



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



TESE DE DOUTORADO

THAMIRYS SUELLE DA SILVA

**SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA: INFLUÊNCIA DE
ESPÉCIES FORRAGEIRAS E DO ESPAÇAMENTO SOBRE CARBONO
ORGÂNICO NOS AGREGADOS DE UM CAMBISSOLO NO SEMIÁRIDO DO
CEARÁ**

Rio Largo, Alagoas

2025

THAMIRYS SUELLE DA SILVA

**SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA: INFLUÊNCIA DE
ESPÉCIES FORRAGEIRAS E DO ESPAÇAMENTO SOBRE CARBONO
ORGÂNICO NOS AGREGADOS DE UM CAMBISSOLO NO SEMIÁRIDO DO
CEARÁ**

Tese apresentada à Coordenação do Programa
de Pós-Graduação em Agronomia: Produção
Vegetal, CECA/UFAL, para obtenção do título
de Doutora em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Stoécio Malta Ferreira
Maia

Rio Largo, Alagoas

2025

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA Bibliotecário
Responsável: Erisson Rodrigues de Santana
CRB - 1512

S586s Silva, Thamirys Suelle da.

Sistemas de integração pecuária-floresta: influência de espécies forrageiras e do espaçamento sobre carbono orgânico nos agregados de um cambissolo no semiárido do Ceará. / Thamirys Suelle da Silva. – 2025.

106 f.: il.

Orientador (a): Stoécio Malta Ferreira Maia.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós- Graduação em Agronomia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio largo, 2025.

Inclui Bibliografia

1. Agregados do solo. 2. Estoque de C. 3. Estrutura do solo. 4. Mudança no uso da terra. 5. Semiárido. 6. Sistemas integrados.

CDU:631.452

FOLHA DE APROVAÇÃO

THAMIRYS SUELLE DA SILVA

SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA: INFLUÊNCIA DE ESPÉCIES FORRAGEIRAS E DO ESPAÇAMENTO SOBRE CARBONO ORGÂNICO NOS AGREGADOS DE UM CAMBISSOLO NO SEMIÁRIDO DO CEARÁ

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Agronomia, do Programa de Pós-graduação em Agronomia do Campus - Centro de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Tese defendida e APROVADA em 24 de abril de 2025.

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **STOECIO MALTA FERREIRA MAIA**
Data: 09/06/2025 14:18:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Prof. Dr. Stoécio Malta Ferreira Maia
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **FRANCISCO ALISSON DA SILVA XAVIER**
Data: 09/06/2025 14:39:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Francisco Alisson da Silva Xavier
Membro Externo

Documento assinado digitalmente
 **SELENOBALDO ALEXINALDO CABRAL DE SANT'ANNA**
Data: 10/06/2025 09:09:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Selenobaldo Alexinaldo Cabral de Sant'Anna
Membro Externo

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO CAVALCANTE**
Data: 09/06/2025 15:00:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Cavalcante
Membro Externo

A minha família, em especial a minha mãe, Anailda Ferreira Barbosa e a
minha avó Djaci Ferreira Barbosa.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo cuidado e proteção em minha vida, por me conceder força, sabedoria e discernimento nos momentos mais difíceis deste processo, permitindo-me superar todas as barreiras e chegar até aqui. Gratidão eterna!

A minha mãe Anaílda Ferreira e minha avó Djaci, pelos ensinamentos ao longo desses anos e por estarem sempre ao meu lado nos momentos alegres e difíceis, por serem minha fonte de apoio e incentivo. Obrigada por sempre me querer bem!

A minha irmã Thássila Anyelle, pelo apoio e companheirismo.

Ao meu orientador, professor Stoécio Malta Ferreira Maia, meus sinceros agradecimentos pela disponibilidade, acolhimento e paciência. Agradeço por todos os ensinamentos e experiências compartilhadas, bem como pelo apoio e incentivo que me permitiram chegar até aqui. Gratidão sempre!

Aos amigos e colegas do Laboratório de Análises Ambientais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas (IFAL), em especial à Crislany Canuto, pelos ensinamentos e pelo companheirismo, sempre presente nos momentos mais difíceis. Agradeço também ao Handerson Brandão pela ajuda no laboratório e por todo o apoio.

Aos colegas que fiz durante o curso de Pós-Graduação em Agronomia no CECA.

A Universidade Federal de Alagoas e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, por todo suporte e compreensão ao longo da minha trajetória no programa e a todos os professores.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Alagoas (IFAL), Campus Marechal Deodoro, por ter me dado a oportunidade de realizar as pesquisas no Campus e a todos os funcionários, servidores pelos bons momentos e convivência e aos colegas de laboratórios durante todos esses anos.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Limoeiro do Norte, por ter disponibilizado a área de estudo para a realização desse trabalho, ao professor Rodrigo Gregório da Silva.

Ao Centro de Pesquisa para Inovação em Emissões de Gases (RCGI) – Programa Soluções Baseada na Natureza, sediado pela Universidade de São Paulo (USP).

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão da bolsa de estudo de pós-graduação.

A todos que direta ou indiretamente me apoiaram, acreditaram e contribuíram para alcançar esse objetivo.

Enfim, agradeço a todos que me ajudaram a trilhar esta caminhada, tornando possível a realização e a concretização deste trabalho. A todos vocês, os meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

No semiárido brasileiro, predominam os sistemas convencionais de agricultura e pecuária, caracterizados por mudanças no uso da terra que contribuem para a destruição dos agregados do solo, expondo a matéria orgânica, resultando na perda do carbono do solo (COS) e na sua degradação. Com isso, soluções baseadas na natureza estão sendo estudadas e implementadas com o objetivo de promover uma agricultura mais sustentável. Um exemplo são os sistemas integrados de produção agrícola, modelo que tem proporcionado sustentabilidade na agricultura e o aumento da produtividade, além de minimizar as emissões dos gases do efeito estufa (GEE). Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da adoção de sistemas integrados Pecuária-Floresta (IPF) no semiárido brasileiro por meio da agregação do solo e carbono orgânico do solo em diferentes espaçamentos e profundidades, com a implementação de diferentes culturas. O estudo foi conduzido na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão do IFCE do Ceará, Campus Limoeiro do Norte. Os sistemas avaliados consistiram em seis áreas, em que os tratamentos analisados foram em quatro áreas cultivadas com as espécies sorgo, palma forrageira, capim massai e capim buffel, implantadas entre faixas de vegetação nativa (FxVN) com diferentes espaçamentos de 7, 14 e 28 metros (E7, E14 e E28). Esses sistemas foram comparados com uma área de vegetação nativa (VN; Caatinga) que foi utilizada como referência. As amostras de solo foram coletadas até profundidades de 0-50 cm. Foi avaliada a distribuição de agregados estáveis em água considerando as seguintes classes de diâmetros: macroagregados (>2,00 mm), mesoagregados (2,00-0,25 mm) e microagregados (0,25-0,053 mm). Foram calculados o diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), o índice de estabilidade dos agregados (IEA) e o índice de sensibilidade (IS), além do COS associados aos agregados. Este estudo compreende dois capítulos. No Capítulo 1, as análises de estabilidade de agregados nos espaçamentos de 7, 14 e 28m, mostraram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os sistemas de IPF quando comparado com a área da VN. A distribuição das classes de agregados indicou predominância nos mesoagregados, seguido dos macroagregados, e, por fim, dos microagregados, independentemente do uso da terra e das camadas avaliadas. O E28 demonstrou maior estabilidade na distribuição dos agregados, especificamente nos sistemas integrados com capim buffel e o sorgo. O DMP e o DMG mostraram resultados semelhantes entre os sistemas de IPF, a VN e FxVN, principalmente nos espaçamentos de 7 e 14m. Os maiores IS foram observados na camada de 30-50 cm, em todos os espaçamentos, exceto nos sistemas com capim massai nos espaçamentos de 7 e 28 m. No capítulo 2, a VN e os sistemas de IPF apresentaram maior estoque de carbono nos mesoagregados, principalmente no E28 com os sistemas integrados com capim buffel, massai e sorgo. Para o espaçamento de E7, apenas a VN nas camadas de 0-10 cm e 30-50 cm apresentou maior estoque de COS do que os demais sistemas analisados. Conclui-se que o estoque de carbono ocorre majoritariamente nos mesoagregados, e os sistemas IPF são uma alternativa sustentável para melhorar o estoque de carbono do solo e a agregação do solo no semiárido brasileiro, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis com menos impacto.

Palavras-chave: Agregados do solo; Estoque de C; Estrutura do solo; Mudança no uso da terra; Semiárido; Sistemas integrados.

ABSTRACT

In the Brazilian semi-arid region, traditional systems of agriculture and livestock farming prevail. These changes in land use contribute to soil degradation, causing the destruction of soil aggregates, exposing organic matter, and resulting in the loss of soil carbon. With this, nature-based solutions are being studied and implemented with the aim of promoting more sustainable agriculture. An example is integrated production systems, a model that has provided sustainability in agriculture and increased productivity, in addition to minimizing GHG emissions. In this sense, the objective of this study was to evaluate the effects of adopting Integrated Livestock-Forest Systems (ILF) in the Brazilian semi-arid region through the physical structuring of the soil at different spacings and depths, with the implementation of different crops, using native vegetation (Caatinga) as a reference. The study was conducted at the Teaching, Research, and Extension Unit of IFCE in Ceará, Limoeiro do Norte Campus. The evaluated systems consisted of six areas; the analyzed treatments were in four cultivated areas: sorghum (So), forage cactus (Fc), massai grass (Mg), and buffel grass (Bg), implemented between strips of native vegetation (NTS) with different spacings of 7, 14, and 28 meters (S7, S14, and S28). These systems were compared with an area of native vegetation (NV) that was used as a reference. Soil samples were collected to depths of 0-50 cm. The distribution of stable aggregates in water was evaluated considering the following diameter classes: macroaggregates (>2.00 mm), mesoaggregates (2.00-0.25 mm), and microaggregates (0.25-0.053 mm). The mean weighted diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), aggregate stability index (ASI), and sensitivity index (SI) were calculated, in addition to the SOC associated with the aggregates. This study comprises two chapters. In Chapter 1, the analyses of aggregate stability at spacings of 7, 14, and 28 showed significant differences ($p < 0.05$) between the ILF systems when compared to the NV area. The distribution of aggregate classes indicated a predominance of mesoaggregates, followed by macroaggregates, and finally microaggregates, regardless of land use and the evaluated layers. The E28 demonstrated greater stability in the distribution of aggregates, specifically in systems integrated with buffel grass and sorghum. The MWD and GMD showed similar results among the ILF systems, NV, and NTS, mainly at the 7 and 14m spacings. The highest IS values were observed in the 30-50 cm layer, at all spacings, except in the systems with massai grass at the 7 and 28 m spacings. In chapter 2, NV and ILF systems showed higher carbon stocks in the mesoaggregates, especially in S28 with the systems integrated with buffel grass, massai, and sorghum. For the S7 spacing, only the NV in the 0-10 cm and 30-50 cm layers showed a higher SOC stock than the other analyzed systems. It is concluded that carbon stock occurs mainly in the mesoaggregates, and ILF systems are a sustainable alternative to improve soil carbon stock in the Brazilian semi-arid region, promoting sustainable agricultural practices with less impact.

Keywords: Soil aggregates; C stock; Soil structure; Land-use change; Semi-arid; Integrated systems.

LISTA DE FIGURAS

REVISÃO DE LITERATURA

Figura 1.	Teoria da hierarquia de agregação e os princípios dos compostos orgânicos responsáveis pela estabilidade dos agregados.....	23
Figura 2.	Esquema simplificado que ilustra o processo de formação dos agregados do solo (macroagregados e microagregados).....	24
Figura 3.	Ilustração de diferentes Sistemas Integrados (SI) de cultivo: Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), Pecuária-Floresta (IPF), Lavoura-Floresta (ILF) e Lavoura-Pecuária (ILP).....	30

CAPÍTULO 1

Figura 1.	Representação esquemática da área de estudo com sistemas de IPF com os diferentes espaçamentos entre as faixas de árvores nativas (Caatinga).....	44
Figura 2.	Estabilidade de agregados em água (%) sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), o sistema de Integração Pecuária-Floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7m – E7, 14m – E14 e 28m – E28) nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.....	50
Figura 3.	Diâmetro médio ponderado (DMP) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), e sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF) com cultivos: capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos (7m – E7, 14m – E14 e 28m – E28).....	52
Figura 4.	Diâmetro médio geométrico (DMG) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), e sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF) com os cultivos: capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos (7m – E7, 14m – E14 e 28m – E28).....	52
Figura 5.	Índice de estabilidade de agregados (IEA) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma orelha (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7m – E7, 14m – E14 e 28m – E28).....	54
Figura 6.	Índice de sensibilidade (IS) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob faixa de vegetação nativa (FxVN), capim buffel (IPFCb),	55

	capim massai (IPFCm), palma orelha (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7m – E7, 14m – E14 e 28m – E28).....	
Figura 7.	Biplot análise de componentes principais (ACP 1 e 2) associados aos agregados do solo distribuídas nas camadas (a) 0-10 cm, (b) 10-20 cm, (c) 20-30 cm e (d) 30-50 cm sob os componentes arbóreos: vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN) e nos sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos (7,14 e 28m) entre as FxVN da Caatinga com 06 anos de cultivo	58
Figura 8.	Dendrograma da análise hierárquica de agrupamentos para sistemas de IPF em diferentes espaçamentos (7, 14 e 28m) entre a faixa de vegetação nativa nas camadas de 0-10 (a), 10-20 (b), 20-30 (c) e 30-50 (d) cm.....	59

CAPÍTULO 2

Figura 1.	Representação esquemática da área do estudo com sistemas de IPF com os diferentes espaçamentos entre as faixas de árvores nativas (Caatinga).....	76
Figura 2.	Distribuição de agregados do solo em água (%) sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), os sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7m – E7 e 28m – E28) na profundidade de 0-50 cm.....	79
Figura 3.	Teores de carbono (g Kg^{-1}) nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN) e nos sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7m – E7 e 28m – E28).....	81
Figura 4.	Estoque de carbono orgânico do solo (COS) (Mg ha^{-1}) associado aos agregados do solo nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN) e nos sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7m – E7 e 28m – E28).....	84
Figura 5.	A proporção (%) de contribuição de COS em cada fração dos agregados do solo nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), e nos sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos	87

diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7m - E7 e 28m – E28) nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.....

Figura 6. Biplot análise de componentes principais (ACP 1 e 2) associados aos agregados do solo distribuídas nas camadas (a) 0-10 cm, (b) 10-20 cm, (c) 20-30 cm e (d) 30-50 cm sob os componentes arbóreos: vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN) e nos sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos (7 e 28m) entre as FxVN da Caatinga com 06 anos de cultivo..... 90

Figura 7. Dendrograma da análise hierárquica de agrupamentos para sistemas de IPF em diferentes espaçamentos (7 e 28m) entre a faixa de vegetação nativa nas camadas de 0-10 (a), 10-20 (b), 20-30 (c) e 30-50 (d) cm 91

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.	Caracterização dos atributos químicos e físicos do solo sob áreas com vegetação nativa (VN), sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF) com os cultivos de sorgo (IPFSO), palma forrageira (IPFPo), capim massai (IPFCm), capim buffel (IPFCb) e faixa de vegetação nativa (FxVN) na profundidade de 0-50 cm	45
------------------	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
Cb	Capim buffel
Cm	Capim massai
COS	Carbono orgânico do Solo
COT	Teor de Carbono Orgânico Total
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ eq	Carbono orgânico equivalente
DMP	Diâmetro médio ponderado
DMG	Diâmetro médio geométrico
E7	Espaçamento com 7 metros
E14	Espaçamento com 14 metros
E28	Espaçamento com 28 metros
FxVN	Faixa de vegetação nativa
GEE	Gases do Efeito Estufa
IEA	Índice de Estabilidade de Agregados
IFCE	Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará
IPF	Integração Pecuária-Floresta
IS	Índice de Sensibilidade
MOS	Matéria Orgânica do Solo
Po	Palma orelha
SI	Sistema Integrado
So	Sorgo
UEPE	Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão
VN	Vegetação nativa

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO GERAL	16
2 OBJETIVOS	21
2.1 Geral	21
2.2 Específicos	21
3 REVISÃO DE LITERATURA	22
3.1 Agregados do solo	22
3.2 Carbono associado aos agregados do solo	26
3.3 Sistemas integrados de produção agrícola	28
CAPÍTULO 1 – Agregação e estabilidade de agregados do solo sob sistemas integrados pecuária-floresta em um Cambissolo do semiárido brasileiro	40
Resumo	40
1 Introdução	40
2 Material e métodos	42
2.1 Caracterização da área de estudo	42
2.2 Descrição do manejo dos sistemas do uso da terra	43
2.3 Amostragem e análises de solo	44
2.4 Determinação dos agregados do solo estáveis em água	45
2.5 Determinação dos índices de agregação do solo	46
2.6 Análise estatística	47
3 Resultados	48
3.1 Distribuição dos agregados do solo	48
3.2 Diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) ...	51
3.3 Índice de estabilidade dos agregados (IEA)	53
3.4 Índice de Sensibilidade (IS)	54
3.5 Análise multivariada	55
3.5.1 Análise de componente principal	57
3.5.2 Agrupamento hierárquico	59
4 Discussão	60
5 Conclusão	64

Referências	65
CAPÍTULO 2 – Carbono orgânico do solo associado a agregados sob sistemas de integração pecuária-floresta em um Cambissolo no semiárido brasileiro	72
Resumo	72
1 Introdução	72
2 Material e métodos	74
2.1 Caracterização da área de estudo	74
2.2 Descrição do manejo dos sistemas do uso da terra	75
2.3 Amostragem e análises do solo	76
2.4 Determinação dos agregados do solo estáveis em água	76
2.5 Determinação do C orgânico associado aos agregados	77
2.6 Análise estatística	78
3 Resultados	78
3.1 Distribuição dos agregados do solo	78
3.2 Teores de Carbono orgânico associado aos agregados	80
3.3 Estoques de carbono orgânico (COS) associado aos agregados do solo	82
3.4 Proporção de carbono orgânico do solo nos agregados do solo	85
3.5 Análise multivariada	87
3.5.1 Análise de componente principal.....	87
3.5.2 Agrupamento hierárquico.....	90
4 Discussão.....	91
5 Conclusão	96
Referências	97
APÊNDICE A	104
APÊNDICE B	107

1 INTRODUÇÃO GERAL

O semiárido brasileiro abrange uma área total de aproximadamente um milhão de km² (Althoff *et al.*, 2018), dos quais cerca de 34% estão atualmente sob uso de sistemas agropecuários (Araújo Neto *et al.*, 2021). Um dos desafios enfrentados em algumas regiões do semiárido está relacionado com a degradação do solo, resultante, principalmente, do uso indevido da terra por meio de práticas agrícolas inapropriadas de cultivo, como a conversão da vegetação nativa para agricultura e pecuária, a extração ilegal de madeira e pastoreio dos animais que ainda são predominantes nessa região (Medeiros *et al.*, 2023; Bieluczyk *et al.*, 2021). Tais práticas, compromete a qualidade do solo, reduz a biodiversidade, sobretudo promove a perda de carbono orgânico do solo e causa desagregação do solo (Liu *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2024). Além disso, a ausência de práticas de manejo adequadas, como adubação orgânica, inorgânica ou verde, bem como a rotação de culturas podem proporcionar maior atividade microbiana do solo e aumentar o processo de ciclagem de nutrientes (Lima *et al.*, 2024).

Além das limitações impostas pelo clima e pelas características dos solos, o semiárido brasileiro enfrenta atualmente os efeitos das mudanças climáticas, no qual tem apresentado adversidade climáticas e ambientais, como a baixa precipitação anual (<800 mm), a elevada taxa de evapotranspiração e as altas temperaturas. Esses fatores restringem a produção de biomassa vegetal, dificultando o acúmulo da matéria orgânica no solo, o estoque de carbono e a formação e estabilização dos agregados do solo. Estudos de Maia *et al.* (2007), Medeiros *et al.* (2022) e Carvalho *et al.* (2024) indicam que a implantação de sistemas integrados de produção pode aumentar os teores de matéria orgânica e os estoques de carbono do solo no semiárido brasileiro, promovendo benefícios tanto para a produtividade quanto para o meio ambiente.

Nesse contexto, os sistemas integrados de produção (SIs) têm se destacado como alternativa sustentáveis para o uso da terra no semiárido. Esses sistemas são caracterizados pela integração de dois ou mais componentes produtivos, que proporcionam condições favoráveis à produção agrícola, ao mesmo tempo em que promovem a conservação da qualidade ambiental e do solo (Cavalieri-Polizeli *et al.*, 2024). De acordo com Balbino *et al.* (2011), os SIs podem ser classificados em quatro modalidades: (i) Integração Lavoura-Pecuária (ILP) - sistema de produção que engloba os componentes agrícola e pecuário, em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área e no mesmo ano agrícola ou por múltiplos anos; (ii) Integração Pecuária-Floresta (IPF) –

sistema de produção que integra os componentes pecuário (pastagem e animal) e florestal, por meio de consórcios; (iii) Integração Lavoura-Floresta (ILF) – sistema de produção que engloba os componentes agrícola e florestal por meio da consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas (anuais ou perenes); e (iv) Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) – sistema de produção que engloba os componentes agrícola, pecuário e florestal em rotação, consórcio ou sucessão, em uma mesma área, com o objetivo de promover os efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema (Valani *et al.*, 2020).

Diversos estudos têm apresentado os benefícios dos SIs, como o incremento da biomassa microbiana, o aumento da ciclagem de nutrientes, a recuperação de áreas degradadas e a maior produtividade em comparação aos sistemas convencionais (Nascimento *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2024; Damian *et al.*, 2023). No contexto atual das atividades de adaptação às mudanças climáticas, os SIs do tipo lavoura-pecuária-floresta tendem a se tornar cada vez mais predominantes na produção agrícola. Dados apresentados pela Rede ILPF (2024) indicam que a área cultivada sob SIs no Brasil cresceu de 10,7 milhões de hectares em 2010 para 17 milhões em 2020, com destaque para os sistemas ILP e ILPF (Tenelli *et al.*, 2025).

Pesquisas como de Conceição *et al.* (2017) demonstraram que os sistemas de ILPF apresentaram um percentual de sequestro de carbono no solo de 7,8% após três anos de experimento, representando um aumento de 5,5 Mg ha⁻¹ no estoque de carbono orgânico do solo na camada de 0-30 cm, quando comparados com os sistemas de cultivos de floresta (eucalipto). De forma semelhante, Chaves *et al.* (2013) constataram que a conversão de pastagens degradadas para o sistema ILPF, associado ao plantio direto, recuperou quase totalmente os estoques de carbono do solo.

Entretanto, embora alguns estudos tenham sido publicados mostrando os impactos da mudança do uso da terra na dinâmica dos estoques de carbono no solo no semiárido brasileiro (Nascimento *et al.*, 2024; Maia *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2023; Medeiros *et al.*, 2022; Monroe *et al.*, 2021; Araújo Neto *et al.*, 2021), ainda há uma lacuna de pesquisas integradas que avaliem, de forma conjunta, os efeitos dos SIs no semiárido sobre os agregados do solo e os estoques de carbono, diferentemente do que já ocorre em outras regiões como o Cerrado e o Sudeste (Valani *et al.*, 2022). Poucos trabalhos comparam diferentes modalidades de sistemas integrados, especialmente os que envolvem o componente florestal, sendo essa uma área de pesquisa ainda incipiente.

Dessa forma, torna-se necessária a ampliação dos estudos voltados à qualidade do solo em sistemas integrados de produção agrícola no semiárido, especialmente no que se refere à influência do arranjo espacial, da diversidade de culturas e da densidade de árvores sobre os processos de agregação do solo e o sequestro de carbono.

Além disso, é possível avaliar a influência de diferentes arranjos de espaçamento e diferentes combinações de cultivos quanto ao carbono armazenado no solo, bem como no potencial de sequestro de carbono associado a estabilidade dos agregação do solo, conforme a densidade de árvores presente no sistema avaliado. Nesse contexto, os sistemas agrícolas integrados se mostram como uma alternativa viável de produção sustentável, com destaque para recuperação de áreas modificadas ou degradadas.

Nesse sentido, objetivou -se com esta pesquisa avaliar os efeitos da adoção dos Sistemas Integrados Pecuária-Floresta (IPF) no semiárido brasileiro sobre a agregação do solo e carbono orgânico do solo em diferentes espaçamentos e profundidades, com a implementação de diferentes culturas, tendo como referência a vegetação nativa (Caatinga), os resultados obtidos deste estudo podem contribuir para uma estimativa de redução de emissão de carbono devido à adoção de sistemas integrados de ILPF na região do semiárido.

REFERÊNCIAS

ALTHOFF, T.D.; MENEZES, R.S.C.; PINTO, A.S.; PAREYN, F.G.C.; CARVALHO, A.L.; MARTINS, J.C.R.; CARVALHO, E.X.; SILVA, A.S.A.; DUTRA, E.D.; SAMPAIO, E.V.S.B. Adaptation of the century model to simulate C and N dynamics of Caatinga dry forest before and after deforestation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 254, n. 2, p. 26-34, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.016>

ARAÚJO NETO, R. A.; MAIA, S.M.F.; ALTHOFF, T.D., CERRI, C.E.P.; CARVALHO, A.L.; MENEZES, R.S.C. Simulation of soil carbon changes due to conventional systems in the semi-arid region of Brazil: adaptation and validation of the century model, **Carbon Management**, v.12, p.399-410, 2021. <https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1962978>

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (Ed.). **Marco Referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 130 p

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; LAMBAIS, G. R.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; CHERUBIN, M. R. Eucalyptus tree influence on spatial and temporal dynamics of fine-root growth in an integrated crop-livestock-forestry system in southeastern Brazil. **Rhizosphere**, v.19, 100415, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100415>

CARVALHO, F. F.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; PEREZ-MALUF, R.; MONROE, P. H. M.; PEREIRA, F. R.; ALMEIDA, T. C.; NUNES, M. R. Effects of coffee arábica cultivation systems on tropical soil microbial biomass and activity in the northeast region of Brazil. **Agroforestry Systems**, v.98, p.2397-2410, 2024.

<https://doi.org/10.1007/s10457-024-01026-2>

CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; GUEDES FILHO, O.; ROMANOSKI, V. S.; RUTHES, B. E. S.; CAALABRIA, Z. P.; OLIVEIRA, L. B. Conservative farming systems and their effects on soil organic carbon and structural quality. **Soil and Tillage Research**, v.242, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106143>

CONCEIÇÃO, M. C. G.; MATOS, E. S.; BIDONE, E. D.; RODRIGUES, R. A. R.; CORDEIRO, R. C. Changes in soil carbon stocks under Integrated Crop-Livestock-Forest system in the Brazilian Amazon region. **Agricultural Sciences**, v.8, 2017. <https://doi.org/10.4236/as.2017.89066>

CHAVES, S. S. F.; MARTORANO, L. G.; CAMARGO, P. B.; EL-HUSNY, J. C.; FERNANDES, P. C. C.; VALENTE, M. A. Estoque de carbono no solo em área de pastagem convencional e sistema agrossilvipastoril em Paragominas. **Ciências Ambientais**. p.15-22, 2013.

DAMIAN, J. M.; MATOS, E. S.; PEDREIRA, B. C.; CARVALHO, P. C. F.; PREMAZZI, L. M.; CERRI, C. E.P. Intensification and diversification of pasturelands in Brazil: patterns and driving factors in the carbon stocks. **Catena**, v.220, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106750>

LIMA, A. Y. V.; CHERUBIN, M. R.; GRESCHUK, L. T.; MUNIZ, G. D. A. M.; CAVALCANTE, D. M.; ARAUJO PEREIRA, A. P. Mapping soil health research in the Brazilian Semiarid region: a bibliometric approach. **Experimental Agriculture**, v.60, n.29, p.1-18, 2024. <https://doi.org/10.1017/S0014479724000243>

LIU, L.; ZHU, Q.; WAN, Y.; YANG, R.; MOU, R.; LI, Y.; MENG, L.; ZHU, T.; ELRYS, A. S. Afforestation improves soil organic carbon and total nitrogen stocks mainly through increasing >2 mm aggregate fractions and stimulating carbon and nitrogen transformations within aggregates in subtropical karst region. **Catena**, v.243, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108220>

MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S. M.; ARAÚJO FILHO, J. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 71, n. 2, p. 127–138, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9063-8>

MAIA, S. M. F.; MEDEIROS, A. S.; SANTOS, T. C.; LYRA, G. B.; LAL, R.; ASSAD, E. D.; CERRI, C. E. P. Potential of no-till agriculture as a nature-based solution for climate-change mitigation in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.220, 105368, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105368>

MEDEIROS, A.S.; SOARES, A. A. S.; MAIA, S. M. F. Soil Carbon stocks and compartments of organic matter under conventional systems in brazilian semi-arid region. **Revista Caatinga**, v.35, n.3. 2022. <https://doi.org/10.1590/198321252022v35n321>

MEDEIROS, A. S.; CESÁRIO, F. V.; MAIA, S. M. F. Long-term impact of conventional management on soil carbon and nitrogen stocks in the semi-arid region of Brazil: A meta-analysis. **Journal of Arid Environments**, v.218, 105052, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.105052>

MONROE, P. H. M.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; BARROS, W. T.; OLIVEIRA, F. G. R. B.; PEREIRA, M. G. Physical protection of soil organic carbon through aggregates in different land use systems in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v.186, 104427, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104427>

NASCIMENTO, M. S.; BARRET-GARCIA, P. A. B.; MONROE, P. H. M.; PEREIRA, M. G.; BARROS, W. T.; NUNES, M. R. Carbon in soil macroaggregates under coffee agroforestry systems: Modeling the effect of edaphic fauna and residue input. **Applied Soil Ecology**, v.202, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105604>

REDE ILPF. Rede Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. **ILPF em números**. 2024. Disponível em: <https://redeilpf.org.br/>. Acesso em: 30 dez. 2024.
REFATI, D. C.; SILVA, J. L. B.; MACEDO, R. S.; LIMA, R. D. C. C.; SILVA, M. V.; PANDORFI, H.; SILVA, P. C.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. Influence of drought and anthropogenic pressures on land use and land cover change in the brazilian semiarid region. **Journal of South American Earth Sciences**, v.126, 104362, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104362>

SANTOS, C. C.; MEDEIROS, A. S.; ARAÚJO, V. M. F.; MAIA, S. M. F. Soil organic matter fractions under different land uses and soil classes in the Brazilian semi-arid region. **Soil Research**, v.61, p.817-830, 2023. <https://doi.org/10.1071/SR23087>

SILVA, L. J.; OLIVEIRA, D. M. S.; SANTOS, R. S.; OLIVEIRA, P. A.; FREITAS, D. A. F.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Soil carbon dynamics in integrated agricultural systems in Minas Gerais state, Brazil: A meta-analysis. **Geoderma Regional**, v.36, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00761>

TENELLI, S.; NASCIMENTO, A. F.; GABETTO, F. P.; PIMENTEL, M. L.; STRAUSS, M.; BORDONAL, R. O.; CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N. Well-managed grass is a key strategy for carbon storage and stabilization in anthropized Amazon soils. **Journal of Environmental Management**, v.373, 123742, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123742>

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; DA SILVA, L. F. S.; BOVI, R. C.; COOPER, M. Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. **Soil Use and Management**, v.37, n.1, p.22-36, 2020. <https://doi.org/10.1111/sum.12667>

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; DE CAMPOS BERNARDI, A. C.; COOPER, M. Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v.220, 105357, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105357>

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar os efeitos da adoção dos sistemas integrados Pecuária-Floresta (IPF) no semiárido brasileiro sobre a agregação do solo e carbono orgânico do solo em um Cambissolo em diferentes espaçamentos e profundidades, com a implementação de diferentes culturas, tendo como referência a vegetação nativa (Caatinga).

2.2 Específicos

- Avaliar o efeito de diferentes espaçamentos entre as culturas sobre a distribuição e estabilidade dos agregados do solo em sistemas de integração Pecuária-Floresta (IPF) em ambiente no semiárido brasileiro;
- Analisar os índices de agregação do solo em diferentes sistemas de integração Pecuária-Floresta (IPF) no semiárido brasileiro, considerando diferentes espaçamentos e profundidades;
- Avaliar os efeitos da adoção do sistema de integração Pecuária-Floresta (IPF) com diferentes culturas e espaçamentos sobre os estoques de carbono orgânico nas diferentes classes dos agregados do solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Agregados do solo

A formação do solo é um processo dinâmico que resulta da interação entre fatores climáticos, materiais orgânicos, organismos vivos, entre outros. Esse processo começa com a intemperização das rochas e partículas minerais, que se desintegram em partículas menores. A estrutura do solo consiste na organização ou arranjo de partículas sólidas (minerais e orgânicas) e secundárias (agregados) do solo em combinação de diferentes tipos de poros (Schiebelbein *et al.*, 2023). Essas associações organominerais são presumidas como essenciais para o fornecimento de nutrientes, preservação e o armazenamento do carbono, sendo compostas por minerais e matéria orgânica do solo (MOS) (Guhra *et al.*, 2022).

A formação dos agregados é um processo dinâmico que envolve interações entre partículas minerais (argila, silte e areia), MOS e microrganismos. A matéria orgânica, como resíduos de plantas e organismos em decomposição, atua como um agente aglutinante, promovendo a coesão entre as partículas minerais (Lavelle *et al.*, 2020). Os microrganismos também desempenham um importante papel na formação dos agregados, uma vez que são produzidas substâncias, tais como a liberação ativa de exsudatos orgânicos, incluindo mucilagem de raiz, muco de minhoca e substâncias poliméricas extracelulares microbianas, no solo circunjacente (Guhra *et al.*, 2022), que ajudam a unir as partículas.

Ao longo do desenvolvimento da estrutura de agregação, as formas de interação são conduzidas por ciclos de umedecimento e secagem, ação de congelamento, bioturbação, crescimento das raízes, colonização, adsorção e oxidação, que mantém as partículas associadas e arranjas dentro dessa estrutura tridimensional complexas, que serão alteradas ao longo do tempo (Lehndorff *et al.*, 2021). A interação entre as partículas está diretamente relacionada com a superfície do solo, onde as partículas menores se combinam para formar um maior volume de massa de agregados. Isso pode resultar em um aumento de até três vezes no raio da esfera do agregado. Assim, à medida que a estrutura de agregação se expande, diferentes formas de interação e mecanismos de estabilização se tornam necessários para a união dos agregados no solo (Briedis *et al.*, 2018; Tostsche *et al.*, 2018).

