

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

VITÓRIA MARIA VIEIRA BRITO

**ESTOQUES DE CARBONO E QUALIDADE DE PLANOSSOLO EM
ÁREAS DO SEMIÁRIDO SUBMETIDAS A DIFERENTES USOS**

RECIFE

2024

Vitória Maria Vieira Brito
Engenheira Ambiental

Estoques de carbono e qualidade de Planossolo em áreas do semiárido submetidas a diferentes usos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Ciência do Solo.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire

Recife

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Sistema
Integrado de Bibliotecas da UFRPE Bibliotecário(a): Auxiliadora
Cunha –CRB-4 1134

B862e Brito, Vitória Maria Vieira.
Estoque de carbono e qualidade de Planossolo em áreas do semiárido submetidas a diferentes usos / Vitória Maria Vieira Brito. – Recife, 2024.
75 f.; il.

Orientador(a): Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências e anexo(s).

1. Manejo do solo. 2. Revegetação. 3. Área degradada. 4. Planossolo I. Freire, Maria Betânia Galvão dos Santos, orient. II. Título

CDD 631.4

Estoques de carbono e qualidade de Planossolo em áreas do semiárido submetidas a diferentes usos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Ciência do Solo.

Aprovada em 30 de abril de 2024

Profa. Dra. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire
Orientadora
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Tavares da Rocha
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco

Prof. Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos
Universidade Federal Rural de Pernambuco

A meu pai, que sempre me apoiou em todas as minhas escolhas. Por sempre me deixar voar, tendo a certeza que encontraria um ninho quentinho na volta.

DEDICO E OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Paulo e Neide, que são meu alicerce. Que sempre fizeram tudo para que eu me torne uma pessoa, acima de tudo, feliz e realizada com minhas escolhas. Agradeço por toda a força e o estímulo para que eu continue galgando novas conquistas.

Ao meu irmão e melhor amigo, Joe. Por sempre me apoiar desde o começo dessa caminhada e para além dela, compartilhando as dores e delícias da vida.

Ao meu namorado e companheiro, Heynrich, por estar comigo em todas as horas, pelas noites em claro para a conclusão do trabalho. Por acreditar sempre em mim, mesmo quando nem eu mesma acredito. Pela ajuda em todas as fases desta pós. Essa conquista também é sua.

A minha orientadora, Maria Betânia, que foi essencial nessa caminhada. Por sua generosidade, paciência e acolhimento desde o primeiro dia em que a conheci, por todo conhecimento compartilhado. Pela sua paz e confiança de que a vida sempre pode dar certo.

A tia Ana, meu maior exemplo e inspiração na vida acadêmica. Por ser mulher na ciência e por todo apoio à minha educação. Por ser casa longe de casa.

A minha família. Especialmente à Neuma, Nélia, Bárbara, Rebeca e Matias. Que sempre foram representação de lar.

As minhas amigas Pâmela e Rayana, que desde a primeira semana seguraram minha mão e nunca soltaram. Por todo o companheirismo, risadas, choros, madrugadas em claro, aprendizados e reuniões pelo meet.

As minhas amigas e companheiras de apartamento, Karol e Giórgia, por todos os momentos que passamos juntas, pelas palavras de incentivo e apoio. Por serem minha família fora de casa.

Aos amigos e amigas que fiz ao longo da vida, por sempre arrancarem sorrisos e dividirem fardos.

Aos professores e professoras do PPG Ciência do solo da UFRPE, por todo aprendizado. Em especial ao Prof. Jean Santos, Profa. Caroline Biondi e Profa. Giselle Fracetto que, para além

dos conhecimentos científicos, sempre ofertaram abraços e amparo, pelos seres humanos que são.

Ao Prof. Dr. Alexandre Tavares e ao Prof. Jean Santos por aceitarem compor a banca examinadora desse trabalho. Sou grata pela dedicação e tempo gastos nas contribuições.

Aos amigos do grupo de pesquisa de Química e Salinidade de Solo, pelos ensinamentos repassados, pela ajuda na coleta e nas análises.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo e a Universidade Federal Rural do Pernambuco, pela contribuição nessa formação.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de estudo, por todo o suporte para se fazer ciência de qualidade.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente nessa jornada. Tom Jobim estava certo quando cantava “é impossível ser feliz sozinho”.

