0–0,05 m). Em subsuperfície, destaque para a fração de $OCLP$ em ambas as classes de agregados (variando de 34 a 44%), seguida das frações de $OHPI$ (20 e 23%) e M_3P (18 e 22%) nos agregados biogênicos e $OHPO$ (27 e 34%) nos agregados fisiogênicos; todos esses resultados descritos nos agregados das áreas de NT e NT+B (0,05–0,10 m).

Tabela 11. Teores das frações de fósforo (P; mg kg⁻¹) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de uso e manejo, região subtropical do Brasil.

Áreas	Bio	Phy	Bio	Phy	Bio	Phy
0–0,05 m						
	SOLP		M₃P		OH₃Pi	
NT	1,03 aA	0,78 aA	74,82 bA	56,30 bA	66,50 bA	48,50 bA
NT+B	1,86 aA	0,96 aA	95,55 bA	80,02 bA	70,30 bA	64,50 bA
PP	5,35 aA	5,08 aA	220,32 aA	201,97 aA	439,10 aA	387,40 aA
NF	2,28 aA	1,86 aA	86,97 bA	82,16 bA	67,40 bA	61,10 bA
	OH₂Po		HClP		OCLP	
NT	104,70 bA	118,00 bA	16,01 bA	17,58 aA	102,36 bA	126,15 bA
NT+B	110,50 bA	119,80 bA	22,19 abA	22,87 aA	104,45 bA	122,53 bA
PP	335,40 aA	250,10 aA	34,89 aA	17,29 aB	222,77 aA	219,27 aA
NF	135,20 bA	133,90 abA	7,94 bA	9,36 aA	50,00 cA	57,79 cA
0,05–0,10 m						
	SOLP		M₃P		OH₃Pi	
NT	2,12 aA	2,72 aA	56,59 bA	53,40 bA	57,61 bA	61,54 bA
NT+B	2,15 aA	1,94 aA	61,15 bA	60,73 bA	69,42 bA	63,97 bA
PP	5,32 aA	4,72 aA	151,94 aA	117,91 aA	304,55 aA	217,57 aB
NF	2,29 aA	2,40 aA	67,80 bA	62,81 bA	65,73 bA	59,39 bA
	OH₂Po		HClP		OCLP	
NT	35,65 bA	119,51 aA	12,94 bA	10,64 aA	91,89 cB	136,91 bcA
NT+B	43,09 bB	168,92 aA	16,02 abA	16,02 aA	152,61 bA	154,71 bA
PP	204,64 aA	255,70 aA	24,59 aA	13,15 aB	252,08 aA	260,46 aA
NF	71,88 abA	141,47 aA	5,81 bA	5,66 aA	62,57 cA	78,27 cA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado. (ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados; ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados; e Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher). SOLP: Fração de P solúvel com solução de CaCl₂; M₃P: Fração de P disponível com solução de extratora Mehlich 3; OH₃Pi: Fração de P inorgânico extraído com solução de NaOH; OH₂Po: Fração de P orgânico extraído com solução de NaOH; HClP: Fração de P inorgânico extraído com HCl; OCLP: Fração de P ocluso; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; e NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica.

Não foram verificadas diferenças dos teores da fração de SOLP quantificada nos agregados das áreas avaliadas (0–0,10 m). A fração de %SOLP apresenta-se como a de menor expressão na contribuição relativa dos teores de TP em ambas as classes de agregados, independentemente do sistema de produção (variando de 0,2 a 1%). Seguida da fração de %HClP com padrão semelhante (variando de 1,5 a 6%) (0–0,10 m). Vale ressaltar que, nos agregados da área de NF verificou-se que a fração de %OH₂Po demonstrou maior participação relativa dos teores de TP na camada superficial (42%) (0–0,05 m). Padrão similar para os agregados de origem fisiogênica da mesma área na camada subsuperficial (%OH₂Po; 37%) (0,05–0,10 m).

Tabela 12. Contribuição relativa de cada fração de fósforo em relação à concentração de fósforo total (TP) de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de uso e manejo, região subtropical do Brasil.

Áreas	Bio						Phy					
	%SOL P	%M3 P	%OH Pi	%OH Po	%HCl P	%OCL P	%SOL P	%M3 P	%OH Pi	%OH Po	%HCl P	%OCL P
0-0,05 m												
NT	0,3	21,0	18,0	29,0	3,7	28,0	0,20	15,0	13,0	32,0	4,8	34,0
NT+B	0,5	23,0	17,0	27,0	5,5	26,0	0,20	20,0	16,0	29,0	5,8	30,0
PP	0,4	17,0	35,0	26,0	2,6	19,0	0,40	18,0	35,0	23,0	1,6	22,0
NF	0,5	22,0	18,0	42,0	1,5	14,0	0,50	21,0	17,0	41,0	2,5	18,0
0,05-0,10 m												
NT	1,0	22,0	23,0	14,0	5,0	35,0	1,00	15,0	17,0	27,0	3,0	38,0
NT+B	1,0	18,0	20,0	12,0	5,0	44,0	0,40	14,0	14,0	34,0	3,6	34,0
PP	1,0	15,0	31,0	24,0	2,0	28,0	1,00	12,0	25,0	28,0	2,0	32,0
NF	1,0	20,0	27,0	24,0	3,0	25,0	1,00	14,0	19,0	37,0	2,0	28,0

%SOLP: Porcentagem da fração de P solúvel com solução de CaCl_2 ; %M3P: Porcentagem da fração de P disponível com solução de extratora Mehlich 3; %OHPi: Porcentagem da fração de P inorgânico extraído com solução de NaOH; %OHPo: Porcentagem da fração de P orgânico extraído com solução de NaOH; %HClP: Porcentagem da fração de P inorgânico extraído com HCl; %OCLP: Porcentagem da fração de P ocluso; NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; e NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica.

5.5.5. Análises multivariadas

Em relação a análise de componentes principais (ACP), foi observada variância acumulada para as componentes principais (PC) 1 e 2 de 67,2% (Figura 11). Avaliando a ACP (Figura 11), verificou-se a separação dos sistemas de uso e manejo do solo por meio da formação de três grupos diferentes na camada de 0-0,10 m: (1) grupo formado pelos agregados do sistema de pastagem (quadrante inferior direito); (2) grupo formado pelos agregados dos sistemas de produção de grãos (quadrante superior esquerdo); e (3) grupo formados pelos agregados do sistema não antropizado (quadrante inferior esquerdo). As áreas de PP e NF foram individualizadas das áreas de NT e NT+B, tanto pelo eixo principal (PC1: 54,2%) como pelo eixo secundário (PC2: 13,0%). Não se observou padrão de separação entre as classes de agregados (Figura 11).

As variáveis discriminantes para a formação da PC1 (elevada correlação, $-0,70 \geq r \geq 0,70$) foram Ca, Mg, TC, TN, TP, SOLP, M3P, OHPi, OHPo e OCLP (Tabela 13). Sendo esses atributos indicadores (exceto Ca) os mais associados aos agregados biogênicos e fisiogênicos da área de PP na camada de 0-0,10 m (Figura 11). Quanto a PC2, o atributo P disponível (0,76) foi a variável que mais contribuiu para a construção desse eixo (Tabela 13). Os agregados biogênicos e fisiogênicos das áreas de NT e NT+B estão relacionados com os valores das relações C/N e C/P na camada de 0-0,10 m (Figura 11). Mesmo os valores de correlação dessas variáveis não terem sido classificados como elevados (PC1: -0,34 e -0,45; e PC2: 0,64 e 0,28, respectivamente) (Tabela 13).

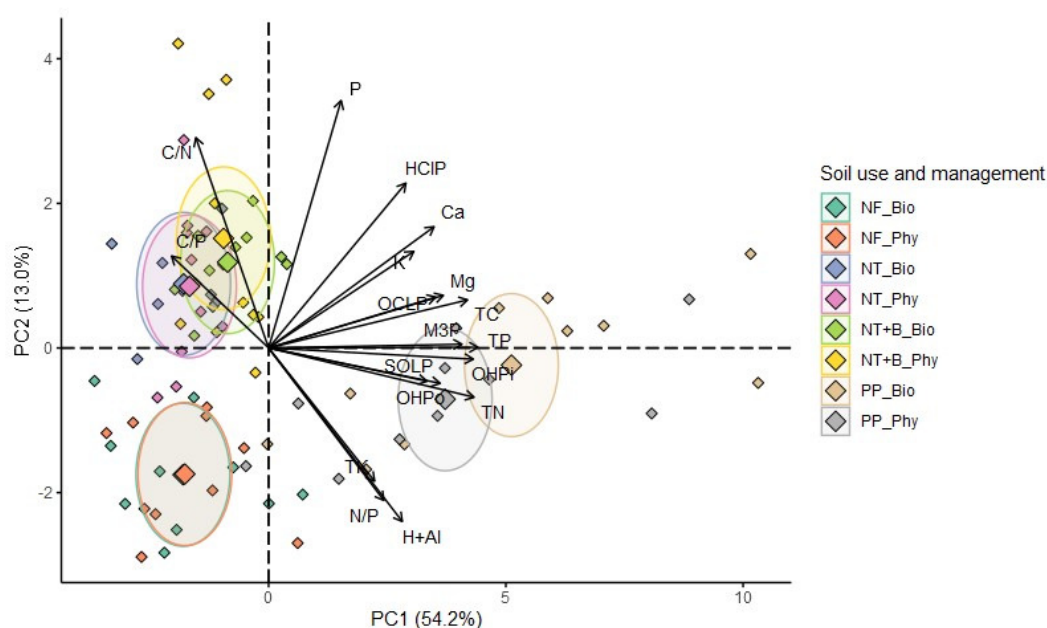


Figura 11. Análise de componentes principais integrando a caracterização dos atributos químicos, razões estequiométricas e frações de fósforo de agregados biogênicos (Bio) e fisiogênicos (Phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo, camada de 0–0,10 m, região subtropical do Brasil. NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; K: Potássio trocável; P: Fósforo disponível; H+Al: Acidez potencial; TC: Carbono total; TN: Nitrogênio total; TP: Fósforo total; TK: Potássio total; C/N: Relação carbono e nitrogênio; C/P: Relação carbono e fósforo; N/P: Relação nitrogênio e fósforo; solP : Fração de P solúvel com solução de CaCl_2 ; M_3P : Fração de P disponível com solução de extratora Mehlich 3; OH-Pi : Fração de P inorgânico extraído com solução de NaOH; OH-Po : Fração de P orgânico extraído com solução de NaOH; HCl-P : Fração de P inorgânico extraído com HCl; e OCL-P : Fração de P ocluso.