A formação e a estabilidade dos agregados do solo são influenciados por diversos fatores, como a umidade, a atividade biológica e as práticas de manejo adotadas (Brady,

2013). Além disso, os agregados em pequenas estruturas se formam por meio da ação de agentes de ligação denominados por temporários, transientes e persistentes (Tisdall; Oades, 1982), que podem apresentar diferentes formas, tamanhos e rugosidade, e sua organização no solo resulta a formação de poros. Esses poros são fundamentais para os processos como a infiltração da água, a retenção e a circulação de ar no solo (Rabot *et al.*, 2018).

Em relação aos agentes de ligação que estão postulado no conceito de hierarquia de agregados proposto por Tisdall e Oades (1982) (Figura 1), os temporários são as raízes finas e hifas de fungos que podem dar início a formação dos agregados, ocupando os poros que há entre microagregados, permitindo a formação e a estabilização dos macroagregados. Os agentes transientes consistem em polissacarídeos excretados por fungos e bactérias que induzem ligações entre as partículas de argila do solo, favorecendo a agregação. Os agentes persistentes são partículas primárias livres, as substâncias húmicas, resíduos de microrganismos aderidos a materiais inorgânicos, que contribuem para a formação dos microagregados pela associação de agentes flocculantes (cátions polivalentes, óxidos de Fe e Al) e a matéria orgânica que permanecem no solo favorecendo a estabilização de agregados mais estáveis (Zhu *et al.*, 2021; Demenois *et al.*, 2018; Six *et al.*, 2004).

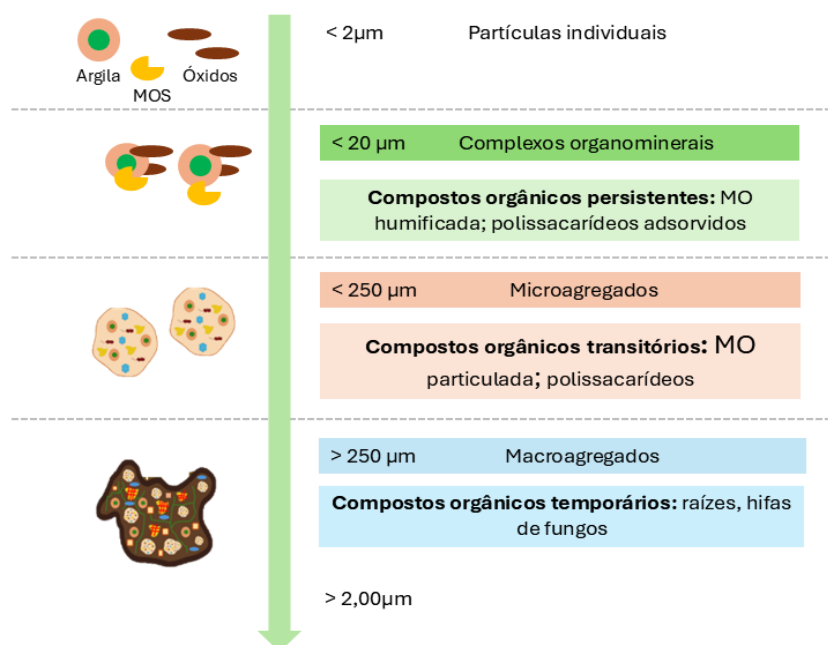


Figura 1. Teoria da hierarquia de agregação e os princípios dos compostos orgânicos responsáveis pela estabilidade dos agregados.

Fonte: Adaptado de Tisdall e Oades (1982).

Nessa formação de agregados também ocorrem processos de interação biológica, química e física (Figura 2), em que os processos físico-químicos são mais associados a argila. Já os processos biológicos são mais associados aos organismos do solo. Essas atividades resultam em uma ligação estreita entre a dinâmica dos agregados e da MOS, especialmente em processos biológicos (Lavelle *et al.*, 2020).

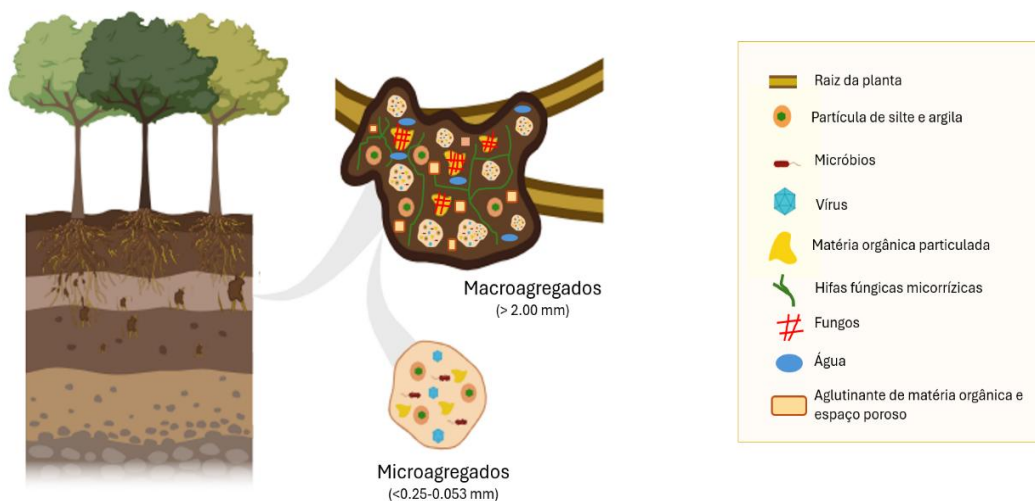


Figura 2. Esquema simplificado que ilustra o processo físico-químico e biológicos da formação dos agregados do solo (macroagregados e microagregados).
Fonte: Autora (2025).

Segundo Christensen (2000), existem três mecanismos que podem influenciar a estabilização e proteção da MOS. Esses mecanismos são: (i) oclusão dentro do agregado ou nos poros finos, considerado o mais importante mecanismo de estabilização da MOS (Bayer *et al.*, 2000); (ii) complexação dos compostos orgânicos com a matriz mineral do solo e (iii) recalcitrância de estabilização da MOS.

Os agregados são avaliados de diferentes formas, que podem ser por via úmida ou por via seca, esses são os métodos mais comuns de determinação da estabilidade dos agregados do solo. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diferentes métodos para avaliar a estabilidade dos agregados do solo, dos métodos mais simples e rápidos até os mais complexos, cada metodologia adotada com a sua especificidade, além das vantagens e desvantagens (Rabot *et al.*, 2018).

As principais diferenças associadas as metodologias estão relacionadas à classe de agregados testados, à umidade inicial da amostra, ao pré-tratamento aplicado e à forma de apresentação dos resultados obtidos (Le Bissonnais, 2016). Assim, a escolha do

método depende, em grande parte, da classificação do solo, das condições climáticas e do sistema adotado. Para avaliar e comparar a estabilidade dos agregados, é necessário utilizar metodologias que considerem os mecanismos de ruptura aos quais os agregados são submetidos nas condições naturais do solo (Almajmaie *et al.*, 2017; Saygin *et al.*, 2017; Le Bissonnais, 2016). Como exemplo, a tamisação à úmido é um dos métodos mais empregados pela facilidade em ser replicado e de refletir as condições naturais do solo (Liu *et al.*, 2021; Yoder, 1936). Do ponto de vista físico, os agregados do solo podem ser avaliados quanto a sua estabilidade de agregados por meio da determinação do diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG), além do índice de estabilidade agregada (IEA) (Pereira *et al.*, 2021; Texeira *et al.*, 2017).

Além disso, os agregados do solo podem ser divididos comumente em diferentes classes de tamanho, que podem variar em um conjunto de oito peneiras com aberturas de 8,00 e 0,053 mm, sendo aceita a definição de duas classes básicas de agregados em estudos, os microagregados (0,125 – 0,053mm) e os macroagregados (8,00 – 0,25 mm) (Madari, 2004; Madari *et al.*, 2005; Tisdall; Oades, 1982). Cada classe desempenha funções específicas no ecossistema do solo (Santos *et al.*, 2021; Six; Paustian, 2014). Vale ressaltar que alguns autores estão desenvolvendo trabalhos e assumido essa separação de classes como agregados pequenos, médios e grandes, sendo os respectivos tamanhos denominados como, os microagregados (<0,25-0,053 mm), macroagregados pequenos ou mesoagregados (<2,00-0,25 mm) e os macroagregados (>2,00 mm) (Dai *et al.*, 2024; Thomaz *et al.*, 2022; Lehndorff *et al.*, 2021).

Os microagregados, por exemplo, tendem a ser mais suscetíveis à compactação, o que pode reduzir a aeração e a infiltração de água. A estabilidade dos mesoagregados é mais vulnerável a processos de distúrbios, como a secagem e reidratação. Já os macroagregados, podem ser formados por meio do acúmulo de microagregados, proporcionando uma estrutura mais estável e favorecendo o desenvolvimento de raízes e a penetração de água, essencial para o crescimento saudável das plantas (Bronick; Lal, 2005), além de constituir grandes reservatórios de carbono orgânico do solo (Liu *et al.*, 2024). Os macroagregados e os microagregados, regulam a capacidade dos solos de armazenar carbono ao proteger fisicamente a MOS, tornando-a inacessível aos microrganismos e aos processos de decomposição (Six *et al.*, 2004).

Quando os agregados estão bem desenvolvidos, ou seja com a formação maior que 2,00 mm, o solo tem uma melhor capacidade de reter água, o que é benéfico para as plantas, especialmente em períodos de seca. Por outro lado, solos compactados ou mal

estruturados podem resultar em drenagem inadequada e aumento da erosão, comprometendo a qualidade do solo e a produtividade agrícola (Mikha *et al.*, 2024). O rompimento dos agregados pode ocorrer por diversos fatores, sobretudo os físicos, químicos e biológicos, sendo em diferentes escalas, frequência e intensidade (Le Bissonnais, 2016). O uso excessivo de máquinas pesadas, por exemplo, pode compactar o solo e prejudicar a formação de agregados. Por outro lado, técnicas de cultivo como a agricultura conservacionista, que incluem a cobertura do solo e a rotação de culturas, ajudam a promover a estrutura do solo. Essas práticas mantêm a umidade, aumentam a biodiversidade microbiana e melhoram a agregação, resultando em um solo mais saudável e produtivo (Zhu *et al.*, 2021).

3.2 Carbono orgânico do solo e agregados do solo

Os principais reservatórios de carbono no planeta incluem a atmosfera, os oceanos, os ecossistemas que englobam a vegetação e o solo, além das formações geológicas que contêm carbono mineral e fóssil (Santos *et al.*, 2019). O solo é o maior reservatório terrestre de carbono, armazenando entre 1.500 e 2.400 PgCO₂ até um metro de profundidade. Esse carbono no solo se divide em duas categorias: mineral e orgânico (Gonçalves *et al.*, 2024; Lal *et al.*, 2021). Os solos armazenam cerca de quatro vezes mais carbono que a biomassa vegetal e três vezes mais que a quantidade presente na atmosfera, desempenhando um papel crucial na regulação do carbono, influenciando tanto o clima quanto a fertilidade dos ecossistemas (He *et al.*, 2020).

O carbono solo é gerado por reações bioquímicas que estão diretamente associadas à atividade biológica dos microrganismos e à respiração das raízes, que são influenciadas principalmente pela temperatura e umidade do solo (Pries *et al.*, 2017). O armazenamento do carbono é influenciado pela taxa de decomposição, que depende da composição da matéria orgânica e da recalcitrância dos compostos (Bhattacharyya *et al.*, 2021). No entanto, a difusão e o fluxo de massa são os principais responsáveis pelo movimento do carbono para o solo e a liberação para a atmosfera, sendo esses processos influenciados pela textura, estrutura e umidade do solo (Santos *et al.*, 2019).

O acúmulo de carbono do solo advém da vegetação por meio da absorção e fixação do CO₂ da atmosfera na biomassa. Posteriormente, parte dessa biomassa é transformada em MOS por meio da decomposição de resíduos (Batista *et al.*, 2024). Essa matéria orgânica vai permanecer por um período no solo como matéria orgânica particulada (não

decomposta), em seguida passa pelo processo de decomposição e ocorrerá a incorporação ao solo e, com isso, uma parte do carbono é liberado na atmosfera como CO₂ durante esse processo (Silva *et al.*, 2024a). Por tanto, o carbono do solo que foi incorporado precisa ser estabilizado, o que ocorre por meio de três mecanismos principais: (i) recalcitrância bioquímica das moléculas orgânicas do solo; (ii) proteção física por agregados do solo e (iii) associação química entre C e partículas finas do solo (por exemplo, areia, silte, argila, óxidos de Fe e Al) (Briedis *et al.*, 2018; Six *et al.*, 2004). Esses mecanismos protegem o carbono do solo contra a oxidação microbiana, resultando em diferentes níveis de estabilização. Lavelle *et al.* (2020) indicaram que esses mecanismos de estabilização não são independentes e espera-se que a agregação do solo seja um fator fundamental na integração desses mecanismos no armazenamento da matéria orgânica e na estabilização do carbono no solo.

A MOS, que contém carbono, é um dos principais componentes que favorecem a formação e estabilização de agregados (Lavelle *et al.*, 2020). Os agregados do solo desempenham um papel fundamental no ciclo do carbono, pois contribuem para o sequestro de carbono atmosférico e seu armazenamento no solo. Nos agregados, os processos ocorrem de forma biológicas e químicas, em que os microrganismos e raízes metabolizam a matéria orgânica e incorporam o carbono em novas formas (Sonsri; Watanabe, 2023). Assim, solos bem estruturados favorecem a estabilização física da matéria orgânica e tendem a apresentar maior capacidade de armazenamento do carbono no solo (Zhu *et al.*, 2024). Por outro lado, solos mal estruturados apresentam distribuição desigual de carbono no solo ao longo do perfil, o que limita a formação e a estabilização dos agregados (Briedis *et al.*, 2018).

O carbono orgânico do solo associado aos agregados serve como um aglutinante, afetando a formação e estabilidade, e os agregados podem proteger o carbono por meio da agregação (Li *et al.*, 2022). Os macroagregados podem fornecer maiores proteção do carbono. Por outro lado, os microagregados podem inibir a entrada de microrganismos do solo ao se ligarem a compostos de matéria orgânica, desempenhando assim um importante papel na estabilidade de longo prazo da matéria orgânica (Sheng *et al.*, 2023).

A interação entre carbono e agregados do solo é fundamental para a formação de um solo saudável e produtivo. Os agregados, ao agruparem partículas, criam microporos e macroporos que facilitam a movimentação de água e ar. O carbono, na forma de matéria orgânica atua como um agente cimentante, ligando as partículas e conferindo estabilidade aos agregados (Liu *et al.*, 2024), evitando a erosão do solo e a compactação garantindo

que o solo mantenha sua estrutura e funcionalidade ao longo do tempo (Zhu *et al.*, 2021). A presença de carbono orgânico nos agregados, melhora a estrutura do solo, aumentando a agregação das partículas e, conseqüentemente, a aeração e a permeabilidade (Gan *et al.*, 2024).

Diante desses benefícios do carbono orgânico associado aos agregados do solo, vários estudos têm sido realizados no Brasil (Medeiros *et al.*, 2023; Monroe *et al.*, 2021; Nascimento *et al.*, 2021), em que na grande maioria dos estudos, os resultados indicaram maior acúmulo de carbono orgânico nos macroagregados quando comparados com os sistemas de uso da terra e a área de vegetação nativa. Porém, a perda desse carbono depende do tipo de cultura, tipo de solo e do manejo adotado e das condições climáticas.

Nesse sentido, Nascimento *et al.* (2024) avaliaram um sistema agroflorestal com os cultivos de café com banana e café com grevilea robusta, usando a área de vegetação nativa como referência. Os resultados mostraram que o carbono orgânico nos macroagregados foi maior na vegetação nativa, variando de 65,65 a 87,11 g kg⁻¹, em comparação com os demais cultivos analisados. Similarmente, Nascimento *et al.* (2021) realizaram estudos sobre carbono associado aos agregados do solo com espécies florestais de *Pterogyne nitens* e *Pinus caribaea*, tomando como referência a área de floresta nativa. Como resultado, o maior acúmulo de carbono associado aos agregados do solo foi encontrado nos macroagregados na área de floresta nativa, resultando cerca de 70% do carbono associado aos macroagregados. Para os microagregados o valor foi de 17,5% do carbono orgânico acumulado no agregado do solo.

Outrossim, Vicente *et al.* (2019) analisaram áreas de cultivo com eucalipto com idade de 3 e 5 anos, seringueira com 35 anos e pastagem não fertilizada de 50 anos, os quais resultaram maiores quantidades de carbono nos macroagregados do que nos microagregados, variando em todos os sistemas de uso da terra de 8 a 33 Mg ha⁻¹ e, para o carbono associado aos microagregados variou de a 7 Mg ha⁻¹ a 11 Mg ha⁻¹. Embora o carbono orgânico ocluso nos macroagregados possa ser mais suscetível a perturbações do que a fração de tamanho microagregados.

3.3 Sistemas integrados de produção agrícola

O modelo de agricultura convencional mal manejada tem provocado diminuição na produtividade por diversos motivos, sendo os principais os processos erosivos do solo, alteração da estrutura e perda da fertilidade, além do desmatamento indiscriminado e

queimadas da vegetação (lenha, madeira e pastagens), a qual contribui para a redução da vegetação nativa (Medeiros *et al.*, 2022). Diante desse cenário, sistemas de manejo estão sendo adotados para minimizar o revolvimento do solo e as intensificações das ações antrópicas, sobretudo, o solo e a vegetação, buscando recuperar e/ou manter a fertilidade do solo. Dessa forma, diferentes alternativas e estratégias têm sido reconhecidas e implementadas com o intuito de aumentar a produtividade e melhorar a qualidade do solo. No geral, essas estratégias visam reduzir áreas de pastagens degradadas, mitigar as emissões de CO₂, melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, sobretudo a quantidade de MOS (Damian *et al.*, 2023).

Os sistemas integrados (SIs) de produção têm se tornado uma estratégia promissora para a eficiência do uso da terra e para uma agricultura mais sustentável (efeitos nas condições sociais, econômicas e ambientais) para intensificar a produtividade da terra combinando atividades de cultivos agrícolas, pecuária e florestais (Oliveira *et al.*, 2024). Assemelham-se aos ecossistemas naturais por aumentar a complexidade dos sistemas de cultivo. No entanto, os efeitos sinérgicos em SIs dependem das condições edafoclimáticas. Os SIs geralmente adotam práticas que podem ser usadas para alcançar os princípios de conservação do solo (por exemplo, cultivo mínimo, rotação de culturas e retenção de resíduos vegetais de culturas), melhorando os efeitos sinérgicos solo-planta-animal (Bieluczyk *et al.*, 2020).

Os SIs compreendem quatro diferentes modalidades que são: (i) sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) (sistema agropastoril), sistema de produção que integra lavoura e pecuária (pastagem e animais) na mesma área de terra, seja em rotação, sucessão ou combinada e no mesmo ano agrícola ou por vários anos; (ii) integração lavoura, pecuária e floresta (ILPF) (sistema agrossilvipastoril), sistema de produção que integra os componentes lavoura, pecuária e floresta em área de terra; (iii) integração lavoura-floresta (ILF) (sistema silviagrícola), que integra os componentes florestais e agrícolas pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas (anuais e perenes); e (vi) integração pecuária-floresta (IPF) (sistema silvipastoril), sistema de produção que permite a associação de componentes florestais e pecuário, principalmente em áreas com baixa capacidade de produção agrícola (Figura 2) (Ologunde *et al.*, 2024; Balbino *et al.*, 2012; Balbino *et al.*, 2011).

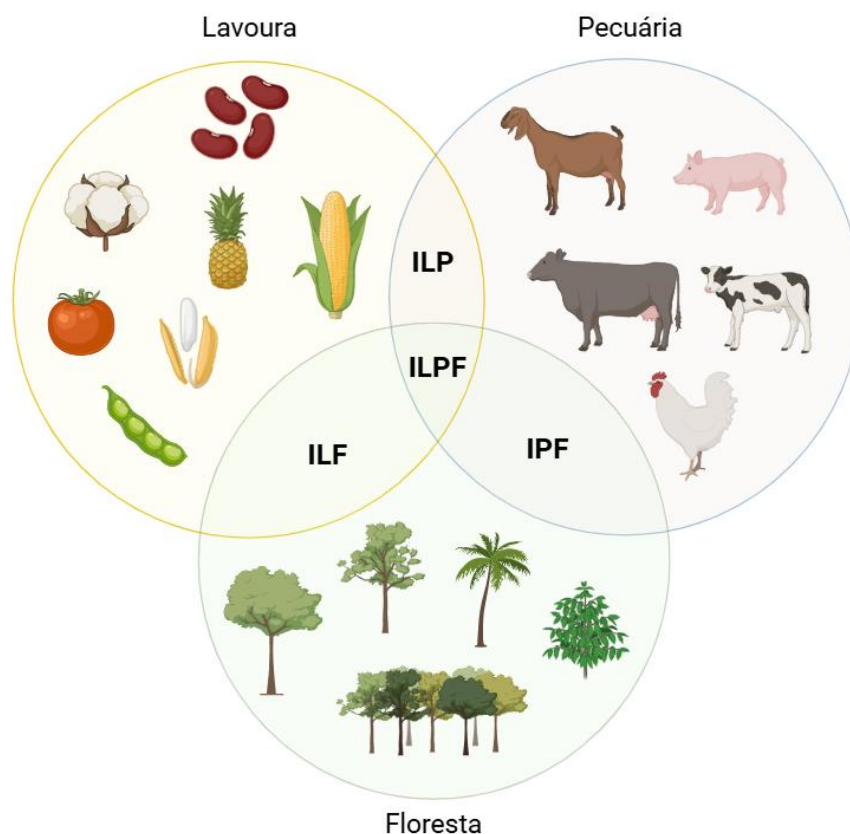


Figura 2. Ilustração de diferentes Sistemas Integrados (SI) de cultivo: Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), Pecuária-Floresta (IPF), Lavoura-Floresta (ILF) e Lavoura-Pecuária (ILP).

Fonte: Adaptado da Embrapa (2020).

A adoção de SIs tem sido incentivada em diversos países por meio de políticas públicas com foco na sustentabilidade agrícola. Na União Europeia, a Política Agrícola Comum (PAC) abrange subsídios específicos para práticas agroecológicas, incluindo a integração de árvores e pastagens nos sistemas produtivos. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), práticas como SIs são fundamentais para enfrentar os desafios globais de segurança alimentar, mudanças climáticas e recuperação de áreas degradadas. ODS 1, 2, 3, 7, 12, 13, 15.

No Brasil, os sistemas integrados têm se destacado como uma estratégia para alcançar uma agricultura sustentável e de baixa emissão de carbono (FAO, 2019). O Plano ABC+ (Agricultura de Baixa de Carbono) inclui os sistemas integrados como uma das principais tecnologias para mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), além da recuperação de área degradadas (Brasil, 2021). Além disso, a implantação dos SIs incentiva a disseminação de tecnologia e a capacitação de agricultores para a

implementação dos sistemas de ILPF, ILP, ILF e do IPF. Tal iniciativa objetiva expandir a área de adoção e contribuir para o cumprimento das metas brasileiras no acordo da COP 21 em Paris (Brasil, 2021).

A implementação dos SIs proporciona benefícios ambientais consideráveis, incluindo a redução das emissões de GEE e o aumento do sequestro de carbono no solo e no incremento da biomassa no solo (Vogado *et al.*, 2024). Do ponto de vista produtivo, a diversificação das atividades agrícolas e pecuária reduz os riscos econômicos, garantindo maior estabilidade financeira para os produtores (Gil *et al.*, 2015). O sistema também promove a eficiência no uso de recursos naturais, visto que diferentes componentes se interagem para melhorar a saúde do solo e a resiliência dos ecossistemas agrícolas. Essas características tornam os SIs uma alternativa viável para produtores rurais de diferentes escalas, incluindo os de grande e pequeno porte. Entretanto, o fortalecimento das políticas públicas, aliado à crescente conscientização sobre os benefícios ambientais e produtivos do sistema, tem contribuído para a expansão dessa prática no Brasil.

Alternativas sustentáveis para minimizar os processos negativos de mudanças climáticas, como por exemplo, uso de sistemas integrados, tem sido estudadas em algumas regiões no Brasil, incluindo também a região do semiárido brasileiro, que avaliam o potencial desses SIs para recuperação de áreas degradadas (Silva *et al.*, 2021). Entretanto, os efeitos desses SIs de produção na qualidade do solo nas condições edafoclimáticas no semiárido mundial, bem como nos sistemas ILPF e IPF tem demonstrado resultados satisfatórios e promissores, apesar desses estudos serem incipientes na região do semiárido brasileiro (Silva *et al.*, 2019).

A adoção de SIs é justificada por sua capacidade de fornecer benefícios físicos, químicos e biológicos ao solo (Ologunde *et al.*, 2024). Estudos com sistemas de ILP em região semiárida do Brasil, evidenciou um aumento do nitrogênio total e sequestro de carbono, além do aumento do carbono da biomassa microbiana do solo que estão associados a fração dos agregados estável (Liebig *et al.*, 2020).

A perda de carbono no solo apresenta ampla variação, dependendo do tipo de cultura e manejo adequado. Nesse sentido, Monroe *et al.* (2021) avaliaram os estoques de carbono e agregados do solo em sistemas de ILF com cultivo de pomar manga, palma forrageira em períodos de 3 e 18 anos, comparando com a vegetação nativa no semiárido brasileiro da Bahia. Os resultados indicaram um aumento nos COS, com destaque para a camada de 0-60 cm, onde o pomar de manga apresentou aumentando o estoque de carbono do solo de 16,4%, em relação a florestal nativa.

Em relação ao carbono nos agregados do solo, a quantidade de estoque de COS teve efeito nos macroagregados na camada de 0-10 cm, na floresta nativa de 38,41 g kg⁻¹, em relação aos tratamentos de palma de 3 e 18 anos totalizando 18,34 e 21,64 g kg⁻¹, respectivamente, e o pomar de manga 33,49 g kg⁻¹. Outros estudos também relataram correlação positiva entre COS e carbono nos macroagregados, o que indica a importância da MOS na estabilidade dos agregados (Liu *et al.*, 2024; Vicente *et al.*, 2019).

Os SIs além de promover o aumento de diversas propriedades físicas, químicas e biológicas, sendo considerados como alternativas de soluções baseada na natureza (SBN) para enfrentar esses desafios impostos pelas mudanças climáticas (mitigação, adaptação e resiliência) e as ações antrópicas. Os sistemas integrados são exemplo evidente de SBN aplicado à agricultura, apresentando benefícios tanto diretos quanto indiretos, sobretudo, para o solo e o clima.

Ao diversificar as atividades produtivas, os sistemas integrados exercem pressão sobre áreas florestais e aumentam a eficiência na utilização do uso da terra e que está alinhada as ações SBN. Pesquisas demonstraram que áreas gerenciadas com SIs apresentam balanços de carbono mais precisos em relação a sistemas convencionais, destacando a sua função como ferramenta de mitigação das mudanças climática e de controle (Buma *et al.*, 2024; Bieluczyk *et al.*, 2020).

No Brasil, as SBN foram integradas as políticas públicas com o intuito de promover uma agricultura sustentável. O Plano ABC+ (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) reconhece os sistemas ILPF como uma abordagem fundamental para a mitigação das emissões e a recuperação de solos degradados (Brasil, 2021). Além disso, o Código Florestal Brasileiro incentiva a preservação de áreas nativas, alinhando-se aos princípios da SBN. A Estratégia Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg) complementa essas iniciativas para promover a restauração ecológica e a integração de árvores em sistemas produtivos (WRI, 2019). A articulação entre políticas de crédito rural e os programas de capacitação têm sido fundamentais para ampliar a adoção de alternativas sustentáveis, cujo objetivo é desenvolver ações voltadas à proteção, manejo sustentável e restauração de ecossistemas, tanto naturais quanto modificados. Essa abordagem visa enfrentar desafios sociais de maneira efetiva e adaptativa, promovendo o bem-estar humano e os benefícios para a biodiversidade.

REFERÊNCIAS

- ALMAJMAIEE, A.; HARDIE, M.; ACUNA, T.; BIRCH, C. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability. **Soil and Tillage Research**, v.167, p.39-45, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.003>
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (Ed.). **Marco Referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 130 p
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L.A.M.; PORFÍRIO, V.S.; Moraes, A.; MARTINEZ, G. B.; ALVARENGA, R.C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1-12, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000001>
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p.599-607, 2000.
- BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P.A.; MOREIRA, M. Z.; CAMARGO, P. B.; DIAS, C. T. S.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, v.371, 114368, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>
- BHATTACHARYYA, R.; RABBI, S. M.; ZHANG, Y.; YOUNG, I. M.; JONES, A. R.; DENNIS, P. G.; DALAL, R. C. Soil organic carbon is significantly associated with the pore geometry, microbial diversity and enzyme activity of the macro-aggregates under different land uses. **Science of the Total Environment**, v.778, 146286, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146286>
- BATISTA, A. M.; PESSOA, T. N.; PUTTI, F. F.; ANDREOTE, F. D.; LIBARDI, P. L. Root Influences Rhizosphere Hydraulic Properties through Soil Organic Carbon and Microbial Activity. **Plants**, v.13, n.14, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13141981>
- BUMA, B.; GORDON, D.R.; KLEISNER, K.M.; BARTUSKA, A.; BIDLACK, R.; DEFRIES, P.; ELLIS, P.; FRIEDLINGSTEIN, S.; METZGER, G.; MORGAN, K.; NOVICK, J. N.; SANCHIRICO, J. R.; COLLINS, A. J.; EAGLE, R.; FUJITA, E.; HOLST, J. M.; LAVALLEE, R. N.; LUBOWSKI, C.; MELIKOV, L. A.; MOORE, E. E.; OLDFIELD, J.; PALTSEVA, A. M.; RAFFELD, N. A.; RANDAZZO, S. P. Expert review of the science underlying nature-based climate solutions. **Nature Climate Change**, v.14, p.402–406, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-01960-0>
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações). **Emissões em dióxido de carbono equivalente por setor**. 2020. Disponível em: https://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/paineis/2018/08/24/Emissoes_em_dioxido_de_carbono_equivalente_por_setor.html. Acesso em: 25 nov.2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano de adaptação e baixa emissão de carbono na agricultura visão estratégica para um novo ciclo**, Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agricultura-de-baixa-emissao-de-carbono/publicacoes/abc-english.pdf/view>. Acesso em: 26 nov. 2024.

BRIEDIS, C.; MORAES SÁ, J. C.; LAL, R.; TIVET, F.; FRANCHINI, J. C.; OLIVEIRA FERREIRA, A.; GONÇALVES, D. R. P. How does no-till deliver carbon stabilization and saturation in highly weathered soils?. **Catena**, v.163, p.13-23, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.003>

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v.124, p.3-22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>

CARVALHO, P. C.; PONTES, L. S.; BARRO, R. S.; SIMÕES, V. J. L. P.; DOMINSCHKE, R.; CARGNELUTTI, C. S.; MAURICIO, R. M.; BREMM, C. Integrated crop-livestock-forestry systems as a nature-based solution for sustainable agriculture. **Agroforestry Systems**, v.98, p.1-15, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01057-9>

CHRISTENSEN, B. T. **Organic matter in soil**: structure, function and turnover. Tijele: DIAS (DIAS Report. Plant Production, 30, 2000.

DAI, W.; FENG, G.; HUANG, Y.; TEWOLDE, H.; SHANKLE, M. W.; JENKINS, J. N. Soil aggregate stability and erosion resistance in response to integration of cover crops and poultry litter in a no-till rainfed soybean cropping system. **Soil and Tillage Research**, v.244, 106245, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106245>

DAMIAN, J. M.; MATOS, E. S.; PEDREIRA, B. C.; CARVALHO, P. C. F.; PREMAZZI, L. M.; CERRI, C. E.P. Intensification and diversification of pasturelands in Brazil: patterns and driving factors in the carbon stocks. **Catena**, v.220, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106750>

DEMENOIS, J.; CARRICONDE, F.; BONAVENTURE, P.; MAEGHT, J. L.; STOKES, A.; REY, F. Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferralsol. **Geoderma**, v.312, p.6-16, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.033>

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS)**. FAO CA Website. 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/spi/scpi-home/managing-ecosystems/integrated-crop-livestock-systems/en/>. Acesso em: 26 nov.2024.

GAN, F.; SHI, H.; GOU, J.; ZHANG, L.; DAI, Q.; YAN, Y. Responses of soil aggregate stability and soil erosion resistance to different bedrock strata dip and land use types in the karst trough valley of Southwest China. **International Soil and Water Conservation Research**, v.12, n.3, p.684-696, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.09.002>

GIL, J.; SIEBOLD, M.; BERGER, T. Adoption and development of integrated crop–livestock–forestry systems in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 199, p.394-406, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.00>

GONÇALVES, D. R. P.; INAGAKI, T. M.; BARIONI, L. G.; JUNIOR, N. L. S.; CHERUBIN, M. R.; DE MORAES SÁ, J. C.; ANSELM, A. Assessing and modelling soil organic carbon stocks in Prairies, Savannas, and forests. **Catena**, v.243, 108219, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108219>

GUHRA, T.; STOLZE, K.; TOTSCHKE, K. U. Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 164, p. 108483, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108483>

HE, Y.; CHENG, W.; ZHOU, L.; SHAO, J.; LIU, H.; ZHOU, H.; ZHOU, X. Soil DOC release and aggregate disruption mediate rhizosphere priming effect on soil C decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, v.144, 107787, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107787>

LAL, R. Soil management for carbon sequestration. **South African Journal of Plant and Soil**, v.38, n.3, p.231–237, 2021. <https://doi.org/10.1080/02571862.2021.1891474>

LAVELLE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; BEDANO, J. C.; BLANCHART, E.; GALINDO, V.; ZANGERLÉ, A. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta ecologica**, v.105, 103561, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103561>

LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I Theory and methodology. **European Journal of Soil Science**, v.67, p.11-21. https://doi.org/10.1111/ejss.4_12311

LEHNDORFF, E.; RODIONOV, A.; PLUMER, L.; ROTTMANN, P.; SPIERING, B.; DULTZ, S.; AMELUNG, W. Spatial organization of soil microaggregates. **Geoderma**, v.386, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114915>

LI, H.; ZHU, H.; LIANG, C.; WEI, X.; YAO, Y. Soil erosion significantly decreases aggregate-associated OC and N in agricultural soils of Northeast China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.323, 107677, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107677>

LIEBIG, M. A.; FAUST, D. R.; ARCHER, D. W.; KRONBERG, S. L.; HENDRICKSON, J. R.; TANAKA, D. L. Integrated crop-livestock effects on soil carbon and nitrogen in a semiarid region. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v.3, n.1, e20098, 2020. <https://doi.org/10.1002/agg2.20098>

LIU, J.; HU, F.; XU, C.; WANG, Z.; MA, R.; ZHAO, S.; LIU, G. Comparison of different methods for assessing effects of soil interparticle forces on aggregate stability. **Geoderma**, v.385, 114834, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114834>

LIU, S.; WANG, R.; YANG, Y.; SHI, W.; JIANG, K.; JIA, L.; YU, P. Changes in soil aggregate stability and aggregate-associated carbon under different slope positions in a karst region of Southwest China. **Science of The Total Environment**, v.928, 172534, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172534>

MADARI, B. E. **Fracionamento de agregados**: procedimento para uma estimativa compartimentada do sequestro de carbono no solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. p.10. (Comunicado técnico, 22).