Estoques de carbono e qualidade de Planossolo em áreas do semiárido submetidas a diferentes usos

RESUMO

A vegetação do semiárido brasileiro é constituída, predominantemente, pela Caatinga. Nos últimos anos as mudanças no uso da terra, por meio de práticas antrópicas como pecuária, extração de lenha e mineração, vem contribuindo para o processo de degradação destas áreas, afetando fortemente a capacidade dos solos em armazenar carbono. Os benefícios da revegetação em áreas degradadas envolvem todo o ecossistema e contribuem para o equilíbrio ambiental. Com base neste contexto, objetivou-se com esta pesquisa avaliar a qualidade e o aporte de carbono dos solos em áreas sob vegetação de Caatinga nativa, pastagem e em processo de revegetação há cinco anos com espécies nativas e *Atriplex nummularia*. Em todas as áreas, foram coletadas amostras de solo no final do período seco e chuvoso, abertas 10 mini trincheiras com 50 cm de profundidade, em que foram coletadas amostras de solo (0-5, 5-10, 10-30, 30-50 cm), a fim de avaliar as alterações dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Para a caracterização química foram realizadas análises de pH em água (1:2,5), condutividade elétrica e cátions solúveis (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) nas amostras de solo. Foram determinadas ainda a densidade do solo, a granulometria e a porosidade total e de partículas para avaliação dos atributos físicos dos solos. Para avaliar a qualidade biológica, foram determinados os teores de carbono orgânico total (oxidação por via úmida), o estoque de carbono, índice do manejo de carbono, carbono oxidado em permanganato em função da profundidade dos solos em áreas sob diferentes coberturas vegetais. Para as análises biológicas, foram coletadas amostras apenas na camada de 0-5 cm, e determinados o carbono da biomassa microbiana, quociente metabólico do solo (qCO_2), microbiano (qMic) e de mineralização (qMin) e carbono nas substâncias húmicas, sendo calculadas as relações AH:AF e HUM. Os resultados indicaram que o solo apresenta textura arenosa, com maior densidade na área de pasto degradado e revegetação. Houve concentrações de sais e acúmulo de cátions na revegetação devido o histórico de degradação da área regenerada. As variáveis CBM e C-Mic e RB diferiram entre épocas, onde a época seca apresentou maiores teores. Os teores de COT e COP foram mais elevados na época chuvosa e o COP variou entre as áreas, Caatinga>Revegetação>Pasto degradado. Em relação às substâncias húmicas, na camada superficial, HUM>AH>AF. Também diferiram entre épocas, apresentando maiores valores na época úmida. Assim como o estoque de COT, os menores valores de IMC na área de pasto degradado sugerindo que o manejo esteja impactando negativamente a matéria orgânica e qualidade do solo. De modo geral, é possível observar melhorias na área sob revegetação, mesmo com as adversidades que ocorrem na área de experimento e que as áreas podem levar décadas para serem regeneradas.

Palavras-chave: Manejo do solo. Revegetação. Área degradada. Planossolo.

Carbon stocks and Planosol quality in semi-arid areas subjected to different uses

ABSTRACT

The vegetation of the Brazilian semi-arid is predominantly constituted by Caatinga. In recent years, changes in the use of land, through anthropic practices such as livestock, firewood extraction and mineration, have contributed for the degradation process of these areas, strongly affecting the soil's capacity of store carbon. The benefits of revegetation in degraded areas involve the entirety of the ecosystem and contribute to environmental balance. Based on this context, this research aimed to evaluate the quality and carbon input of soils in areas under native Caatinga vegetation, pasture, and in the process of revegetation for five years with native species and *Atriplex nummularia*. In all areas, soil samples were collected at the end of the dry and rainy seasons. Ten mini trenches 50 cm deep were opened, and soil samples were collected (0-5, 5-10, 10-30, 30- 50 cm), for the purpose of evaluate the physics, chemical and biological attributes of the soil. The pH in water (1:2,5), electrical conductivity and soluble cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) in the soil samples will be determined. Soil density, granulometry and total porosity will also be determined to evaluate the physical attributes. The contents of total organic carbon (wet oxidation), carbon stock, water-soluble carbon, and labile carbon will be determined according to the depth of the soil in areas under different vegetation covers. To evaluate the biological quality, the contents of total organic carbon (wet oxidation), carbon stock, carbon management index, permanganate oxidizable carbon as a function of soil depth in areas under different vegetation covers. For the biological analyzes, samples were collected only in the 0-5 cm layer and determined the microbial biomass carbon, soil metabolic quotient ($q\text{CO}_2$), microbial ($q\text{Mic}$) and mineralization ($q\text{Min}$), respirometry, and humic substances, the AH: AF and HUM ratio being calculated. The results indicated that the soil has a sandy texture, with higher density for degraded pasture and revegetation areas. There were salt concentrations and cation accumulation in the revegetation due to the history of degradation of the regenerated area. CBM and C-Mic and RB differed between seasons, where the dry season presented higher contents, The TOC and POC contents were higher in the rainy season and the POC still varied between the areas, Caatinga> Revegetation> Degraded pasture, respectively. In relation to the humic substances, in the surface layer, HUM> AH> AF. They also differed between seasons, presenting higher values in the humid season. As well as the TOC stock, the lowest OC values in the degraded pasture area suggest that management is negatively impacting soil organic matter and quality. In general, it is possible to observe improvements in the area under revegetation, even with the adversities that occur in the experimental area and that the areas may take decades to be regenerated.