Tabela 13. Matriz da análise de componentes principais (ACP). A contribuição relativa corresponde a correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com as variáveis, camada de 0–0,10 m.

Variáveis	PC1	PC2	Variáveis	PC1	PC2
Ca	0,77	0,37	C/N	–0,34	0,64
Mg	0,82	0,16	C/P	–0,45	0,28
H+Al	0,62	–0,53	N/P	0,54	–0,47
K	0,68	0,30	solP	0,74	–0,10
P	0,34	0,76	M_3P	0,90	0,01
TC	0,93	0,14	OH-Pi	0,96	–0,03
TN	0,96	–0,15	OH-Po	0,80	–0,11
TP	0,98	0,01	HCl-P	0,64	0,50
TK	0,49	–0,40	OCL-P	0,78	0,16

Valores em negrito: Indicam elevada correlação ($-0,70 \geq r \geq 0,70$). Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; K: Potássio trocável; P: Fósforo disponível; H+Al: Acidez potencial; TC: Carbono total; TN: Nitrogênio total; TP: Fósforo total; TK: Potássio total; C/N: Relação carbono e nitrogênio; C/P: Relação carbono e fósforo; N/P: Relação nitrogênio e fósforo; solP : Fração de P solúvel com solução de CaCl_2 ; M_3P : Fração de P disponível com solução de extratora Mehlich 3; OH-Pi : Fração de P inorgânico extraído com solução de NaOH; OH-Po : Fração de P orgânico extraído com solução de NaOH; HCl-P : Fração de P inorgânico extraído com HCl; e OCL-P : Fração de P ocluso.

A análise de agrupamento hierárquico (análise de clustering) dos atributos químicos da camada de 0–0,10 m demonstrou inicialmente a formação de dois “clusters” principais, estando os agregados do sistema de pastagem (grupo mais heterogêneo) separados dos agregados das áreas de NF, NT e NT+B (grupo mais homogêneo), com $\pm 70\%$ de dissimilaridade (Figura 12a). Na sequência, foi observado a construção de três “clusters” secundários, individualizando principalmente os agregados do sistema não antropiado dos agregados dos sistemas de produção de grãos, com aproximadamente 40% de dissimilaridade (Figura 12b). E finalmente, o dendograma indicou também a formação de quatro “clusters” terciários, diferenciando especialmente as classes de agregados dentro dos sistemas conservacionistas, com $\pm 30\%$ de dissimilaridade (Figura 12c).

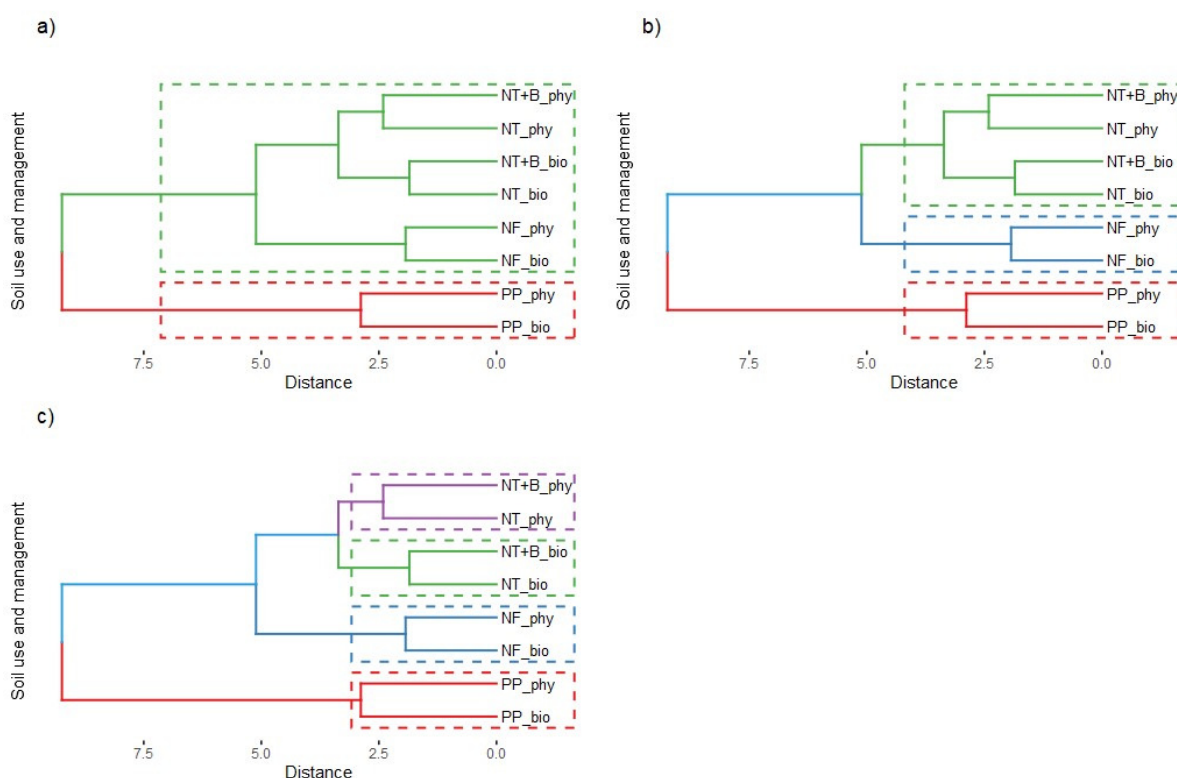


Figura 12. Análise de agrupamento hierárquico integrando a caracterização dos atributos químicos, razões estequiométricas e frações de fósforo de agregados biogênicos (bio) e fisiogênicos (phy) de áreas sob diferentes sistemas de manejo, camada de 0–0,10 m, região subtropical do Brasil. a) Dois clusters; b) Três clusters; e c) Quatro clusters. NT: Sistema plantio direto; NT+B: Sistema plantio direto + *Urochloa*; PP: Pastagem permanente; NF: Vegetação típica do bioma Mata Atlântica; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; K: Potássio trocável; P: Fósforo disponível; H+Al: Acidez potencial; TC: Carbono total; TN: Nitrogênio total; TP: Fósforo total; TK: Potássio total; C/N: Relação carbono e nitrogênio; C/P: Relação carbono e fósforo; N/P: Relação nitrogênio e fósforo; $SOLP$: Fração de P solúvel com solução de $CaCl_2$; M_3P : Fração de P disponível com solução de extratora Mehlich 3; $OH-Pi$: Fração de P inorgânico extraído com solução de NaOH; $OH-Po$: Fração de P orgânico extraído com solução de NaOH; $HClP$: Fração de P inorgânico extraído com HCl; e $OCIP$: Fração de P ocluso.

5.6. DISCUSSÃO

5.6.1. Influência dos sistemas de produção e da origem dos agregados na fertilidade do solo e nos teores TC, TN, TP e TK

O sistema de pastagem permanente (com 45 anos de instalação) foi superior aos demais sistemas avaliados quanto aos valores dos atributos químicos associados à agregação do solo; seguido do sistema de produção de grãos consorciado (com 25 anos de adoção do sistema conservacionista, sendo os últimos seis anos de cultivo intercalar milho e *Urochloa ruziziensis* no período seco. Os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , P disponível, H+Al, K^+ , TC, TN, TP e TK nos agregados do sistema de pastagem foram beneficiados pelas condições do solo inerentes a área. Podendo ser citadas como preponderantes os teores de MOS; a variação da textura entre as áreas; e os menores níveis de perturbação do solo. Práticas conservacionistas como pastagens bem manejadas têm se mostrado eficientes no aumento da capacidade de armazenamento de nutrientes; o que em geral é atribuído ao maior aporte de resíduos orgânicos (via liteira), ao sistema radicular das gramíneas (via rizodeposição) e ao menor revolvimento da camada superficial do solo (CERRI et al., 2023).

A dinâmica da MOS em áreas de pastagens é afetada pelas entradas de material orgânico e saídas de C do solo, bem como pelos processos de decomposição, mineralização, estabilização e respiração microbiana (CHERUBIN et al., 2023). A textura mais argilosa na área de pastagem (francoarenosa; Tabela 2 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2) favorece as interações organominerais, a capacidade de troca catiônica e a adsorção de P nos agregados; diminuindo as perdas dos nutrientes por lixiviação e/ou erosão. A adição de calcário nas pastagens pode propiciar acréscimo dos teores nutricionais. Entretanto, para o N, a prática de aumentar os teores do nutriente em pastos via adubação nitrogenada (aumenta a produção da pastagem), além de ser onerosa pode resultar em maiores perdas via emissões de N_2O nos solos agrícolas. Dessa forma, a fixação biológica de N (FBN) é uma estratégia relevante para a recuperação e sequestro de nutrientes em pastagens brasileiras (CERRI et al., 2023). No estudo, o sistema de pastagem recebe somente a aplicação de calcário durante sua reformulação a cada 15 anos ($2,0 \text{ t ha}^{-1}$; Tabela 1 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.1). As pastagens de gramíneas tropicais são comumente eficazes no uso de N do solo, e demonstram baixas perdas deste nutriente (BAPTISTELLA et al., 2020).