MADARI, B.; MACHADO, P. L.; TORRES, E.; ANDRADE, A. G.; VALENCIA, L. I. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.80, p.185-200, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.006>

MEDEIROS, A. S.; CESÁRIO, F. V.; MAIA, S. M. F. Long-term impact of conventional management on soil carbon and nitrogen stocks in the semi-arid region of Brazil: A meta-analysis. **Journal of Arid Environments**, v.218, 105052, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.105052>

MIKHA, M. M.; GREEN, T. R.; UNTIEDT, T. J.; HERGRET, G. W. Land management affects soil structural stability: Multi-index principal component analyses of treatment interactions. **Soil and Tillage Research**, v. 235, 105890, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105890>

MONROE, P. H. M.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; BARROS, W. T.; OLIVEIRA, F. G. R. B.; PEREIRA, M. G. Physical protection of soil organic carbon through aggregates in different land use systems in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v.186, 104427. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104427>

NASCIMENTO, M. S.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; MONROE, P. H. M.; SCORIZA, R. N.; GOMES, V. S. Interaction between edaphic mesofauna and organic carbon within water-stable aggregates in forestry systems: A case study in northeastern Brazil. **Catena**, v.202, 105269, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105269>

NASCIMENTO, M. S.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; MONROE, P. H. M.; PEREIRA, M. G.; BARROS, W. T.; NUNES, M. R. Carbon in soil macroaggregates under coffee agroforestry systems: Modeling the effect of edaphic fauna and residue input. **Applied Soil Ecology**, v.202, 105604, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105604>

OLIVEIRA, D. M. S.; SANTOS, R. S.; CHIZZOTTI, F. H. M.; BRETAS, I. L.; FRANCO, A. L. C.; LIMA, R. P.; FREITAS, D. A. F.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review. **Geoderma Regional**, v.37, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00796>

OLOGUNDE, O. H.; BELLO, S. K.; BUSARI, M. A. Integrated agricultural system: A dynamic concept for improving soil quality. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.23, p.352-360, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2024.03.002>

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BATISTA, I.; MELO, T. R.; SILVA, 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, e0210108, 2021. <https://doi.org/10.36783/18069657rbs20210108>

PRIES, C. E.; CASTANHA, C.; PORRAS, R. C.; TORN, M. S. The whole-soil carbon flux in response to warming. **Science**, v.355, p.1420-1423, 2017. [10.1126/science.aal1319](https://doi.org/10.1126/science.aal1319)

RABOT, E; WIESMEIER, M.; SCHLUTER, S.; VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v.314, p.122-137, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>

SANTOS, G. A.; MOITINHO, M. R.; DE OLIVEIRA SILVA, B.; XAVIER, C. V.; TEIXEIRA, D. D. B.; CORÁ, J. E.; JÚNIOR, N. L. S. Effects of long-term no-tillage systems with different succession cropping strategies on the variation of soil CO₂ emission. **Science of the total environment**, v.686, p.413-424, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.398>

SANTOS, W. R.; JARDIM, A. M. D. R. F.; DE SOUZA, L. S. B.; DE SOUZA, C. A. A.; DE MORAIS, J. E. F.; ALVES, C. P.; DA SILVA, T. G. F. Can changes in land use in a semi-arid region of Brazil cause seasonal variation in energy partitioning and evapotranspiration?. **Journal of Environmental Management**, v.367, 121959, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121959>

SCHIEBELBEIN, B. E.; BORDONAL, R. D. O.; CERRI, C. E. P.; OLIVEIRA, D. M. D. S.; CHERUBIN, M. R. Mineral-associated and particulate organic matter in aggregates as a proxy for soil C changes in pasture sugarcane land use transitions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.47, 0220103, 2023.

<https://doi.org/10.36783/18069657rbs20220103>

SAYGIN, S. D.; ERPUL, G.; BASARAN, M. Comparison of aggregate stability measurement methods for clay-rich soils in asartepe catchment of Tukey. **Land degradation and development**, v.28, p.199-206. <https://doi.org/10.11002/ldr.2383>

SILVA, P. L. F. D.; OLIVEIRA, F. P. D.; TAVARES, D. D.; NÓBREGA, C. C. D.; AMARAL, A. J. Water availability in a Planosol under integrated crop-livestock-forestry system in the agreste region of Paraíba, Brazil. **Revista Caatinga**, v.32, p.449-457, 2019. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n218rc>

SILVA, P. L. F. D.; OLIVEIRA, F. P. D.; MARTINS, A. F.; TAVARES, D. D.; AMARAL, A. J. D. Fertility, carbon stock and aggregate stability of an Alfisol under integrated farming systems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.51, e66505, 2021.

<https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5166505>

SILVA, B. O.; MOITINHO, M. R.; PANOSSO, A. R.; DA SILVA OLIVEIRA, D. M.; MONTANARI, R.; DE MORAES, M. L. T.; LA SCALA JR, N. Implications of converting native forest areas to agricultural systems on the dynamics of CO₂ emission and carbon stock in a Cerrado soil, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v.358, 120796, 2024a. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120796>

SILVA, L. J.; OLIVEIRA, D. M.; SANTOS, R. S.; OLIVEIRA, P. A.; FREITAS, D. A.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. Soil carbon dynamics in integrated agricultural systems in Minas Gerais state, Brazil: A meta-analysis. **Geoderma Regional**, v.36, e00761, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00761>

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between microaggregates, soil biota, and organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v.79, p.7-31, 2004.

SHENG, M. H.; AI, X. Y.; HUANG, B. C.; ZHU, M. K.; LIU, Z. Y.; AI, Y. W. Effects of biochar additions on the mechanical stability of soil aggregates and their role in the dynamic renewal of aggregates in slope ecological restoration. **Science of the Total Environment**, v.898, 165478, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165478>

SONSRI, K.; WATANABE, A. Insights into the formation and stability of soil aggregates in relation to the structural properties of dissolved organic matter from various organic amendments. **Soil and Tillage Research**, v. 232, p. 105774, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105774>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev e ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2017.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p.141-163, 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

TOTSCHKE, K.U.; AMELUNG, W.; GERZABEK, M.H.; GUGGENBERGER, G.; KLUMPP, E.; KNIEF, C.; LEHNDORFF, E.; MIKUTTA, R.; PETH, S.; PRECHTEL, A.; RAY, N.; KÖGEL-KNABNER, I. Microaggregates in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.181, p.104-136, 2018. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>

THOMAZ, E. L.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; VENDRAME, P. R.; DE MELO, T. R. Mechanisms of aggregate breakdown in (sub) tropical soils: Effects of the hierarchical resistance. **Catena**, v.216, 106377, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106377>

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; DE CAMPOS BERNARDI, A. C.; COOPER, M. Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v.220, 105357, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105357>

VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MARCIANO, C. R. Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. **Catena**, v.182, 104139, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104139>

VOGADO, R. F.; DE SOUZA, H. A.; SAGRILO, E.; DE BRITO, L. D. C. R.; MATIAS, S. S. R.; NETO, M. L. T.; LEITE, L. F. C. Soil organic carbon stocks and fractions under integrated systems and pasture in the Cerrado of Northeast Brazil. **Catena**, v.243, 108196, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108196>
YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, v.28, n.5, p.337-351, 1936. <https://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>

ZHU, Y.; ZHANG, M.; HAN, X.; LU, X.; CHEN, X.; FENG, H.; ZOU, W. Evaluation of the soil aggregate stability under long term manure and chemical fertilizer applications: Insights from organic carbon and humic acid structure in aggregates. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.376, 109217, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109217>

ZHU, G.Y.; SHANGGUAN, Z. P.; DENG, L. Variations in soil aggregate stability due to land use changes from agricultural land on the Loess Plateau, China. **Catena**, v.200, p. 105181, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105181>

CAPÍTULO 1

Agregação e estabilidade de agregados do solo sob sistemas integrados pecuária-floresta em um Cambissolo do semiárido brasileiro

Resumo

A mudanças de uso da terra, como na agricultura e pecuária no semiárido brasileiro contribuem para a degradação do solo devido a práticas inadequadas do manejo no solo. Para mitigar esse problema, alternativas sustentáveis estão sendo adotados, como a adoção dos sistemas integrados de produção agrícola. O objetivo deste estudo foi avaliar como diferentes arranjos de sistemas integrados pecuária-floresta (IPF) no semiárido brasileiro afetam a agregação do solo de um Cambissolo. Foram analisados quatro sistemas de IPF cultivados com sorgo, palma forrageira, capim massai e capim buffel, implantados entre faixas de vegetação nativa (FxVN) com espaçamentos de 7, 14 e 28 m, utilizando a Caatinga como referência. Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, e 30-50 cm de profundidade e analisadas quanto a distribuição de agregados estáveis em água, considerando os macroagregados, mesoagregados e microagregados. Em seguida, foram calculados os diâmetros médios ponderado (DMP) e geométrico (DMG), o índice de estabilidade de agregados (IEA) e o índice de sensibilidade (IS). Os resultados mostraram diferenças na formação dos agregados do solo e na estabilidade de agregados nos sistemas de IPF em comparação com a vegetação nativa (VN), com predominância de mesoagregados, seguidos por macroagregados e microagregados, independentemente do tipo de uso da terra e das culturas. A exceção foram os sistemas de IPF com sorgo, e capins buffel e massai no espaçamento de 28m e na camada superficial, onde houve predominância dos macroagregados. O DMP e o DMG mostraram resultados semelhantes entre os sistemas de IPF, a VN e FxVN, principalmente nos espaçamentos de 7 e 14m. Os maiores IS foram observados na camada de 30-50 cm, em todos os espaçamentos, exceto nos sistemas com capim massai nos espaçamentos de 7 e 28 m. A conversão da VN em sistemas de IPF resultou em poucas mudanças na formação dos agregados, restringindo-se à quebra de macroagregados em mesoagregados.

Palavras-chave: Agregação; Caatinga; Estrutura do solo; Índice de estabilidade de agregados; Mudança do uso da terra; Soluções baseada na natureza.

1. Introdução

A conversão de florestas nativas e a adoção de técnicas de manejo agrícola inadequadas podem resultar na degradação do solo, ocasionando perdas, como a redução da fertilidade, a diminuição da ciclagem de nutrientes e, sobretudo, na formação dos agregados do solo, culminando na diminuição produtiva do solo, ou seja, na capacidade

do sistema de cultivo mantendo o crescimento e a produtividade satisfatória mesmo sob alterações (Tomaz *et al.*, 2023). Tal situação, compromete diversos serviços ecossistêmicos ambientais, entre os quais se destacam a regulação do ciclo hidrológico, a conservação da biodiversidade, o controle da erosão, a emissão de gases de efeito estufa, e o sequestro de carbono (Pinto *et al.*, 2022).

No Brasil, a região semiárida tem sido explorada de forma intensiva, como o desmatamento indiscriminado, com o objetivo de extração de lenha e madeira, para o uso agricultura convencional (agricultura e pastagem), visando a produção de culturas de subsistência (Medeiros *et al.*, 2023a). Essa região se apresenta basicamente estagnada no que se refere à produtividade da agropecuária de sequeiro, continuando carente quanto aos sistemas agrícolas que sejam capazes de se adaptar as condições edafoclimáticas adversas (Araújo *et al.*, 2024; Medeiros *et al.*, 2023a; Pereira *et al.*, 2022). Quando associadas às condições climáticas, como as altas temperaturas, as chuvas escassas e mal distribuídas, além da elevada evapotranspiração, tem comprometido a qualidade do solo, impactado negativamente algumas regiões do semiárido brasileiro, resultando em reduções significativas dos níveis de matéria orgânica do solo, o que, por sua vez, impacto direto nos estoques de carbono e na agregação do solo (Tomaz *et al.*, 2023; Medeiros *et al.*, 2023b).

Estudos demonstraram que a adoção de sistemas integrados tem resultados benéficos, sendo esses uma solução viável e baseada na natureza para enfrentar as adversidades de áreas antropizadas da agricultura, tais como, o aumento da matéria orgânica (Bieluczyk *et al.*, 2024; Pereira *et al.*, 2023; Bieluczyk *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2018), melhoria na agregação (Sales *et al.*, 2025; Even; Cotrufo, 2024; Macedo *et al.*, 2024; Locatelli *et al.*, 2022) o aumento da ciclagem de nutrientes (Camargo *et al.*, 2024; Pereira *et al.*, 2023), favorecendo a formação e conservação de agregados, além do acúmulo de carbono do solo (Silva *et al.*, 2025; Soares *et al.*, 2022).

Pesquisa desenvolvida por Monroe *et al.* (2021) na região do semiárido brasileiro, indica que a implementação dos sistemas integrados agroflorestais proporcionaram maiores formação de macroagregados em comparação com a floresta nativa, principalmente na camada superficial do solo. Já Macedo *et al.* (2023) estudaram os efeitos dos agregados do solo em diferentes sistemas de uso agroflorestais e, constataram que a distribuição e tamanho dos agregados foi superior na área florestal, em seguida no sistema de agrofloresta e, por fim no sistema de pastagem.

Os agregados do solo consistem na organização ou arranjo das partículas sólidas (minerais e orgânicas) e secundárias (agregados) do solo (Schiebelbein *et al.*, 2023). De acordo com a teoria hierárquica da formação de agregados descrita por Tisdall e Oades (1982), a agregação do solo é mediada pela matéria orgânica e por diferentes agentes ligantes (temporários, transitórios e persistentes) que atuam em diversos estágios na formação dos agregados.

Os microagregados estáveis servem como base para a formação dos macroagregados (> 2,00 mm), sendo conectados por agentes de ligação temporários, como raízes e hifas fúngicas. Além disso, a decomposição de resíduos vegetais por microrganismos contribui para esse processo, uma vez que os fragmentos resultantes favorecem tanto a formação quanto a estabilização dos macroagregados (Six *et al.*, 2004). Assim, a dinâmica de agregação do solo é resultado da interação entre processos biológicos, físicos e químicos, que atuam de forma integrada, podendo ocorrer simultaneamente ou em sequência (Dai *et al.*, 2024b; Batista *et al.*, 2023; Aksakal *et al.*, 2020; Lavallo *et al.*, 2020).

Além disso, o outro fator proeminente que influencia a estabilidade e a distribuição do tamanho dos agregados do solo é o carbono orgânico do solo. A estabilidade dos agregados é, portanto, medida importante para avaliar a capacidade estrutural do solo, sendo influenciada pelos diversos usos e manejo da terra, usando como base a distribuição dos tamanhos dos agregados (Tomaz *et al.*, 2024). Aumentar a estabilidade dos agregados do solo é um método eficaz para reforçar a qualidade do solo.

Portanto, a hipótese deste estudo é que a adoção do sistema integrado, especificamente a integração pecuária-floresta (IPF), pode melhorar a agregação do solo na região semiárida brasileira. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes sistemas de integração pecuária-floresta (IPF) sobre a distribuição e estabilização dos agregados em um Cambissolo, no semiárido brasileiro.

2. Material e métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE) do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), situado no município de Limoeiro do Norte, Ceará - Brasil. O município está localizado na região do semiárido

brasileiro, situado sob as coordenadas geográficas de 5°10'53.0"S e 38°00'43.0"W, com altitude 146 m ao nível do mar, de relevo plano. A região possui clima quente, classificado como BSw'h (seco, semiárido, quente) segundo classificado de Koppen (Koppen *et al.*, 2006), com estações chuvosa de janeiro a julho e seca de agosto a novembro, apresentando temperatura média anual de 29 °C e precipitação média anual de 719 mm (Santos Neto *et al.*, 2023).

O solo da área do estudo sob uso agrícola foi caracterizado e classificado como um Cambissolo (IUSS-WRB, 2015). Os Cambissolos são unidades pedológicas em início de formação, constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente, normalmente com elevados teores de silte, sobretudo em profundidade. São solos com pouco desenvolvimento estrutural, em que as características variam de um local para outro e do ambiente de formação (Cunha *et al.*, 2021).

2.2 Descrição do manejo dos sistemas do uso da terra

Em 2015 no período seco, a área de vegetação nativa foi raleada, utilizando trator com lâmina frontal, suprimindo 100% da vegetação presente na área cultivável. A ação deixou apenas as faixas de árvores nativas de seis metros de largura. Todo o material residual da vegetação raleada foi direcionado para as bordas das árvores. Antes do raleamento, a área era composta por uma Caatinga arbórea em estágio de sucessão secundária (Santos Neto *et al.*, 2023). Anualmente foi realizada adubação fosfatada na área dos cultivos, utilizando o fertilizante monofosfato de amônio (MAP) (44% de P₂O₅ e 10% N), na dose de 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹. O controle de plantas daninhas foi realizado por meio mecânico e químico.

A área do estudo foi dividida em quatro sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF), espaçadas em três diferentes espaçamentos de árvores nativas da Caatinga: 7 (E7), 14 (E14) e 28 (E28) metros (m) entre as faixas de vegetação de Caatinga, com dimensões de 6,0 x 100m, posicionados no sentido norte-sul (Figura 1). Em 2016, nos espaços entre as faixas de vegetação nativa foram implantados quatros tipos de sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF) com as seguintes espécies: (i) Capim buffel (*Cenchrus ciliaries* L.) – IPFCb; (ii) Capim massai (*Megathyrsus maximum*) – IPFCm; (iii) Sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* L.) – IPFSo; e (vi) Palma forrageira (*Opuntia stricta* Haw. cv. Orelha de Elefante) – IPFPo (Figura 1). Os plantios dos componentes de pastagens, as gramíneas corresponderam ao sistema pecuário não pastejado.

O sorgo foi plantado e colhido anualmente sob práticas de manejo convencional. Enquanto, os capins buffel e massai eram mantidos em crescimento livre durante a estação chuvosa e, ao final da estação seca, eram realizados cortes mecânicos de uniformização permanecendo com a altura média de 0,05 m da superfície do solo, com o objetivo de padronizar as pastagens para o próximo período de crescimento da cultura. Todo o material residual das pastagens foram retirados da área e destinado para alimentação animal. Já a palma forrageira, possuía frequência de corte a cada dois anos.

Nessa conjuntura, os tratamentos analisados consistiram em sistemas de IPF, totalizando 13 tratamentos (Figura 1), mais a área de vegetação nativa utilizada como referência (VN – área de Caatinga). Para os espaçamentos 7, 14 e 28 m foram atribuídos densidades de 1.418 (46,15%), 925 (30,00%) e 524 (17,64%) árvores por hectare. Após o levantamento fitossociológico, identificou-se que a vegetação nativa possui as seguintes espécies arbóreas: *Cordia goeldiana* Huber (Boraginaceae), *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth (Fabaceae), *Cenostigma pyramidale* (Tuul.) E. Gagnon & G.P. Lewis (Fabaceae), *Commiphora leptophloeos* (Mart.) J.B.Gillertt (Burseraceae) e *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir (Fabaceae) (Santos Neto *et al.*, 2022).

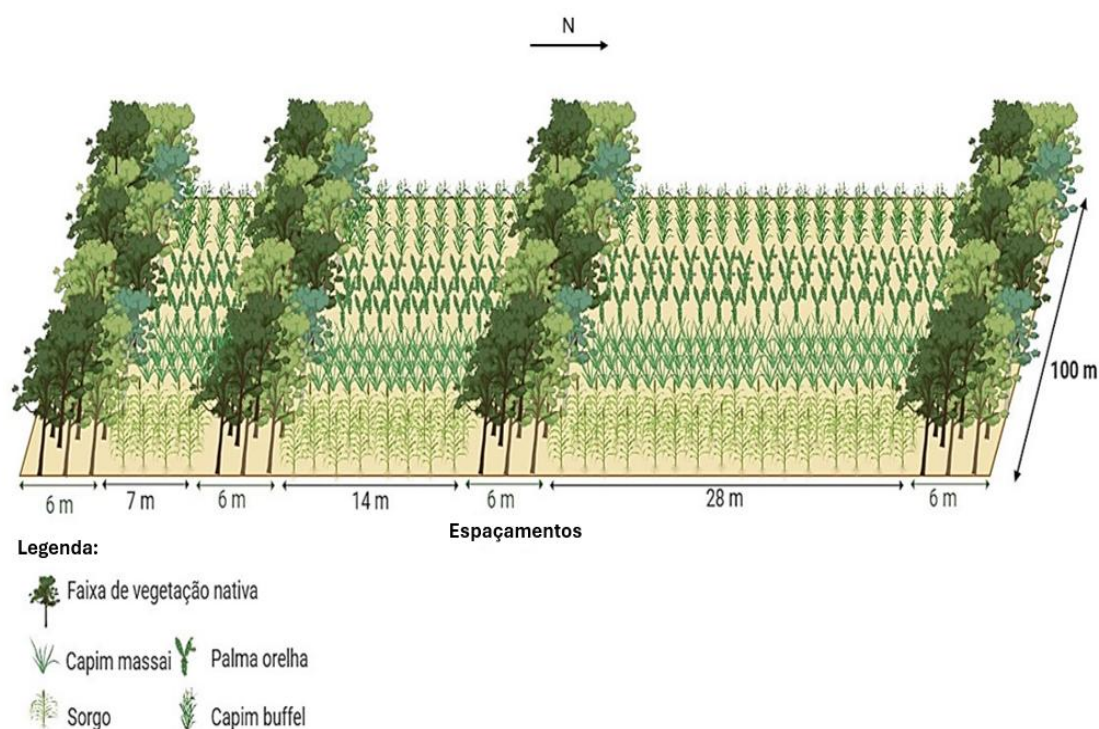


Figura 1. Representação esquemática da área do estudo com sistemas de IPF com os diferentes espaçamentos entre as faixas de árvores nativas (Caatinga).

2.3 Amostragem e análises de solo

As coletas de amostragem de solo foi realizada em janeiro de 2022, no período seco. As amostras deformadas foram coletadas em cinco trincheiras (repetições) abertas em cada área, em quatro camadas de solo: 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm, resultando em um total de 280 amostras. Em seguida, foram secas ao ar, peneiradas (< 2 mm) e raízes e restos vegetais foram removidas. As frações granulométricas do solo (argila, silte e areia) foram determinadas pelo método da pipeta (Texeira *et al.*, 2017), e as análises químicas foram realizadas no Laboratório Central Analítica de Alagoas. Amostras indeformadas para determinação da densidade do solo foram coletadas em três repetições, usando anéis de Kopeck, compreendendo um total de 168 amostras. As amostras indeformadas foram secas em estufa a 105°C por 48h, e a densidade do solo (Ds) foi calculada com base na massa seca e no volume total do anel (Texeira *et al.*, 2017). A caracterização química e física da área de estudo é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios da caracterização dos atributos químicos e físicos do solo sob áreas com vegetação nativa (NV), sistemas de integração pecuária-floresta (IPF) com os cultivos de sorgo (IPFSO), palma forrageira (IPFPo), capim massai (IPFCm), capim buffel (IPFCb) e faixa de vegetação nativa (FxVN) nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.

Tratamentos	Espaçamento (m)	Areia	Silte	Argila	CO		Ds	pH	CTC
		(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹)	(g cm ⁻³)		(cmolc kg ⁻¹)
VN		474,36	304,44	221,21	7,60	46,02	1,33	7,40	11,15
FxVN		472,39	224,58	303,03	8,14	48,41	1,31	6,98	8,90
IPFCb	7	424,48	139,12	436,40	5,95	37,88	1,34	6,25	7,81
IPFCm		435,49	213,95	350,56	6,32	39,27	1,28	6,83	8,13
IPFPo		529,93	89,22	380,85	5,87	37,11	1,41	5,88	10,29
IPFSO		474,76	73,59	451,65	6,02	38,30	1,34	6,88	9,40
IPFCb	14	406,55	247,49	345,97	6,58	40,21	1,34	6,93	8,69
IPFCm		456,93	225,50	317,57	6,37	40,62	1,42	6,83	8,43
IPFPo		485,64	187,69	326,67	5,92	34,99	1,46	5,83	7,95
IPFSO		445,79	117,76	436,45	5,19	32,42	1,37	5,98	7,84
IPFCb	28	468,66	230,54	300,80	6,25	39,43	1,38	6,78	9,34
IPFCm		447,37	274,54	278,10	6,74	42,18	1,39	6,65	10,46
IPFPo		486,89	195,66	317,45	5,41	32,88	1,36	5,55	10,16
IPFSO		508,24	220,84	270,92	6,17	36,83	1,27	6,43	9,26

Ds: Densidade do solo; pH em H₂O; CTC: Capacidade de troca de cátions; CO: Carbono Orgânico.

2.4 Determinação dos agregados do solo estáveis em água

Os agregados estáveis em água foram obtidos por peneiramento úmido, conforme os procedimentos descritos por Teixeira *et al.* (2017). Para a análise, 50g de amostras de solo foram pesadas e posicionadas na peneira superior e colocada em imersão em água, sendo submetidas a agitação vertical no aparelho de Yodder durante 15 minutos. O solo retido em cada peneira foi coletado e posteriormente seco em estufa a 105°C por 48 h. Por fim, os agregados foram, classificados em três classes, tendo-se como critério os seguintes diâmetros: macroagregados (> 2,00 mm), mesoagregados (2,00 – 0,25 mm) e microagregados (0,25 – 0,053 mm), conforme procedimento descrito por Costa Júnior *et al.* (2012).

A distribuição dos agregados foi corrigida a partir da determinação do teor de areia, utilizando o hidróxido de sódio (NaOH, 1,0 mol L⁻¹). Em seguida, o material residual de cada peneira foi transferido para a lata e seco em estufa a 105° C. Posteriormente, o material seco foi pesado novamente para determinar a massa seca das partículas individuais, conforme o método descrito por Teixeira *et al.* (2017).

2.5 Determinação dos índices de agregação do solo

Os valores obtidos da massa seca de cada classe de agregado, foram utilizados para calcular diferentes índices de agregação, como o diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e o índice de sensibilidade (IS).

Os cálculos do DMP e do DMG foram realizados de acordo com Medeiros *et al.* (2023), obtidos por meio das equações (1) e (2).

$$DMP = \sum_{i=1}^n (xi \cdot wi) \quad (1)$$

Em que: wi = proporção de cada classe em relação ao total (%); xi = diâmetro médio de classes (mm).

$$DMG = (\exp \sum_{i=1}^n (wp \cdot \log xi)) / (\sum_{i=1}^n (wi)) \quad (2)$$

Em que: wp = peso dos agregados de cada classe (g); xi = diâmetro médio das classes (mm); wi = proporção de cada classe em relação ao total (%).

Os valores do IEA e o IS foram calculados de acordo com a metodologia proposta por Castro Filho (1998), conforme a equação (3).

$$IEA = \frac{WDS-WP25-sand}{WDS-sand} \quad (3)$$

Em que: WDS = peso total da amostra seca de agregados (g); WP25 = peso seco dos agregados da classe < 0.25mm (g).

Para o cálculo de IS foi realizado de acordo com Bolinder *et al.* (1999), conforme a equação (4).

$$IS = \frac{DMP_{Ag}}{DMP_{VN}} \quad (4)$$

Em que: DMP_{Ag} = valor do DMP do solo de cada sistema agropecuário, e DMP_{VN} = valor do DMP do solo na vegetação nativa.

2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos aos pressupostos de normalidade (teste de Shapiro-Wilks) e homogeneidade (teste de Barlett), não aditividade (teste de Tukey) e independência dos resíduos para validar a ANOVA. Posteriormente, a ANOVA foi realizada em todas as variáveis, para avaliar os efeitos dos sistemas integrados (IPFCb, IPFCm, IPFPo e IPFSO) e dos diferentes espaçamentos de 7, 14 e 28 m entre as FxVN nas propriedades do solo, adotando fatorial com adição de testemunha. Quando significativo, os valores médios dos tratamentos foram comparados pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) para analisar os efeitos dos sistemas de IPF e dos espaçamentos. O teste de Dunnett ($p < 0,05$) foi utilizado para comparar os sistemas de IPF com a vegetação nativa (referência).

Na análise multivariada, utilizou-se a análise dos componentes principais, utilizando-se a rotação ortogonal (critério Varimax), com os dados padronizados ($\bar{X} = 0,0$ e $s = 1,0$). Nesta análise foram consideradas as variáveis que apresentaram valor da carga fatorial acima de 0,60 (Araújo *et al.*, 2013). Variáveis não associadas aos componentes principais (PCs) ($|r| < 0,60$) foram removidas do banco de dados e uma nova análise foi realizada. Foi realizada a análise de agrupamento hierárquico, utilizando-se o método UPGMA, a partir da distância euclidiana média padronizada, utilizando-se o critério de Frey para estimar o número de grupos. Para testar a eficiência do método hierárquico,

calculou-se o coeficiente de correlação cofenético (CCC), que varia de 0 a 1, em que, quanto maior o valor, maior é a eficiência, com menor perda de informação. Nesta análise, aplicou-se o teste de Mantel ($p < 0,05$). Todas as análises foram realizadas com o auxílio dos pacotes *MultivariateAnalysis*, versão 0.4.4 (Azevedo, 2021), *FactoMineR*, versão 2.8 (Le *et al.*, 2008) e *Factoextra*, versão 1.0.7 (Kontopoulou *et al.*, 2015) do software R (R Core Team, 2020).

3. Resultados

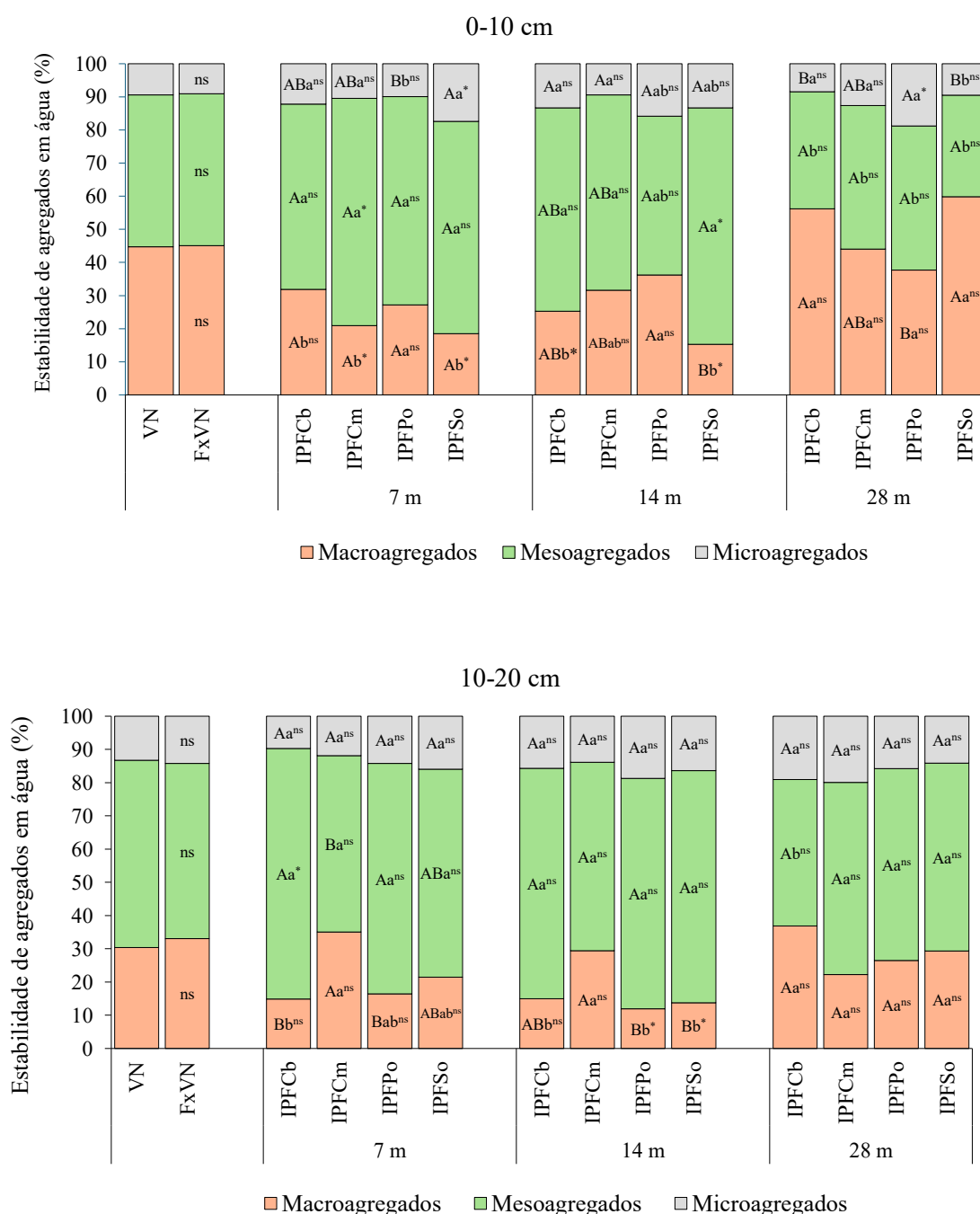
3.1 Distribuição dos agregados do solo

A distribuição dos agregados do solo nas diferentes classes (macroagregados, mesoagregados e microagregados) apresentou pouca diferença estatística significativa ($p < 0,05$) ao comparar os sistemas de IPF (Cb, Cm, Po e So), os espaçamentos de E7, E14 e E28, e as profundidades do solo, em relação à área de VN (Figura 2), destacando-se predominância dos mesoagregados, seguidos pelos macroagregados, e por fim, os microagregados, independentemente do tipo de uso da terra, e das culturas adotadas nos sistemas de IPF. A exceção foi observada somente nos resultados do E28 na camada de 0-10 cm, em que se verificou que há o predomínio dos macroagregados nos sistemas de IPFSO, IPFCb e IPFCm. Este aumento em relação a VN pode ser observado em outras profundidades, como, por exemplo, no tratamento IPFCb na camada de 10-20 cm, e no IPFSO na camada 30-50 cm do solo (Figura 2).