Keywords: Soil management. Revegetation. Degraded area. Planosol.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Mapa da localização geográfica da área de estudo. Em destaque o Estado de Pernambuco e o município de Caruaru.....22
- Figura 2** - Média da precipitação mensal do município de Caruaru em 2022.....23
- Figura 3** - Área de Caatinga Nativa no período seco (a) e chuvoso (d); Área de revegetação no período seco (b) e chuvoso (e); Área de pasto degradado no período seco (c) e chuvoso (f).....24
- Figura 4** - Croqui da distribuição das amostras em ziguezague na área (A) e da profundidade das camadas a serem avaliadas nas mini-trincheiras em cada ponto de amostragem (B).....25
- Figura 5** - Teores de densidade do solo e densidade de partículas sob diferentes coberturas de solo (a,b).....31
- Figura 6** - Teores de areia grossa em função da cobertura do solo (a) e em função da profundidade (b), de areia fina em função da cobertura do solo (c) e da profundidade (d) e de argila em função da cobertura do solo (e) e da profundidade (f).....33
- Figura 7** - Teores de silte em função da profundidade de coleta dentro de cada cobertura do solo (a) e em função da cobertura do solo dentro de cada profundidade.....34
- Figura 8** - Potencial hidrogeniônico do solo em função de diferentes coberturas do solo nas épocas úmida e seca de coleta, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-30 e 30-50 cm de profundidade.....39
- Figura 9** - Condutividade elétrica do solo em função de diferentes coberturas do solo nas épocas úmida e seca de coleta, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-30 e 30-50 cm de profundidade.....40
- Figura 10** - Carbono da biomassa microbiana no solo em função do período úmido e seco (a) e em função da cobertura do solo (b); quociente metabólico em função do período úmido e seco (c) e em função da cobertura do solo (d); quociente microbiano em função do período úmido e seco (e) e em função da cobertura do solo (f); quociente de mineralização em função do período úmido e seco (g) e em função da cobertura do solo (h), na camada de 0-5 cm.....48
- Figura 11** - Respiração basal do solo em função das épocas de coleta (úmida e seca) dentro das coberturas do solo avaliadas (a) e em função das coberturas nas épocas de coleta úmida e seca (b).....49