Adicionalmente, o processo de ciclagem de C no solo é intenso em áreas de pastagens, na qual grande parte do nutriente derivado da biomassa das forrageiras ingerida pelos animais retorna (em menor proporção) ao solo via fezes e urina (CHERUBIN et al., 2023). Sendo assim, a presença de animais merece destaque no sistema de pastagem do estudo (lotação contínua de gado leiteiro de 2 UA ha^{-1} ; Tabela 1 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.1). Uma vez que os dejetos *in natura* de bovinos podem ativar a biota do solo e propiciar um ambiente mais favorável ao crescimento e a atividade da biomassa microbiana, bem como à formação de agregados biogênicos. Por conseguinte, resultar em maiores taxas de decomposição do material orgânico (BERNARDI et al., 2023) e, consequentemente, disponibilizando maiores teores de nutrientes, como verificado nos agregados da área de PP.

Na região Centro-Oeste do Brasil, Oliveira et al. (2020) compararam a ciclagem e estratificação vertical de absorção de K em áreas de monocultivo de soja, sucessão soja/*Urochloa ruziziensis*, sucessão soja/milho e consórcio milho-*Urochloa ruziziensis* sucessionadas com a soja. Os autores verificaram que as áreas com a introdução da *Brachiaria ruziziensis* acumularam elevados teores de K sendo a maior parte do nutriente originada das camadas subsuperficiais do solo. Corroborando aos resultados de K^+ nos

agregados do sistema de produção de grãos com consórcio milho-*Urochloa ruziziensis*. O K encontra-se associado a componentes estruturais do tecido vegetal, o que permite fácil e rápida liberação após o rompimento da membrana plasmática (MARSCHNER, 2012). Tais resultados ressaltam que estudos sobre a dinâmica do nutriente em áreas de produção agrícola com espécies de braquiárias merecem mais atenção.

Os solos cultivados com braquiárias tendem apresentar maiores teores de MOS em função da grande quantidade de plantas; maior deposição de resíduos; inibição da nitrificação; rizodeposição e maior massa de raízes; e a incorporação de N via palhada mais lignificada (BAPTISTELLA et al., 2020). Justificando os resultados de TC nos agregados da área de NT+B em comparação as áreas de NT e NF, principalmente na camada subsuperficial. O plantio de milho consorciado com *Urochloa ruziziensis* permite maior produção de grãos (soja – safra; e milho – segunda safra) concomitante à formação de sistema radicular mais vigoroso e palhada de braquiária. Sendo assim, o uso da gramínea é imprescindível à sustentabilidade do sistema conservacionista. A *Urochloa ruziziensis* é a espécie mais usada em conjunto com o milho na região subtropical do país objetivando a melhoria da qualidade do solo; e o fornecimento de forragem de alta qualidade nos meses de julho e agosto (época seca). Período em que as pastagens perenes apresentam baixa produtividade e qualidade, considerado como momento crítico para a produção bovina a pasto (FRANCHINI et al., 2016). A espécie é uma das poucas gramíneas que pode ser misturada ao adubo para ser semeada mecanicamente e produzir biomassa vegetal neste período.

Outro fator relacionado ao aumento proporcional dos teores de TC nos agregados do consórcio milho-*Urochloa ruziziensis* encontra-se no intervalo de coleta após a dessecação da forrageira anual. A *Urochloa ruziziensis* é uma ótima gramínea para a formação de cobertura morta em áreas de manejo conservacionista e apresenta boa palatabilidade para os animais (BALBINO et al., 2012). Porém, para a espécie é requerido um maior tempo para a total desidratação, em torno de 20 dias; sendo necessário a antecipação da dessecação, quando forem ser realizadas coletas de amostras para avaliação dos níveis de fertilidade e/ou semeaduras da cultura anual (KLUTHCOUSKI et al., 2004). Tal fator reduz a temperatura do solo durante o dia e as perdas de água por evaporação, além de proporcionar condições mais adequadas à sobrevivência da fauna do solo e a manutenção dos estoques de C no meio edáfico. Contribuindo para a manutenção ou aumento da qualidade física, química e biológica do solo (FRANCHINI et al., 2016).

O enriquecimento dos teores de Mg^{2+} , P disponível, H+Al, C e N nos agregados de origem biogênica é uma indicação clara do elevado potencial que a via de formação biológica tem para acumular; proteger; e disponibilizar os nutrientes no momento mais propício à necessidade dos organismos do solo (espécies vegetais e fauna edáfica). Resultados similares foram observados por Melo et al. (2019) em áreas de manejo conservacionista com aplicação de dejetos líquidos de suínos e esterco de galinha em condições climáticas semelhantes a deste estudo. Para os autores, a agregação biogênica intensifica a melhoria estrutural e química do solo causada pela aplicação dos resíduos orgânicos (estrupe).

Na região Sudeste do Brasil, Fonseca Júnior et al. (2023) quantificaram maiores teores de C orgânico e suas respectivas frações químicas e físicas nos agregados biogênicos em comparação aos fisiogênicos em áreas de plantio de eucalipto e ecótono floresta-eucalipto. Para os autores, os resultados evidenciam a importância do estudo da origem dos agregados na avaliação da qualidade do solo de diferentes ecossistemas florestais. Também na região Sudeste, Rossi et al. (2023b) verificaram maiores teores de C nas frações físicas da MOS nos agregados biogênicos em áreas de produção agroecológica manejadas em solos com camada superficial de textura arenosa. Segundo os autores, a agregação biogênica favoreceu o aumento dos teores de C o que sugere melhoria na qualidade edáfica.

Cosniderando o aumento dos teores de TN nos agregados biogênicos em comparação aos fisiogênicos na camada superficial dos sistemas de produção de grãos e sistema não antropizado é possível inferir que a agregação biológica foi mais eficiente em armazenar o N; contribuindo para reduzir perdas do nutriente nas áreas de manejo conservacionista (NT e NT+B) e referência (NF) nos primeiros 0,05 m do solo. As entradas de N no solo derivam da deposição atmosférica, fertilização e processos de FBN. No contexto biológico, os exsudatos das raízes das gramíneas também podem atuar diretamente no ciclo do N, inibindo processos indesejáveis (p. ex., volatilização de amônia, erosão do solo, desnitrificação e lixiviação de nitrato) em termos de sustentabilidade ambiental e produtiva (BAPTISTELLA et al., 2020).

5.6.2. Influência dos sistemas de produção e da origem dos agregados nos valores das razões estequiométricas

Na camada superficial, os valores da relação C/N nos agregados fisiogênicos das áreas de NT e NT+B indicam elevado potencial à imobilização de N ($C/N > 30$); influenciado pelos baixos teores de TN nesses agregados. Para os agregados biogênicos das mesmas áreas, os valores da razão C/N mostram tendência de equilíbrio entre os processos de decomposição, liberação e disponibilidade de nutrientes. Reflexo da maior capacidade da via de formação biogênica em armazenar e preservar os nutrientes, principalmente C e N. Para valores C/N entre 20 e 30, a mineralização equivale a imobilização, enquanto valores inferiores a 20 favorecem à mineralização de N (MULLEN, 2011). Para sequestro de C, o fornecimento de N é fundamental sendo apontado como fator chave para aumentar a estabilização e acúmulo de C no solo, notadamente na matéria orgânica associada aos minerais (COTRUFO e LAVALLEE, 2022).

Na camada subsuperficial, os valores da relação C/N nos agregados fisiogênicos dos sistemas de produção de grãos encontram-se dentro da faixa de equilíbrio; ou seja, fora da taxa requerida pelos microrganismos decompositores (30). Enquanto na agregação biogênica dos mesmos sistemas, os valores da razão C/N sinalizam à imobilização de N; porém menos intensa quando comparada a imobilização verificada nos agregados fisiogênicos superficiais. Tais resultados são importantes no estudo da ciclagem de nutrientes em agregados de diferentes origens. Posto que, a maior imobilização de N nos agregados fisiogênicos da camada superficial pode ser considerada como fator altamente crítico no ciclo do nutriente; afetando negativamente a disponibilidade de N nos sistemas de produção de grãos.

A imobilização ocorre quando os microrganismos decompositores removem o N inorgânico do solo resultando em menor disponibilidade deste nutriente às espécies vegetais. Esse processo pode ocorrer através da decomposição de resíduos orgânicos incorporados ao solo que apresentam relação C/N superior a 30. À medida que os microrganismos se alimentam desses resíduos, não dispendo da concentração de N adequada proveniente do material orgânico consumido, estes removem a quantidade necessária de N inorgânico da solução do solo para alcançar a relação C/N apropriada para suas funções e biomassa (MULLEN, 2011). Alocando o nutriente em suas células (N da biomassa microbiana do solo).

Vale ressaltar que analisar as interações entre as práticas de manejo realizadas nos sistemas de produção de grãos e as condições do solo da região do estudo é fundamental para compreender as taxas de decomposição dos resíduos vegetais e sua consequente contribuição para os mecanismos de equilíbrio e ciclagem de nutrientes no solo. Neste caso, destaque para i) a diversificação de espécies vegetais no tempo (rotação de culturas entre gramíneas e leguminosas) e espaço (consórcios); ii) a manutenção da biomassa vegetal sobre a superfície do solo, considerada como a principal prática adotada no sistema plantio direto (CERRI et al.,

2023); e iii) a textura mais arenosa da camada superficial que potencializa as transformações dos resíduos vegetais e MOS.

A decomposição da palhada de espécies de gramíneas (milho e/ou braquiária) favorece a imobilização de N inorgânico e maiores quantidades de biomassa vegetal à superfície do solo, devido sua elevada relação C/N. No decorrer dos ciclos de produção das culturas o potencial à imobilização tende a diminuir com a incorporação dos resíduos de espécies de leguminosas (soja), ricas em N (maiores teores de proteína e menores concentrações de lignina). Iniciando um rápido processo de mineralização de N (aumentando a disponibilidade do nutriente), devido à baixa relação C/N do material orgânico e menor deposição de biomassa vegetal à superfície do solo (MULLEN, 2011). C e N são componentes estruturais, e suas relações de acúmulo e consumo são relativamente fixas (CLEVELAND e LIPTZIN, 2007; ZHANG et al., 2019).