Nos mesoagregados, os resultados variaram substancialmente entre os tratamentos e espaçamentos, porém, vale destacar que na camada de 0-10 cm, todos os sistemas de IPF nos E7 e E14 apresentaram valores que foram superiores ($p \leq 0,05$) em relação a VN. Para a camada de 10-20 cm, destacaram-se tratamentos com IPFCb, IPFPo e IPFSO nos E7 e E14, enquanto para o E28, os destaques foram os tratamentos IPFCm e IPFPo. Na camada de 20-30 cm, todos os tratamentos dos sistemas de IPF (em todos os espaçamentos) apresentaram maiores valores que a área da VN, os quais foram estatisticamente diferentes ($p < 0,05$) nos E7 e E14. Para a camada mais profunda (30-50 cm), os tratamentos que se destacaram foram o IPFPo nos E7 e E28, e o IPFSO nos E7 e E14, os quais apresentaram valores superiores ($p < 0,05$) em relação à VN (Figura 2).

Os menores valores observados foram para a classe de microagregados, com diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os sistemas IPFPo, IPFSO e IPFCm nas camadas de 0-10 e 30-50 cm nos E7 e E28, em comparação com a VN.

Com relação a FxVN, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, os resultados para a distribuição das três classes de agregados foram semelhantes aos observados na VN. Com o aumento da profundidade do solo, observou-se que, na camada de 20-30 cm, houve redução dos macroagregados e, conseqüentemente, houve aumento dos mesoagregados (Figura 2). Em contrapartida, na camada de 30-50 cm, houve aumento nos macroagregados e a diminuição dos mesoagregados. Para os microagregados, não houve alterações em comparação com a área da VN em todas as camadas do solo analisadas.



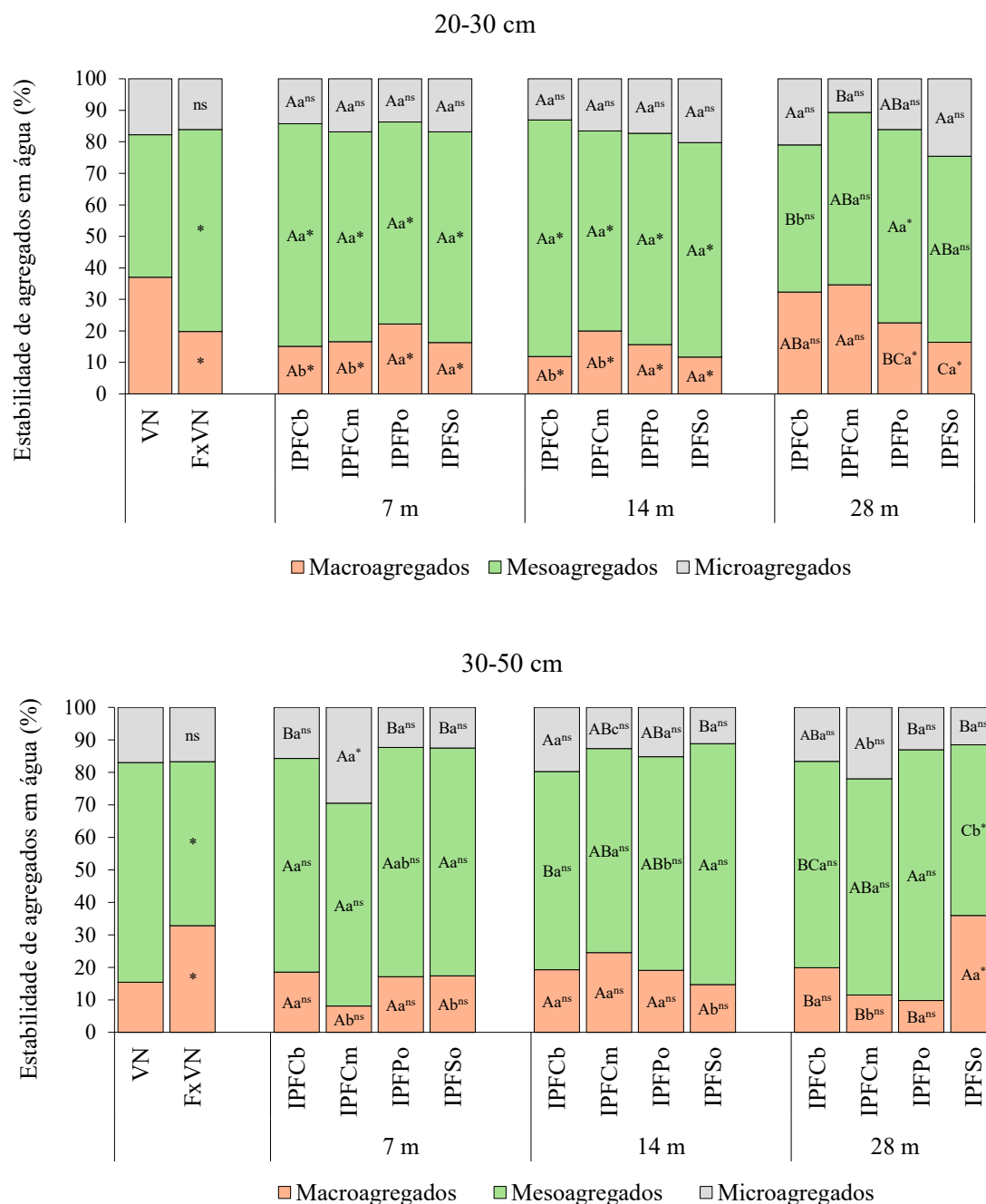


Figura 2. Estabilidade de agregados em água (%) sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), o sistema de integração pecuária-pecuária (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7 m - E7, 14 m - E14 e 28 m – E28) nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm. Letras maiúsculas indicam diferenças entre os sistemas de IPF em um mesmo espaçamento pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Letras minúsculas diferentes no mesmo sistema de IPF e na mesma camada do solo diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), compara os tratamentos IPFCb, IPFCm, IPFPo e IPFSO com a área de referência (NV). * - significativo a 5%; ns – não significativo a 5%, respectivamente, pelo teste de Dunnett.

3.2 Diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG)

No DMP (Figura 3) e no DMG (Figura 4) os maiores valores foram observados na camada superficial de 0-10 cm em todos os sistemas de IPF, sobretudo, nos sistemas IPFCb e IPFSO no espaçamento com 28 m (E28), os quais foram substancialmente maiores quando comparados com a VN.

Para o DMP, os resultados da VN foram superiores aos sistemas de IPF, apresentando algumas exceções, como nos sistemas IPFCb e IPFSO na camada de 0-10 cm no E28. Na camada de 0-10 cm, o IPFSO nos E7 e E14 apresentaram valores inferiores ($p < 0,05$) de 1,12 e 1,13 mm, respectivamente, quando comparados com a área da VN, que foi de 1,43 mm (Figura 3). Observou-se que os resultados no E28 foram superiores aos demais espaçamentos (E7 e E14 m). Especificamente na camada de 0-10 cm, os sistemas IPFCb e IPFSO, e na camada de 20-30 cm o IPFCm, foram os sistemas que apresentaram valores superiores a área de VN. Os valores de DMP da área da VN variaram de 1,10 a 1,42 mm, entre as camadas do solo, os quais foram semelhantes aos valores observados na FxVN ($p > 0,05$), sobretudo nas camadas superficiais (0-10 e 10-20 cm), em que os valores foram 1,42 e 1,43mm, e 1,26 e 1,28 mm, respectivamente (Figura 3). Diferentemente das camadas mais profundas, as quais apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) em comparação com a VN.

Para o DMG (Figura 4), as diferenças entre os tratamentos e os espaçamentos foram superiores aos resultados observados no DMP. No entanto, o DMG apresentou os maiores valores na camada de 0-10 cm ($p < 0,05$), em comparação com as demais camadas avaliadas, com destaque para os sistemas IPFCb e IPFSO no E28. Na camada de 10-20 cm, os maiores valores observados foram nos tratamentos IPFCb, IPFCm e IPFPo nos E7 e no E28, com valores de 1,04 e 0,98 mm, respectivamente. Em relação a FxVN, os resultados foram estatisticamente semelhantes ($p > 0,05$) quando comparada com a área VN.

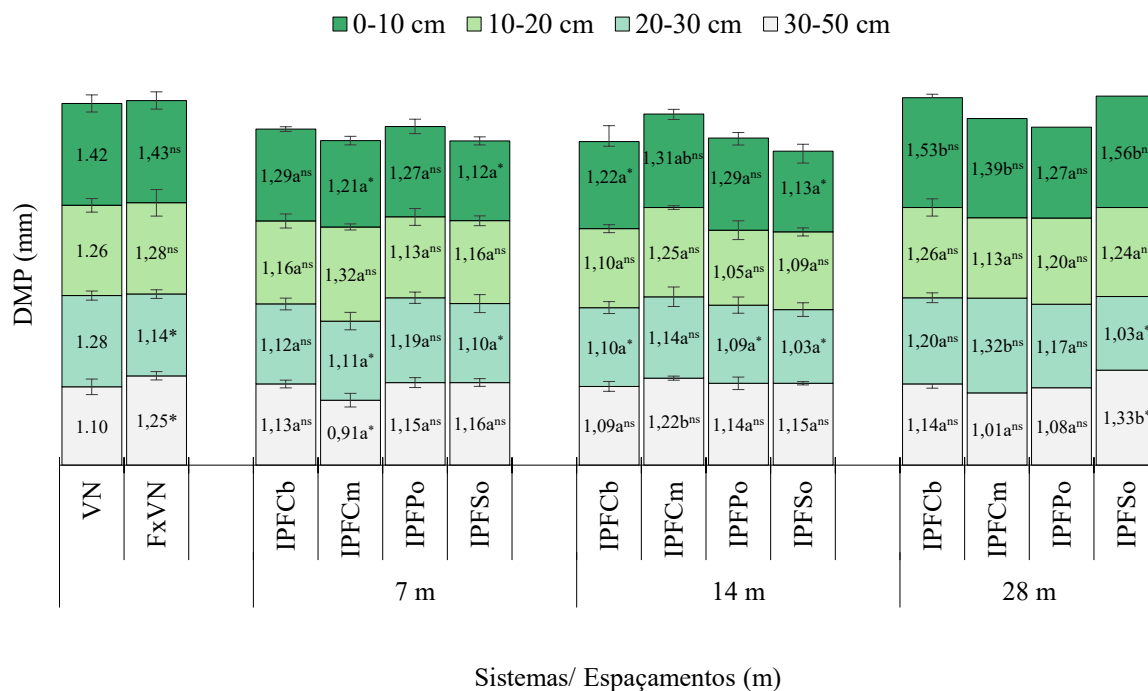


Figura 3. Diâmetro médio ponderado (DMP) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), e sistemas de integração pecuária-floresta (IPF) com cultivos: capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos (7 m - E7, 14 m - E14 e 28 m - E28). Valores seguidos pela mesma letra no mesmo sistema e mesma camada do solo não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * - significativo a 5%, ns - não significativo a 5%, respectivamente, pelo teste de Dunnett e teste t-student ($p \leq 0,05$), compara as médias com a área de referência (VN).

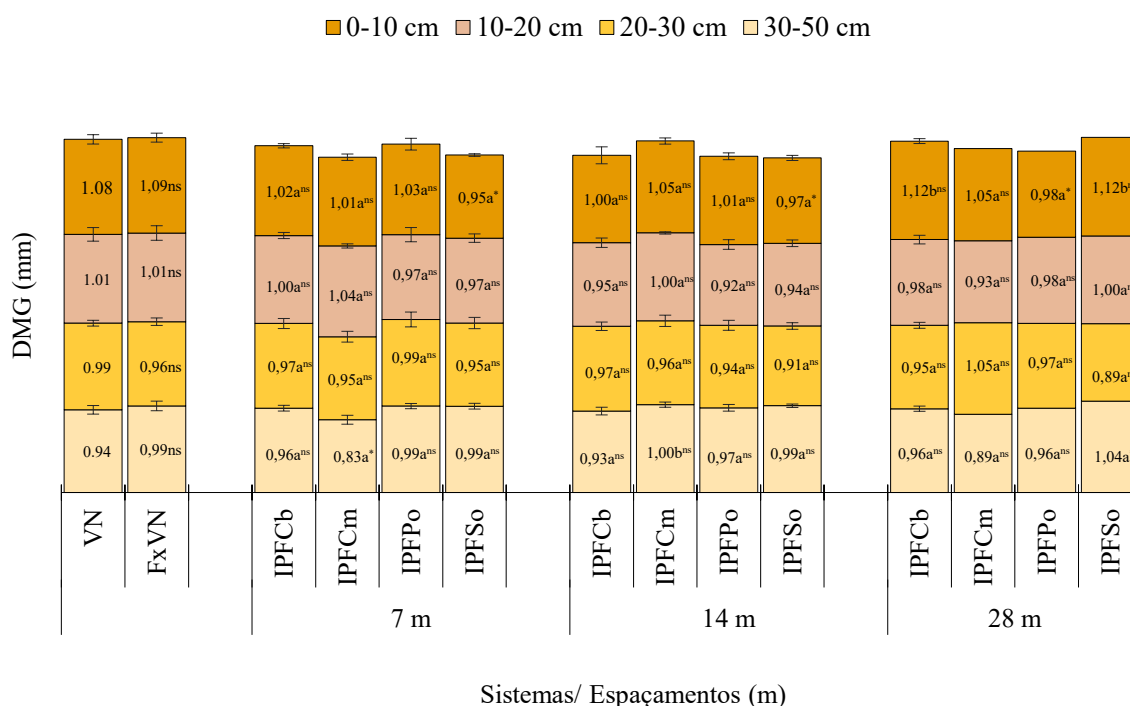


Figura 4. Diâmetro médio geométrico (DMG) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), e sistemas de integração pecuária-floresta (IPF) com os cultivos: capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos (7 m - E7, 14 m - E14 e 28 m - E28). Valores seguidos pela mesma letra no mesmo sistema e mesma camada do solo não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * - significativo a 5%, ns - não significativo a 5%, respectivamente, pelo teste de Dunnett e teste t-student ($p \leq 0,05$), compara as médias com a área de referência (VN).

3.3 Índice de estabilidade dos agregados (IEA)

O IEA avalia a quantidade e a coesão dos macroagregados do solo, indicando a capacidade de agregados manterem sua estrutura sob diferentes condições de uso da terra. Essa avaliação é essencial para contribuir na avaliação da qualidade do solo, assim como a resistência à erosão e a desintegração quando expostos à água ou a outras forças externas.

Em geral, os resultados indicaram reduções do IEA nos sistemas de IPF nas camadas superficiais (0-10 e 10-20 cm) em comparação com a área da VN, exceto o IPFCb e IPFCm no E7 (Figura 5). Na camada de 0-10 cm, as maiores reduções ($p < 0,05$) foram observadas nos sistemas com cultivo de IPFSO no E7, e na palma forrageira nos E14 e E28. Por outro lado, os valores dos IPFs nas camadas mais profundas (20-30 e 30-50 cm) nos sistemas com IPFCb no E7 e E14, IPFPo no E7 e o IPFCm no E28, foram superiores aos observados na área da VN (Figura 5). Destacou-se, para a camada de 20-30 cm, o sistema com IPFCm apresentou valores de 82,8% no E7 e 83,1% no E14, resultados superiores ao observado na VN, que foi de 76,4%, mesmo não apresentando diferenças significativas. O mesmo sistema apresentou maior IEA de 86,4 % no E7 na camada de 10-20 cm. Em seguida, para a mesma camada, no E28 o sistema com IPFCm apresentou valor superior a VN que foi de 86,1%. Já para a camada de 30-50 cm, o sistema IPFSO alcançou percentuais de 85,9% no E14 e 85,2 % no E28, os quais foram superiores à VN. Comparando os diferentes espaçamentos e os sistemas de IPF, os cultivos com os capins buffel e massai resultaram em maiores percentuais de IEA na camada de 0-10 cm, variando de 75% a 84,3%. Tal resultado também pode ser observado na camada 10-20 cm, nos E7 e E14.

Com relação a FxVN, na camada mais superficial (0-10 cm) do solo, o IEA foi semelhante a VN com valor de 84,1% (Figura 5). Com o aumento da profundidade, embora tenham sido observados resultados maiores que a área da VN, não houve diferença ($p > 0,05$) entre a VN e a FxVN e os demais sistemas de IPF.

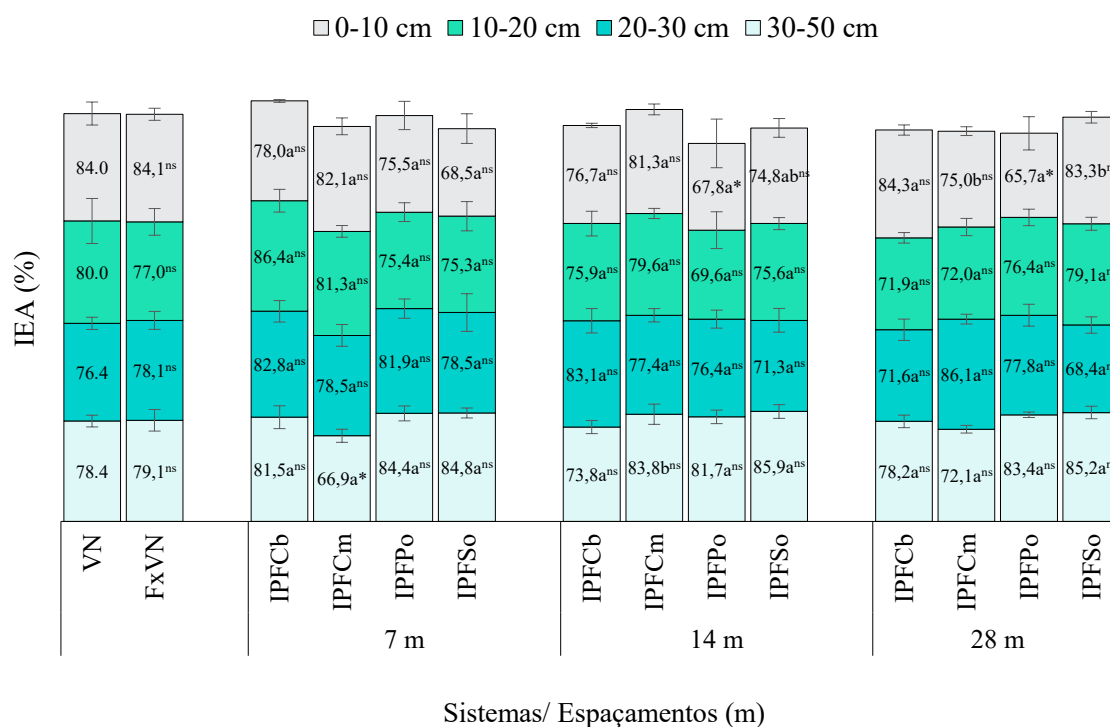


Figura 5. Índice de estabilidade de agregados (IEA) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma orelha (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7 m - E7, 14 m - E14 e 28 m – E28). Valores seguidos pela mesma letra no mesmo tratamento e na mesma camada do solo não diferem pelo teste de tukey ($p < 0,05$). * - significativo a 5%, ns - não significativo a 5%, respectivamente, pelo teste de Dunnett e teste t-student ($p \leq 0,05$), compara as médias com a área de referência (VN).

3.4 Índice de Sensibilidade (IS)

O IS é calculado comparando o DMP dos sistemas integrados e FxVN com o DMP da VN, assim, valores maiores a 1,0 significam que houve aumento do DMP, enquanto valores menores que 1,0 significam que houve diminuição do DMP em relação ao valor médio da VN. Observou-se que os maiores valores de IS foram obtidos na camada de 30-50 cm, principalmente no E14, independentemente do sistema de IPF adotado (Figura 6). Para o E7, os maiores valores foram encontrados nos sistemas com os cultivos de capim buffel, palma forrageira e o sorgo. Por outro lado, no E28, os maiores valores foram

registrados, apenas nos sistemas com capim buffel e sorgo, variando de 1,01 a 1,08 e de 1,0 a 1,22, respectivamente, nas camadas do solo de 0-10, 10-20 e 30-50 cm (Figura 6).

Na FxVN, na camada 20-30 cm apresentou valor menor que 1.0, os demais variaram entre 1,01 e 1,14, quando comparados ao valor de referência atribuído a área da VN.

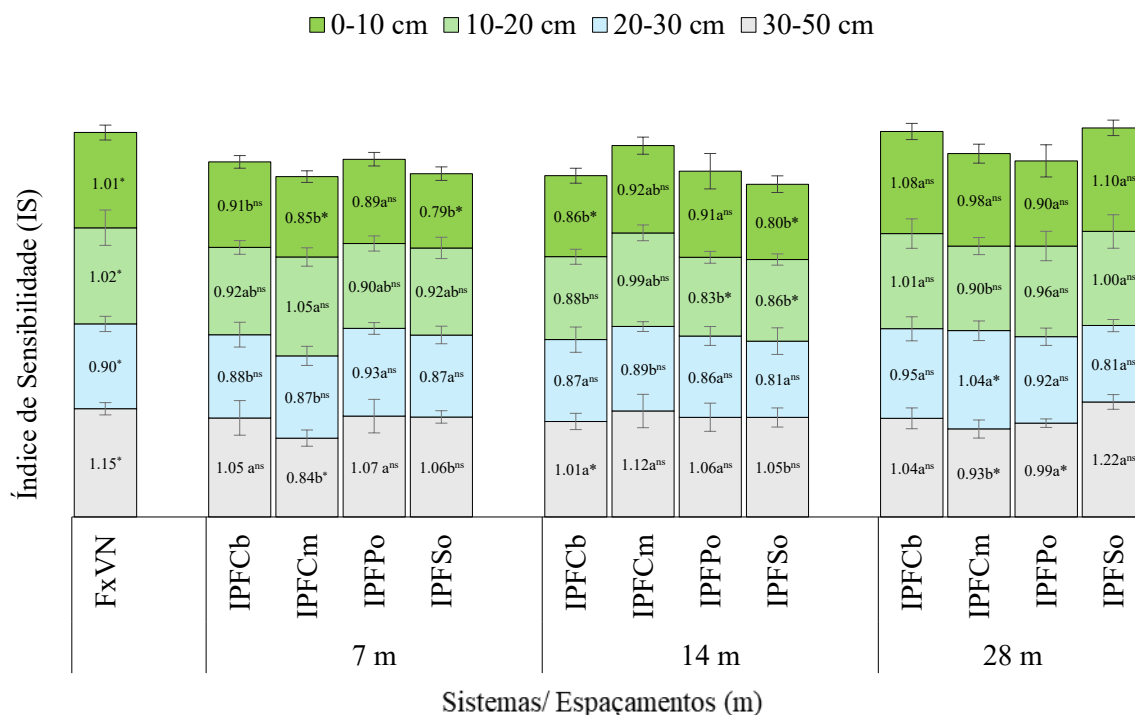


Figura 6. Índice de sensibilidade (IS) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob faixa de vegetação nativa (FxVN), capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma orelha (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7 m - E7, 14 m - E14 e 28 m – E28). Valores seguidos pela mesma letra na mesma cultura e mesma camada do solo não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * - significativo a 5%, ns - não significativo a 5%, respectivamente, pelo teste de Dunnett e teste t-student ($p \leq 0,05$), compara as médias com a área de referência (VN). Barras em cada perfil do solo representaram o desvio padrão da média.

3.5 Abordagem multivariada

3.5.1 Análise de componente principal

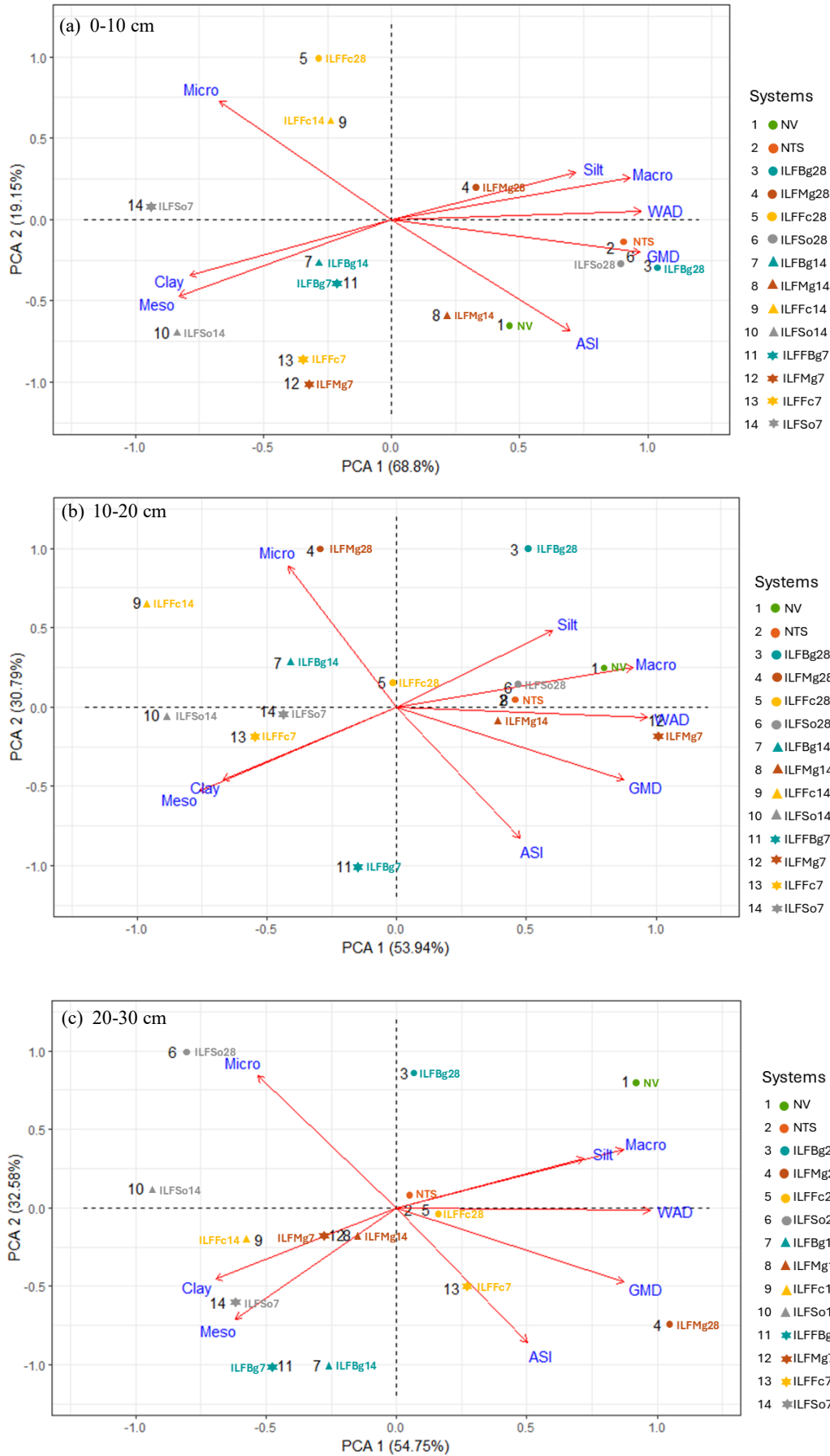
A análise de componentes principais (ACP) explorou a relação das variáveis Macro (macrogregados), Meso (mesoagregados), Micro (microagregados), DMG, DMG, IEA, IS, silte e argila nos diferentes espaçamentos e nas camadas do solo de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm, cuja variação total acumulada nos dois primeiros componentes principais foi de 87,9%, 84,7%, 87,3% e 81,08%, respectivamente (Figura 7).

Na camada 0-10 cm (Figura 7a), os atributos mais associados ao ACP1, que explica 68,8% da variação total entre os tratamentos de IPF foram: Macroagregados, DMP e DMG, os quais foram mais correlacionados com os escores positivos dos sistemas FxVN, IPFCb e IPFSO no E28. Destacaram-se também os sistemas IPFCm no E14 e VN, com maiores valores para o IEA. Por outro lado, os sistemas IPFSO no E14, IPFPo e IPFCm no E7, apresentaram os menores valores para argila, que é uma variável associada a formação dos agregados do solo. O sistema de IPFPo, nos E14 e E28 apresentaram as menores médias de microagregados. O segundo componente da análise (ACP2) explicou 19,15% da variabilidade total dos dados, correlacionando-se com os escores dos sistemas de IPFSO no E7 e IPFPo no E14 e E28, os quais estão relacionados aos maiores valores de microagregados do solo (Figura 7a).

Na camada de 10-20 cm (Figura 7b), o ACP1 explicou 53,94% da variabilidade total dos dados, sendo mais correlacionados com os escores nos sistemas IPFCm no E7 e E14, IPFSO no E28, FxVN e VN, sendo que as variáveis que mais contribuíram foram DMP, DMG, macroagregados e silte. Os sistemas IPFCb no E28 e VN apresentaram os maiores valores de silte e macroagregados. No ACP2, que explica 30,79% da variação total, os sistemas de IPFCb e IPFPo no E14 e IPFCm no E28 apresentaram os maiores valores médios para os microagregados. Os sistemas IPFSO no E14, IPFSO e IPFPo no E7 apresentaram as menores médias, de argila e os mesoagregados do solo.

Para a camada de 20-30 cm (Figura 7c), o ACP1 explicou 54,75% da variação total dos dados, sendo mais correlacionado com os escores dos sistemas IPFCb e IPFCm no E28 e VN, os quais estão relacionados aos maiores valores das variáveis macroagregados, DMP e DMG e silte. O ACP2, explicou 32,58% da variabilidade dos dados, os quais apresentaram nos mesoagregados e argila menores correlação nos sistemas IPFCb e IPFCm no E7 e E14, IPFPo no E14 e IPFSO no E7. Enquanto na camada 30-50 cm (Figura 7d), o ACP1 acumulou 52,25% da variação total dos dados, em que os sistemas IPFCm no E14 e FxVN apresentaram os maiores similaridade nos Macro e DMP. O sistema de IPFSO no E28 apresentou maior escore nas variáveis de macroagregados e no DMP, o que separa de todos os outros sistemas de IPF. Já o sistema de IPFCm no E7 apresentou menores valores nos mesoagregados. O segundo componente (ACP2), explicou 28,83% da variabilidade total dos dados e foi mais influenciado pelas variáveis de silte e argila.

De maneira geral, foi possível observar que as variáveis macroagregados, DMP, DMG, IEA e silte correlacionaram-se positivamente em todas as camadas analisadas.



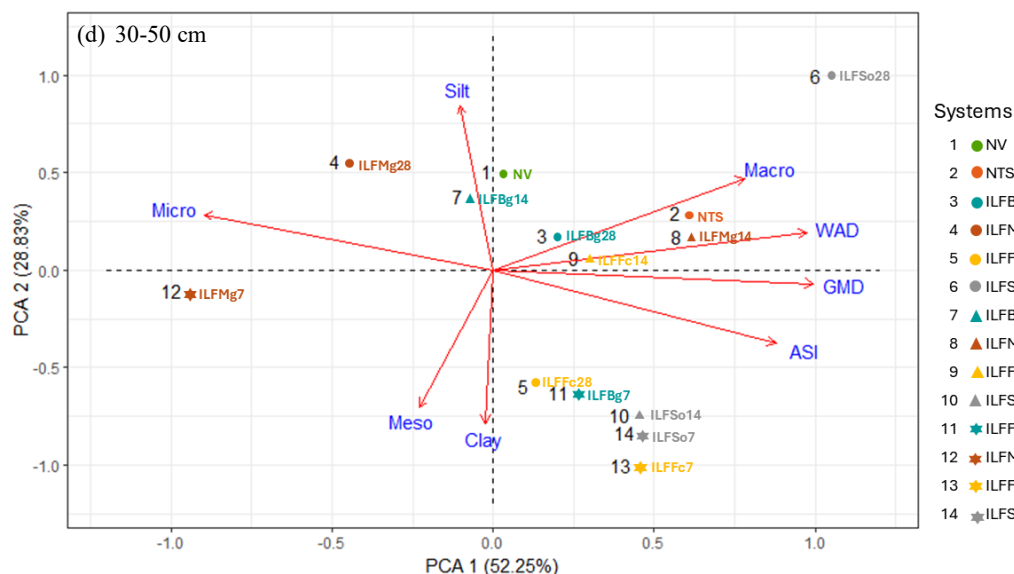


Figura 7. Biplot da análise de componentes principais (ACP 1 e 2) associados aos agregados do solo e granulometria das partículas distribuídas nas camadas (a) 0-10 cm, (b) 10-20 cm, (c) 20-30 cm e (d) 30-50 cm sob os componentes arbóreos: vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN) e nos sistemas de integração pecuária-floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos (7,14 e 28m) entre as FxVN da Caatinga com 06 anos de cultivo.

Nota:

WAD – Diâmetro médio ponderado (DMP), GMD – Diâmetro médio geométrico (DMG), ASI – Índice de estabilidade dos agregados (IEA), ILF – Integração Pecuária-Floresta (IPF), Bg – Capim buffel (IPFCb), Mg – Capim massai (IPFCm), Fc – Palma forrageira (IPFPo), So – Sorgo (IPFSO), NTS – Faixa de Vegetação Nativa (FxVN), NV – Vegetação Nativa (VN), Silt – Silte e Clay – Argila.

3.5.2 Agrupamento hierárquico

Os sistemas de IPF foram agrupados de acordo com o grau de similaridade para todas as camadas (Figura 8). Na camada de 0-10 cm, o grupo G1, formado apenas pela FxVN. O G2 foi formado pelos sistemas de IPFCb, IPFCm e IPFSO no E28, incluindo a área de VN, apresentando maior similaridade. Por outro lado, o grupo G5 foi formado pelos sistemas IPF com Cb (E7 e E14), Cm (E7 e E14) e So no espaçamento de E7 (Figura 8).