Figura 12 - Carbono orgânico total em função da época de coleta do solo nas camadas 0-5 cm (a), 5-10 cm (c), 10-30 cm (e) e 30-50 cm (g); e em função da cobertura do solo na camada de 0-5 cm (b), 5-10 cm (d), 10-30 cm (f) e 30-50 cm (h).....	51
Figura 13 - Carbono oxidado em permanganato de potássio em função da época de coleta na camada 0-5 cm (a) e 5-10 cm (c) e em função da cobertura do solo na camada de 0-5 cm (b) e 5-10 cm (d).....	52
Figura 14 - Teores de carbono nas frações ácidos fúlvicos em função da época de coleta (a) e da cobertura do solo (b), ácidos húmicos em função da época de coleta (c) e da cobertura do solo (d) e humina em função da época de coleta(e) e da cobertura do solo(f), na camada de 0-5 cm de profundidade.....	54
Figura 15 - Teores de carbono nas frações ácidos fúlvicos em função da época de coleta (a) e da cobertura do solo (b), ácidos húmicos em função da época de coleta (c) e da cobertura do solo (d) e humina em função da época de coleta(e) e da cobertura do solo(f), na camada de 5-10 cm de profundidade.....	55
Figura 16 - Teores de carbono nas frações ácidos fúlvicos em função da época de coleta (a) e da cobertura do solo (b), ácidos húmicos em função da época de coleta (c) e da cobertura do solo (d) e humina em função da época de coleta(e) e da cobertura do solo(f), na camada de 10-30 cm de profundidade.....	56
Figura 17 - Teores de carbono nas frações ácidos fúlvicos em função da época de coleta (a) e da cobertura do solo (b), ácidos húmicos em função da época de coleta (c) e da cobertura do solo (d) e humina em função da época de coleta(e) e da cobertura do solo(f), na camada de 30-50 cm de profundidade.....	57
Figura 18 - Teores de carbono na fração humina em função da coberturas do solo nas camadas de 0-5 cm (a) e 5-10 cm (b) de profundidade.....	58
Figura 19 - Estoques de COT em função do período de coleta (a) e da cobertura do solo (b) nas diferentes camadas avaliadas.....	59
Figura 20 - Índice de manejo do carbono em função da cobertura do solo dentro dos períodos de coleta (úmido e seco), nas camadas de 0-5 cm (a) e 5-10 cm (b) de profundidade.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fonte de variação para atributos físicos do solo, em relação às diferentes aberturas e profundidades analisadas.....	30
Tabela 2 - Atributos químicos do solo em função da época de coleta nas camadas avaliadas....	36
Tabela 3 - Atributos químicos em função da cobertura do solo nas camadas avaliadas.....	38
Tabela 4 - Cátions trocáveis em função de diferentes coberturas do solo nas épocas de coleta úmida e seca, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-30 e 30-50 cm de profundidade.....	42
Tabela 5 - Cátions solúveis do solo sob o efeito de diferentes coberturas do solo em distintas épocas de coleta, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-30 e 30-50 cm de profundidade.....	44
Tabela 6 - Análise de variância para atributos biológicos do solo na camada de 0-5 cm de profundidade.....	46
Tabela 7 - Tabela da análise da variância para o estoque do carbono orgânico total em função da época de coleta e da cobertura do solo no município de Caruaru – PE.....	58

SUMÁRIO

RESUMO	21
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Hipóteses	14
1.2 Objetivos	15
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	15
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	15
2.1. Semiárido e degradação de solos	16
2.2. Planossolos.....	17
2.3. Caatinga e a importância da revegetação	17
2.4. Estoque de carbono	20
3. METODOLOGIA	22
3.1. Área de estudo.....	22
3.2. Coleta e tratamento das amostras.....	23
3.3. Análises químicas do solo.....	24
3.4. Análises físicas do solo	25
3.5. Determinação de carbono orgânico total (COT) e estoque de C total do solo.....	25
3.6. Índice do manejo do carbono (ICM)	26
3.7. Carbono oxidado em permanganato de potássio.....	26
3.8. Análises biológicas	26
3.8.1. <i>Carbono da biomassa microbiana</i>	26

3.8.2. <i>Respirometria</i>	27
3.8.3. <i>Quociente metabólico do solo (qCO_2)</i>	27
3.8.4. <i>Quociente microbiano (q_{mic}) e quociente de mineralização (q_{Min})</i>	28
3.8.5. <i>Substâncias húmicas</i>	28
3.9. <i>Análise estatística</i>	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Atributos físicos.....	30
4.2. Atributos químicos	34
4.3. Atributos biológicos e pools de carbono	45
5. CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXOS	71
ANEXO A - Análise da variância para atributos químicos do solo na camada de 0-5 cm de profundidade.....	71
ANEXO B - Análise da variância para atributos químicos do solo na camada de 5-10 cm de profundidade.....	71
ANEXO C - Análise de variância para atributos químicos do solo na camada de coleta de 10-30 cm de profundidade.....	71
ANEXO D - Análise de variância para atributos químicos do solo na camada de coleta de 30-50 cm de profundidade.....	72
ANEXO E - Análise da variância dos teores de carbono orgânico total e seus compartimentos na camada de 0-5 cm de profundidade.....	72
ANEXO F - Análise da variância dos teores de carbono orgânico total e seus compartimentos na camada de 5-10 cm de profundidade.....	72

ANEXO G - Análise da variância dos teores de carbono orgânico total e seus compartimentos na camada de 10-30 cm de profundidade.....73

ANEXO H - Análise da variância dos teores de carbono orgânico total e seus compartimentos na camada de 30-50 cm de profundidade.....73

1. INTRODUÇÃO

O Semiárido é uma região que compreende 1.182.697 km² de área e é delimitado pelas condições climáticas dominantes de semiaridez, principalmente quanto à precipitação pluviométrica. Composto principalmente por estados da região nordeste, o semiárido brasileiro possui a Caatinga como bioma mais representativo, sendo considerado um bioma completamente brasileiro e a forma de vegetação mais resiliente do Brasil, no qual suas áreas são utilizadas intensamente desde os primórdios da colonização.