A fertilização é um dos fatores que pode influenciar nos valores da relação C/N, pois alteram os teores de C e N no solo. Assim, os fatores apresentados justificam a imobilização de N observada nos agregados dos sistemas de produção de grãos, especialmente nos fisiogênicos superficiais. Ressalta-se que a cultura de interesse econômico que antecedeu o período de coleta das amostras foi o milho (produção de grãos e palhada) nas áreas de NT e NT+B; e que na área de NT+B a amostragem dos torrões de terra foi realizada 35 dias após a dessecação da braquiária (alimentação animal e proteção do solo).

Os valores da relação C/N observados nos agregados do sistema de pastagem indicam maior mineralização do N ($C/N < 20$), sendo afetada pelos elevados teores de TN nos agregados, independente da via de formação. Reforçando a importância do N para os processos mediados pela fauna do solo e, portanto, para as transformações do C nos resíduos vegetais, MOS e suas frações. Os resultados apontam uma acelerada decomposição da MOS e/ou perda das formas mais solúveis de C dos agregados da área de PP. Dessa forma, a MOS restante nessas unidades estruturais tende a ser mais estável e/ou humificado (ZINN et al., 2018).

A mineralização é o processo pelo qual moléculas orgânicas mais simples são degradadas e transformadas em formas inorgânicas por microrganismos, que obtêm energia e nutrientes necessários à sua multiplicação e desenvolvimento (BAPTISTELLA et al., 2020). Os produtos da mineralização MOS são basicamente mensurados como CO_2 e sob as formas inorgânicas de N ($N-NH_4^+$, $N-NO_2^-$ e $N-NO_3^-$) que estão diretamente relacionados à fração mais lábil da MOS. Portanto, quanto maior for a fração mineralizável, mais lábil será o material e, consequentemente, maior será a produção de CO_2 e a disponibilização de N mineral (BREMER et al., 1994; COSCIONE et al., 2023). Valores de relação C/N entre 12–16 sinalizam que o material orgânico se encontra mais decomposto (BUI e HENDERSON, 2013). Em geral, a relação C/N é inversamente proporcional à taxa de decomposição do material orgânico (ZHANG et al., 2019).

Já os valores das relações C/P e N/P nos agregados dos sistemas de uso e manejo do solo, estes indicam mineralização de P ($C/P \leq 200$) e limitação de N ($N/P < 14$), respectivamente (BUI e HENDERSON, 2013). Ambas as razões estequiométricas podem afetar diretamente a qualidade química do solo nos sistemas agrícolas. Destaque para os valores da relação C/P nos agregados biogênicos das áreas de NT (0–0,10 m), NT+B e NF (0,05–0,10 m) que refletem uma mineralização de P menos intensa. Para a relação N/P, a menor potencialidade no processo de limitação de N pode ser observada nos agregados do sistema de pastagem (0–0,10 m).

A relação C/P é um parâmetro da eficácia do uso de P, ou seja, menores valores indicam maior eficácia do nutriente no solo. A relação N/P é considerada como indicativo da limitação de N ou P ao nível da comunidade vegetal, sendo avaliada como importante fator da

decomponibilidade dos resíduos orgânicos (BUI e HENDERSON, 2013). Os baixos valores da relação N/P podem sinalizar que os teores de N no solo limitam fortemente o funcionamento adequado dos ecossistemas (CLEVELAND e LIPTZIN, 2007; BUI e HENDERSON, 2013; OLIVEIRA FILHO et al., 2019). Em função dos resultados das razões estequiométricas C/N e N/P no estudo, sugere-se a criação e adoção de estratégias de manejo da MOS-associada à agregação, visando otimizar os processos de ganhos de N e minimizar as perdas do nutriente por volatilização e lixiviação nos sistemas de produção avaliados.

5.6.3. Influência dos sistemas de produção e da origem dos agregados nos teores de P lábil, moderadamente lábil e não lábil

A superioridade nos teores de M_3P , OH_3Pi , OH_3Po , $HClP$ e $OCLP$ nos agregados do sistema de pastagem se deve a influência das condições do solo da área, em especial os teores de argila e o maior aporte de resíduos vegetais; exceto o $SOLP$. A fração de $SOLP$ (forma inorgânica de P) está fracamente ligada ao solo (baixa energia de ligação com as partículas minerais), sendo diretamente relacionado à poluição ambiental devido ao seu maior potencial de transferência por meio do solo e massas de água (MCDOWELL e SHARPLEY, 2001). Os teores de $SOLP$ são geralmente menores em função da maior solubilidade e disponibilidade da fração (GATIBONI e CONDRON, 2021).

A fração de M_3P corresponde ao P associado aos íons de ferro e alumínio com baixa energia de ligação. Os teores de M_3P do fracionamento podem ser comparados aos níveis críticos de P calibrados às culturas em algumas regiões do país que utilizam o extrator (Mehlich 3) como método oficial para a recomendação da adubação fosfatada (GATIBONI e CONDRON, 2021). As frações de $SOLP$ e M_3P (lábeis) são as formas inorgânicas de P que apresentam maior disponibilidade às plantas sendo consideradas como indicadores do enriquecimento de P no solo; pois encontram-se em equilíbrio rápido com a fase aquosa do solo (GATIBONI et al., 2021). Os maiores teores de M_3P nos agregados do sistema de pastagem significam que essa área está armazenando P em formas prontamente disponíveis à gramínea forrageira cultivada no pasto (*Cynodon dactylon*).

As formas inorgânicas (OH_3Pi e $HClP$) e orgânicas (OH_3Po) de P com labilidade moderada também foram favorecidas pelas condições do solo da área de PP, avaliadas como importantes reservatórios do nutriente (GATIBONI et al., 2021). A fração de OH_3Pi corresponde a labilidade intermediária de P, podendo ser acessada pelas plantas com maior capacidade de absorção; culturas de ciclo longo; e/ou quando estão sujeitas à limitação severa do nutriente (GUO e YOST, 1998; GATIBONI et al., 2007; GATIBONI e CONDRON, 2021). Essa fração representa a forma inorgânica de P adsorvido aos óxidos de ferro e alumínio de baixa cristalinidade, corroborando aos maiores teores de argila na área de PP (200 g kg⁻¹) em detrimento às áreas de NT e NT+B (120 e 110 g kg⁻¹; Tabela 2 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2). A capacidade de adsorção de P é influenciada pela presença de óxidos de Fe e Al na fração argila, sendo mais efetiva em solos oxidícos (SANDIM et al., 2023).

A fração OH_3Po está relacionada a forma orgânica de P associada a MOS. Nos agregados do sistema de pastagem, os maiores teores de TC, e a maior proteção física e química da MOS oferecida pela fração argila (Tabela 2 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2) e pelas vias de formação dos agregados estão proporcionando o aumento e a manutenção dos teores de OH_3Po . A MOS desempenha papel ambivalente na dinâmica do P no solo; ou seja, os ácidos orgânicos liberados durante a mineralização da MOS (p. ex., ácidos cítrico, oxálico e málico) podem tanto adsorver o P como ocupar os sítios de adsorção do nutriente presentes nas superfícies das argilas, óxidos de ferro e alumínio,

propiciando o aumento dos teores de P moderadamente lábil (ZAVASCHI et al., 2020; SANDIM et al., 2023). Isto ocorre porque o processo reduz consideravelmente a adsorção de P, pois os ácidos orgânicos derivados da decomposição do material orgânico podem formar complexos muito estáveis com ferro e alumínio (ABDALA et al., 2012).

Para a fração de $HClP$, esta representa as formas inorgânicas de P ligadas aos minerais de cálcio, como as apatitas. Nas regiões de clima tropical ou subtropical onde predominam solos altamente intemperizados, as reservas minerais de cálcio são escassas, resultando em baixos teores de P nessa fração (GATIBONI et al., 2021). Entretanto, em áreas agrícolas com histórico de correção e adubação do solo, os teores de $HClP$ podem ser mais elevados. A ligação de P com o cálcio reduz a disponibilidade e labilidade do nutriente, devido à saturação de cálcio (adicionado pelo calcário) e P (adicionado pelo fertilizante) na solução do solo (SANDIM et al., 2023). E finalmente, a fração de $OCLP$ corresponde as formas de P não lábeis ou “fixadas” sob ligações químicas muito estáveis, não disponíveis aos vegetais devido à baixa solubilidade (formas inorgânicas) ou reduzido potencial à mineralização (formas orgânicas) (GATIBONI e CONDRON, 2021).

Considerando que as frações lábeis e moderadamente lábeis de P são mais susceptíveis à dissolução, é plausível inferir que a textura e a estabilização da MOS no sistema de pastagem (seja por: recalcitrância molecular, complexos organo-minerais, oclusão em agregados, formação de estruturas supramoleculares e/ou adsorção em minerais de argila) são os fatores que estão mais correlacionados à estabilização e acúmulo de P nas frações com diferentes graus de labilidade e disponibilidade no método proposto por Gatiboni e Condrón (2021). No estudo de Sandim et al. (2023), os autores também observaram que a dinâmica de P no solo foi influenciada principalmente pela MOS (composição química, estrutural e teores), capacidade de troca catiônica e presença de óxidos de ferro e alumínio.

O consórcio milho-braquiária está favorecendo o aumento dos teores de $HClP$ nos agregados biogênicos em comparação aos agregados biogênicos das áreas de NT e NF; com valores similares aos quantificados nos agregados biogênicos do sistema de pastagem (0–0,10 m). Esses resultados são importantes para o monitoramento dos efeitos da introdução da *Urochloa ruziziensis* (após seis anos) no que diz respeito ao padrão de distribuição de P entre suas frações. Em razão de saturação do compartimento mais lábil, o nutriente é redistribuído para o compartimento de moderada labilidade.