O agrupamento hierárquico na camada de 10-20 cm, evidenciou a formação de quatro grupos de similaridade (Figura 8b), em que o grupo G2 apresentou maior similaridade com a VN.

Na camada 20-30 cm (Figura 8c), apenas o IPFCb no E28 ficou no mesmo grupo que a vegetação nativa (G3), enquanto os demais tratamentos, com exceção do IPFCm no

4. Discussão

Mudanças no uso da terra e sistemas de manejo de solo geralmente impactam negativamente a agregação do solo, resultando na destruição de agregados maiores, o que consequentemente, aumenta a proporção de meso ou microagregados (Dai *et al.*, 2024b). No presente estudo, tomando como referência a área de vegetação nativa, esta tendência se confirmou, visto que os resultados mostraram que houve redução dos macroagregados, os quais foram transformados, principalmente, em mesoagregados, enquanto o aumento dos microagregados foi observado apenas em algumas situações. Tais resultados devem-se, inicialmente, ao revolvimento do solo realizado no momento de implementação dos sistemas de Integração de Pecuária-Floresta. É sabido que o revolvimento do solo provoca a ruptura mecânica dos agregados devido à ação dos implementos agrícolas (gradagem e aração) (Cavaliere-Polizeli *et al.*, 2024). Além disso, o revolvimento do solo, resulta em perdas do C, além de provocar alterações na microbiologia do solo e no sistema radicular, aspectos reconhecidamente essenciais para a formação e estabilização da agregação dos solos, ocasionando a degradação (Cotrufo; Lavelle *et al.*, 2022).

Embora a classe dos mesoagregados tenha sido dominante nos sistemas de IPF, os sistemas integrados com IPFSo e com os IPFCb e IPFCm no E28, destacaram-se por promoverem um impacto positivo na agregação do solo, sobretudo, na camada de 0-10 cm quando comparados a vegetação nativa. Estes resultados podem estar associados aos maiores estoques de C do solo (Apêndice A2), observados na camada de 0-10 cm no E28, o qual é proveniente do maior aporte de biomassa proporcionado pelas culturas observadas neste espaçamento. De acordo com Santos Neto *et al.* (2023), na área do estudo, a produção média de biomassa de forragem total de massa seca dos capins massai e buffel no E28 foi superior ($\approx 3.900 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) que nos demais espaçamentos ($\approx 3.600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ – E14, e $\approx 2.700 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ – E7), o que pode ter sido decisivo para a formação dos macroagregados do solo, principalmente, na camada mais superficial. Não existem dados da produção de biomassa do sistema radicular para a área do estudo. No entanto, Patidar *et al.* (2023) relataram que os capins buffel e massai podem produzir cerca de $10,55 \text{ g planta}^{-1}$ e $23,07 \text{ g planta}^{-1}$ de raízes secas por ano, respectivamente enquanto no sorgo a biomassa média geral da raiz foi de $11,62 \text{ g planta}^{-1}$ (Ngidi *et al.*, 2024).

Quando associado ao sorgo, os resultados para os macroagregados no E28 (0-10 cm) são ainda mais surpreendentes, considerando que este sistema foi conduzido por meio do cultivo convencional do solo, ou seja, operações de preparo são realizados anualmente. Provavelmente, o aumento dos macroagregados em relação a VN se deve à elevada produção de biomassa seca do sorgo forrageiro e ao seu sistema radicular profundo e ramificado. Com relação a parte aérea, a produção média de biomassa seca do sorgo forrageiro no semiárido brasileiro é de 8,18 Mg ha⁻¹ (Pinheiro *et al.*, 2024), enquanto a biomassa média da raiz é de 11,62 g planta⁻¹ (Ngidi *et al.*, 2024). A pesquisa conduzida por Santos *et al.* (2025), na mesma área do estudo, constatou que o sorgo apresentou níveis mais elevados de glomalina no E28, em relação aos demais sistemas IPF, consequentemente, influenciando na formação dos macroagregados. A glomalina atua como agente cimentante, contribuindo com a junção dos microagregados, e consequente formação dos macroagregados (Huang *et al.*, 2022), que aumenta a estabilidade dos agregados do solo.

No sistema com palma forrageira, a formação dos macroagregados não ocorreu de forma significativa, quando comparado aos demais sistemas de IPF no E28. A baixa deposição de resíduos orgânicos pela palma deixa o solo mais exposto, podendo ter contribuído para menor taxa de decomposição da MOS. De acordo com Santos Neto *et al.* (2023), na área de estudo, a palma forrageira apresentou maior produtividade de biomassa seca de forragem total produzidas nos E14 e E28 com, aproximadamente, 7.000 e 9.000 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, em comparação com o E7. Na palma forrageira nos E14 e E28, a produção de biomassa total foi maior em aproximadamente 50%. Esses resultados em que o E7 apresentou menor produção de massa seca pode estar associado a menor incidência de radiação fotossintética na superfície dos cladódios, ocasionando redução na densidade populacional de perfilhos refletindo na menor produção de biomassa das culturas (Santos Neto *et al.*, 2023). Em relação a biomassa seca total das raízes da palma forrageira, Hassan *et al.* (2019) relataram que, ao longo de 12 meses de cultivo, a média geral foi de 32 g planta⁻¹.

Portanto, a escolha das espécies para compor os sistemas integrados no semiárido brasileiro deve considerar as características das culturas que, além de outros benefícios, também possam influenciar a formação e estabilização dos agregados do solo. Nesse contexto, é importante considerar a quantidade e qualidade dos resíduos vegetais depositados no solo (acima e abaixo do solo), o tipo de sistema radicular e deposição de

exsudados (Bastista *et al.*, 2024), a capacidade de acesso à água disponível no solo (Ferraz *et al.*, 2017), e a sua capacidade de adaptação das espécies ao ambiente semiárido.

Resultados obtidos com a implementação dos sistemas de IPF na região semiárida do Brasil têm mostrado aumento na formação e distribuição dos agregados. A pesquisa desenvolvida por Sales *et al.* (2025) investigou a influência de sistemas agroflorestais, compostos por cultivos de café e cedro, e de um sistema convencional com monocultura de café, na formação de agregados do solo. Os resultados indicaram que a formação de agregados foi mais expressiva nos sistemas agroflorestais, especialmente na classe de agregados superiores a 6 mm. Em contraste, o sistema convencional apresentou agregados predominantemente nas classes menores (de 4 a 2 mm). Esses resultados podem ser explicados pela contribuição contínua de resíduos vegetais nos sistemas agroflorestais, que favorece a cobertura do solo e promove a formação de agregados maiores.

Com relação aos índices, o DMP é comumente reconhecido como um dos principais índices para avaliar a estabilidade dos agregados do solo, demonstrando uma correlação positiva com o grau de agregação, estabilidade, estrutura do solo e massa dos agregados do solo (Gan *et al.*, 2024; Dai *et al.*, 2024a). Quanto maior for o percentual de agregados grandes, maior o DMP. Por outro lado, o DMG representa a estimativa do tamanho de maior ocorrência na distribuição dos agregados do solo. Logo, quanto maior os valores do DMP e DMG maior a estabilidade dos agregados (Yu *et al.*, 2023; Ma *et al.*, 2020). Para este estudo, os maiores valores de DMP e DMG foram observados no E28 para os sistemas de IPF com sorgo e capim buffel. Para o E7 e E14, destacaram os sistemas com capim massai e buffel. Estes resultados podem ser atribuídos, a presença de sistemas radiculares diversificados dos sistemas de IPF que contribuem para a renovação constante dos agregados, o que potencializa a estabilidade e a estrutura do solo.

O IEA é um dos índices que avaliam a estabilidade dos agregados do solo e a resistência a desagregação, e pode indicar a condição de agregação total do solo, após estresse natural ou antropogênico (Castro Filho *et al.*, 1998). Os valores mais elevados do IEA foram observados nos sistemas de IPF com IPFCb e IPFCm, os quais reforçam os aspectos já discutidos, tais como, a proteção proporcionada pelos resíduos vegetais das diferentes culturas, sobretudo das gramíneas, o aporte contínuo de matéria orgânica que fornece energia para a atividade microbiana que, por sua vez, produz mecanismos para formação e estabilização dos agregados. Mesmo a palma forrageira, que apresenta um sistema radicular mais superficial, com distribuição horizontal das raízes no solo, resultou

na manutenção da estabilidade dos agregados do solo em profundidade. Além desses aspectos, nos sistemas de IPF com capim buffel e massai, os maiores resultados de IEA também estão relacionados com o menor revolvimento do solo.

Para o sistema associado ao sorgo, que foi conduzido com revolvimento anual do solo, a manutenção ou pouco impacto no IEA, provavelmente se deve ao desenvolvimento extensivo do sistema radicular fasciculado, que pode promover a agregação por meio da liberação de exsudatos e os entrelaçamentos dentro das partículas do solo, ocasionando o aumento na formação e na estabilidade dos agregados (Salton; Tomazi *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2022).

O IS estima a intensidade das alterações dos agregados do solo, utilizando a área de vegetação nativa como referência. Quanto mais próximo o IS estiver do valor de referência (VN, IS = 1), menor será a alteração dos atributos avaliados (Bolinder *et al.*, 1999). Neste sentido, os resultados de IS obtidos nesse estudo corroboram os demais dados e índices já analisados, que indicaram poucas alterações causadas pelo sistema de manejo nas culturas. Os maiores valores foram observados na camada de 30-50 cm, especificamente no espaçamento de 14 m, para todos os tratamentos (Cb, Cm, Po e So), o qual representam incremento na agregação nos diferentes sistemas de uso da terra. Destacou-se os tratamentos IPFCb, IPFSo e a FxVN, que apresentaram valores superiores a unidade 1, respondendo de forma positiva a adoção dos sistemas IPF. O IPFCb, no espaçamento de 28 m, destacou-se pela estrutura do sistema radicular que entrelaça as partículas minerais do solo, formando os microagregados enriquecidos com COS. Esse processo favorece a atividade microbiana e, conseqüentemente, aumenta a proporção de agregados estáveis, contribuindo para a formação dos macroagregados (Six *et al.*, 2004).

Para os resultados da ACP, as variáveis que mais correlacionaram-se foram macroagregados, DMP, DMG e silte, os quais apresentaram escores positivos, bem como os mesoagregados e argila com escores negativos. As correlações dessas variáveis relacionadas a estrutura do solo nos sistemas integrados demonstraram que contribuíram para a melhoria da agregação do solo, principalmente nas camadas superficiais.

Com relação a análise hierárquica de agrupamentos para sistemas de IPF, a similaridade entre os sistemas de IPF na camada superficial pode estar associada a maior macroagregação do solo na camada de 0-10 cm. Nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, o grupo G2 está formado pelos sistemas de IPFBg, IPFSo e IPFMg no E28, onde foram agrupado com a vegetação nativa, associados a maior formação dos macros e mesoagregados.

5 Conclusão

Nesse estudo, a conversão da vegetação nativa da Caatinga para sistemas de integração IPF resultou em mudanças discretas na agregação do solo, considerando os diferentes espaçamentos adotados entre as faixas de vegetação nativa. A adoção dos sistemas de IPF promove redução dos macroagregados, os quais foram transformados, principalmente em mesoagregados.

De modo geral, os sistemas de integração pecuária-floresta no espaçamento de 28 m mostrou melhores resultados quando se observa os demais espaçamentos de 7 e 14m. Além disso, apresentou maiores distribuição dos agregados do solo quando comparado com a vegetação nativa.

Os sistemas de integração pecuária-floresta com os capins buffel, massai e sorgo são benéficos na melhoria da agregação do solo na formação dos macroagregados na camada superficial. Para as camadas mais aprofundadas analisadas, os mesoagregados foram predominantes, independentes das culturas integradas e dos diferentes espaçamentos. Para os índices de agregação, os resultados dos sistemas de IPF corroboram os dados apresentados na distribuição das classes dos agregados do solo, em relação aos sistemas e espaçamentos avaliados.

Com isso, a implementação dos sistemas de IPF mostram um potencial positivo para formação e distribuição dos agregados do solo. No entanto, a exceção do IPF com sorgo, os demais provocam perdas pouco significativas na estabilidade dos agregados, sobretudo no espaçamento com 28m. No caso da cultura do sorgo, o impacto do cultivo convencional parece ter sido minimizado pelo aporte de biomassa da cultura.

Diante disso, o mais sugestivo é adotar práticas que aumentam a cobertura do solo, proporcionando o aumento no aporte de biomassa, como por exemplo, consorcio com gramínea ou leguminosa. Para o sistema com palma forrageira, é fundamental adotar práticas que aumentem a cobertura do solo, proporcionando o aumento no aporte de biomassa.

REFERÊNCIAS

- AKSAKAL, E. L.; ANGIN, I.; SARI, S. A new approach for calculating aggregate stability: Mean weight aggregate stability (MWAS), *Catena*, v.194, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104708>
- ARAÚJO, A.O.; MENDONÇA, L.A.R.; LIMA, M.G.S.; FEITOSA, J.V.; SILVA, F.J.A.; NESS, R.L.L.; FRISCHKORN, H.; SIMPLÍCIO, A.A.F.; KERNTOPF, M.R. Modificações nas propriedades dos solos de uma área de manejo florestal na Chapada do Araripe. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.37, p.754–762, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300022>
- ARAÚJO, A. S. F.; MEDEIROS, E.V.; COSTA, D. P. B.; PEREIRA, A. P.A.; MENDES, L. W. From desertification to restoration in the Brazilian semiarid region: Unveiling the potential of land restoration on soil microbial Properties. *Journal of Environmental Management*, v.351, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119746>
- AZEVEDO, A.M. MultivariateAnalysis: pacote para análise multivariada. R package version 0.4.4, 2021. <https://CRAN.R-project.org/package=MultivariateAnalysis>
- BATISTA, A. M.; NUNES, M. R.; PESSOA, T. N.; LIBARDI, P. L. Seasonal variation of the rhizosphere soil aggregation in an Oxisol. *Soil and Tillage Research*, v.231, 105741, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105741>
- BATISTA, A. M.; PESSOA, T. N.; PUTTI, F. F.; ANDREOTE, F. D.; LIBARDI, P. L. Root Influences Rhizosphere Hydraulic Properties through Soil Organic Carbon and Microbial Activity. *Plants*, v.13, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13141981>
- BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; CAMPOS BERNARDI, A. C.; CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. *Geoderma*, v.371, 114368, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114>
- BIELUCZYK, W.; DE CÁSSIA PICCOLO, M.; GONÇALVES, J. V. M.; PEREIRA, M. G.; LAMBAIS, G. R.; DE CAMARGO, P. B.; DE MORAES, M. T. Fine root production and decomposition of integrated plants under intensified farming systems in Brazil. *Rhizosphere*, v.31, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100930>
- BOLINDER, M.A.; ANGERS, D.A.; GREGORICH, E. G.; CARTER, M.R. The response of soil quality indicators to conservation management. *Canadian Journal of Soil Science*, v.79, p.37-45, 1999. <https://doi.org/10.4141/S97-099>
- CAMARGO, T. A.; ALVES, L. A.; MENDES, I. C.; GASQUES, L. R.; OLIVEIRA, L. G. S.; PIRES, G. C.; ALMEIDA, T. O.; CARVALHO, C. F.; SOUZA, E. D. Enhancing soil quality and grain yields through fertilization strategies in integrated crop-livestock system under no-till in Brazilian Cerrado. *European Journal of Soil Biology*, v. 121, 103613, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103613>

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistema de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.3, p.527-38, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000300019>

CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; GUEDES FILHO, O.; ROMANOSKI, V. S.; RUTHES, B. E. S.; CAALABRIA, Z. P.; OLIVEIRA, L. B. Conservative farming systems and their effects on soil organic carbon and structural quality. **Soil and Tillage Research**, v.242, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106143>

CARVALHO, P. C.; PONTES, L. S.; BARRO, R. S.; SIMÕES, V. J. L. P.; DOMINSCHKE, R.; CARGNELUTTI, C. S.; MAURICIO, R. M.; BREMM, C. Integrated crop-livestock-forestry systems as a nature-based solution for sustainable agriculture. **Agroforestry Systems**, v.98, p.1-15, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01057-9>

COTRUFO, M. F.; LAVELLE, J. M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis to inform its conservation and regeneration. **Advances in Agronomy**, v.172, p.1-66, 2022. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002>

COSTA JÚNIOR, C.; PICCOLO, M.C.; SIQUEIRA NETO, M.; CAMARGO, P.B.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas na região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.4, p.1311-1321, 2012; <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000400025>

CUNHA, T. J. F.; SÁ, I. B.; PETRERE, V. G.; TAURA, T. A. **Cambissolos**. [S. l.], Embrapa. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/biomacaatinga/solos/cambissolos>. Acesso em: 23 fev. 2025.

DAI, W.; FENG, G.; HUANG, Y.; ADELI, A.; JENKINS, J.N. Influence of cover crops on soil aggregate stability, size distribution and related factors in a no-till field. **Soil and Tillage Research**, v.244, 2024a. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106197>

DAI, W.; FENG, G.; HUANG, Y.; TEWOLDE, H.; SHANKLE, M. W.; JENKINS, J. N. Soil aggregate stability and erosion resistance in response to integration of cover crops and poultry litter in a no-till rainfed soybean cropping system. **Soil and Tillage Research**, v.244, 106245, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106245>

EVEN, R. J.; COTRUFO, M. F. The ability of soils to aggregate, more than the state of aggregation, promotes protected soil organic matter formation. **Geoderma**, v.442, 116760, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116760>

FERRAZ, R.L.S.; COSTA, P.S.; DANTAS NETO, J.; ANJOS, F.A., BARRETO, N.P.; SOARES, L.S.; MAGALHÃES, I.D.; BARBOSA, M.A. *Opuntia ficus-indica* (L.) mill. (Cactaceae) in climate change scenarios and its potential for wastewater bioremediation in semiarid regions: a systematic review and meta-analysis. **American Journal. Experimental. Agriculture**, v.18, p.1–11, 2017. <https://10.9734/JEAI/2017/36730>.

FULTON-SMITH, S.; EVEN, R.; COTRUFO, M. F. (2024). Depth impacts on the aggregate-mediated mechanisms of root carbon stabilization in soil: Trade-off between MAOM and POM pathways. **Geoderma**, v.452, 117078, 2025
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117078>

GAN, F.; SHI, H.; GOU, J.; ZHANG, L.; DAI, Q.; YAN, Y. Responses of soil aggregate stability and soil erosion resistance to different bedrock strata dip and land use types in the karst trough valley of Southwest China. **International Soil and Water Conservation Research**, v.12, n.3, p.684-696, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.09.002>

HASSAN, S.; INGLESE, P.; GRISTINA, L.; LIGUORI, G.; NOVARA, A.; LOUHAICHI, M.; SORTINO, G. Root growth and soil carbon turnover in *Opuntia ficus-indica* as affected by soil volume availability. **European Journal of Agronomy**, v.105, p.104-110, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.012>

HUANG, B.; YAN, G.; LIU, G.; SUN, X.; WANG, X.; XING, Y.; WANG, Q. Effects of long-term nitrogen addition and precipitation reduction on glomalin-related soil protein and soil aggregate stability in a temperate forest. **Catena**, v.214, 106284, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106284>

IUSS- WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. **International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**, World Soil Resources Reports No. 106. Rome, 2015.

KONTOPOULOU, C.K.; BILALIS, D.; PAPPA, V.A.; REES, R.M.; SAVVAS, D. Effects of organic farming practices and salinity on yield and greenhouse gas emissions from a common bean crop. **Scientia Horticulturae**, v.183, n.12, p.48–57, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.012>

LAVELLE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; BEDANO, J. C.; BLANCHART, E.; GALINDO, V.; ZANGERLÉ, A. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta ecologica**, v.105, 103561, 2020b.
<https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103561>

LE, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v.25, n.1, p.1-18, 2008.
<https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>

LIU, S.; HUANG, X. J.; GAN, L.; Z.B. ZHANG, Z.B.; DONG, Y.; PENG, X.H. Drying-wetting cycles affect soil structure by impacting soil aggregate transformations and soil organic carbon fractions, **Catena**, v.243, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108188>

LOCATELLI, J. L.; DE LIMA, R. P.; SANTOS, R. S.; CHERUBIN, M. R.; CREAMER, R. E.; CERRI, C. E. Soil strength and structural stability are mediated by soil organic matter composition in agricultural expansion areas of the Brazilian Cerrado Biome. **Agronomy**, v.13, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010071>

LOCATELLI, J. L.; POPIN, G. V.; SANTOS, R. S.; BIELUCZYK, W.; CIPRIANI, L. T.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. A comprehensive assessment of greenhouse gas emissions research in the Cerrado region, Brazil. **Catena**, v.247, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108538>

LOCATELLI, J. L.; DEL GROSSO, S.; SANTOS, R. S.; HONG, M.; GURUNG, R.; STEWART, C. E.; CHERUBIN, M. R.; BAYER, C.; CERRI, C. E. P. Modeling soil organic matter changes under crop diversification strategies and climate change scenarios in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.379, 109334, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109334>

MACEDO, R. S.; LIMA, R. P.; DE ALMEIDA A. C. K.; MORO, L.; REFATI, D. C.; CAMPOS, M. C. C.; COSTA, D. T. D. Assessment of Soil Quality of Smallholder Agroecosystems in the Semiarid Region of Northeastern Brazil. **Land**, v.13, 304. 2024a. <https://doi.org/10.3390/land13030304>

MACEDO, R. S.; MORO, L.; DOS SANTOS SOUSA, C.; DE ALMEIDA ALVES CARNEIRO, K.; CAMPOS, M. C. C.; DE BAKKER, A. P.; BEIRIGO, R. M. Agroforestry can improve soil fertility and aggregate-associated carbon in highland soils in the Brazilian northeast. **Agroforestry Systems**, v.98, p.1167-1179, 2024b. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00875-7>

MATOS, P. S.; OLIVEIRA, J. M.; CARVALHO, M. T. D. M.; MADARI, B. E.; SILVEIRA, A. L. R.; DAMIAN, J. M.; MORAES, P. A. O.; ARAUJO, W. A.; SIQUEIRA M. M. B.; SILVA, R. R.; FERRARESI, T.M.; STONE, L. F.; SILVA, M. A.S.; FREITAS, F.M.C.; PACHECO, A. R.; YELUPIRARI, J.; ALMEIDA, P. L. O. Impact of land use intensification on key drivers of soil organic carbon pools in Brazil's Central-West. **Catena**, v.249, 108636, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108636>

MEDEIROS, A. D. S.; GONZAGA, G. B. M.; SILVA, T. S. BARRETO, B. D. S.; SANTOS, T. C.; MELO, P. L. A.; MAIA, S. M. F. Changes in soil organic carbon and soil aggregation due to deforestation for smallholder management in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma Regional**, v.33, p.1-12. 2023a. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00647>

MEDEIROS, A. S.; CESARIO, F. V.; MAIA, S. M.F. Long-term impact of conventional management on soil carbon and nitrogen stocks in the semi-arid region of Brazil: A meta-analysis. **Journal of Arid Environments**, v.218, 105052, 2023b. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.105052>

MOJENA, R. 1977. Hierarchical grouping methods and stopping rules: an evaluation. **The Computer Journal**, v.20, n.4, p.359-363. DOI: <https://doi.org/10.1093/comjnl/20.4.359>

MONROE, P. H. M.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; BARROS, W. T.; OLIVEIRA, F. G. R. B.; PEREIRA, M. G. Physical protection of soil organic carbon through aggregates in different land use systems in the semi-arid region of Brazil. v.186, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104427>

NGIDI, A., SHIMELIS, H., ABADY, S.; FIGLAN, S.; CHAPLOT, V. Response of *Sorghum bicolor* genotypes for yield and yield components and organic carbon storage in the shoot and root systems. **Scientific Reports**, v.14, 9499, 2024.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-59956-x>

OLIVEIRA, J. S.; EMERENCIANO NETO, J. V.; DIFANTE, G. S.; LISTA, F. N.; SANTOS, R. S.; BEZERRA, J. D. V.; BONFIM, B. R. S.; MILHOMENS, L. B. S.; RIBEIRO, J. S. M. Structural and productive features of *Panicum* cultivars submitted to diferente rest periods in the irrigated semiarid region of Brazil. **Bioscience Journal**, v.35, n.3, p.682-690, 2018.
<https://doi.org/10.14393/BJ-v35n3a2019-36402>

PATIDAR, P.; SANNAGOUDAR, M. S. GHOSH, A.; SINGH, A. K.; MISRA, S.; KHANDIBAGUR, V.; OJHA, D.; CASINI, R.; ELANSARY, H.; CHANDRA, A. Tropical range grasses can sustain soil functions despite nutrient depletion in semiarid degraded land. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v.7, p.1-11, 2023.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1230156>

PEREIRA, A. P.; MENDES, L. W.; OLIVEIRA, F. A. S.; ANTUNES, J. E. L.; MELO, V. M. M.; ARAUJO, A. S. F. Land degradation affects the microbial communities in the Brazilian Caatinga biome. **Catena**, v.211, 105961, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105961>

PEREIRA, D. G.C.; PORTUGAL, A.F.; GIUSTOLIN, T. A.; MAIA, V. M.; MEGDA, M. X. V.; KONDO, M. K. Litter decomposition and nutrient release in different land use systems in the Brazilian semi-arid region. **Catena**, v.231, 107345, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107345>

PINHEIRO, A. G.; ALVES, C. P.; SOUZA, C. A.A.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; JARDIM, A. M. R. F.; MORAIS, J. E. F.; SOUZA, L. S. B.; LOPES, D. C.; STEIDLE NETO, A. J.; MONTENEGRO, A. A. A.; GOMES, J. E. A.; SILVA, T. G. F. Calibration and validation of the AquaCrop model for production arrangements of forage cactus and grass in a semi-arid environment. **Ecological Modelling**, v.488, 110606, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110606>

PINTO, L. A. S. R.; LIMA, S. S.; SILVA, C. F.; GONÇALVES, R. G. M.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JUNIOR, W. F.; TORRES, J. R.; PEREIRA, M. G. Soil quality indicators in conventional and conservation tillage systems in the Brazilian Cerrado. **Environmental Earth Sciences**, v.81, p. 2-13, 2022.
<https://doi.org/10.1007/s12665-022-10426-5>

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing - R Foundation for Statistical Computing (4.1.1)**. Vienna, Austria. 2022. Available at: <https://www.R-project.org/>.

SALES, E. P. O.; BARRETO-GARCIA, P. A B.; MONROE, P. H. M.; PEREIRA, M. G.; MARTINS, K. B. S.; SANTOS, T. O.; SILVA, C. F.; SANTOS, L. A.; NUNES, M. R.; Do coffee agroforestry systems favor carbon and glomalin input in soil biogenic aggregates? . **Catena**, v.249, 108685, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108685>

- SALTON, J.C.; TOMAZI, M. Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo. Na Embrapa Dourados; **Comunicado Técnico**, v.198, 2015.
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1005326/1/COT198.pdf>
- SANTOS NETO, C. F. N.; SILVA, R. G.; MARANHÃO, S. R.; BARRETO, C. M.; LOPES, M. N.; CÂNDIDO, M. J. D. Morphological characteristics and yield of *Opuntia stricta* and *Nopalea cochenillifera* in integrated crop systems with caatinga trees. **Agroforestry Systems**, v. 97, n. 1, p. 59-68, 2022.
<https://doi.org/10.1007/s10457-022-00787-y>
- SANTOS NETO, C. F.; SILVA, R. G.; MARANHÃO, S. R.; CAVALVANTE, A. C. R.; MACEDO, V. H. M.; CANDIDO, M. J. D. Shading effect and forage production of tropical grasses in Brazilian semi-arid silvopastoral systems. **Agrofest Systems**, v.97, p.995-1005, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00843-1>
- SANTOS, M. O.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; MONROE, P. H. M.; PAULA, A. Effect of Caatinga forest management on organic carbon stock in soil aggregates. **Scientia Forestalis**, v.49, n.129, 2021. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.16>
- SANTOS, C.; LOSS, A.; PICCOLO, M. D. C.; GIROTTO, E.; LUDWIG, M. P.; DECARLI, J.; BRUNETTO, G. Aggregation index and carbon and nitrogen contents in aggregates of pasture soils under successive applications of pig slurry in Southern Brazil. **Agronomy**, v.12, n.2, p.320, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020320>
- SCHIEBELBEIN, B. E.; BORDONAL, R. D. O.; CERRI, C. E. P.; OLIVEIRA, D. M. D. S.; CHERUBIN, M. R. Mineral-associated and particulate organic matter in aggregates as a proxy for soil C changes in pasture sugarcane land use transitions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.47, 0220103, 2023.
<https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220103>
- SILVA, M. D. S.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; MONROE, P. H. M.; PEREIRA, M. G.; PINTO, L. A. D. S. R.; NUNES, M. R. Physically protected carbon stocks in a Brazilian Oxisol under homogeneous forest systems. **Geoderma Regional**, v.40, e00915, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00915>
- SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between microaggregates, soil biota, and organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v.79, p.7-31, 2004.
- SOARES, B.P.; CECAGNO, D.; VELOSO, M. G.; SCHAIDHAUER, W. S.; LOCHMANN, S. H.; CARVALHO, J. K.; BAYER, C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; TIECHER, T. Long-term effects of grazing intensities on soil aggregation and organic matter in a no-tilled integrated soybean-cattle system. **Soil Secutity**, v.6, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100028>
- TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Brasília, p.573, 2017.
<https://www.embrapa.br/busca-depublicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v.33, n.2, p.141-163, 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

TOMAZ, A. R.; DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; LAL, R.; AMADO, T. J. C.; DA SILVA, B. O. T.; DA SILVA, W. R.; NUNES, E. O. D. S. Can natural undisturbed revegetation restores soil organic carbon to levels under native climax vegetation under tropical semiarid climate? **Land Degradation & Development**, v.35, 1971-1981, 2024. <https://doi.org/10.1002/ldr.5036>

WANG, B.; XU, G.; MA, T.; CHEN, L.; CHENG, Y.; LI, P.; ZHANG, Y. Effects of vegetation restoration on soil aggregates, organic carbon, and nitrogen in the Loess Plateau of China. **Catena**, v.231, 107340, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107340>

YU, A. C. P.; LIU, A. J.; TANG, A. H.; TANG, A. C. X.; LIU, A. S.; DING, A. C. Z. MINGGUO, A.C. The increased soil aggregate stability and aggregate-associated carbon by farmland use change in a karst region of Southwest China. **Catena**, v.231, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107284>

CAPÍTULO 2

Carbono orgânico do solo associado a agregados sob sistemas de integração pecuária-floresta em um Cambissolo no semiárido brasileiro

Resumo

A mudança de uso da terra promovida pela agropecuária contribui para o rompimento dos agregados do solo, expondo a matéria orgânica e, consequentemente, levando a perda do carbono no solo. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da adoção de sistemas de integração pecuária-floresta (IPF) com diferentes culturas e espaçamentos entre faixas de vegetação nativa (VN), sobre o estoque de carbono orgânico do solo (COS) em diferentes classes dos agregados no semiárido brasileiro. Os sistemas avaliados consistiram em seis áreas: quatro com culturas de sorgo, palma Orelha de Elefante, capim massai e capim buffel, implantadas entre faixas de VN em diferentes espaçamentos (7,14 e 28 m), além de uma área de VN como referência. Amostras de solo foram coletadas nas camadas 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm. Os agregados do solo estáveis em água foram classificados em macroagregados ($>2,00$ mm), mesoagregados (2,00 - 0,25 mm) e microagregados (0,25 - 0,053 mm). O carbono foi analisado por combustão seca usando um analisador elementar. Os resultados demonstraram os mesoagregados apresentam os maiores estoques de COS, seguido pelos macroagregados e microagregados, independentemente do uso da terra. A VN apresentou maior estoque de COS nos mesoagregados. O capim massai destacou-se com $7,52 \text{ Mg ha}^{-1}$ de COS nos mesoagregados no espaçamento de 7m. No espaçamento de 28m, sorgo e capim buffel apresentaram maior estoque de COS nos macroagregados, com ganhos de 54,5% e 46,3% em relação a VN, na camada superficial do solo. Conclui-se que o estoque de carbono ocorre majoritariamente nos mesoagregados. Os sistemas IPF são uma alternativa sustentável para melhorar o estoque de carbono do solo no semiárido brasileiro, promovendo práticas agrícolas com menos impacto.

Palavras-chave: Estoque de COS; ILPF; Manejo do solo; Matéria orgânica; Uso da terra.

1. Introdução

Mudanças no uso da terra podem alterar consideravelmente a distribuição dos agregados do solo, afetando a sua estabilidade e o conteúdo do carbono orgânico do solo (COS) (Bhattacharyya *et al.*, 2021), podendo resultar em deficiência na formação da estrutura do solo, disponibilidade inadequada de nutrientes, diminuição da agregação do solo, taxas elevadas de perda de solo e redução da produtividade agrícola (Cavaliere-Polizeli *et al.*, 2024; Bhattacharyya *et al.*, 2021).

Os sistemas integrados de produção são caracterizados pela integração de atividades agrícolas e pecuárias na mesma área, distribuídas ao longo de diferentes períodos (Silva *et al.*, 2024). Esses sistemas são sinérgicos entre os componentes solo, planta, animal e a atmosfera, otimizando os processos produtivos e ecológicos. O potencial dos sistemas integrados está relacionado ao expressivo aporte de resíduos

orgânicos, provenientes da deposição de serapilheira, renovação radicular e liberação de exsudatos (Sales *et al.*, 2025). Isso resulta no aumento da matéria orgânica, contribuindo para a formação de agregados do solo, favorecendo, por conseguinte, o incremento do estoque de carbono no solo (Carneiro *et al.*, 2020).

Os agregados do solo são unidades fundamentais para a estrutura do solo, que têm capacidade de armazenar cerca de 90% do COS na camada superficial, por meio da composição da MOS (Liu *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2023; Kan *et al.*, 2020), sendo a agregação essencial para estabilizar o COS. A distribuição e o arranjo dos agregados determinam o tamanho e a continuidade dos poros do solo, que podem influenciar diretamente a estabilidade estrutural do solo, na capacidade de retenção de água, na aeração e na ciclagem de nutrientes, influenciando assim, os estoques de COS (Liu *et al.*, 2023; Paes *et al.*, 2021).