Para atender a demanda do crescimento populacional, o uso contínuo do solo para práticas agrícola e pecuária de exploração mista, feito de forma não planejada, tem contribuído para a redução do estoque de carbono do solo, como também para o aumento da emissão de CO₂ na atmosfera. Outro fator que agrava o problema na redução de nutrientes, matéria orgânica e, conseqüentemente, o sequestro de carbono no solo, é a constante prática de desmatamento, associada ao corte-queima, na região semiárida.

A cobertura vegetal auxilia na reconstituição da qualidade do solo, um dos maiores responsáveis pelo estoque de carbono orgânico terrestre. A recuperação das áreas, por meio da revegetação por interferência antrópica ou da regeneração de forma espontânea a partir de espécies nativas, é uma alternativa de manejo importante, por estas serem adaptadas ao clima e ao déficit hídrico na região semiárida. Ainda são poucos os dados disponíveis de estudos sobre a quantificação de carbono em áreas de revegetação com espécies da Caatinga, justificando assim, a necessidade de trabalho desenvolvido nessa área. Portanto, o objetivo da pesquisa foi avaliar o aporte de carbono e a qualidade do solo em áreas sob vegetação de Caatinga nativa, pastagem e em processo de revegetação.

1.1 Hipóteses

A revegetação com espécies nativas da Caatinga em uma área degradada melhora a qualidade do solo e promove o aporte de carbono no semiárido em cinco anos;

O solo sob pastagem tem maior fluxo de gases de CO₂ em comparação ao solo em recuperação;

As concentrações de carbono no solo variam em função da época do ano, conforme a umidade;

A revegetação de solo degradado por cinco anos promove acúmulo de carbono similar à área de Caatinga nativa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o aporte de carbono e indicadores da qualidade do solo em áreas sob vegetação de Caatinga nativa, pastagem e em processo de revegetação.

1.2.2 Objetivos Específicos

Avaliar as alterações dos atributos físicos e químicos do solo em áreas sob Caatinga, pastagem e revegetação por cinco anos com espécies nativas da Caatinga e *Atriplex nummularia*;

Determinar concentrações de carbono em solo em função da profundidade em áreas sob diferentes coberturas vegetais;

Avaliar o estoque de carbono em área de Caatinga em recuperação e de uma área de pastagem em comparação com Caatinga preservada no período seco e chuvoso.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Semiárido e degradação de solos

O semiárido brasileiro é uma região que compreende 1.182.697 km² de área, sendo composto por 1.427 municípios (SUDENE, 2021). É constituído por parte dos nove estados do Nordeste e, também, pela zona setentrional de Minas Gerais, estendendo-se por cerca de 18% do território do estado mineiro e, aproximadamente, 85% do Nordeste brasileiro (SILVA; BEZERRA, 2020). Os critérios usados para demarcação do semiárido são o índice de Aridez de Thornthwaite inferior ou igual a 0,50; a precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; e o risco de seca, em que o percentual diário de déficit hídrico é igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano. Vale ressaltar que, para um município pertencer a esta região, pelo menos um destes critérios citados deve ser atendido (SUDENE, 2021).

De acordo com o Instituto Nacional do Semiárido – INSA (2021), a região abriga cerca de 28 milhões de habitantes, entre zonas urbanas (62%) e rurais (38%), formando um dos semiáridos mais povoados do mundo. No semiárido brasileiro, cerca de 90% dos municípios com até 20 mil habitantes tem a agricultura familiar como estrutura econômica (SOUSA et al., 2023). Ainda de acordo com os autores, o semiárido é marcado por instabilidade climática, caracterizada pela irregularidade pluviométrica, temperaturas médias anuais elevadas e níveis baixos de umidade por longos períodos, tornando-se heterogêneo em paisagem, revestimento florístico e na disponibilidade dos recursos naturais, onde são comuns as atividades agrícolas produtoras de alimentos, desenvolvidas pelos agricultores familiares, predominantemente a agricultura de sequeiro e a pecuária extensiva, representando uma garantia de segurança alimentar e geração de emprego e renda para as famílias rurais, por apresentar maior resistência à seca.