Na fase aquosa do solo, os teores de $HClP$ encontram-se em equilíbrio muito lento, tamponando outras frações do elemento e sendo importante na disponibilidade às plantas quando em condições de elevada depleção de P no solo (GUARDINI et al., 2012; GATIBONI et al., 2021). No Sudeste do Brasil, Almeida e Rosolem (2016) verificaram que o cultivo de *Urochloa ruziziensis* em rotação com a soja aumentou os teores de P nas frações lábeis e moderadamente lábeis, reduzindo os teores do nutriente na fração oclusa. Segundo os autores, esses resultados indicam que a presença da *Urochloa ruziziensis* gerou efeito potencial na eficiência agrônoma de uso do P, independentemente da estratégia de fertilização fosfatada.

Na região subtropical do Brasil, utilizando o mesmo método de fracionamento de P, Tiecher et al. (2023) verificaram que sistemas conservacionistas favoreceram o acúmulo do nutriente na camada de 0–0,10 m, gerando um gradiente vertical de frações prontamente disponíveis (Mehlich 1 e Mehlich 3), moderadamente disponíveis (NaOH e HCl) e oclusas de P no solo. Para Gatiboni et al. (2021), o acúmulo de P na superfície do solo satura os sítios de adsorção mais ávidos, armazenando o nutriente em frações de maior disponibilidade. Ao longo do tempo, o sistema plantio direto pode promover aumento dos teores de MOS e P disponível nas camadas superficiais. Entretanto, pode também resultar no desenvolvimento de um gradiente de acidez do solo e disponibilidade de P em profundidade, não sendo ideal para o desenvolvimento das culturas anuais (TIECHER et al. 2023).

As frações de $\%OH\text{Pi}$, $\%OH\text{Po}$ e $\%OCL\text{P}$ apresentaram as maiores participações dos teores de TP nos agregados biogênicos e fisiogênicos das áreas avaliadas. Resultados semelhantes foram verificados por Gatiboni e Condrón (2021). No entanto, os autores quantificaram valores de proporção para a fração oclusa superiores ($\%OCL\text{P} \sim 65\%$) aos observados nos agregados desse estudo (variando de 26 a 44%). Para Gatiboni e Condrón (2021), os maiores valores proporcionais da fração oclusa mostram a elevada capacidade de adsorção de P em solos altamente intemperizados. Destaque para as maiores proporções de $\%OH\text{Po}$ nos agregados do sistema não antropizado. Validando a hipótese de que em áreas de vegetação nativa os teores de P são oriundos da ciclagem de nutrientes através da decomposição da MOS.

Nesse estudo, as menores contribuições relativas nos agregados biogênicos e fisiogênicos das áreas foram constatadas nas frações de $\%SOL\text{P}$ e $\%HCl\text{P}$. No estudo de Gatiboni e Condrón (2021), os autores verificaram teores de P semelhantes entre as formas inorgânicas de $\%SOL\text{P}$ (lábil) e $\%HCl\text{P}$ (moderadamente lábil). Na literatura, apenas Moura et al. (2019) analisaram os teores de P em suas diferentes frações nos agregados biogênicos e fisiogênicos em áreas de produção agrícola sob manejo agroecológico no Sudeste do Brasil. Os autores quantificaram os maiores teores de P orgânico e P inorgânico nos agregados fisiogênicos. Para estes, os teores de P observados nas diferentes classes de agregados evidenciam o importante papel das vias de formação na avaliação da qualidade química do solo.

5.6.4. Dissimilaridade entre os sistemas de produção e as vias de formação dos agregados

As técnicas multivariadas auxiliaram no entendimento do padrão dos resultados dos atributos dos agregados dos sistemas de uso e manejo do solo em associação aos testes estatísticos univariados. De acordo com a matriz de correlação das componentes principais, o primeiro grupo de variáveis altamente ponderadas implica que a PC1 está principalmente associada aos cátions trocáveis; aos teores de TC, TN e TP; e as frações de P com diferentes graus de labilidade e disponibilidade. Variáveis que estão fortemente relacionadas aos agregados do sistema de pastagem, independentemente da origem de formação das unidades estruturais. Ressaltando a maior influência das condições do solo da área de PP sobre os atributos indicadores associados a agregação.

Na PC2, a variável altamente ponderada indica que a componente está principalmente relacionada aos teores de P disponível, não estando correlacionados aos agregados das áreas avaliadas. A ligação entre as relações C/N e C/P e os agregados biogênicos e fisiogênicos das áreas de NT e NT+B, significa presença ou ausência de nutrientes limitantes ao crescimento e desenvolvimento vegetal nesses agregados. Nutrientes essenciais para a correta funcionalidade dos sistemas de produção de grãos. Ambas as componentes principais estão separando as áreas de PP, NT, NT+B e NF. No estudo, os atributos indicadores selecionados pela ACP são considerados mais críticos e eficazes para expressar a qualidade química do solo e a resposta subsequente aos diferentes sistemas de produção em solos de camada superficial arenosa.

A análise de clustering, integrando os atributos indicadores, agrupou os sistemas e as vias de formação dos agregados em três “clusters” distintos. As maiores dissimilaridades foram verificadas entre os sistemas de uso e manejo do solo nos dois primeiros “clusters”, corroborando aos resultados da ACP. O terceiro “cluster” separou os agregados biogênicos dos fisiogênicos provenientes dos sistemas de produção de grãos. Estudos recentes também observaram a separação das vias de formação dos agregados por meio da análise de agrupamento hierárquico (FONSECA JÚNIOR et al., 2023; ROSSI et al., 2023b), principalmente na camada superficial do solo. Os resultados da Figura 12c, atestam que i) a

técnica de análise de clustering foi mais eficiente na separação e agrupamento das classes de agregados quando comparada a ACP; e ii) a colaboração da via biogênica na qualidade química do solo pode ser mais evidente em sistemas conservacionistas.

5.7. CONCLUSÕES

Os atributos químicos quantificados nos agregados biogénicos e fisiogénicos foram afetados de forma distinta pelos sistemas de produção, especialmente a pastagem (vegetação de gramínea forrageira perene), seguido do consórcio milho-*Urochloa* (maior diversidade de espécies vegetais). O sistema de pastagem está associado à alta fertilidade nos agregados; maiores teores totais de C, N, P e K; menores valores da relação C/N; e superioridade nos teores das frações lábil, moderadamente lábil e não-lábil do P. Sugerindo maior qualidade química do solo com alta fragilidade textural.

A influência positiva da *Urochloa ruziziensis* em conjunto ao milho nos cultivos de inverno pode ser constatada principalmente na camada subsuperficial. Após seis anos de consorciação, seus agregados apresentaram principalmente maiores teores de K^+ e aumento nos valores de C e P inorgânico (moderadamente lábil) em comparação aos agregados do sistema sem consorciação (sucessão soja/milho). As razões estequiométricas apresentaram padrões diferenciados nos mecanismos de equilíbrio e ciclagem de nutrientes em subsuperfície, especialmente a relação C/N nos agregados dos sistemas de produção de grãos.

Verificou-se que a agregação biogénica promoveu maior acumulação de determinados nutrientes quando comparada a agregação fisiogénica, especialmente maiores teores de Mg^{2+} , P disponível e acidez potencial. Os seus agregados apresentaram aumento dos teores de C e N, bem como menores valores da relação C/N à superfície (equilíbrio entre mineralização e imobilização) e maiores valores da mesma relação à subsuperfície (imobilização de N). Esses agregados também apresentaram uma maior participação da forma orgânica de P no compartimento total do nutriente na camada superficial (0–0,05 m). Os resultados da agregação biogénica reiteram a importância do estudo das vias de formação na avaliação da qualidade química do solo, principalmente em áreas de manejo conservacionista.

5.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALA, D. B.; GHOSHA, A. K.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; VENEGA, V. H. A. Phosphorus saturation of a tropical soil and related P leaching caused by poultry litter addition. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.162, p.15–23, 2012.
- ALMEIDA, D. S.; ROSOLEM, C. A. Ruzigrass grown in rotation with soybean increases soil labile phosphorus. **Agron. J.**, v.108, p.2444–2452, 2016.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.(6), p.711–728, 2013.
- BALBINO, L. C.; VILELA, L.; CORDEIRO, L. A. M.; OLIVEIRA, P.; PULROLNIK, K.; KLUTHCOUSKI, J.; SILVA, J. L. S. **Curso de capacitação do programa ABC (agricultura de baixa emissão de carbono) – Módulo Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) Região Sul**. Embrapa Arroz e Feijão, 2012.
- BAPTISTELLA, J. L. C.; ANDRADE, S. A. L.; FAVARIN, J. L.; MAZZAFERA, P. Urochloa in tropical agroecosystems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v.4, p.119, 2020.
- BATISTA, I.; CORREIA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; MELLO, N. A. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no Cerrado, MS. **Semina**, v.34, p.1535–48, 2013.
- BERNARDI, A. C. C.; TADINI, A. M.; BIELUCZYK, W.; PEZZOPANE, J. R. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E.; NETO, L. M. Manejo conservacionista da matéria orgânica do solo: sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (eds) **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Embrapa, CDD (21. ed.), pp.569–600, 2023.
- BREMER, E.; JANZEN, H. H.; JOHNSTON, A. M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil. **Canadian Journal of Soil Science**, v.74, p.131–138, 1994.
- BUI, E. N.; HENDERSON, B. L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. **Plant and soil**, v.373, p.553–568, 2013.
- BULLOCK, P.; FEDEROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Albrighton, England: Waine Research Publications 152 p. 1985.
- CERRI, C. E. P.; ABBRUZZINI, T. F.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R.; FRAZÃO, L. A.; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, D. M. S. Matéria orgânica do solo e o equilíbrio global de carbono. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (eds) **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Embrapa, CDD (21. ed.), pp 211–254, 2023.
- CHERUBIN, M. R.; MAIA, S. M. F.; DAMIAN, J. M.; CERRI, C. E. P. Matéria orgânica do solo em áreas de pastagens no Brasil. IN: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (eds) **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Embrapa, CDD (21. ed.), pp.601–625, 2023.