O armazenamento de COS em sistemas integrados de produção agrícola tem sido usado para avaliar a qualidade do solo e o potencial da sustentabilidade agrícola em diversas regiões do Brasil, incluído a região do semiárido brasileiro, que predominado pelo sistemas agrícolas convencionais de manejo (agricultura de sequeiro e pastagem), resultando no declínio de COS. Além disso, cerca de 34% dessa área é conduzida sob o uso de sistemas agrícolas, principalmente por pequenos agricultores, que adotam o desmatamento da vegetação nativa para produção de culturas de subsistência, períodos de pousio inadequados e preparo convencional do solo, ou seja, um conjunto de fatores que tem causado a degradação ambiental em algumas região do semiárido brasileiro (Medeiros *et al.*, 2023). Soma-se a isto, as condições climáticas adversas a produção agrícola, tais como elevadas temperaturas ($>25^{\circ}\text{C}$), chuvas sazonais, escassas e distribuídas irregularmente, radiação solar incidente e a elevada evapotranspiração (Araújo *et al.*, 2024; Pereira *et al.*, 2023). Diante desses fatores climáticos, estabilizar o COS em regiões semiáridas e áridas, é um desafio, visto que o armazenamento de COS é frequentemente limitado pela menor produtividade primária e pelo aumento da respiração do solo (Acharya *et al.*, 2024). No entanto, aumentar o sequestro de COS nesta região do semiárido é fundamental para sustentar a produtividade e, ao mesmo tempo, mitigar as mudanças climáticas.

Estudos em áreas degradadas (solos, pastagem e áreas desmatadas) têm demonstrado que a adoção dos sistemas integrados de produção agrícola pode promover diversos benefícios para o solo, tais como o acúmulo do COS, agregação do solo e a ciclagem de nutrientes (Matos *et al.*, 2025; Mori *et al.*, 2025; Pimentel *et al.*, 2024;

Oliveira *et al.*, 2024), sobretudo aqueles associados aos agregados do solo (Pimentel *et al.*, 2024; Tomaz *et al.*, 2024; Monroe *et al.*, 2021; Nascimento *et al.*, 2021). Estudo realizado por Sales *et al.* (2025), na região do semiárido brasileiro tem apresentado que os sistemas agroflorestais com cultivo de monocultura, sistema agroflorestal com diferentes cultivos e a área com floresta nativa usada como referência, tem apresentados resultados favoráveis ao acúmulo de COS associados aos agregados do solo, especificamente nos macroagregados.

Portanto, a hipótese deste estudo é que a adoção de diferentes sistemas integrados, especificamente a integração pecuário-floresta (IPF), pode aumentar o estoque de carbono nos agregados do solo na região semiárida brasileira. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da adoção de sistemas de integração pecuária-floresta (IPF) com diferentes culturas e espaçamentos sobre o estoque de carbono orgânico do solo nas diferentes classes de agregados do solo em um Cambissolo no semiárido brasileiro.

2. Materiais e métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE) do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), situado no município de Limoeiro do Norte, Ceará. O município está localizado na região do semiárido brasileiro, situado nas coordenadas geográficas de 5°10'53.0"S e 38°00'43.0"W, com altitude 146 m, possui relevo plano. A região possui clima classificado como BSw'h (seco, semiárido, quente) segundo classificado de Koppen (Koppen *et al.*, 2006), com estações chuvosa de janeiro a julho e seca de agosto a novembro, apresentando temperatura média anual de 29 °C e precipitação anual de 719 mm (Santos Neto *et al.*, 2023).

O solo da área do estudo sob uso agrícola foi classificado como um Cambissolo, conforme a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (IUSS-WRB, 2015). Os Cambissolos são unidades pedológicas em início de formação, constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente, normalmente com elevados teores de silte, sobretudo em profundidade. São solos com pouco desenvolvimento estrutural, as características destes solos variam de um local para outro e do ambiente de formação (Cunha *et al.*, 2021).

2.2 Descrição do manejo dos sistemas do uso da terra

Em 2015 no período seco, a área de vegetação nativa foi desmatada, utilizando trator com lâmina frontal, suprimindo 100% da vegetação presente na área cultivável (sub-bosque). A ação deixou apenas as faixas de árvores nativas de seis metros de largura. Todo o material residual da vegetação desmatada foi direcionado para as bordas das árvores. Antes do desmatamento, a área era composta por uma Caatinga arbórea em estágio de sucessão secundária (Santos Neto *et al.*, 2023). A adubação fosfatada na área desmatada destinada aos cultivos foi realizada anualmente, utilizando o fertilizante monofosfato de amônio (MAP) (44% de P_2O_5 e 10% N), na dose de $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, conforme a redução dos níveis de fósforo verificados por meio de análise química de solo. O controle de plantas daninhas foi realizado por meios mecânico e químico.

A área do estudo foi dividida em três tipos de sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF), onde as faixas remanescentes de vegetação nativa (Caatinga) (FxVN) foram espaçadas em 7 (E7) e 28 (E28) metros (m) de distância, com dimensões $6.0 \times 100 \text{ m}$ (Figura 1). Em 2016, nos espaços entre as FxVN foram implantados quatro tipos de sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF) com as seguintes espécies: (i) Capim buffel (*Pennisetum ciliare*) – IPFCb; (ii) Capim massai (*Megathyrsus maximum*) – IPFCm; (iii) Sorgo (*Sorghum bicolor L*) – IPFSO; e (vi) Palma forrageira (*Opuntia stricta*) – IPFPo (Figura 1). Os plantios com os componentes de pastagens, as gramíneas, corresponderam ao sistema pecuário não pastejado.

O sorgo foi plantado e colhido anualmente sob práticas de manejo convencional. Enquanto, os capins buffel e massai eram mantidos em crescimento livre durante a estação de chuvosa e ao final da estação seca, eram realizadas roçagem mecânica de uniformização permanecendo com a altura média de 0,05m da superfície do solo, com o objetivo de padronizar as pastagens para o próximo período de crescimento da cultura. Todo o material residual das pastagens eram retirados da área e posteriormente destinado para alimentação animal. Já a palma forrageira, era cortada a cada dois anos.

Nessa conjuntura, os tratamentos analisados consistiram em sistemas IPF, totalizando 9 tratamentos (Figura 1), mais a área de vegetação nativa utilizada como referência (VN – área de Caatinga). Para os espaçamentos 7 e 28 m foram atribuídos densidades de 1418 (46,15%) e 524 (17,64%) árvores por hectare. Após o levantamento fitossociológico, identificou-se que a vegetação nativa possui as seguintes espécies

arbóreas: *Cordia goeldiana*, *Mimosa caesalpiniaefolia*, *Cenostigma pyramidale*, *Commiphora leptophloeos* e *Mimosa tenuiflora* (Santos Neto *et al.*, 2021).

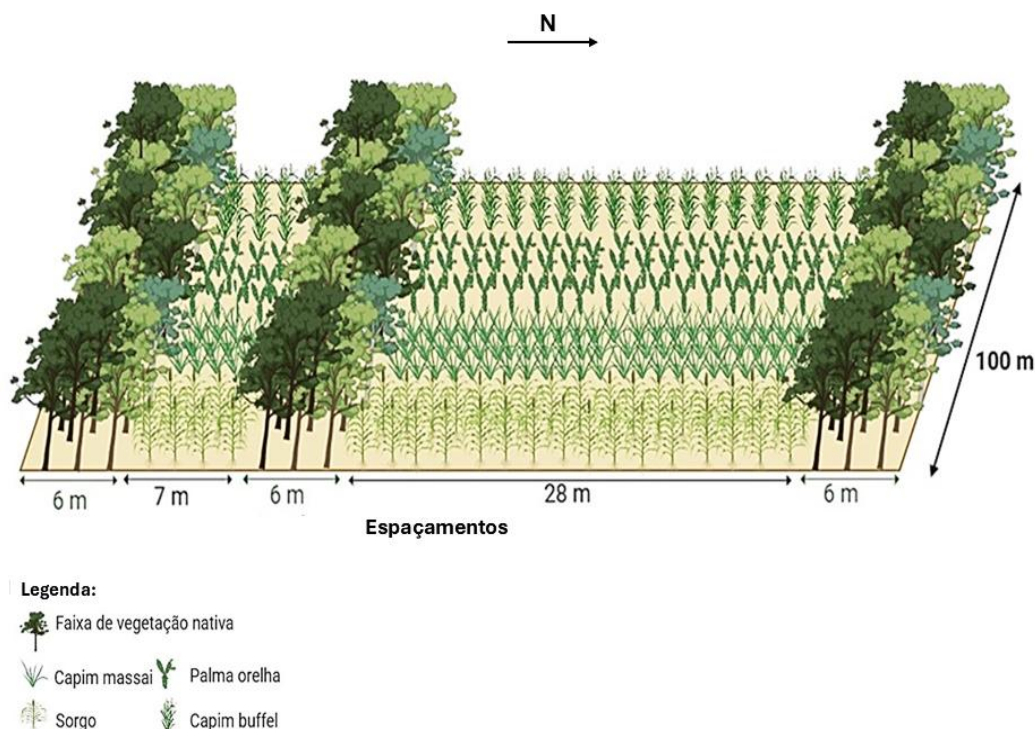


Figura 1. Representação esquemática da área do estudo com sistemas de IPF com os diferentes espaçamentos entre as faixas de árvores nativas (Caatinga).

2.3 Amostragem e análises de solo

A amostragem de solo foi realizada em janeiro de 2022, no período seco. As amostras deformadas foram coletadas em cinco trincheiras (repetições) abertas em cada área, e coletadas até 50 cm de profundidades, em quatro camadas de solo: 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm, o que resultou em um total de 280 amostras (4 profundidades x 5 repetições x 14 tratamentos). As amostras foram secas ao ar, peneiradas (>2 mm) e raízes e restos vegetais foram removidos.

2.4 Determinação dos agregados do solo estáveis em água

Os agregados estáveis em água foram obtidos por peneiramento úmido, conforme os procedimentos descritos por Teixeira *et al.* (2017). Para a análise, 50g de amostras de solo foram pesadas e umedecidas com borrifador de água. Em seguida, posicionadas na peneira superior e colocada em imersão em água, sendo submetidas a agitação vertical no aparelho de Yodder durante 15 minutos. O solo retido em cada peneira foi coletado e posteriormente seco em estufa a 60°C por 48 horas (Liu *et al.*, 2024; Teixeira *et al.*, 2017).

Por fim, os agregados foram, então, classificados em três classes considerando os seguintes diâmetros: macroagregados (diâmetro > 2,00 mm), mesoagregados (2,00 – 0,25 mm) e microagregados (0,25 – 0,053 mm), conforme procedimento descrito por Costa Júnior *et al.* (2012).

2.5 Determinação do C orgânico associado ao agregado

Para a determinação do teor de carbono (C) nas diferentes classes dos agregados do solo, foram pesados 50mg das subamostras provenientes da análise dos agregados as quais foram homogeneizadas, maceradas em almofariz de ágata e passadas em peneira de 0,25 mm. Os teores de carbono orgânico total (COT) das classes dos agregados foram determinados pelo método de combustão seca usando um analisador elementar (TOC-Shimadzu, acoplado ao módulo para amostras sólidas SSM-5000A Shimadzu).

Os estoques COS nas classes dos agregados foram calculados por meio do teor de carbono, densidade do solo e espessura da camada do solo, de acordo com a Equação 1:

$$\text{Estoque de C (Mgha}^{-1}\text{)} = \text{TOC (g Kg ha}^{-1}\text{)} * \text{Ds (g cm}^3\text{)} * \text{espessura da camada} \quad (1)$$

onde TOC, é o teor de carbono do solo da camada; Ds é a densidade do solo da camada

A avaliação do estoque de COS nas classes dos agregados foi realizada pela determinação de suas respectivas massas de solo, porcentagem de COS, massa proporcional dos agregados do solo e o estoque de COS, seguindo o método proposto por Ferreira *et al.* (2018), de acordo com as Equações 2, 3 e 4:

$$\text{Massa proporcional do agregados (\%)} = \frac{\text{Massa da classe (g)}}{\sum \text{massa das classes (g)}} * 100 \quad (2)$$

$$\text{Estoque associados aos agregados (Mgha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{COS (Mgha}^{-1}\text{)} * \text{COS (\%)} \text{ em cada classe}}{100} \quad (3)$$

O cálculo da proporção do carbono orgânico do solo nos agregados foi calculada seguindo a Equação 4:

$$\text{Proporcional do COS nos agregados (\%)} = \frac{\text{Estoque da classe (Mg ha}^{-1}\text{)} * 100}{\sum \text{estoque das classes (Mg ha}^{-1}\text{)}} \quad (4)$$

2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos aos pressupostos de normalidade (teste de Shapiro-Wilks) e homogeneidade (teste de Barlett), não aditividade (teste de Tukey) e independência dos resíduos para validar a ANOVA. Posteriormente, a ANOVA foi realizada em todas as variáveis, para avaliar os efeitos dos sistemas integrados (IPFCb, IPFCm, IPFPo e IPFSo) e dos diferentes espaçamentos de 7, 14 e 28 m entre as FxVN nas propriedades do solo, adotando fatorial com adição de testemunha. Quando significativo, os valores médios dos tratamentos foram comparados pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) para analisar os efeitos dos sistemas de IPF e dos espaçamentos. O teste de Dunnett ($p < 0,05$) foi utilizado para comparar os sistemas de IPF com a vegetação nativa (referência).

Na análise multivariada, utilizou-se a análise dos componentes principais, utilizando-se a rotação ortogonal (critério Varimax), com os dados padronizados ($\bar{X} = 0,0$ e $s = 1,0$). Nesta análise foram consideradas as variáveis que apresentaram valor da carga fatorial acima de 0,60 (Araújo *et al.*, 2013). Variáveis não associadas aos componentes principais (PCs) ($|r| < 0,60$) foram removidas do banco de dados e uma nova análise foi realizada. Foi realizada a análise de agrupamento hierárquico, utilizando-se o método UPGMA (Unweighted Pair-Group Method Using an Arithmetic Average), a partir da distância euclidiana média padronizada, utilizando-se o critério de Frey para estimar o número de grupos. Para testar a eficiência do método hierárquico, calculou-se o coeficiente de correlação cofenético (CCC), que varia de 0 a 1, em que, quanto maior o valor, maior é a eficiência, com menor perda de informação. Nesta análise, aplicou-se o teste de Mantel ($p < 0,05$). Todas as análises foram realizadas com o auxílio dos pacotes MultivariateAnalysis, versão 0.4.4 (Azevedo, 2021), FactoMineR, versão 2.8 (Le *et al.*, 2008) e Factoextra, versão 1.0.7 (Kontopoulou *et al.*, 2015) do software R (R Core Team, 2020).

3. Resultados

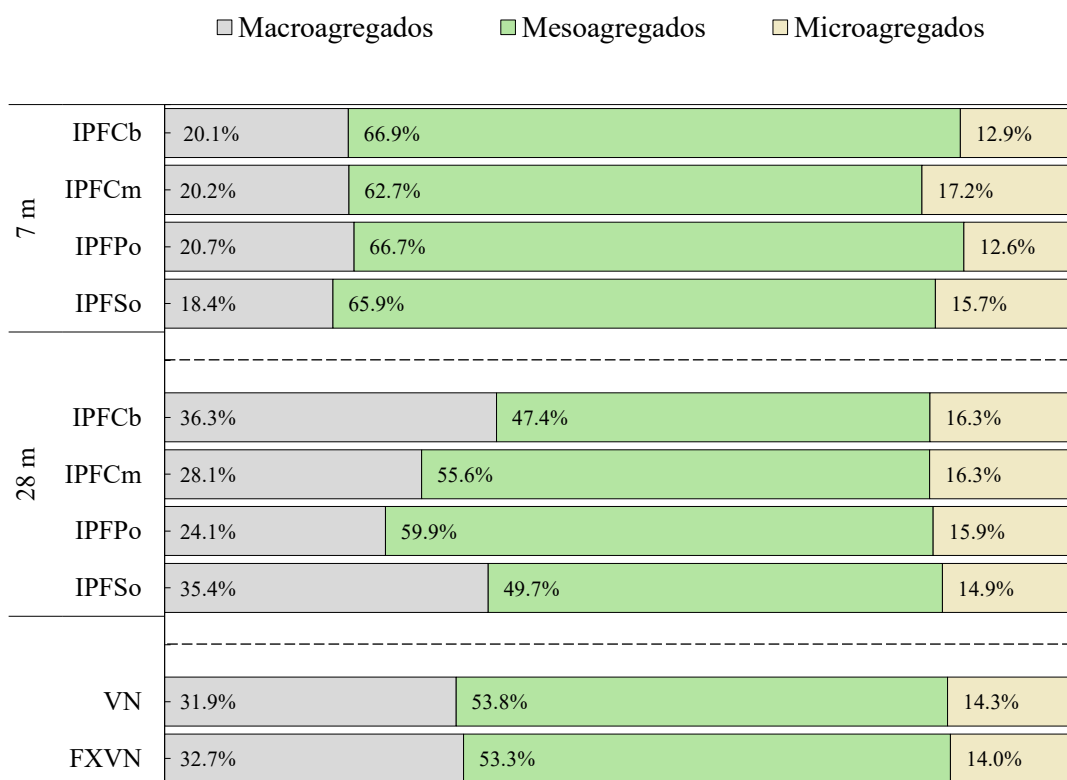
3.1 Distribuição dos agregados do solo

Os resultados mostraram poucas alterações quando comparados os sistemas de IPF (Cb, Cm, Po e So), os espaçamentos de E7 e E28, e as profundidades do solo, em relação à área da VN. Observou-se predominância dos mesoagregados, seguidos pelos

macroagregados, e por fim, dos microagregados, independentemente do tipo de uso da terra, das culturas adotadas nos sistemas de IPF e da camada do solo (Figura 2). No entanto, observa-se uma exceção no E28 na camada de 0-10 cm, onde os macroagregados prevaleceram nos tratamentos com IPFCb e IPFSO, com valores de 36,3% e 35,4%, respectivamente, em comparação com a área da VN que foi de 31,9%.

De modo geral, os mesoagregados mostraram-se predominantes em todos os sistemas de IPF no E7, apresentando variações entre 62,7 e 66,9%, com resultados superiores a área da VN, que foi de 53,8%. No que se refere ao E28, apenas os sistemas de IPFCm e IPFPo apresentaram uma maior formação de mesoagregados. Para os microagregados, não houve alterações significativas no E28.

Em relação a FxVN, o maior valor foi observado nos mesoagregados. Em geral, a FxVN mostrou comportamento semelhante ao observado quando comparada à VN, resultando nos macroagregados cerca de 32%, nos mesoagregados 53% e nos microagregados 14% (Figura 2).



Distribuição de agregados do solo (%)

Figura 2. Distribuição de agregados do solo em água (%) sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), os sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO)

nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7m – E7 e 28m – E28) na profundidade de 0-50 cm.

3.2 Teores de carbono orgânico do solo associado aos agregados

A diversificação das culturas na conversão da vegetação nativa (Caatinga) em sistemas integrados IPF induziu alterações no teor de carbono orgânico do solo (COT) nos agregados do solo. De modo geral, os teores de COT associados as diferentes classes de agregados do solo (macro, meso e microagregados) diminuíram com o aumento da profundidade do solo em todos os sistemas de IPF (Figura 3), embora, essas reduções não tenham sido significativas estatisticamente.

Nos sistemas de IPF, os teores de COT apresentaram valores inferiores quando comparados com a área da VN na camada de 0-10 cm. No E28, os sistemas de IPFCm e IPFSo apresentaram maiores teores de COT em comparação com a VN, especificamente na camada superficial do solo.

No E7, os teores de COT nos macroagregados, nos sistemas de IPF diferiram significativamente ($p < 0,05$) da VN, exceto pelos sistemas de IPFCb (0-10 e 10-20 cm) e IPFCm (10-20 cm), que apresentaram níveis semelhantes ao da VN. Já o sistema IPFPo, apresentou menor teor de COS nos mesoagregados em relação a VN e aos demais sistemas de IPF, os quais apresentaram diferença ($p < 0,05$). Enquanto na camada mais profunda (30-50 cm) nos E7 e E28, não ocorreram mudanças significativas ($p > 0,05$) (Figura 3).

Em relação a FxVN, os teores de COT nos macroagregados apresentaram redução em todas as camadas nos sistemas de IPF, os quais não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) em comparação com a VN, considerando os diferentes espaçamentos (E7 e E28) e as profundidades do solo. Em relação aos diferentes espaçamentos, o E7 foi o que apresentou as maiores perdas de teor de carbono associado aos agregados do solo nos sistemas de IPF. Embora na camada de 0-10 cm, houve aumento nos níveis de teores de COT.

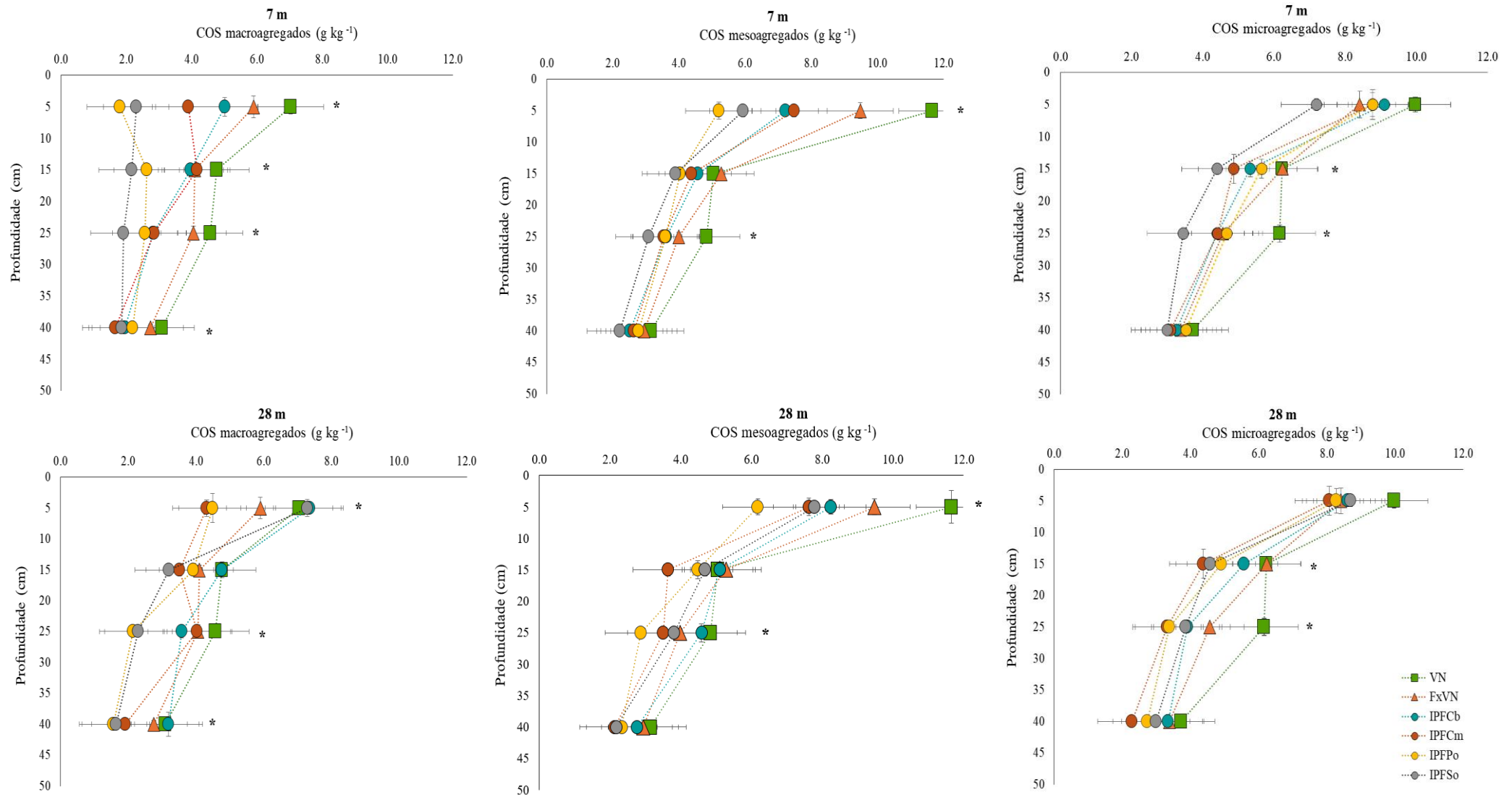


Figura 3. Teores de carbono (COT) (g kg⁻¹) nas frações de agregados do solo e nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxBVN) e nos sistemas de integração pecuária-floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxBVN da Caatinga (7m – E7 e 28m – E28). * - significativo a 1% pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$), compara os sistemas IPF com a área de referência (VN) na mesma camada de solo e pelo teste t ($p < 0,05$) compara a FxBVN com VN.

3.3 Estoques de carbono orgânico do solo (COS) associado aos agregados do solo

De forma geral, os maiores estoques de COS estão nos mesoagregados, seguidos pelos macroagregados, e por fim, os microagregados, independentemente do tipo de uso da terra, das culturas adotadas nos sistemas de IPF e da camada do solo (Figura 4). A exceção foram os sistemas IPFCb e IPFSo no E28 na camada de 0-10 cm, onde os estoques de COS foram maiores nos macroagregados, inclusive com valores superiores ao da área da VN. Além disso, foi possível observar um aumento nos estoques de COS nos macroagregados em relação a VN, em outras profundidades, por exemplo, no cultivo com IPFSo na camada 30-50 cm do solo (Figura 4).

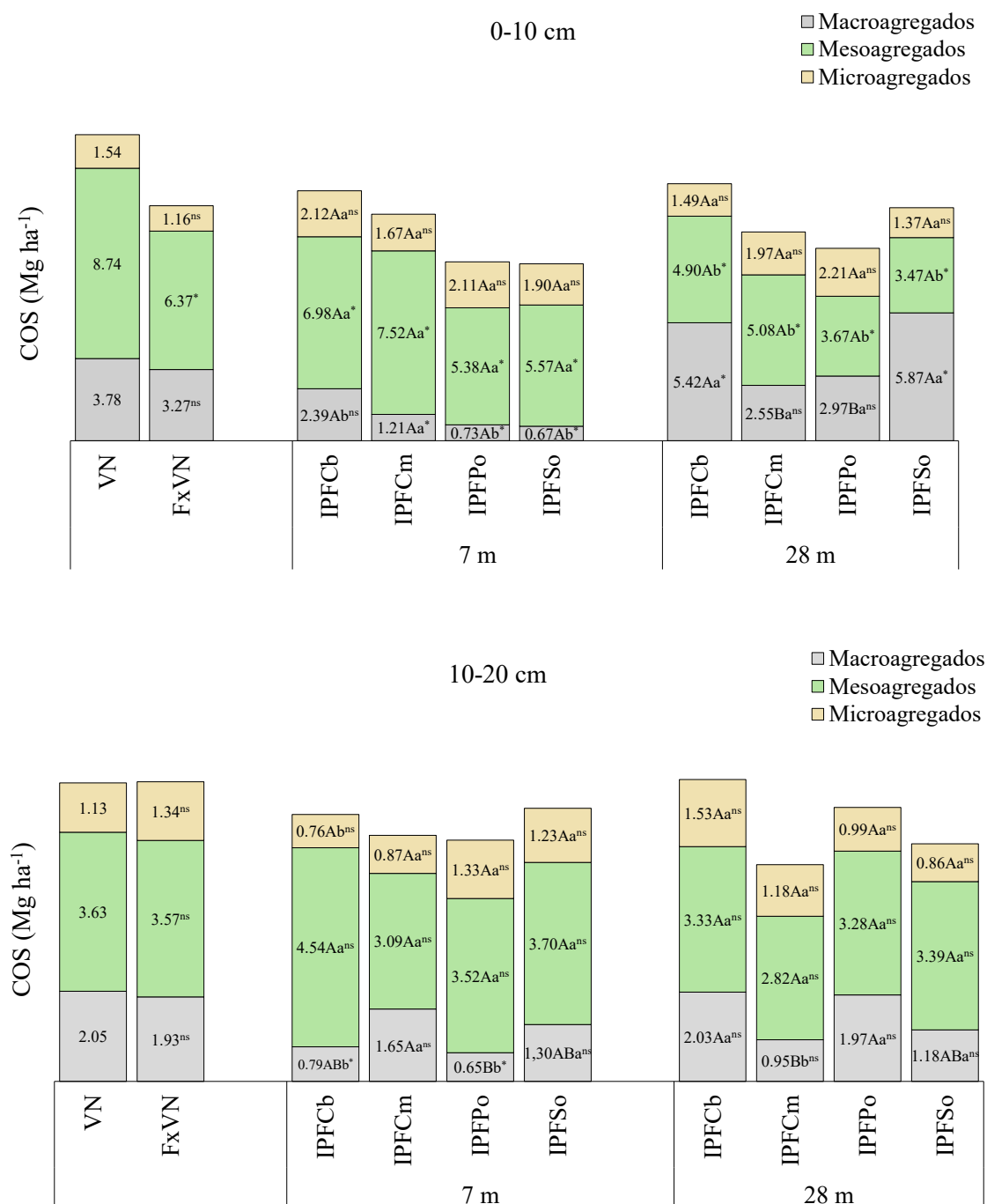
Para a camada de 0-10 cm, houve aumento dos macroagregados nos sistemas IPFCb e IPFSo no E28. Em geral, no E28 os macroagregados foram maiores do que no E7, ou seja, no E28, esses resultados sugeriram que houve uma recuperação dos macroagregados e um aumento dos COS. Em relação aos mesoagregados, os maiores estoques de COS foram nos sistemas de IPFCb e IPFCm no E7. Para os microagregados na mesma camada, observa-se que houve um maior aumento do COS no E7 em todos os sistemas IPF em relação a área da VN, já no E28 esse aumento foi observado apenas nos sistemas IPFCm e IPFPo, no qual foi superior ao estoque de COS da área VN. Para a FxVN, apresentou valor inferior ao da VN, cujo estoque foi de $1,16 \text{ Mg ha}^{-1}$, embora nos sistemas de IPF as diferenças não foram estatisticamente significativas ($p > 0,05$).

Na camada de 10-20 cm, os sistemas de IPFCb e IPFPo demonstraram maiores COS nos macroagregados no E28. Quanto a classe dos mesoagregados, o COS foi maior no sistema com IPFCb e IPFSo no E7 e E28. Nos microagregados, os sistemas de IPFCb e IPFCm no E28 propiciaram um aumento de 35 e 4,5%, respectivamente, nos estoques de COS quando comparados com a área da VN, enquanto no E7, os sistemas de IPFPo e IPFSo também apresentaram maiores estoques de COS de 18 e 9%, respectivamente, e não diferiram na respectiva camada.

Em relação à camada 20-30 cm, os sistemas com IPFCb e IPFCm no E28 apresentaram maiores COS nos macroagregados do que no E7. Enquanto os estoques COS nos mesoagregados, os sistemas com IPFPo e IPFSo apresentaram maiores estoques de COS no E7, com valores de $3,22$ e $3,31 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente, sendo superior ao da VN, os quais não diferiram estatisticamente dos níveis de estoque de COS da VN ($p > 0,05$). Quanto aos microagregados, o sistema de IPFCb apresentou um aumento do

estoque de COS no E28. Para a FxVN, houve uma perda de 29% do estoque de carbono em relação a área da VN.

Por fim, a camada de 30-50 cm, foi possível observa um acúmulo de COS nos macroagregados no sistema de IPFSO. Além disso, observa-se que o sistema de IPFCb perdeu menos carbono no E28 nas classes dos meso e nos microagregados. Para o sistema IPFCm, observa-se que houve um aumento nos microagregados no E7 em 25% em relação a VN. Para a FxVN, ocorreu uma perda de COS, que foi menor em 31% em relação a VN (Figura 4).