De modo a assegurar a oferta de suprimento alimentar ao rebanho, o cultivo de pastagens é utilizado como estratégia pelos produtores, contudo, o êxito na eficiência do emprego das plantas forrageiras para alimentação animal demanda algumas condições, como por exemplo, a disponibilidade de qualidade e quantidade de forragem na pastagem (MELO; VOLTOLINI, 2019). Em razão dos períodos de estiagem mais extensos, a obtenção de produtos de origem animal para a população semiárida é afetada, limitando a disponibilidade de alimentos e reduzindo a qualidade nutricional da pastagem (PAULA; FERREIRA, 2020), impactando a cadeia produtiva dos ruminantes (SANTOS et al., 2023).

De acordo com Macedo et al. (2023), o semiárido é uma região sujeita à seca e a degradação, em que os processos erosivos estão sendo intensificados devido ao extrativismo vegetal, agricultura rudimentar e a pecuária extensiva, resultando na compactação superficial dos solos, destruição da cobertura vegetal nativa e extenuação de serrapilheira (PORTO et al., 2019).

A degradação pode ocorrer de forma natural ou antrópica, variando de nível moderado a grave, chegando a um nível em que a vegetação e os solos encontrem-se em condições irreversíveis, denominadas “núcleos de desertificação” (MACEDO et al., 2021). A ação mais comum que pode provocar o processo de desertificação é a retirada da vegetação, uma das principais resultantes está ligada aos solos das áreas impactadas, devido ao aumento da erosão e seus impactos na fertilidade do solo (TAVARES et al., 2023).

Com a chegada das chuvas e o solo desprotegido, a água que não é infiltrada pode evaporar ou ser escoada para áreas mais baixas causando o assoreamento dos mananciais (PORTO et al., 2019). De acordo com os mesmos autores, os solos do semiárido brasileiro são considerados rasos e naturalmente podem ser solos afetados por sais.

2.2. Planossolos

Encontrados em diversas regiões do mundo, expressivamente no sul e nordeste do Brasil, os Planossolos constituem 10,5% da região semiárida e compreende cerca de 78.500 km² (EMBRAPA, 2021). Ocorrem em áreas de relevo plano ou suave ondulado, sujeitas a longos períodos de estiagem e excesso de água em curto espaço de duração (EMBRAPA, 2021). Apresentam, geralmente, pouca profundidade, possuindo fertilidade média a alta e podem apresentar limitações devido ao elevado teor de sódio (PARAHYBA et al., 2024). O manejo dos Planossolos demanda atenção especialmente à drenagem, principalmente aos tipos hidromórficos, e à correção da acidez e dos níveis prejudiciais de alumínio que afetam a maioria das plantas (EMBRAPA, 2021).

2.3. Caatinga e a importância da revegetação

A Caatinga é o bioma que compõe, predominantemente, a vegetação do semiárido brasileiro (OLIVEIRA; FLORENTINO, 2023). De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2024), este bioma ocupa uma área de, aproximadamente, 862.818 km². Com mais de onze mil espécies vegetais catalogadas, a vegetação é composta por mata espinhosa tropical e adaptada ao clima semiárido, no qual, normalmente, é constituída por um estrato herbáceo-graminoso junto de árvores e arbustos, cuja densidade depende das condições de

clima e do estado de conservação do solo (INSA, 2021). Também de acordo com o INSA, a denominação do termo “Caatinga” significa “mata-branca” no tupi-guarani, assim nomeado, pois os troncos se tornam esbranquiçados e brilhantes, dominando a paisagem. Isso acontece porque a Caatinga apresenta atributos morfológicos de adequação à seca causada pela falta de água (xeromorfismo), em que possui duas formas de adaptação marcantes: a perda das folhas nos períodos de escassez de precipitação pluviométrica, fazendo com que a planta compense a perda de água por meio do processo de transpiração, e pelo fator das raízes possuírem bom desenvolvimento, facilitando a captação de água no solo, em que, comparativamente, as espécies arbustivas têm demandas hídricas menores em relação às árvores de grande porte. (JARDIM et al., 2023; SANTOS et al., 2021; SOUSA e SOBRINHO, 2016).