- CLEVELAND, C. C.; LIPTZIN, D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? **Biogeochemistry (Dordrecht)**, v.85, p.235–252, 2007.
- COSCIONE, A. R.; CARNIER, R.; NOGUEIRA, T. A. R. Metodologias para avaliar a qualidade de fontes de matéria orgânica. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (eds) **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Embrapa, CDD (21. ed.), pp.185–210, 2023.
- COTRUFO, M. F.; LAVALLEE, J. M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. **Advances in Agronomy**, v.172, p.1–66, 2022.
- DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; DENARDIN, N. D.; WIETHÖLTER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. p. 39, 2012.
- FERREIRA, C. R.; SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; GUEDES, J. N.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil Till Res**, v.198, p.104533, 2020.
- FONSECA JÚNIOR, A. M.; PINTO, L. A. S. R.; SILVA, C. F.; FERREIRA, R.; MORAIS, I. S.; CAMARA, R.; DELGADO, R. C.; PEREIRA, M. G. Edaphic properties in a eucalyptus-forest ecotone in the Nova Baden State Park, Southeastern Brazil. **Rev Bras Cienc Solo**, v.47, p.e0230074, 2023.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – INTERGOVERNMENTAL TECHNICAL PANEL ON SOILS **Protocol for the assessment of Sustainable Soil Management**. Rome: FAO. 2020.
- FRANCHINI, J. C.; VELIINI, C. L.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; WATANABE, R. H. Integração Lavoura-Pecuária em solo arenoso e clima quente: duas décadas de experiência. Londrina: Embrapa Soja. (**Embrapa Soja. Circular técnica**, 118). 2016.
- GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. D. S.; FLORES, J. P. C. Bioavailability of soil phosphorus forms in no-tillage system. **Rev Bras Cien Sol**, v.31, p.691–699, 2007.
- GATIBONI, L. C.; SOUZA JUNIOR, A. A.; DALL’ORSOLETTA, D. J.; MUMBACH, G. L.; KULESZA, S. B.; ABDALA, D. B. Phosphorus speciation in soils with low to high degree of saturation due to swine slurry application. **Journal of Environmental Management**, v.282, p.111553, 2021.
- GATIBONI, L. C.; CONDRON, L. M. A rapid fractionation method for assessing key soil phosphorus parameters in agroecosystems. **Geoderma**, v.385, p.114893, 2021.
- GUARDINI, R.; COMIN, J. J.; SANTOS, D. R. D.; GATIBONI, L. C.; TIECHER, T.; SCHMITT, D.; BENDER, M. A.; BELLI FILHO, P.; OLIVEIRA, P. A. V.; BRUNETTO, G. Phosphorus accumulation and pollution potential in a hapludult fertilized with pig manure. **Rev Bras Cien Sol**, v.36, p.1333–1342, 2012.
- GUHRA, T.; STOLZE, K.; TOTSCHE, K. U. Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates. **Soil Biol Biochem**, v.164, p.108483, 2022.
- GUO, F.; YOST, R. S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, v.163, n.10, p.822–833, 1998.

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 Sci. Soc. Am. J.**, v.46, p.970–976, 1982.

IUSS WORKING GROUP WRB. World reference base for soil resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **World Soil Res Rep** No 106 FAO Rome, 203 pp. 2015.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H.; STONE, L. F.; COBUCCI, T. Integração lavoura-pecuária e o manejo de plantas daninhas. Piracicaba: Potafos. (**Informações Agronômicas**, 106). 2004.

LOSS, A.; PERERIA, M. G.; COSTA, E. L.; BEUTLER, S. J. Soil fertility, physical and chemical organic matter fractions, natural ^{13}C and ^{15}N abundance in biogenic and physicogenic aggregates in areas under different land use systems. **Soil Research**, v.52, p.685–697, 2014.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd.ed. New York: Academic Press. 2012.

MCDOWELL, R. W.; SHARPLEY, A. N. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage. **J Environ Qual**, v.30, n.2, p.508–520, 2001.

MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. Commun. **Soil Sci. Plant Anal.**, v.15, n.12, p.1409–1416, 1984.

MELO, T. R.; PEREIRA, M. G.; BARBOSA, G. M. C.; SILVA NETO, E. C.; ANDRELLO, A. C.; FILHO, J. T. Biogenic aggregation intensifies soil improvement caused by manures. **Soil Till Res**, v.190, p.186–193, 2019.

MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E.; FERREIRA, G. W.; COMIN, J. J.; LOVATO, P. E.; BRUNETTO, G. Atributos químicos em agregados biogênicos e fisiogênicos de solo submetido à aplicação com dejetos suínos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.14, n.1, p.1–8, 2019.

MOURA, O. V. T.; ROSSI, C. Q.; SANTOS, O. A. Q.; PEREIRA, M. G.; PINTO, L. A. S. R.; ARAÚJO, E. D. S. Phosphorus in biogenic and physicogenic aggregates under different agroecological management systems. **Revista Agrarian**, v.12, n.46, p.466–478, 2019.

MULLEN, R. W. Nutrient cycling in soils: nitrogen. In: HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J. (eds.), **Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture**, pp.67–78, 2011.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chim. Acta**, v.27, p.31–36, 1962.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbono, organic carbono and organic matter. p. 961-1010. In: BLACK, C. A. Ed. **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods**. Soil Science of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 1996.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; VIEIRA, J. N.; SILVA, E. M. R.; OLIVEIRA, J. G. B.; PEREIRA, M. G.; BRASILEIRO, F. G. Assessing the effects of 17 years of grazing exclusion in degraded semi-arid soils: evaluation of soil fertility, nutrients pools and stoichiometry. **Journal of Arid Environments**, v.166, p.1–10, 2019.

OLIVEIRA, S. M.; DIAS, D. S.; BORJA REIS, A. F.; CRUZ, S. C. S.; FAVARIN, J. L. Vertical stratification of K uptake for soybean-based crop rotation. **Nutr. Cycl. Agroecosystems**, v.117, p.185–197, 2020.

- PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BATISTA, I.; MELO, T. R.; SILVA NETO, E. C.; PINTO, L. A. S. R. Biogenic and physicogenic aggregates: formation pathways, assessment techniques, and influence on soil properties. **Rev Bras Cienc Solo**, v.45, p.e0210108, 2021.
- PINTO, L. A. S. R.; MORAIS, I. S.; OZÓRIO, J. M. B.; MELO, T. R.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G. Soil aggregation and associated organic matter under management systems in sandy-textured soils, subtropical region of Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.195, n.253, p.1–18, 2023.
- PINTO, L. A. S. R.; SILVA, C. F.; MELO, T. R.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G. (2022) Stability, labile organic carbon, and glomalin of biogenic aggregates in sandy soils under management systems in the subtropical region of Brazil. **Rev Bras Cienc Solo**, v.46, p.e0220074, 2022.
- PINTO, L. A. S. R.; TORRES, J. L. R.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JÚNIOR, W. F.; LIMA, S. S.; BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G. Aggregates physicogenic and biogenic under different management systems in the Cerrado region, Brazil. **Rev Bras Cienc Solo**, v.45, p.0200114, 2021b.
- PINTO, L. A. S. R.; ZIVIANI, M. Z.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JUNIOR, W. F.; LIMA, S. S.; SILVA, C. F.; TORRES, J. L. R., PEREIRA, M. G. Soil organic matter of aggregates physicogenic and biogenic in areas under no-tillage system in the Cerrado, Brazil. **Research, Society and Development**, v.10, n.5, p.e39910515012, 2021a.
- PULLEMAN, M. M.; SIX, J.; MARINISSEN, J. C. Y.; JONGMANS, A. G. Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. **Applied Soil Ecology Amsterdam**, v.29, n.1, p.1–15, 2005.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020.
- ROSSI, C. Q.; PINTO, L. A. S. R.; MOURA, O. V.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G. Soil organic matter in biogenic, intermediate and physicogenic aggregates under agroecological management. **Revista Caatinga**, v.36, p.167–176, 2023a.
- ROSSI, C. Q.; PINTO, L. A. S. R.; SOUZA, R. C.; MORAIS, I. D. S.; MIRANDA, L. H. D. S.; SILVA, T. P.; PEREIRA, M. G. Organic matter fractions of soil aggregates under agroecological production systems in the southeast of Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v.55, p.e20228601, 2023b.
- SANDIM, A. S.; SILVA, L. J. R.; DEUS, A. C. F.; PENN, C.; BÜLL, L. T. Phosphorous Fractions in Weathered Tropical Soils After Application of Conventional and Alternative P Fertilizers. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.23, p.5621–5631, 2023.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 356 p. 2018.
- SATO, J. H.; FIGUEIREDO, C. C.; MARCHAO, R. L.; MADARI, B. E.; BENEDITO, L. E. C.; BUSATO, J. G.; SOUZA, D. M. Methods of soil carbon determination in Brazilian savannah soil. **Scientia Agrícola**, v.71, n.4, p.302–308, 2014.
- SCHULTZ, N.; PINTO, L. A. S. R.; LIMA, S. S.; ZIVIANI, M. M.; ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G. Agregação do solo e atributos químicos em áreas com diferentes coberturas

vegetais. In: **Características do Solo e sua Interação com as Plantas** 2.2 ed.: Atena Editora, pp.1–12, 2019.

SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; MELO, T. R.; CORRÊA NETO, T. A.; ANJOS, L. H. C.; CORREIA, M. E. F. How the biological activity of Oligochaeta shape soil aggregation and influence the soil functions. In: **Global Symposium on Soil Biodiversity**; pp.19–22, 2021.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy** 12th ed. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, US Government Printing Office, Washington DC, 360 pp. 2014.

SUÁREZ, L. R.; AUDOR, L. C. U.; SALAZAR, J. C. S. Formation of macroaggregates and organic carbon in cocoa agroforestry systems. **Floresta & Ambiente**, v.26, n.3, p.e20180312, 2019.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2 ed., v.174, 1995.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa, 573p., 2017.