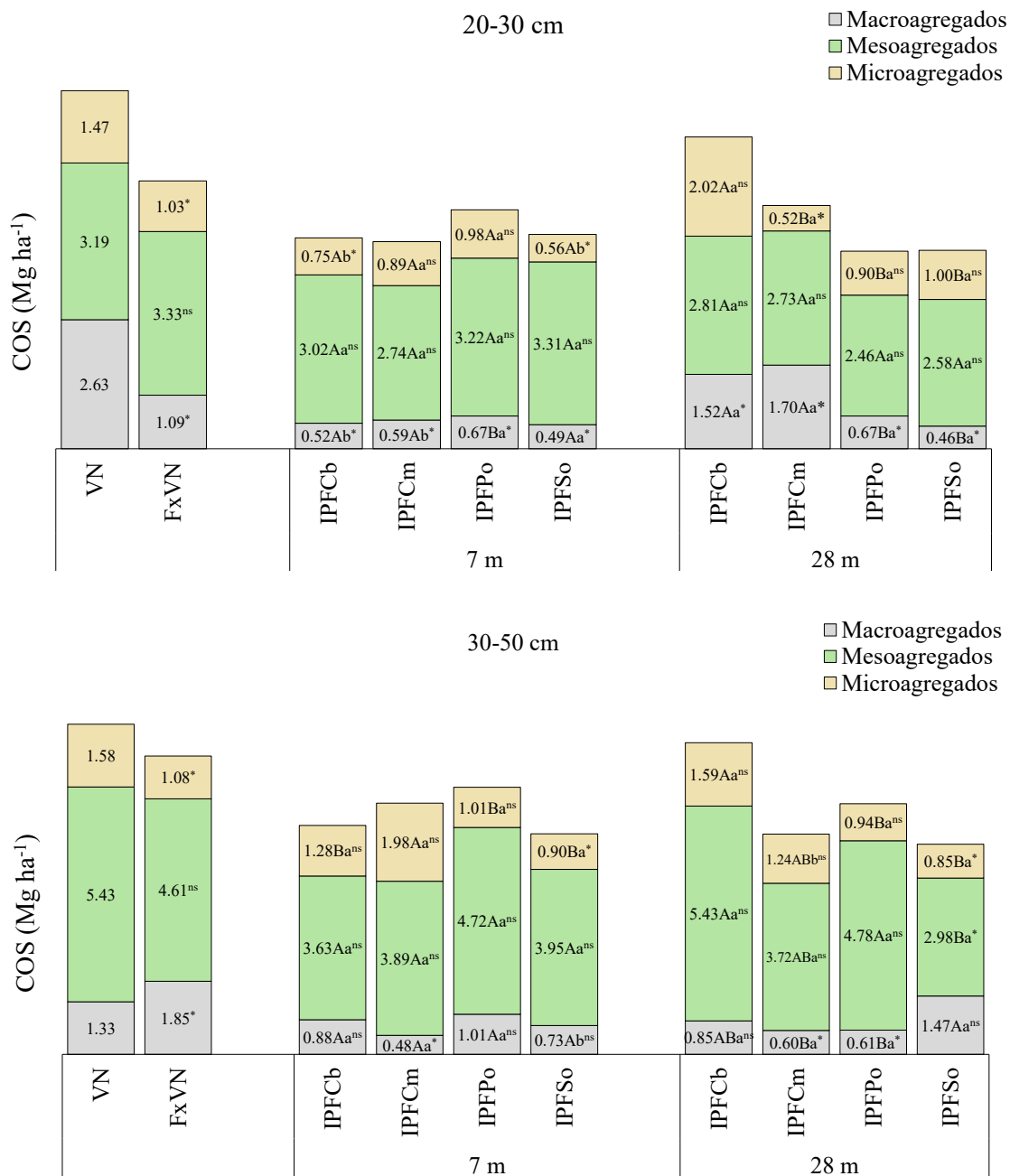


Figura 4. Estoque de carbono orgânico do solo (COS) (Mg ha^{-1}) associado aos agregados do solo nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN) e nos sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7m – E7 e 28m – E28). Letras maiúsculas indicam diferenças entre os sistemas de IPF em um mesmo espaçamento; minúsculas diferentes no mesmo sistema de IPF e na mesma camada do solo diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), compara os tratamentos IPFCb, IPFCm, IPFPo e IPFSO com a área de referência (VN). * - significativo a 1%; ns – não significativo a 5%, respectivamente pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

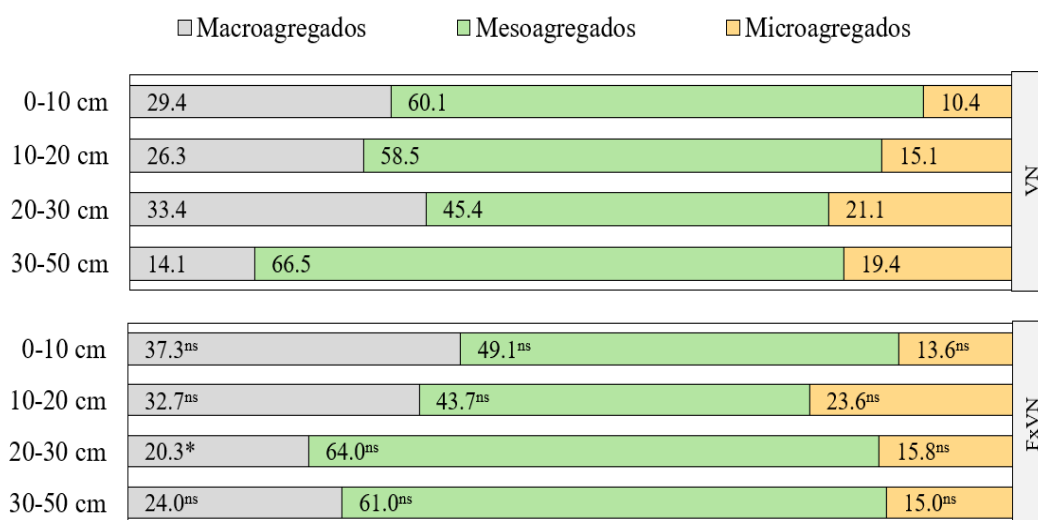
3.4 Proporção de carbono orgânico nos agregados do solo

Os maiores percentuais dos estoques de carbono foram observados nos macroagregados nos IPFs com Cb e So na camada de 0-10 e 10-20 cm no E28 (Figura 5). Enquanto os mesoagregados na VN respondem por 60,1% do COS, no E28, variando entre 32,4 e 55,5% (Figura 5). No E7, todos os sistemas de IPFs mostraram percentuais superiores ao da VN, variando entre 63,2 e 68,3% na camada superficial do solo.

Na camada de 10-20 cm, os sistemas com IPFCb, IPFPo e IPFSo no E7 responde por 73,9, 69,2 e 66,6% do COS nos mesoagregados, respectivamente. Enquanto nos microagregados, todos os sistemas de IPFs (Cb, Cm, Po e So), incluindo a FxVN, apresentaram maiores percentuais dos estoques de carbono, variando entre 15,9 e 24%, exceto o IPFCb no E7.

Observa-se que na camada 20-30 cm, para os macroagregados o maior percentual foi no sistema de IPFCm que foi de 31,3%, no E28. Quanto aos mesoagregados, a VN apresentou menor percentual do estoque de carbono que foi de 45,4%, em relação aos sistemas de IPFs e a FxVN que variaram entre 50,4 e 68,1%, nos E7 e E28.

Em relação à camada 30-50 cm, os sistemas de IPFCb, IPFCm mostraram percentuais semelhantes ao da área da VN que foi de 66% do estoque de carbono nos mesoagregados. Para os microagregados, o IPFCm apresentou maior percentual de estoque de carbono nos E7 e E28.



0-10 cm	46.3 Aa ^{ns}	41.6 Aa ^{ns}	12.1 Aa ^{ns}	IPFCb E28
10-20 cm	29.9 Aa ^{ns}	48.0 Ab ^{ns}	22.1 Aa ^{ns}	
20-30 cm	24.6 ABa ^{ns}	50.4 Aa ^{ns}	24.9 Aa ^{ns}	
30-50 cm	15.9 ABa ^{ns}	66.7 Aa ^{ns}	17.3 Aa ^{ns}	
0-10 cm	15.9 Ab ^{ns}	63.2 Aa ^{ns}	20.9 Aa ^{ns}	IPFCb E7
10-20 cm	13.2 Bb ^{ns}	73.9 Aa ^{ns}	12.9 Aa ^{ns}	
20-30 cm	17.6 Aa*	61.0 Aa ^{ns}	21.4 Aa ^{ns}	
30-50 cm	14.3 Aa ^{ns}	65.9 Aa ^{ns}	19.9 Aa ^{ns}	
0-10 cm	24.8 Ba ^{ns}	55.5 Aa ^{ns}	19.7 Aa ^{ns}	IPFCm E28
10-20 cm	18.5 Ab ^{ns}	57.5 Aa ^{ns}	24.0 Aa ^{ns}	
20-30 cm	31.3 Aa ^{ns}	57.5 Aa ^{ns}	11.1 Aa ^{ns}	
30-50 cm	10.8 Ba ^{ns}	66.3 Aa ^{ns}	22.9 Aa ^{ns}	
0-10 cm	10.3 Aa ^{ns}	64.8 Aa ^{ns}	24.9 Aa ^{ns}	IPFCm E7
10-20 cm	35.0 Aa ^{ns}	45.7 Ba ^{ns}	19.3 Aa ^{ns}	
20-30 cm	14.9 Ab*	68.1 Aa ^{ns}	17.0 Aa ^{ns}	
30-50 cm	5.3 Aa ^{ns}	62.3 Aa ^{ns}	32.5 Aa ^{ns}	
0-10 cm	25.4 Ba ^{ns}	47.9 Aa ^{ns}	26.8 Aa ^{ns}	IPFPo E28
10-20 cm	25.5 Aa ^{ns}	56.6 Aa ^{ns}	17.9 Aa ^{ns}	
20-30 cm	17.5 ABa*	63.0 Aa ^{ns}	19.5 Aa ^{ns}	
30-50 cm	10.2 Ba ^{ns}	74.9 Aa ^{ns}	14.9 Aa ^{ns}	
0-10 cm	14.2 Aa ^{ns}	66.1 Aa ^{ns}	19.8 Aa ^{ns}	IPFPo E7
10-20 cm	11.1 Ba ^{ns}	69.2 ABa ^{ns}	19.8 Aa ^{ns}	
20-30 cm	17.9 Aa*	65.0 Aa ^{ns}	17.1 Aa ^{ns}	
30-50 cm	21.3 Aa ^{ns}	60.3 Aa ^{ns}	18.5 Aa ^{ns}	
0-10 cm	54.5 Aa*	32.4 Aa ^{ns}	13.1 Aa ^{ns}	IPFSO E28
10-20 cm	24.5 Aa ^{ns}	59.6 Aa ^{ns}	15.9 Aa ^{ns}	
20-30 cm	14.4 Ba*	62.1 Aa ^{ns}	23.5 Aa ^{ns}	
30-50 cm	27.6 Aa ^{ns}	56.5 Aa ^{ns}	15.9 Aa ^{ns}	
0-10 cm	8.3 Ab ^{ns}	68.3 Aa ^{ns}	23.4 Aa ^{ns}	IPFSO E7
10-20 cm	16.1 ABa ^{ns}	66.6 ABa ^{ns}	17.2 Aa ^{ns}	
20-30 cm	15.6 Aa*	66.6 Aa ^{ns}	17.8 Aa ^{ns}	
30-50 cm	12.8 Ab ^{ns}	64.3 Aa ^{ns}	22.9 Aa ^{ns}	

Figura 5. Proporção (%) de contribuição de COS em cada fração dos agregados do solo nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), e nos sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7m -E7 e 28m - E28) nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm. Letras maiúsculas indicam diferenças entre os sistemas de IPF em um mesmo espaçamento; letras minúsculas diferentes no mesmo sistema de IPF e na mesma camada do solo diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), compara os tratamentos IPFCb, IPFCm, IPFPo e IPFSO com a área de referência (VN). * - significativo a 1 %; ns – não significativo a 5%, respectivamente pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

3.6 Abordagem multivariada

3.6.1 Análise de componentes principais

As relações entre os sistemas de uso da terra (IPF) com as variáveis dos agregados (macroagregados – Macro, mesoagregados – Meso e microagregados – Micro), teores e estoques de C nos agregados e o teor de argila que são demonstrados pela análise de componentes principais (ACP1 e 2), nos diferentes espaçamentos (E7 e E28) e nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm, onde a variabilidade total acumulada nos componentes principais foi de 80,65, 72,31, 71,19% e 79,64%, respectivamente (Figura 6).

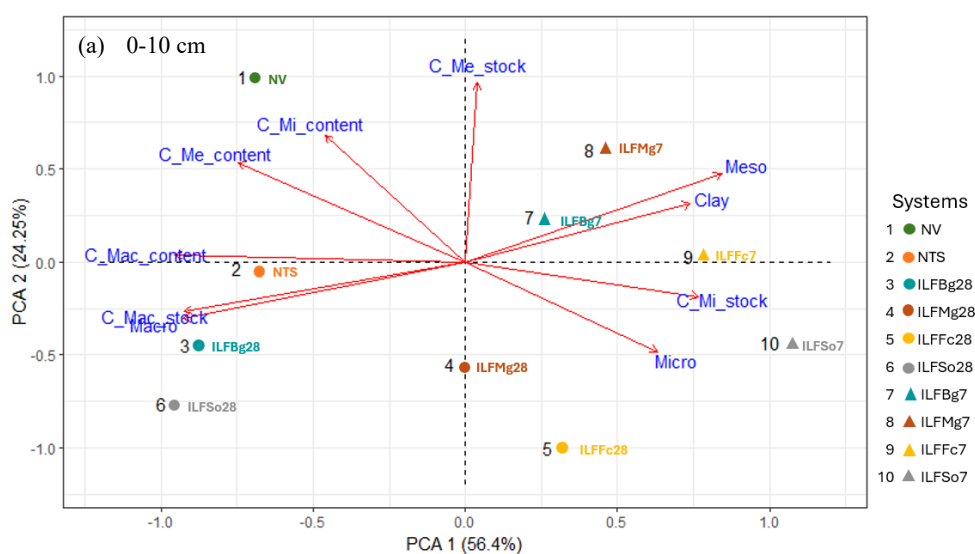
Na camada de 0-10 cm (Figura 6a), os atributos mais associados ao ACP1, que explica 56,4% da variação total dos dados foram: mesoagregados, estoque de carbono nos mesoagregados, microagregados, estoque de carbono nos microagregados, e argila. Os quais foram mais correlacionados com os escores dos sistemas IPFCb, IPFCm e IPFPo no E7. Destacou-se também o IPFSO no E7, com maior valor para o estoque de carbono nos microagregados. Por outro lado, os sistemas IPFCb no E28, IPFSO28 e FxVN apresentaram os menores valores para os macroagregados, teor e estoque de carbono nos macroagregados. O segundo componente (ACP2) explicou 24,25% da variabilidade total dos dados e foi mais influenciado pelos teores de carbono nos mesoagregados e microagregados (Figura 6a).

Na camada de 10-20 cm (Figura 6b), o ACP1 explicou 46,25% da variabilidade total dos dados, sendo mais correlacionados com os escores dos sistemas IPFCm, IPFSO e IPFPo no E28, e IPFCb, IPFPo e IPFSO no E7, sendo que as variáveis que mais contribuíram foram os mesoagregados, estoque de carbono nos mesoagregados e argila. Por outro lado, os escores que apresentaram menores valores foram as variáveis relacionadas com os estoques de carbono nos macroagregados e os teores de carbono no macro, meso e microagregados. No segundo componente de ACP2, que explicou 26,06%

da variabilidade total dos dados, onde as variáveis dos microagregados e os estoques de carbono nos microagregados, estão mais correlacionados com o sistema de IPFCb no E28, apresentando os maiores valores associados.

Para a camada de 20-30 cm (Figura 6c), os atributos mais associados a ACP1, que explicou 53,44% da variabilidade total dos dados, sendo mais correlacionados com os escores dos sistemas de IPFCm, IPFCb, IPFPo e IPFSO no E7, e IPFCm no E28, os quais estão relacionados aos maiores valores da variável do mesoagregados e argila. Para o ACP2, que explicou 17,75% da variação total dos dados, onde as variáveis do microagregados, estoque de carbono nos microagregados e o teor de carbono no mesoagregados apresentaram maiores valores associados, sendo mais correlacionados com o sistema de IPFCb no E28. Por outro lado, as variáveis do macroagregados, estoques de carbono nos macroagregados e mesoagregados, os teores de carbono nos macroagregados e nos microagregados apresentaram menores valores correlacionados com o sistema da VN.

Enquanto na camada 30-50 cm (Figura 7d), o ACP1 explicou 45,97% da variação total dos dados, onde os escores dos sistemas com IPFCm, IPFCb e IPFSO no E7 e IPFCm e IPFPo no E28 apresentaram os maiores valores correlacionados com a variável dos mesoagregados. O sistema de IPFSO28 não se relacionou com os demais sistemas de IPF. O segundo componente ACP2, onde os atributos mais associados, explicou 33,67% da variabilidade total dos dados, onde foram mais influenciada pelas variáveis dos macroagregados e os estoques de carbono associados aos macroagregados.



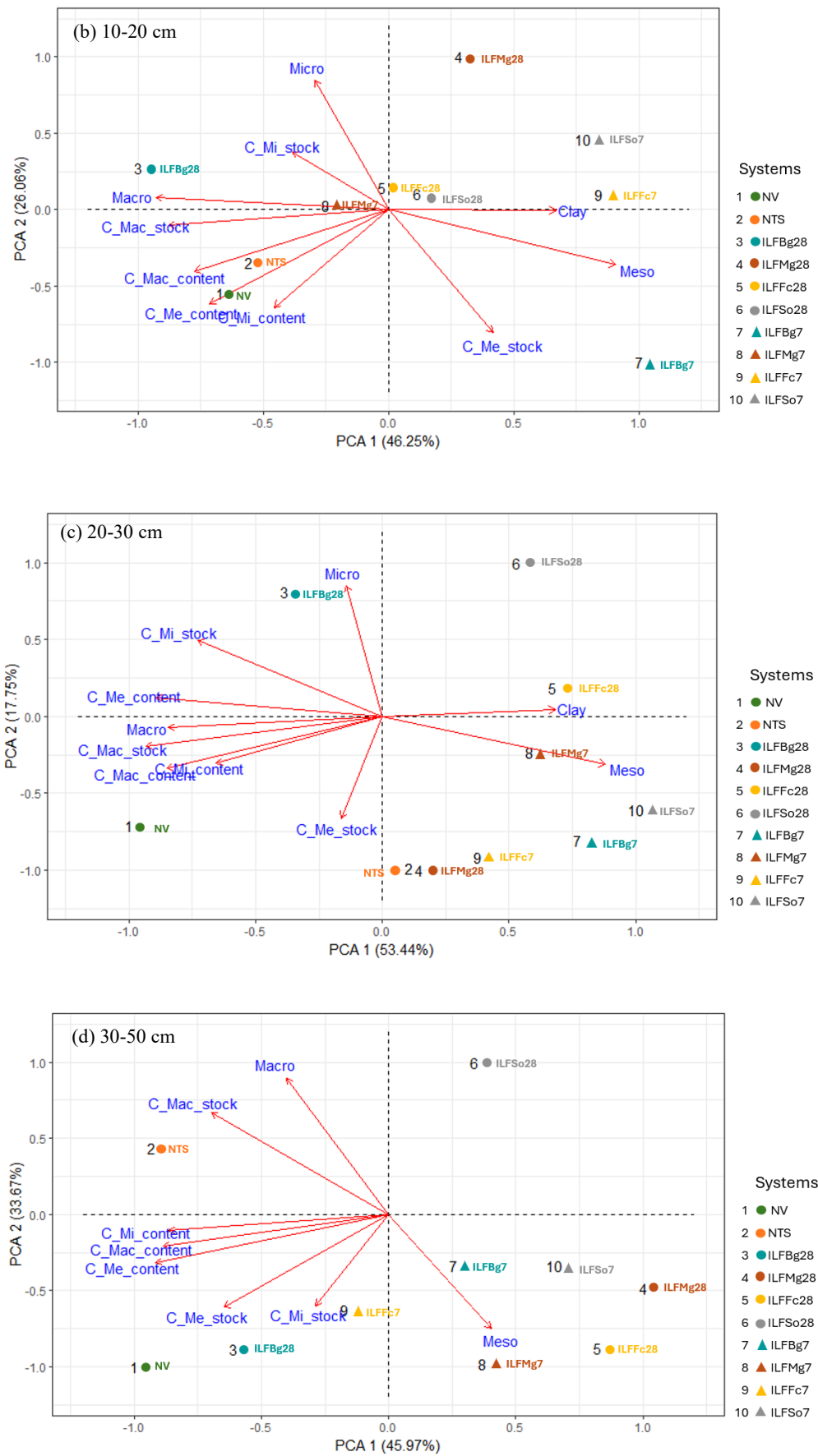


Figura 6. Biplot da análise de componentes principais (ACP 1 e 2) associados aos agregados do solo distribuídas nas camadas (a) 0-10 cm, (b) 10-20 cm, (c) 20-30 cm e (d) 30-50 cm sob os componentes arboréos: vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN) e nos sistemas de integração pecuária-floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos (7 e 28m) entre as FxVN da Caatinga com 06 anos de cultivo.

Nota:

C_Mac_stock – Estoque de carbono nos macroagregados; C_Me_stock – Estoque de carbono no mesoagregados; C_Mi_stock – Estoque de carbono nos microagregados; C_Mac_content – Teor de carbono nos macroagregados; C_Me_content – Teor de carbono nos mesoagregados; C_Mi_content – Teor de carbono nos microagregados; ILF – Integração Pecuária-Floresta (IPF); Bg – Capim buffel (IPFCb), Mg – Capim massai (IPFCm), Fc – Palma forrageira (IPFPo), So – Sorgo (IPFSO), NTS – Faixa de Vegetação Nativa (FxVN), NV – Vegetação Nativa (VN), e Clay – Argila.

3.6.2 Agrupamento hierárquico

Os sistemas de IPF foram agrupados de acordo com o grau de similaridade para todas as camadas (Figura 7). Na camada de 0-10 cm, o G1 foi formado apenas pelos sistemas IPFCm e IPFPo no E28. O G2 agrupou todos os sistemas de IPF no E7. A VN apresentou dissimilaridade em relação aos sistemas de IPF e mesmo a FxVN, formando individualmente o G3. O G4 foi formado pelos sistemas de IPFCb e IPFSO no E28 e da FxVN. Esses resultados no G4 correlacionam-se com os maiores estoque de carbono associado aos agregados do solo nos macroagregados na camada superficial.

Na camada 10-20 cm (Figura 7b), os sistemas de uso da terra foram agrupados em três grupos, sendo o G1 formado apenas pelo IPFCb no E7. O G2 é constituído pela VN, FxVN e IPFCb no E28, enquanto o G3 agrupou os demais sistemas de IPF. Na camada 20-30 cm (Figura 7c), assim como na camada de 0-10 cm, a VN mostrou-se diferentes dos demais usos, formando o G1. Da mesma forma, os sistemas IPFCb e IPFCm no E28, os quais formaram, respectivamente os grupos 2 e 3. O G4 sendo formado pelos demais usos.

Na camada 30-50 cm (Figura 7d), os sistemas de uso da terra foram agrupados em cinco grupos distintos, sendo o G1, G2 e G4 formados apenas por um único sistema de IPF, o IPFSO28, FxVN e IPFCm7, respectivamente. No G3, foram agrupados pelos sistemas de IPFCb no E28 e a VN.

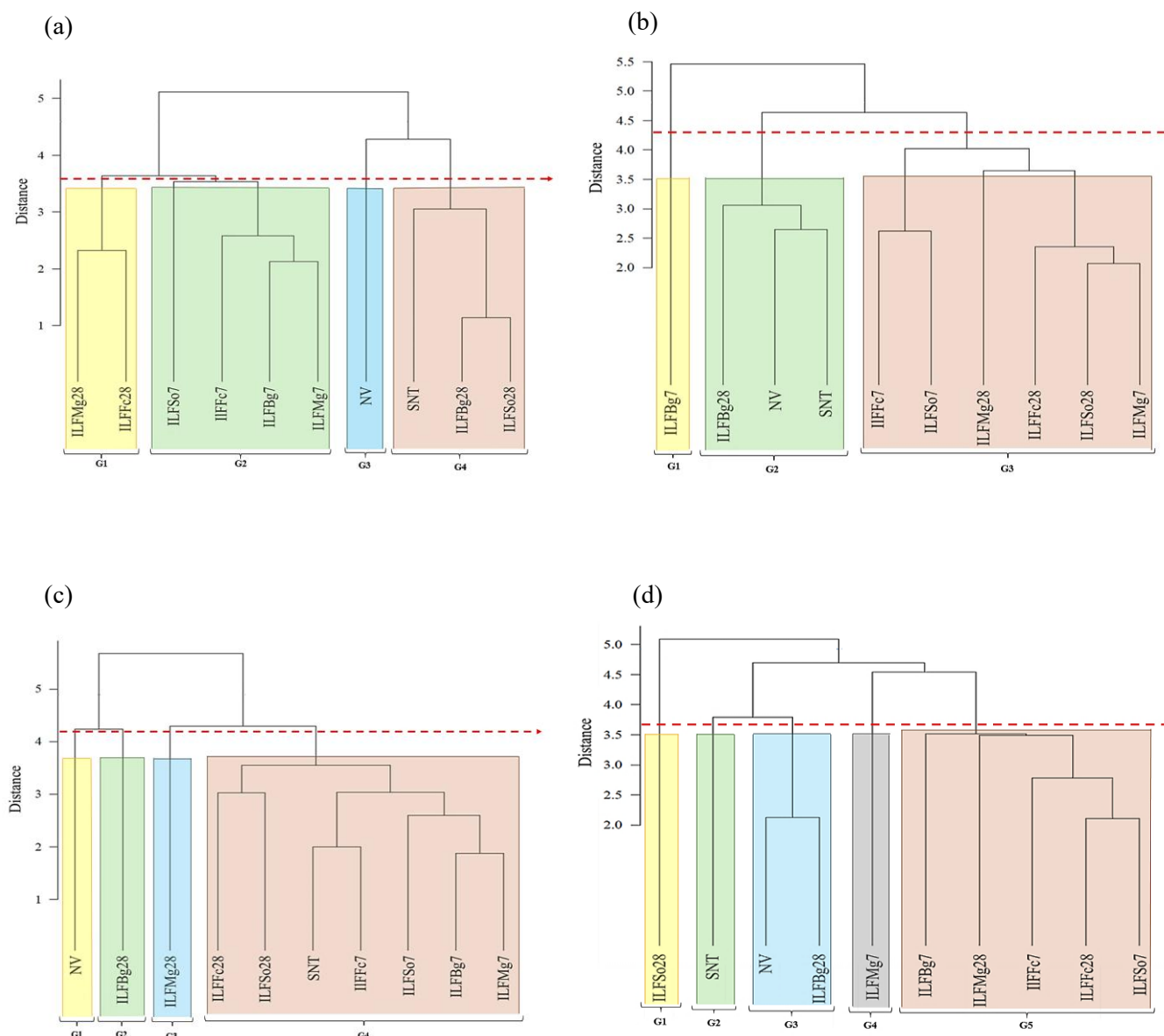


Figura 7. Dendrograma da análise hierárquica de agrupamentos para sistemas de IPF em diferentes espaçamentos (7 e 28m) entre a faixa de vegetação nativa nas camadas de 0-10 (a), 10-20 (b), 20-30 (c) e 30-50 (d) cm. A seta pontilhada indica os pontos de corte que resultaram na formação dos grupos. Variáveis: componentes arbóreos: vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN) e nos sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) com 06 anos de cultivo.

Nota: ILF – Integração Pecuária-Floresta (IPF), Bg – Capim buffel (IPFCb), Mg – Capim massai (IPFCm), Fc – Palma forrageira (IPFPo), So – Sorgo (IPFSO), NTS – Faixa de Vegetação Nativa (FxVN), NV – Vegetação Nativa (VN).

4. Discussão

A conversão da vegetação nativa para outros tipos de usos da terra geralmente exerce uma influência significativa na agregação do solo, bem como no carbono orgânico do solo (COS) (Jiang *et al.*, 2023). De acordo com os trabalhos de Jiang *et al.* (2023) e Yu *et al.* (2022), as mudanças no uso da terra têm demonstrado efeitos significativos substanciais, tanto positivos quanto negativos, na estabilidade dos agregados do solo e no incremento do COS associado aos agregados. No presente estudo, evidenciou-se relevantes constatações que contribuem com estes entendimentos. Os sistemas de IPF avaliados, impactaram mais os teores e estoques de carbono nas classes de agregados do que a distribuição dos agregados em si. Nas classes de agregados observou-se que, em geral, houve redução dos macroagregados, os quais foram transformados em mesoagregados (classe predominante). As exceções foram os sistemas com capim buffel e sorgo, com aumento dos macroagregados, especificamente nos IPF com E28, comparando com a VN.

Em relação aos teores de C nos agregados, os resultados indicaram que houve redução dos teores COT com o aumento da profundidade do solo para todas as profundidades. Comparando os espaçamentos, observou-se que nos macroagregados e, os teores de COT são maiores na camada superficial (0-10 cm), de modo geral, no E28. Isso pode ser atribuído ao maior aporte de matéria orgânica por meio dos resíduos vegetais (acima do solo) e da biomassa das raízes, parcialmente decompostas no solo (abaixo do solo) (Pan *et al.*, 2021), contribuindo para o aumento da atividade dos organismos do solo (Locatelli *et al.*, 2025) que, por sua vez, pode ter contribuído para a formação e estabilização dos agregados do solo, e consequentemente no aumento do COS nas frações dos agregados (Shin *et al.*, 2023; Jin *et al.*, 2021).

A diversificação de culturas adotadas nos sistemas de integração influenciou de forma diferentes na decomposição dos resíduos vegetais no solo e no armazenamento do carbono pelas plantas (Locatelli *et al.*, 2025; Dai *et al.*, 2024). Nesse estudo, de modo geral, os sistemas de IPF com capim buffel, capim massai, palma forrageira e o sorgo responderam de formas diferentes a distribuição dos agregados do solo e aos teores de COS quando comparados com a VN. Nos sistemas de IPF com capins buffel e massai apresentaram maiores níveis de teores de COS nos diferentes espaçamentos com E7 e E28.

Quanto aos estoques de COS, os principais resultados deste estudo mostraram que houve declínio dos estoques de COS nos macroagregados, resultando na redistribuição do COS levando ao aumento nos mesoagregados e nos microagregados nos sistemas de IPF adotados. Segundo Ye *et al.* (2020), este resultado pode estar associado às culturas e ao manejo do solo, que pode induzir a perda do COS em macroagregados, ocasionando a quebra dos agregados e expondo a matéria orgânica e, conseqüentemente acarreta no aumento dos mesoagregados e dos microagregados do solo, provocando a liberação do estoque de COS intermicroagregados ocluso nos macroagregados, considerando os macroagregados mais sensíveis às práticas de manejo, induzindo a ruptura dos maiores agregados, resultando na transferência do COS dos agregados maiores para os mesoagregados. Cabe destacar que o pouco aumento dos microagregados é um indicativo que o impacto no período dos seis anos dos sistemas de IPF ficou restrito aos macroagregados.

No caso do sistema integrado com sorgo, os resultados para os macroagregados no E28 (camada 0-10 cm), foram superiores a VN, são ainda mais surpreendentes, devido a elevada produção de biomassa seca do sorgo e o seu sistema radicular, indicando que, mesmo sob sistema convencional é possível mitigar a degradação de macroagregados, desde que ocorra deposição de serrapilheira de qualidade para manutenção da MOS e conseqüentemente COS.

Fazendo uma relação com o estudo de Lavelle *et al.* (2020b), como consequência, sob a palma forrageira, a entrada de C é principalmente a partir das raízes. No entanto, a superficialidade do sistema radicular da palma forrageira, com distribuição horizontal no solo (Coelho *et al.*, 2023), resulta em menores contribuições para o C do solo em profundidade. Estas informações foram corroborada com os resultados obtidos nesse estudo referente a cultura da palma forrageira, que em algumas situações, houve aumento na distribuição dos agregados do solo, mas não resultou no armazenamento do COS.

Os estoques de COS associados aos agregados tendem a diminuir com o aumento da profundidade nos diferentes espaçamentos com E7 e E28, variando conforme os tipos de cultivo nos sistemas de IPF. Os resultados dos estoques de COS obtidos no presente estudo se assemelham com os estudos realizados por Wei *et al.* (2013), os quais relataram que em terras florestais convertidas por mudanças de uso da terra tende a diminuir os estoques de COS associado aos macroagregados, principalmente nas camadas superficiais do solo. Para os pesquisadores Jiang *et al.* (2023) e Macedo *et al.* (2024), as mudanças

no uso da terra resultam em perdas significativas do COS em macroagregados, e consequentemente ocasionam um aumento nos meso e nos microagregados do solo.

Para as culturas nos sistemas de IPF (Cb, Cm, Po e So), a palma forrageira e o capim massai apresentaram reduções nos estoques de COS associado aos macroagregados no E28, para a palma forrageira o sistema radicular contribui para a menor formação de agregados e estoque de carbono, apresentando um sistema radicular fasciculado, não possuem raízes profundas, mas formam uma rede de raízes finas e superficiais, geralmente alcançando os 30 cm de profundidade do perfil do solo.

Para o E7, todas as culturas apresentaram reduções nos estoques de COS associado aos macroagregados, indicando um aumento de COS nos mesoagregados. Em relação aos efeitos dos espaçamentos nos sistemas de IPF, os capins buffel e massai e o sorgo aumentaram os estoques de COS associado aos agregados do solo. Com base em resultados de estudos realizados na mesma área por Santos Neto *et al.* (2023), a produção média anual de biomassa de forragem total (massa seca) dos capins massai e buffel no E28 foi superior ($\approx 3.900 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em comparação ao E7 ($\approx 2700 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Esse maior aporte de biomassa pode contribuir para a formação dos macroagregados, especialmente na camada superficial do solo, refletindo em maiores estoques de COS associados aos macroagregados.

Embora não existam dados específicos sobre a produção de biomassa do sistema radicular para a área do estudo. No entanto, Patidar *et al.* (2023) relataram que os capins buffel e massai podem produzir cerca de $10,55 \text{ g planta}^{-1}$ e $23,07 \text{ g planta}^{-1}$ de raízes secas por ano, respectivamente. Para o sorgo, a produção média de biomassa radicular raiz é de aproximadamente $11,62 \text{ g planta}^{-1}$, conforme Ngidi *et al.* (2024). Quanto a biomassa aérea em condições de semiárido brasileiro, estudos mostraram valores da produção de biomassa seca foi de $19,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ para o sorgo e $12,56 \text{ Mg ha}^{-1}$ para a palma forrageira (Pinheiro *et al.*, 2024; Alves *et al.*, 2024). Para os capins buffel e massai, as produtividades foram de $14,85$ e $8,7 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente (Oliveira *et al.*, 2019).

Para os resultados com a cultura da palma forrageira, Santos Neto *et al.* (2023) na mesma área de estudo, relataram que a palma forrageira apresentou maior quantidade de biomassa seca de forragem total no E28 com aproximadamente $9.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, em comparação com o E7 com aproximadamente $7.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Além disso, a palma forrageira apresentou um tamanho no sistema radicular apenas 30 cm (Maranhão, 2022), o que pode ser atribuído a menor formação dos agregados, e consequentemente a redução dos estoques de COS nas classes dos agregados do solo. Considerando que a cultura

possui superficialidade do sistema radicular, com distribuição horizontal no solo. Considerar também que, após o corte dos cladódios, há redução do sistema radicular, ou seja, o sistema radicular se apresentará com mais frequência na camada superficial do solo. Por outro lado, espécies arbustivas/arbóreas poderão alcançar espaços mais profundos.

Por outro lado, o capim buffel apresentou um comprimento de 100 cm da raiz, e o capim massai foi de 40 cm do comprimento da radicular ao longo do perfil, no qual contribuiu para a maior formação e nos estoques de COS nas classes dos agregados do solo (Maranhão, 2022). Nesta condição, Locatelli *et al.* (2025) relataram que, apesar da estreita relação entre a formação dos agregados e o sequestro de carbono, ambos os processos nem sempre acontecem juntos, sendo fortemente afetados por processos e perturbações externas.

Quanto a FxVN, apresentou redução dos estoques de COS associados aos agregados em relação a área da VN. As camadas superficiais apresentaram maiores reduções de COS nos macroagregados e nos mesoagregados. Para as camadas de 10-20 cm os COS nos microagregados mostraram resultados superiores quando comparados com a vegetação nativa.