Desde a colonização brasileira, a caatinga tem sido constantemente transformada pela prática da agricultura de corte e queima, extração de lenha e exploração madeireira, contribuindo para a perda e degradação do habitat natural. No contexto do Nordeste, o desmatamento se destaca como principal razão por trás dessa degradação, em função da abertura de áreas para criação de gado, crescimento populacional, produção agrícola e industrial (ANTONGIOVANNI et al., 2020; SILVA et al., 2018). De acordo com o Relatório Anual de Desmatamento 2022 (MAPBIOMAS, 2023), a Caatinga teve 6,8% da sua área desmatada, totalizando 140.637 ha, estando entre os ecossistemas florestais mais ameaçados e menos estudados do mundo (BARRETO-GARCIA et al., 2021).

A retirada da vegetação natural pode tornar o solo mais suscetível a danos e modificar os processos biogeofísicos, que incluem as características físicas do solo, e processos biogeoquímicos, como as emissões de gases de efeito estufa, além de afetar as trocas de energia e água no ambiente (SILVA et al., 2021). Estudos recentes apontam que a degradação do solo em ambientes semiáridos tende a modificar a comunidade microbiana e também a reduzir as funções relacionadas à dinâmica do carbono no solo (PEREIRA et al., 2022). A conversão de ecossistemas naturais em agroecossistemas agrava a perda de carbono no solo devido a três fatores principais: o desmatamento, que remove a cobertura vegetal que contribui para a matéria orgânica no solo; a queima de biomassa, que libera carbono na atmosfera e reduz a quantidade de material orgânico disponível para o solo; e a menor entrada de resíduos vegetais nos agroecossistemas em comparação com os ecossistemas naturais, o que diminui a reposição de carbono no solo (LAL, 2023).

A recuperação das áreas afetadas pelo desmatamento é executável por meio do reflorestamento e da regeneração de forma espontânea, considerando que as florestas retêm

uma quantidade maior de carbono, os solos na região da Caatinga têm a capacidade de se tornar uma reserva significativa desse elemento, assim, há uma possibilidade promissora de armazenar carbono no solo e na vegetação no futuro, através da recuperação das florestas em regiões atualmente utilizadas para outros fins (FERNANDES et al., 2020; MENEZES et al. 2021; SOUZA e SOBRINHO, 2016). Uma alternativa importante para a recuperação de áreas degradadas é o uso de plantas nativas, em que a seleção das espécies usadas seja baseada nos fatores climáticos, edáficos, ambientais e nas características das plantas, além da análise da área antes da realização do plantio para identificar o estágio de degradação do local e auxiliar na escolha das espécies nativas a serem cultivadas na área a ser recuperada (CARVALHO et al., 2022; SOUZA e SOBRINHO, 2016). Ainda de acordo com Carvalho et al. (2022), espécies nativas são as mais indicadas para o reflorestamento porque garantem a preservação do banco genético e torna o ambiente mais equilibrado ecologicamente, conseqüentemente restituindo o mais próximo possível do estado original.

A capacidade da vegetação de se recuperar de perturbações ambientais está associada à sua capacidade adaptativa de restaurar suas funções originais após esses eventos, portanto, a vegetação natural é o melhor indicador da capacidade do sistema de produção (GIONGO et al., 2011; JARDIM et al., 2023). De modo a proteger a conservação de algumas espécies de cactáceas ameaçadas de extinção no semiárido brasileiro, o Instituto Nacional do Semiárido abriga 160 espécies de cactos e outras suculentas, sendo, em maior parte, espécies nativas da região (INSA, 2021). A Caatinga é muito importante, pois é um bioma exclusivamente brasileiro (GOMES e SILVA, 2023). Medeiros e Oliveira (2020) defendem que a caatinga integra outro bioma global denominado Florestas e Arbustos Tropicais Sazonalmente Secos (FATSS), compreendendo a maior, mais contínua e mais biodiversa área do bioma FATSS no mundo.