TIECHER, T.; FONTOURA, S. M.; AMBROSINI, V. G.; ARAÚJO, E. A.; ALVES, L. A.; BAYER, C.; GATIBONI, L. C. Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management. **Geoderma**, v.435, p.116495, 2023.

VELASQUEZ, E.; PELOSI, C.; BRUNET, D.; GRIMALD, M.; MARTINS, M.; RENDEIRO, A. C.; BARRIOS, E.; LAVELLE, P. This ped is my ped: visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. **Pedobiologia**, v.51, p.75–87, 2007.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; SHAXSON, F.; PRETTY, J. The Spread of Conservation Agriculture: Justification, Sustainability and Uptake. **Int. J. Agric. Sustain**, v.7, p.292–320, 2009.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global Spread of Conservation Agriculture. **Int. J. Environ. Stud.**, v.76, p.29–51, 2019.

ZAVASCHI, E.; ABREU FARIA, L.; FERRAZ-ALMEIDA, R.; DO NASCIMENTO, C. A. C.; PAVINATO, P. S.; OTTO, R.; VITTI, A. C.; VITTI, G. C. Dynamic of P flux in tropical acid soils fertilized with humic acid complexed phosphate. **J Soil Sci Plant Nutr.**, v.20, p.1937–1948, 2020.

ZHANG, Y.; LI, P.; LIU, X.; XIAO, L.; SHI, P.; ZHAO, B. Effects of farmland conversion on the stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil aggregates on the Loess Plateau of China. **Geoderma**, v.351, p.188–196, 2019.

ZINN, Y. L.; MARRENJO, G. J.; SILVA, C. A. Soil C/N ratios are unresponsive to land use change in Brazil: A comparative analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.255, p.62–72, 2018.

6. CONCLUSÕES GERAIS

A proporção de agregados biogênicos e fisiogênicos, bem como os atributos associados à agregação do solo (matéria orgânica do solo, macro e microagregados, glomalina, fertilidade e nutrientes), que funcionaram como indicadores de qualidade, foram influenciados pelos diferentes sistemas de uso e manejo do solo. O que possibilitou a identificação das diferenças entre eles e em comparação a área de referência.

No sistema de pastagem permanente (com 45 anos de instalação) foi observado maiores valores de agregados biogênicos; e maiores teores dos atributos avaliados nos agregados em comparação aos demais sistemas, independentemente das vias de formação; seguido do sistema de produção de grãos consorciado (com 25 anos de adoção do sistema conservacionista, sendo os últimos seis anos de cultivo intercalar milho com *Urochloa ruziziensis* no período seco).

A influência benéfica da *Urochloa ruziziensis* associada ao plantio de milho (segunda safra ou safrinha) pode ser constatada principalmente na camada subsuperficial, pois contribuiu para o aumento da estabilidade de macroagregados e também nos teores de carbono total, glomalina total e fósforo de moderada labilidade em comparação à sucessão soja/milho.

A formação dos agregados biogênicos contribuiu para a manutenção das diferentes frações da matéria orgânica do solo, principalmente as mais lábeis e solúveis. Os agregados biogênicos também podem favorecer os mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo, em destaque a proteção física por oclusão. Esse mecanismo eleva o potencial do solo em preservar, armazenar e disponibilizar carbono e outros nutrientes. Ressalta-se ainda que esses benefícios podem ser observados de forma mais relevante na “camada arável” de sistemas conservacionistas, podendo ser citado o sistema plantio direto.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ficou evidente a melhor qualidade do solo na área do sistema de pastagem identificada através da análise dos agregados, independentemente de sua origem. Para que esta seja intensificada, sugere-se o aumento da diversificação de atividades de produção, com a inclusão do componente “lavoura” e/ou “florestal” ao sistema de pastagem; baseando-se no conceito de sistema integrado de produção agropecuária (SIPA). Essa é uma estratégia de produção sustentável que integra atividades da pecuária, agrícola e/ou florestal, conduzidas na mesma área; em cultivo consorciado, em sucessão ou rotação, buscando efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, contemplando a adequação ambiental, a valorização do homem, a quebra de ciclos bióticos (pragas, doenças), a viabilidade econômica, entre outros benefícios.

Após a introdução do novo componente no sistema de pastagem, o monitoramento do impacto da mudança do uso e manejo das terras poderá ser realizado por meio do estudo das propriedades do solo, sendo uma destas a avaliação da agregação e das vias de formação. Uma vez que, as maiores diferenças entre as classes de agregados foram verificadas nos sistemas com maior diversidade de espécies vegetais, como observado nas áreas de produção de grãos. Mensurar as vantagens ambientais, econômicas e sociais do SIPA, fortalece as ações de pesquisa, transferência de tecnologias e políticas públicas focadas no uso consciente e sustentável das terras, principalmente aquelas em que são observados solos de textura arenosa. No entanto, faz-se necessário uma análise técnica criteriosa sobre as peculiaridades da área de pastagem antes da inclusão de outro(s) componente(s), com destaque para: o tamanho da área; a conformidade à legislação ambiental; as condições do solo; a estrutura disponível; a disponibilidade de capital e mão-de-obra; o conhecimento tecnológico por parte do produtor; e a viabilidade de assistência técnica capacitada para implantação e condução do sistema.

Os sistemas de produção de grãos proporcionaram aos agregados biogênicos maiores teores de matéria orgânica de maior labilidade e solubilidade. Contudo, os resultados da estabilidade microagregados, dos teores de nitrogênio e fósforo, e dos índices estequiométricos C/N e C/P precisam de mais estudos para a obtenção de maiores informações. Neste contexto, o manejo da fertilidade do solo (correção e adubação) e as práticas de preparo e rotação de culturas precisam ser reavaliadas. Sugere-se também a possibilidade de implantação do SIPA, principalmente na área de sistema plantio direto. Porém, é preciso que seja feita uma análise dos pontos mais críticos verificados nas áreas de produção de grãos antes da introdução de um novo componente.

Sistemas conservacionistas que englobam, simultaneamente, a diversidade de espécies vegetais em esquema de rotação, consorciação e/ou sucessão de culturas, a contínua deposição de resíduos vegetais na superfície do solo e a ausência (ou mínimo) revolvimento da “camada arável”, proporcionam condições ambientais ideais aos agentes biológicos responsáveis pela formação de agregados biogênicos. Essas unidades estruturais são importantes reservatórios de matéria orgânica e nutrientes, como observado pelas maiores diferenças dos atributos e índices avaliados nos agregados biogênicos e fisiogênicos das áreas de sistema plantio direto e sistema plantio direto associado a *Urochloa ruziziensis*.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

- ARIOLI, E. E.; LICHT, O. A. B. **Grupo Serra Geral no estado do Paraná**. Curitiba: Mineropar, 2014.
- BATISTA, I; CORREIA, M. E. F; PEREIRA, M. G; BIELUCZYK, W; SCHIAVO, J. A; MELLO, N. A. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no Cerrado, MS. **Semina**, v.33, p.1–10, 2013.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v.124, p.3–22, 2005.
- BULLOCK, P.; FEDEROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Albrighton, England: Waine Research Publications. 152 p. 1985.
- CÉCILLON, L.; MELLO, N. A.; DANIELI, S.; BRUN, J. Soil macroaggregate dynamics in a mountain spatial climate gradient. **Biogeochemistry**, v.97, p.31–43, 2009.
- CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 5, p. 333-370, 2007.
- DEMATTE, J. L. I., DEMATTE, J. A. M. Vantagens e limitações dos solos arenosos. In: DEMATTE, J. L. I., DEMATTE, J. A. M. (eds). **Manejo de solos arenosos: fundamentos e aplicações**. Piracicaba: LSO-ESALQ, 2024a, p. 24-26.
- DEMATTE, J. L. I., DEMATTE, J. A. M. Perspectivas e desafios em relação aos solos arenosos. In: DEMATTE, J. L. I., DEMATTE, J. A. M. (eds). **Manejo de solos arenosos: fundamentos e aplicações**. Piracicaba: LSO-ESALQ, 2024b, p. 31-33.
- DEMATTE, J. L. I., DEMATTE, J. A. M. Preparo de solos arenosos. In: DEMATTE, J. L. I., DEMATTE, J. A. M. (eds). **Manejo de solos arenosos: fundamentos e aplicações**. Piracicaba: LSO-ESALQ, 2024c, p. 33-34.
- DEMATTE, J. L. I., DEMATTE, J. A. M. Tipos de solos arenosos. In: DEMATTE, J. L. I., DEMATTE, J. A. M. (eds). **Manejo de solos arenosos: fundamentos e aplicações**. Piracicaba: LSO-ESALQ, 2024c, cap. 3, p. 22-24.
- DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; DENARDIN, N. D.; WIETHÖLTER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. p. 39, 2012.
- DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, 2016.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (eds). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Soil Science Society of America. Madison, Special Publication, n. 35, p. 3-22. 1994.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (eds). **Methods for assesing soil quality**. Soil Science Society of America. Madison, Special Publication, n. 49, p. 25-37, 1996.