Em relação aos diferentes espaçamentos dentro da mesma cultura, foi possível identificar qual espaçamento resultou no maior estoque de COS associado aos agregados nas diferentes camadas do solo. Para os macroagregados, o E28 apresentou maior estoque de COS, em todos os sistemas de ILF (Cb, Cm, Po e So). Nos mesoagregados, o E7 obteve destaque no acúmulo de COS, enquanto nos microagregados, os resultados variaram entre os espaçamentos de E7 e E28.

Para a cultura da palma forrageira, mostrou maiores perdas nos estoques de COS nas classes dos agregados do solo na camada superficial, tanto para os E7 e E28. Provavelmente, a baixa deposição de resíduos orgânicos vegetais e acúmulo de serrapilheira têm deixado o solo mais exposto, com isso resultando em um aumento da temperatura, o que acelerou o processo da decomposição da MOS, resultando na perda de COS. Além disso, o sombreamento causado pela FxVN no E7 pode ter contribuído para um baixo desenvolvimento da cultura.

Portanto, a escolha das espécies para compor os sistemas integrados no semiárido brasileiro deve levar em consideração as características das culturas que, entre outros benefícios, também possam influenciar a formação e estabilização dos agregados do solo. Nesse sentido, deve-se levar em consideração a quantidade e qualidade do resíduo vegetal

depositado no solo (above e belowground), o tipo de sistema radicular e deposição de exsudados (Batista *et al.*, 2024), capacidade de acessar a água disponível no solo (Ferraz *et al.*, 2017), e sua capacidade de adaptação ao ambiente semiárido.

Os resultados dessa pesquisa corroboram com outros estudos que estão sendo desenvolvidos com sistemas integrados no semiárido brasileiro, os quais têm demonstrado resultados promissores na implementação de uma agricultura mais sustentável, buscando soluções baseadas na natureza. Um estudo realizado por Macedo *et al.* (2023) na região do semiárido brasileiro adotando a conversão de pastagens em um sistema agroflorestal, relatou que os teores de COS foram superiores nos macroagregados quando comparado com a área de floresta nativa.

5. Conclusão

Os efeitos da conversão da vegetação nativa em sistemas de IPF ocasiona alterações na distribuição dos agregados do solo e nos estoques carbono orgânico do solo associados aos agregados, nos espaçamentos de 7 e 28m e na profundidade ao longo do perfil do solo. A distribuição dos agregados do solo e dos estoques de COS mostrou predomínio dos mesoagregados, que foram os principais contribuintes para os estoques de COS associados aos agregados do solo ao longo de seis anos.

Os teores de carbono nos macroagregados apresentaram menor redução no espaçamento de 28m, enquanto os meso e microagregados apresentaram maiores níveis de carbono orgânico do solo.

Em relação aos estoques de carbono nos sistemas de IPF, o capim buffel, capim massai e o sorgo apresentam maiores acúmulos de COS nos macroagregados no espaçamento de 28m. Nos mesoagregados, todos os sistemas de IPF foram inferiores à VN. O sistema com palma forrageira apresenta as menores reduções de carbono associadas aos agregados do solo. Nos microagregados, o sistema de IPF com capim buffel resultou em maiores estoques de COS. Para o sistema com a faixa de vegetação nativa, não ocorreu diferenças quando comparada com a vegetação nativa.

De forma geral, o espaçamento com 28m apresentou melhores resultados quando comparado com área da vegetação nativa. No entanto, é preciso considerar que, em diversas situações, o espaçamento de 7m não diferiu estatisticamente do espaçamento de 28m. Com isso, é relevante destacar a contribuição desses sistemas de ILF para armazenar estoque de carbono orgânico do solo, o que poderá intensificar ao longo do tempo, uma

vez que os resultados apresentados nessa pesquisa responderam de forma positiva no período de seis anos.

REFERÊNCIAS

- ACHARYA, P.; GHIMIRE, R.; IDOWU, O.; SHUKLA. Cover cropping enhanced soil aggregation and associated carbon and nitrogen storage in semi-arid silage cropping systems. **Catena**, v.245, 108264, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108264>
- ARAÚJO, A.O.; MENDONÇA, L.A.R.; LIMA, M.G.S.; FEITOSA, J.V.; SILVA, F.J.A.; NESS, R.L.L.; FRISCHKORN, H.; SIMPLÍCIO, A.A.F.; KERNTOPF, M.R. Modificações nas propriedades dos solos de uma área de manejo florestal na Chapada do Araripe. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.37, p.754–762, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300022>
- ARAÚJO, A. S. F.; MEDEIROS, E.V.; COSTA, D. P. B.; PEREIRA, A. P.A.; MENDES, L. W. From desertification to restoration in the Brazilian semiarid region: Unveiling the potential of land restoration on soil microbial Properties. **Journal of Environmental Management**, v.351, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119746>
- AZEVEDO, A.M. MultivariateAnalysis: pacote para análise multivariada. R package version 0.4.4, 2021. <https://CRAN.R-project.org/package=MultivariateAnalysis>
- BATISTA, A. M.; PESSOA, T. N.; PUTTI, F. F.; ANDREOTE, F. D.; LIBARDI, P. L. Root Influences Rhizosphere Hydraulic Properties through Soil Organic Carbon and Microbial Activity. **Plants**, v.13, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13141981>
- BHATTACHARYYA, R.; RABBI, S. M. F.; ZHANG, Y.; YOUNG, I. M.; JONES, A. R.; DENNIS, P. G.; MENZIES, N. W.; KOPITKE, P. M.; DALAL, R. C. Soil organic carbon is significantly associated with the pore geometry, microbial diversity and enzyme activity of the macro-aggregates under different land uses. **Science of the Total Environment**, v.778, 146286, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146286>
- CARNEIRO, R. F. V. et al. Agregação e estabilidade de agregados em sistemas agroflorestais no Nordeste do Brasil. **Revista Caatinga**, v. 33, p. 949-960, 2020.
- CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; GUEDES FILHO, O.; ROMANOSKI, V. S.; RUTHES, B. E. S.; CALÁBRIA, Z. P.; DE OLIVEIRA, L. B. Conservative farming systems and their effects on soil organic carbon and structural quality. **Soil and Tillage Research**, v. 242, p. 106143, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.1061434>
- COSTA JÚNIOR, C.; PICCOLO, M.C.; SIQUEIRA NETO, M.; CAMARGO, P.B.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas na região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.4, p.1311-1321, 2012; <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000400025>

CUNHA, T. J. F.; SÁ, I. B.; PETRERE, V. G.; TAURA, T. A. **Cambissolos**. [S. l.], Embrapa. 8 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/biomacaatinga/solos/cambissolos>. Acesso em: 23 fev. 2025.

DAI, W.; FENG, G.; HUANG, Y.; TEWOLDE, H.; SHANKLE, M. W.; JENKINS, J. N. Soil aggregate stability and erosion resistance in response to integration of cover crops and poultry litter in a no-till rainfed soybean cropping system. **Soil and Tillage Research**, v.244, 106245, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106245>

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; TIVET, F.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P.; ROMANIW, J. Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till. **Science of the total Environment**, v.621, p.1559-1567, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.072>

HAN, S.; LUCAS-BORJA, M. E.; CHEN, W.; HUANG, Q. Soil glomalin-related protein affects aggregate N₂O fluxes by modulating denitrifier communities in a fertilized soil. **Science of The Total Environment**, v.880, 163147, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163147>

HASSAN, S.; INGLESE, P.; GRISTINA, L.; LIGUORI, G.; NOVARA, A.; LOUHAICHI, M.; SORTINO, G. Root growth and soil carbon turnover in *Opuntia ficus-indica* as affected by soil volume availability. **European Journal of Agronomy**, v.105, p.104-110, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.012>

HOK, L.; DE MORAES SÁ, J. C.; BOULAKIA, S.; REYES, M.; DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; TIVET, F. E.; LENG, V. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon based on diversity and high biomass-C input under conservation agriculture in a savanna ecosystem in Cambodia. **Catena**, v. 198, p. 105065, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105065>

IUSS- WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. **International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**, World Soil Resources Reports No. 106. Rome, 2015.

JIANG, W.; LI, Z.; XIE, H.; OUYANG, K.; YUAN, H.; DUAN, L. Land use change impacts on red slate soil aggregates and associated organic carbon in diverse soil layers in subtropical China. **Science of the Total Environment**, v. 856, p. 159194, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159194>

JIN, V. L.; WIENHOLD, B. J.; MIKHA, M. M.; SCHMER, M. R. Cropping system partially offsets tillage-related degradation of soil organic carbon and aggregate properties in a 30-yr rainfed agroecosystem. **Soil and Tillage Research**, 209, 104968. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104968>

KAN, Z. R.; MA, S. T.; LIU, Q. Y.; LIU, B. Y.; VIRK, A. L.; QI, J. Y.; ZHANG, H. L. Carbon sequestration and mineralization in soil aggregates under long-term conservation tillage in the North China Plain. **Catena**, v. 188, p. 104428, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104428>

KONTOPOULOU, C.K.; BILALIS, D.; PAPPA, V.A.; REES, R.M.; SAVVAS, D. Effects of organic farming practices and salinity on yield and greenhouse gas emissions from a common bean crop. **Scientia Horticulturae**, v.183, n.12, p.48–57, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.012>

LAVELLE, J. M.; SONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral – associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v.00, p.0-13, 2020a.

LAVELLE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; BEDANO, J. C.; BLANCHART, E.; GALINDO, V.; ZANGERLÉ, A. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta ecologica**, v.105, 103561, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103561>

LE, S., JOSSE, J., HUSSON, F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v.25, n.1, p.1-18, 2008. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>.

LI, J.; CHEN, P.; LI, Z.; LI, L.; ZHANG, R.; HU, W.; LIU, Y. Soil aggregate-associated organic carbon mineralization and its driving factors in rhizosphere soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.186, 109182, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109182>

LIU, S.; SIX, J.; ZHANG, H. X.; ZHANG, Z. B.; PENG, X. H. Integrated aggregate turnover and soil organic carbon sequestration using rare earth oxides and ¹³C isotope as dual tracers. **Geoderma**, v.430, 116313, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116313>

LIU, S.; HUANG, X. J.; GAN, L.; Z.B. ZHANG, Z.B.; DONG, Y.; PENG, X.H. Drying-wetting cycles affect soil structure by impacting soil aggregate transformations and soil organic carbon fractions, **Catena**, v.243, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108188>

LIU, L.; ZHU, Q.; WAN, Y.; YANG, R.; MOU, J.; LI, Y.; MENG, L.; ZHU, T.; ELRYS, A. Afforestation improves soil organic carbon and total nitrogen stocks mainly through increasing > 2mm aggregates fractions and stimulating carbon and nitrogen transformations within aggregates in subtropical karst region. **Catena**, v.243, 108220, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108220>

LOCATELLI, J. L.; SANTOS, R. S.; TENELLI, S.; SOARES, M. B.; DEL GROSSO, S.; STEWART, C. E.; CERRI, C. E. P. Soil carbon allocation, composition, and sequestration changes induced by cropping diversification in tropical systems. **Soil and Tillage Research**, v.248, 106464, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106464>

MACEDO, R. S.; MORO, L.; SANTOS SOUSA, C.; ALMEIDA, K. A. K.; CAMPOS, M. C. C.; DE BAKKER, A. P.; BEIRIGO, R. M. Agroforestry can improve soil fertility and aggregate-associated carbon in highland soils in the Brazilian northeast. **Agroforestry Systems**, v.98, n.5, 1167-1179, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00875-7>

MARANHÃO, S. R. **Modelagem de sistemas aplicados a produção de forragem e ao uso da água, nas condições atuais e sob mudanças climáticas, no semiárido brasileiro.** 2022.116f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Fortaleza, Ceará, 2022.

MATOS, P. S.; DE MOURA OLIVEIRA, J.; CARVALHO, M. T. D. M.; MADARI, B. E.; DA SILVEIRA, A. L. R.; DAMIAN, J. M.; MORAES, P. A. O.; ARAUJO, W. A.; SIQUEIRA M. M. B.; SILVA, R. R.; FERRARESI, T.M.; STONE, L. F.; SILVA, M. A.S.; FREITAS, F.M.C.; PACHECO, A. R.; YELUPIRARI, J.; ALMEIDA, P. L. O. Impact of land use intensification on key drivers of soil organic carbon pools in Brazil's Central-West. **Catena**, v.249, 108636, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108636>

MEDEIROS, A.; GONZAGA, G. B. M.; SILVA, T. S.; SOUZA BARRETO, B.; SANTOS, T. C.; DE MELO, P. L. A.; MAIA, S. M. F. Changes in soil organic carbon and soil aggregation due to deforestation for smallholder management in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma Regional**, v. 33, p. e00647, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00647>

MOJENA, R. 1977. Hierarchical grouping methods and stopping rules: an evaluation. **The Computer Journal**, v.20, n.4, p.359-363. DOI:
<https://doi.org/10.1093/comjnl/20.4.359>

MONROE, P. H. M.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; BARROS, W. T.; OLIVEIRA, F. G. R. B.; PEREIRA, M. G. Physical protection of soil organic carbon through aggregates in different land use systems in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v.186, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104427>

MORI, L. D.; SIMÕES, V. L. P.; CARGNELUTTI, C.S.; DUARTE, L. P.; LEAL, G. L.; DOBERSTEIN, A. P. S.; KUNRATH, T. R.; NUMES, P. A. A.; SOUZA, E. D.; BAYER, C.; CARVALHO, P.C. F. Grazing intensity for enhanced resource use efficiency in integrated crop-livestock systems: Balancing soil carbon storage and food security. **Journal of Environmental Management**, v.373, 123541, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123541>

NASCIMENTO, M. S.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; MONROE, P. H. M.; SCORIZA, R. N.; GOMES, V.S. Interaction between edaphic mesofauna and organic carbon within water-stable aggregates in forestry systems: A case study in northeastern Brazil. **Catena**, v.202, 105269, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105269>

OLIVEIRA, J. S.; EMERENCIANO NETO, J. V.; DIFANTE, G. S.; LISTA, F. N.; SANTOS, R. S.; BEZERRA, J. D. V.; BONFIM, B. R. S.; MILHOMENS, L. B. S.; RIBEIRO, J. S. M. Structural and productive features of *Panicum* cultivars submitted to different rest periods in the irrigated semiarid region of Brazil. **Bioscience Journal**, v.35, n.3, p.682-690, 2018.
<https://doi.org/10.14393/BJ-v35n3a2019-36402>

OLIVEIRA, L. L.; PORTELA, J. C.; SILVA, E. F.; DIAS, N. S.; GONDIM, J. E.; FERNANDES, C. N.; MEDEIROS, J. F. Water retention in Cambisols under land uses

in semiarid region of the Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 189, p. 104483, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104483>

PAN, J.; WANG, J.; ZHANG, R.; TIAN, D.; CHENG, X.; WANG, S.; NIU, S. Microaggregates regulated by edaphic properties determine the soil carbon stock in Tibetan alpine grasslands. **Catena**, 206, 105570, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105570>

PEREIRA, D. G.C.; PORTUGAL, A.F.; GIUSTOLIN, T. A.; MAIA, V. M.; MEGDA, M. X. V.; KONDO, M. K. Litter decomposition and nutrient release in different land use systems in the Brazilian semi-arid region. **Catena**, v.231, 107345, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107345>

PIMENTEL, M. L.; OLIVEIRA, A. B.; SHIEBELBEIN, B. E.; CARVALHO, M. L.; TENELLI, S.; CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L.N.; BRIEDIS, C.; PANOSSO, A. R.; BORDONAL, R. O. Quantity, quality and physical protection of soil carbon associated with sugarcane straw removal in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.237, 105976, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105976>

PINHEIRO, A. G.; ALVES, C. P.; SOUZA, C. A.A.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; JARDIM, A. M. R. F.; MORAIS, J. E. F.; SOUZA, L. S. B.; LOPES, D. C.; STEIDLE NETO, A. J.; MONTENEGRO, A. A. A.; GOMES, J. E. A.; SILVA, T. G. F. Calibration and validation of the AquaCrop model for production arrangements of forage cactus and grass in a semi-arid environment. **Ecological Modelling**, v.488, 110606, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110606>

POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L.; HERNANI, L.; ANJOS, L.; RODRIGUES, R.; CESÁRIO, F.; ANDRADE, A.; RIBEIRO, J.; The impacto f plans, policies, practices and Technologies based on the principles of conservation agriculture in the controlo f soil erosion in Brazil. **Environmental Science, Agricultural and Food Sciences**, 2020. [10.22541/au.158750264.42640167](https://doi.org/10.22541/au.158750264.42640167)

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing - R Foundation for Statistical Computing (4.1.1)**. Vienna, Austria. 2022. Available at: <https://www.R-project.org/>.

RODRIGUEZ, L.; SUAREZ, J. C.; RODRIGUEZ, W.; ARTUNDUAGA, K.J.; LAVELLE, P. Agroforestry systems impact soil macroaggregation and enhance carbon storage in Colombian deforested Amazonia. **Geoderma**, v.384, 114810, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114810>

SALES, E. P.O.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; MONROE, P. H. M.; PEREIRA, M. G.; MARTINS K. B. M, SANTOS, T. O.; SILVA, C.F.; SANTOS, L.A.; NUNES, M. R. Do coffee agroforestry systems favor carbon and glomalin input in soil biogenic aggregates?. **Catena**, v. 249, p. 108685, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108685>

SANTOS NETO, C. F. N.; SILVA, R. G.; MARANHÃO, S. R.; BARRETO, C. M.; LOPES, M. N.; CÂNDIDO, M. J. D. Morphological characteristics and yield of *Opuntia stricta* and *Nopalea cochenillifera* in integrated crop systems with caatinga

trees. **Agroforestry Systems**. v.97, n.1, p.59-68, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00787-y>

SANTOS NETO, C. F.; SILVA, R.G.; MARANHÃO, S. R.; BARRETO, C. M.; LOPES, M. N.; CÂNDIDO, M. J. D. Morphological characteristics and yield of *Opuntia stricta* and *Nopalea cochenillifera* in integrated crop systems with caatinga trees. **Agroforestry Systems**, v. 97, n. 1, p. 59-68, 2023.

SANTOS, M. O.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; MONROE, P. H. M.; PAULA, A. Effect of Caatinga forest management on organic carbon stock in soil aggregates. **Scientia Forestalis**, v.49, n.129, 2021. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.16>

SILVA, J. A. G.; HABERMANN, E.; COSTA, K. A.P.; SILVA, L. M.; SEVERIANO, E. C.; COSTA, A. C.; OLIVEIRA, T.C.; DÁRIO, B. M. M.; VILELA, L.; COSTA, J. V. C.; MARTINEZ, C. A. Integration crop-livestock system increases the sustainability of soybean cultivation through improved soil health and plant physiology. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 359, p. 108770, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108770>

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, v.241, p.155-176, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between microaggregates, soil biota, and organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v.79, p.7-31, 2004.

SHI, J.; DENG, L.; GUNINA, A.; ALHARBI, S.; WANG, K., LI, J.; KUZYAKOV, Y. Carbon stabilization pathways in soil aggregates during long-term forest succession: Implications from $\delta^{13}\text{C}$ signatures. **Soil Biology and Biochemistry**, v.180, 108988, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.108988>

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Brasília, p. 573. 2017. <https://www.embrapa.br/busca-depublicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v.33, n.2, p.141-163, 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

TOMAZ, A. R.; DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; LAL, R.; AMADO, T. J. C.; DA SILVA, B. O. T.; DA SILVA, W. R.; NUNES, E. O. D. S. Can natural undisturbed revegetation restores soil organic carbon to levels under native climax vegetation under tropical semiarid climate? **Land Degradation & Development**, v.35, 1971-1981, 2024. <https://doi.org/10.1002/ldr.5036>

VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MARCIANO, C. R.; Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast of Brazil. *Catena*, v.182, 104139, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104139>

WEI, X.; SHAO, M.; GALE, W. J.; ZHANG, X.; LI, L. Dynamics of aggregate-associated organic carbon following conversion of forest to cropland. **Soil Biology and Biochemistry**, v.57, p.876-883, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.020>

YU, P.; LI, Y.; LIU, S.; LIU, J.; DING, Z.; MA, M.; TANG, X. Afforestation influences soil organic carbon and its fractions associated with aggregates in a karst region of Southwest China. **Science of The Total Environment**, v.814, 152710, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152710>

CAPÍTULO 1

Apêndice A

Apêndice A1. Estabilidade de agregados do solo estáveis em água (%) sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN), e nos sistemas de integração pecuária-pecuária (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7 m - E7, 14 m - E14 e 28 m - E28) nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.

Sistemas	Espaçamentos (m)	Agregados do solo (%)		
		Macroagregados	Mesoagregados	Microagregados
		Profundidade (cm)		
0-10 cm				
VN		44,7 ±15,0	45,8 ±18,3	9,4 ±5,9
FxVN		45,1 ±12,0	45,8 ±10,9	9,1 ±2,6
IPFCb	7	31,9 ±8,1	55,9 ±8,7	12,2 ±0,9
	14	25,3 ±6,7	61,4 ±7,0	13,3 ±0,5
	28	56,2 ±7,0	35,3 ±5,8	8,5 ±2,3
IPFCm	7	21,0 ±5,1	68,6 ±7,9	10,4 ±3,4
	14	31,6 ±10,3	59,0 ±9,6	9,4 ±2,6
	28	44,0 ±11,1	43,4 ±11,2	12,6 ±0,9
IPFPo	7	27,2 ±4,2	62,9 ±3,5	9,9 ±3,1
	14	36,2 ±21,2	48,0 ±19,6	15,8 ±7,3
	28	37,7 ±14,9	43,5 ±12,9	18,8 ±5,6
IPFSO	7	18,5 ±3,9	64,1 ±4,5	17,4 ±7,2
	14	15,3 ±5,6	71,4 ±6,5	13,3 ±3,8
	28	59,8 ±4,4	30,7 ±4,3	9,5 ±2,2
10-20 cm				
VN		30,4 ±4,8	56,4 ±11,1	13,2 ±9,3
FxVN		33,1 ±16,5	52,7 ±13,6	14,2 ±5,9
IPFCb	7	14,9 ±4,6	75,5 ±8,4	9,7 ±5,7
	14	14,9 ±3,2	69,4 ±4,9	15,6 ±5,3
	28	36,9 ±11,2	44,0 ±8,0	19,1 ±3,4
IPFCm	7	35,1 ±10,8	53,1 ±10,9	11,8 ±2,0
	14	29,4 ±3,9	56,7 ±4,4	13,9 ±1,7
	28	22,2 ±6,5	57,8 ±10,0	19,9 ±5,1
IPFPo	7	16,4 ±3,6	69,3 ±4,2	14,3 ±2,5
	14	11,9 ±4,4	69,4 ±10,9	18,7 ±7,4
	28	26,5 ±13,4	57,8 ±12,4	15,7 ±3,7
IPFSO	7	21,5 ±7,4	62,6 ±10,2	15,9 ±8,7
	14	13,7 ±4,1	69,9 ±5,8	16,3 ±2,1
	28	29,4 ±11,8	56,5 ±10,8	14,2 ±3,3
20-30 cm				
VN		37,0 ±4,6	45,3 ±2,9	17,8 ±2,7
FxVN		19,8 ±4,0	64,1 ±6,5	16,1 ±5,0
IPFCb	7	15,1 ±9,1	70,7 ±9,4	14,2 ±6,19

	14	11,9 ±2,9	75,1 ±2,3	13,0 ±4,2
	28	32,3 ±9,3	46,8 ±8,7	20,9 ±5,42
IPFCm	7	16,6 ±4,8	66,5 ±8,1	16,9 ±6,9
	14	20,0 ±5,1	63,4 ±7,5	16,6 ±3,2
	28	34,7 ±10,4	54,6 ±10,9	10,7 ±2,9
IPFPo	7	22,2 ±10,1	64,1 ±9,1	13,7 ±5,4
	14	15,7 ±5,6	67,0 ±5,3	17,3 ±4,8
	28	22,6 ±6,0	61,4 ±3,4	16,1 ±6,6
IPFSO	7	16,3 ±6,4	66,9 ±17,8	16,8 ±12,1
	14	11,7 ±5,6	68,0 ±5,3	20,3 ±4,8
	28	16,4 ±4,9	59,0 ±3,6	24,6 ±3,2
30-50 cm				
VN		15,5 ±8,8	67,6 ±5,7	17,0 ±3,3
FxVN		32,8 ±6,2	50,4 ±12,1	16,7 ±7,3
IPFCb	7	18,6 ±7,9	65,7 ±7,5	15,7 ±6,9
	14	19,3 ±8,9	61,0 ±7,3	19,8 ±1,9
	28	19,9 ±8,7	63,5 ±9,1	16,6 ±3,6
IPFCm	7	8,1 ±4,1	62,4 ±6,7	29,5 ±4,6
	14	24,6 ±9,1	62,8 ±9,3	12,7 ±6,0
	28	11,5 ±2,0	66,5 ±4,2	22,0 ±2,7
IPFPo	7	17,1 ±7,3	70,5 ±6,2	12,4 ±4,4
	14	19,1 ±3,7	65,7 ±3,1	15,2 ±4,3
	28	9,8 ±5,6	77,2 ±4,2	13,0 ±1,7
IPFSO	7	17,4 ±6,5	70,1 ±5,8	12,5 ±2,2
	14	14,7 ±1,2	74,2 ±4,8	11,1 ±3,7
	28	36,0 ±7,8	52,6 ±10,0	11,5 ±3,6

Apêndice A2. Estoque de carbono orgânico do solo (COT) (Mg ha⁻¹) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN) da Caatinga, os sistemas de integração pecuária-pecuária (IPF): capim buffel (IPFCb), capim massai (IPFCm), palma orelha (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos (7, 14 e 28 m).

Sistemas	COT (Mg ha ⁻¹)		
	7m	14m	28m
0-10 cm			
VN	17,9 ±1,2		
FxVN	17,3 ±4,3 ^{ns}		
IPFCb	15,3 ±1,3 a*	19,0 ±1,6 b ^{ns}	16,7 ±1,2 ab ^{ns}
IPFCm	15,6 ±1,1 a ^{ns}	18,9 ±1,6 b ^{ns}	17,4 ±1,9 ab ^{ns}
IPFPo	13,5 ±1,1 a*	10,8 ±0,8 b*	13,0 ±1,9 a*
IPFSO	13,8 ±0,3 a*	12,9 ±0,5 a*	14,4 ±1,9 a*
10-20 cm			
VN	9,1 ±0,4		
FxVN	10,8 ±0,7 *		
IPFCb	8,1 ±0,3 a ^{ns}	7,0 ±0,5 b*	7,4 ±0,4 ab*
IPFCm	7,9 ±0,7 a*	8,4 ±0,8 ab ^{ns}	8,9 ±1,0 b ^{ns}
IPFPo	8,6 ±0,3 a ^{ns}	8,4 ±0,8 a ^{ns}	6,4 ±0,7 b*
IPFSO	9,2 ±0,9 a ^{ns}	7,7 ±0,6 b*	8,3 ±0,5 b ^{ns}
20-30 cm			

VN	8,2 ±0,2		
FxVN	7,2 ±0,5 *		
IPFCb	6,2 ± 0,3 a *	7,4 ±0,5 b ^{ns}	6,0 ±0,5 a *
IPFCm	5,7 ±0,5 a *	5,8 ±0,8 a *	7,2 ±0,6 b *
IPFPo	7,0 ±0,8 a *	6,2 ±0,3 b *	5,5 ±0,3 b *
IPFSO	6,5 ±0,4 a *	5,6 ±0,6 b *	5,2 ±0,2 b *
30-50 cm			
VN	10,9 ±1,2		
FxVN	11,2 ±1,1 ^{ns}		
IPFCb	8,1 ±0,6 a *	8,6 ±0,3 a *	10,3 ±0,3 b ^{ns}
IPFCm	8,8 ±0,6 a *	9,9 ±1,8 a ^{ns}	9,7 ±0,9 a ^{ns}
IPFPo	9,3 ±0,5 a ^{ns}	10,0 ±0,8 a ^{ns}	8,9 ±0,4 a *
IPFSO	10,0 ±1,1 a ^{ns}	6,7 ±0,5 b *	8,4 ±0,3 c *

Valores médios seguidos pela mesma letra na mesma cultura e mesma camada do solo não diferem pelo teste de tukey ($p < 0,05$). * - significativo, ns - não significativo, respectivamente, pelo teste de Dunnett e teste t-student ($p \leq 0,05$), compara os tratamentos IPFCb, IPFCm, IPFPo e IPFSO com a área de referência (VN).

CAPÍTULO 2

Apêndice B

Apêndice B1 . Teores de carbono orgânico do solo (g kg^{-1}) nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm sob vegetação nativa (VN), faixa de vegetação nativa (FxVN) e nos sistemas de integração pecuária-floresta (IPF): capim buffel (IPFCb) , capim massai (IPFCm), palma forrageira (IPFPo) e sorgo (IPFSO) nos diferentes espaçamentos entre as FxVN da Caatinga (7m – E7 e 28m – E28).

		COS nos agregados do solo (g kg ⁻¹)		
Sistemas	Espaçamentos (m)	Macroagregados	Mesoagregados	Microagregados
		Profundidade		
		(cm)		
0-10				
VN		7,04 ±1,08	11,65 ±2,60	9,97 ±1,15
FxVN		5,90 ±1,71 ^{ns}	9,48 ±1,25 *	8,41 ±2,07 ^{ns}
IPFCb	7	5,02 ±1,44 b ^{ns}	7,22 ±0,46 a*	9,10 ±0,64 a ^{ns}
	28	7,36 ±0,78 a ^{ns}	8,25 ±1,18 a*	8,61 ±0,39 a ^{ns}
IPFCm	7	3,90 ±0,68 a*	7,48 ±0,93 a*	8,77 ±1,86 a ^{ns}
	28	4,32 ±1,33 a*	7,63 ±1,38 a*	8,07 ±1,05 a ^{ns}
IPFPo	7	1,80 ±0,74 b*	5,21 ±1,35 a*	8,77 ±1,86 a ^{ns}
	28	4,49 ±2,34 a ^{ns}	6,18 ±1,30 a*	8,28 ±1,94 a ^{ns}
IPFSO	7	2,30 ±0,58 b*	5,94 ±0,92 a*	7,20 ±0,84 a ^{ns}
	28	7,29 ±1,39 a ^{ns}	7,78 ±0,74 a*	8,70 ±0,84 a ^{ns}
10-20				
VN		4,77 ±0,56	5,04 ±0,50	6,22 ±0,46
FxVN		4,10 ±0,79 ^{ns}	5,28 ±0,60 ^{ns}	6,24 ±0,94 ^{ns}
IPFCb	7	3,98 ±0,68 b ^{ns}	4,58 ±0,62 a ^{ns}	5,33 ±1,18 a*
	28	4,77 ±1,25 a ^{ns}	5,10 ±0,75 a ^{ns}	5,56 ±0,71 a*
IPFCm	7	4,18 ±0,68 b ^{ns}	4,38 ±0,93 a ^{ns}	4,87 ±2,29 a*
	28	3,52 ±0,82 a ^{ns}	3,64 ±0,95 a ^{ns}	4,38 ±0,85 a*
IPFPo	7	2,63 ±0,66 b*	4,04 ±0,64 a ^{ns}	5,65 ±1,48 a*
	28	3,92 ±0,75 a ^{ns}	4,48 ±1,42 a ^{ns}	4,90 ±0,71 a*
IPFSO	7	2,17 ±0,47 b*	3,89 ±0,48 a ^{ns}	4,41 ±0,75 a*
	28	3,20 ±0,42 a ^{ns}	4,68 ±1,03 a ^{ns}	4,57 ±0,42 a*
20-30 cm				
VN		4,57 ±0,72	4,84 ±0,67	6,16 ±1,31
FxVN		4,06 ±1,14 ^{ns}	3,99 ±0,64 ^{ns}	4,57 ±0,51 *
IPFCb	7	2,83 ±0,14 a*	3,62 ±0,27 b ^{ns}	4,40 ±0,44 a*
	28	3,58 ±1,04 a ^{ns}	4,59 ±1,44 a ^{ns}	3,91 ±0,35 a*
IPFCm	7	2,85 ±0,60 a*	3,54 ±0,44 a*	4,41 ±0,22 a*
	28	4,03 ±0,61 a ^{ns}	3,50 ±0,72 a*	3,31 ±0,40 a*
IPFPo	7	2,58 ±0,69 a*	3,60 ±0,16 a*	4,68 ±0,51 a*
	28	2,15 ±0,48 a*	2,86 ±0,36 a*	3,38 ±0,51 a*
IPFSO	7	1,92 ±0,35 a*	3,09 ±0,67 a*	3,45 ±0,30 a*
	28	2,30 ±0,55 a*	3,82 ±0,44 a*	3,85 ±0,42 a*

30-50 cm				
VN		3,09 ±0,98	3,15 ±0,55	3,72 ±0,58
FxVN		2,75 ±0,62 ^{ns}	2,94 ±0,68 ^{ns}	3,38 ±0,42 ^{ns}
IPFCb	7	1,96 ±0,29 a *	2,51 ±0,65 a ^{ns}	3,26 ±0,47 a ^{ns}
	28	3,19 ±1,93 a *	2,77 ±0,33 a ^{ns}	3,34 ±1,10 a ^{ns}
IPFCm	7	1,67 ±0,83 a *	2,64 ±0,42 a ^{ns}	3,10 ±0,38 a ^{ns}
	28	1,92 ±0,66 a *	2,14 ±0,38 a ^{ns}	2,28 ±0,36 a ^{ns}
IPFPo	7	2,20 ±0,76 a *	2,79 ±0,44 a ^{ns}	3,52 ±0,49 a ^{ns}
	28	1,56 ±0,14 a *	2,33 ±0,48 a ^{ns}	2,72 ±0,31 a ^{ns}
IPFSO	7	1,86 ±0,35 a *	2,21 ±0,26 a ^{ns}	3,00 ±0,67 a ^{ns}
	28	1,64 ±0,12 a *	2,18 ±0,18 a ^{ns}	2,98 ±0,46 a ^{ns}

Valores médios seguidos pela mesma letra no mesmo componente do sistema IPF não diferem pelo teste de tukey ($p < 0.05$). * - significativo, ns – não significativo, respectivamente, pelo teste de Dunnett ($p \leq 0.05$), compara os sistemas IPF com a área de referência (VN) e pelo teste t ($p < 0.05$) compara a FxVN com VN.