- FERNANDES, A. L. Mapa litoestratigráfico da parte oriental da bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1:1.000.000. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 55, p. 53-66, 2004.
- FERNANDES, J. C. F.; PEREIRA, M. G.; SILVA NETO, E. C. A.; CORREA NETO, T. A. Characterization of biogenic, intermediate and physicogenic soil aggregates of areas in the Brazilian Atlantic Forest. **Caatinga**, v.30, n.1, p.59–67, 2017.
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 4, p. 717-728, 2000.
- FERREIRA, C. R.; SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; GUEDES, J. N.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil and Tillage Research**, v.198, p.104533, 2020.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – INTERGOVERNMENTAL TECHNICAL PANEL ON SOILS. **Protocol for the assessment of Sustainable Soil Management**. Rome: FAO. 2020.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS **Voluntary guidelines for sustainable soil management**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2017.
- FRANCHINI, J. C.; VELINI, C. L.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; WATANABE, R. H. Integração Lavoura-Pecuária em solo arenoso e clima quente: duas décadas de experiência. Londrina: Embrapa Soja. (**Embrapa Soja. Circular técnica**, 118). 2016.
- GUHRA, T.; STOLZE, K.; TOTSCHKE, K. U. Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates. **Soil Biol Biochem.**, v.164, p.108483, 2022.
- IPARDES. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Leituras regionais: mesorregião geográfica Oeste Paranaense**. Curitiba: IPARDES, BRDE, 2003. 143 p.
- JOUQUET, P., ZANGERLE, A., RUMPEL, C., BRUNET, D., BOTTINELLI, N., TRAN DUC, T. Relevance and limitations of biogenic and physicogenic classification: a comparison of approaches for differentiating the origin of soil aggregates. **Eur. J. Soil Sci.**, v.60, p.1117–1125, 2009.
- LAVELLE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; BEDANO, J. C.; BLANCHART, E.; GALINDO, V.; GRIMALDI, M.; JIMENEZ, J. J.; VELASQUEZ, E.; ZANGERLE, A. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta Oecologica**, v.105, p.103561, 2020.
- LICHT, O. A. B.; ARIOLI, E. E. **Mapa geológico do grupo Serra Geral no estado do Paraná: nota explicativa**. Curitiba: ITCG, 2018.
- LIMA, C. L. R.; KAISER, D. R. Estrutura e agregação do solo. In: ALBUQUERQUE, J. A.; GUBIANI, P. I. (eds). **Física do solo**. SBCS. Núcleo Regional Sul. CDU (613.43), pp.71–102. 2023.
- LIMA, S. S.; PEREIRA, M. G.; SILVA NETO, E. C.; FERNANDES, D. A. C.; AQUINO, A. M. Biogenic and physicogenic aggregates under different crops with black oat in Nova Friburgo, Brazil. **Caatinga**, v.33, n.2, p.299–309, 2020.
- LOSS, A.; FERREIRA, G. W.; COMIN, J. J.; PEREIRA, M. G.; FREO, V. A.; PICCOLO, M. C.; BRUNETTO, G. Carbono orgânico total e oxidável em agregados de um Argissolo adubado com dejetos suínos. **Cienc. Suelo**, v.38, n.1, p.12–20, 2020.

- LOSS, A.; LOURENZI, C. R.; DOS SANTOS, E.; MERGEN, C. A.; BENEDET, L.; PEREIRA, M. G.; PICCOLO, M. C.; BRUNETTO, G.; LOVATO, P. E.; COMIN, J. J. Carbon, nitrogen and natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in biogenic and physicogenic aggregates in a soil with 10 years of pig manure application. **Soil and Tillage Research**, v.166, p.52–58, 2017.
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. L.; BEUTLER, S. J. Soil fertility, physical and chemical organic matter fractions, natural ^{13}C and ^{15}N abundance in biogenic and physicogenic aggregates in areas under different land use systems. **Soil Research**, v.52, p.685–697, 2014.
- MELO, T. R.; PEREIRA, M. G.; BARBOSA, G. M. C.; SILVA NETO, E. C., ANDRELLO, A. C.; FILHO, J. T. Biogenic aggregation intensifies soil improvement caused by manures. **Soil and Tillage Research**, v.190, p.186–193, 2019.
- MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E.; FERREIRA, G. W.; COMIN, J. J.; LOVATO, P. E.; BRUNETTO, G. Atributos químicos em agregados biogênicos e fisiogênicos de solo submetido à aplicação com dejetos suínos. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.**, v.14, n.1, e5620, 2019.
- MINEROPAR. **Mapa geológico do Estado do Paraná**. Curitiba, 1989. 1 mapa color. Escala 1:650.000.
- MOURA, O. V. T., ROSSI, C. Q., SANTOS, O. A. Q., PEREIRA, M. G., PINTO, L. A. S. R.; ARAÚJO, E. S. Fósforo em agregados biogênicos e fisiogênicos sob diferentes sistemas de manejo agroecológico. **Revista Agrarian**, v.12, p.466–478, 2019.
- MURPHY, C. A.; FOSTER, B. L.; RAMSPOTT, M. E.; PRICE, K. P. Effects of cultivation history and current grassland management on soil quality in northeastern Kansas. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 61, p. 75-89, 2006.
- OADES, J. M. Soil organic-matter and structural stability - mechanisms and implications for management. **Plant Soil**, v.76, p.319–337, 1984.
- PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BATISTA, I.; MELO, T. R.; SILVA NETO, E. C.; PINTO, L. A. S. R. Biogenic and physicogenic aggregates: formation pathways, assessment techniques, and influence on soil properties. **Rev Bras Cienc Solo**, v.45, p.e0210108, 2021.
- PINTO, L. A. S. R.; MENDONÇA, O. V. T.; ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; BARROS, F. C. Evolución y acumulación de C-CO₂ en agregados biogênicos y fisiogênicos presentes en diferentes tipos de manejos agroecológicos. **Rev. Acta Agron.**, v.67, p.494–500, 2018.
- PINTO, L. A. S. R.; TORRES, J. L. R.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JÚNIOR, W. F.; LIMA, S. S.; BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G. Aggregates physicogenic and biogenic under different management systems in the Cerrado region, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2021a;45:e0200114.
- PINTO, L. A. S. R.; ZIVIANI, M. Z.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JUNIOR, W. F.; LIMA, S. S.; SILVA, C. F.; TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Soil organic matter of aggregates physicogenic and biogenic in areas under no-tillage system in the Cerrado, Brazil. **Research, Society and Development**, v.10, n.5, e39910515012, 2021b.
- PULLEMAN, M. M.; SIX, J.; MARINISSEN, J. C. Y.; JONGMANS, A. G. Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. **Applied Soil Ecology Amsterdam**, v.29, n.1, p.1–15, 2005.

- REICHERT, J. M.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F.; SUZUKI, L. E. A. S. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandyzation/desertification processes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.233, p.370–380, 2016.
- RIBEIRO, K. A., PADOVAN, M. P., FEIDEN, A. Avaliação da estrutura de solos sob sistemas agroflorestais biodiversos na Região Oeste do Paraná. **Revista GeoPantanal**, v.14, n.26, p.49–65, 2019.
- ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; MOURA, O. V. T.; ALMEIDA, A. P. C. Vias de formação, estabilidade e características químicas de agregados em solos sob sistemas de manejo agroecológico. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.51, n.9, p.1677–1685, 2016.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 356p. 2018.
- SCHULTZ, N.; PINTO, L. A. S. R.; LIMA, S. S.; ZIVIANI, M. M; ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G. Agregação do solo e atributos químicos em áreas com diferentes coberturas vegetais In: **Características do Solo e sua Interação com as Plantas**. 2.2 ed.: Atena Editora, v.2, p.1–12, 2019.
- SEIDEL, E. P.; CALEGARI, M. R.; MARTINS, V. M.; CUNHA, J. E.; PIRES, M. M.; SILVA, B. A.; FUJITA, R. H. **Principais solos da mesorregião Oeste do Paraná: abordagem para educadores do ensino fundamental e médio**. Marechal Cândido Rondon (PR): NEPAR/SBCS, 2023. 48p.
- SILVA NETO, E. C; PEREIRA, M.G; FERNANDES, J. C. F; CORRÊA NETO, T. A. Aggregate formation and soil organic matter under different vegetation types in Atlantic Forest from Southeastern Brazil. **Semina**, v.37, n.6, p.3927–3940, 2016.
- SILVA NETO, L. F; SILVA, I. F; INDA, A. V; NASCIMENTO, P. C; BORTOLO, L. Atributos físicos e químicos de agregados pedogênicos e de coprólitos de minhocas em diferentes classes de solos da Paraíba. **Ciência Agrotécnica**. v.34, n.6, p.1365–1371, 2010.
- ŠIMANSKÝ, V.; JURIGA, M.; JONCZAK, J.; UZAROWICZ, Ł.; STĘPIEŃ W. How relationships between soil organic matter parameters and soil structure characteristics are affected by the long-term fertilization of a sandy soil. **Geoderma**, v.342, p.75–84, 2019.
- SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil Till Res.**, v.79, p.7– 31, 2004.
- SUÁREZ, L. R.; AUDOR, L. C. U.; SALAZAR, J. C. S. Formation of macroaggregates and organic carbon in cocoa agroforestry systems. **Floresta & Ambiente**, v.26, n.3, p.e20180312, 2019.
- TEIXEIRA, W. G., DONAGEMMA, G. K. **Anais do III Simpósio Brasileiro de Solos Arenosos**. 2019.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **J Soil Sci.**, v.62, p.141–163, 1982.
- VELÁSQUEZ, E.; FONTE, S. J.; BAROT, S.; GRIMALDI, M.; DESJARDINS, T.; LAVELLE, P. Soil macrofauna-mediated impacts of plant species composition on soil functioning in Amazonian pastures. **Appl. Soil Ecol**, v.56, p.43–50, 2012.

VELASQUEZ, E.; PELOSI, C.; BRUNET, D.; GRIMALDI, M.; MARTINS, M.; RENDEIRO, A. C.; BARRIOS, E.; LAVELLE, P. This ped is my ped: Visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. **Pedobiologia**, v.51, p.75–87, 2007.

VENTURA, B.S.; LOSS, A.; GIUMBELLI, L.D.; FERREIRA, G.W.; BUENO, A.C.; LOURENZI, C.R.; COMIN, J.J.; BRUNETTO, G. Carbon, nitrogen and humic substances in biogenic and physicogenic aggregates of a soil with a 10-year history of successive applications of swine waste. **Revista Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v.21, p.329–343, 2018.

WELTER, C. A., BATISTA, A. M., CENTURIÃO, D. A. S., RIPPEL, R. Crescimento econômico no oeste do Paraná: uma análise a partir de indicadores regionais. **Revista Paranaense de Desenvolvimento-RPD**, v.41, n.138, p.159–176, 2020.