Por outro lado, os benefícios da revegetação envolvem todo o ecossistema, englobando solos, águas, macro e micro-organismos, contribuindo para a riqueza e equilíbrio ambiental. Segundo Lima et al. (2020), a regeneração de áreas degradadas com culturas perenes contribui para diminuir a taxa de erosão do solo, aumentando a taxa de infiltração, o que mantém a umidade do solo e a temperatura mais estável, possibilitando o desenvolvimento das culturas e a redução do escoamento superficial. Medeiros e Oliveira (2020), em seu estudo sobre a importância da faveleira (*Cnidocolus quercifolius*) na conservação da Caatinga em área em processo de desertificação, ressaltaram a importância do reflorestamento com espécie nativa da Caatinga para amenizar os efeitos do processo de desertificação e do aquecimento global. Os autores relataram que a espécie desempenhou papel fundamental para a conservação das

demais espécies da comunidade vegetal do bioma Caatinga, viabilizando o provimento de bens ambientais para a vida animal e população inserida neste ambiente. Estudos dessa natureza, utilizando espécies arbóreas nativas são fundamentais para a recuperação de áreas degradadas e o enriquecimento dos solos, como componentes centrais do ecossistema.

2.4. Estoque de carbono

Os ecossistemas compostos pelo solo, vegetação, oceano e atmosfera constituem os principais compartimentos do carbono na Terra (LAL, 2020). Ainda de acordo com o autor, o carbono do solo apresenta-se de forma inorgânica, composta por carbonatos e bicarbonatos de cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), e na forma orgânica, originado tanto da biomassa viva quanto dos restos de plantas e tecidos animais em diferentes estágios de decomposição, incluindo também os subprodutos dos processos microbianos.

O sequestro de carbono nos solos acontece através do conjunto de processos: humificação, agregação e sedimentação (LAL, 1997). Atribui-se à humificação o processo de decomposição/transformação de animais e detritos vegetais em húmus por meio da ação de microrganismos, resultando em acúmulo de carbono no solo. Já a agregação do solo, também nomeada de estruturação do substrato edáfico, é o efeito dos processos de floculação e cimentação, principais responsáveis pelo sequestro de carbono no solo. No processo de sedimentação ocorre o acúmulo de materiais oriundos de uma área fonte no qual o ambiente se tornou inapto a transportar este material (OLIVEIRA, 2015).

Segundo Menezes et al. (2021), os solos são responsáveis, geralmente, pelos maiores estoques terrestres de carbono orgânico, retendo mais carbono do que a vegetação e a atmosfera juntos e, por esta razão, desempenham papel fundamental no funcionamento do ecossistema, fazendo com que o manejo dos estoques de carbono do solo possua grande potencial em influenciar a ciclagem global de carbono. Ainda de acordo com LAL (2020), a proteção, restauração e gestão sustentável do estoque de C do solo pode exercer uma influência significativa no estoque de carbono atmosférico.

O tipo do solo, clima, bioma, altura das árvores, queda da serrapilheira, dinâmica da água, além do uso e manejo do solo são fatores que controlam os estoques de carbono no solo (MONTOVANI et al., 2024). Esses estoques são avaliados, principalmente, nas camadas superficiais, levando em consideração as alterações em função das profundidades do preparo do solo e a ação das raízes que acontecem principalmente nestas camadas (ARAÚJO, 2020).

A agregação do solo e o armazenamento de carbono podem ser influenciados de forma direta ou indireta pelo uso de diferentes práticas de manejo (SANTOS et al., 2021). A

remoção da vegetação nativa aumenta a vulnerabilidade das áreas, resultando em alterações significativas nos fluxos de carbono e energia nos ecossistemas terrestres, onde o desmatamento resulta em danos consideráveis ao equilíbrio energético e de carbono, colocando em risco a viabilidade das espécies, expondo essas áreas a eventos climáticos extremos e ao processo de desertificação (JARDIM et al., 2023; MACEDO et al., 2023). Implicando direta e indiretamente na regeneração e estabelecimento da capacidade produtiva da Caatinga (MACEDO et al., 2023).

Os processos naturais da fotossíntese e respiração, em conjunto com a ação antrópica resultam na troca de carbono entre o reservatório terrestre e o atmosférico, onde a captura de carbono por meio da fotossíntese acontece quando as plantas absorvem energia e CO_2 da atmosfera, fixando o carbono na biomassa da vegetação, e conseqüentemente, forma, juntamente com seus resíduos (serapilheira e madeira morta), um estoque natural de carbono. O processo inverso resulta na emissão de carbono mediante a respiração das plantas, animais e decomposição orgânica (respiração das bactérias e fungos), quando somados às ações antrópicas (desmatamento, incêndios, queimas de combustíveis, gases industriais, entre outros), e as emissões de GEE, geram o desequilíbrio no ciclo de carbono (RÜGNITZ et al., 2009).

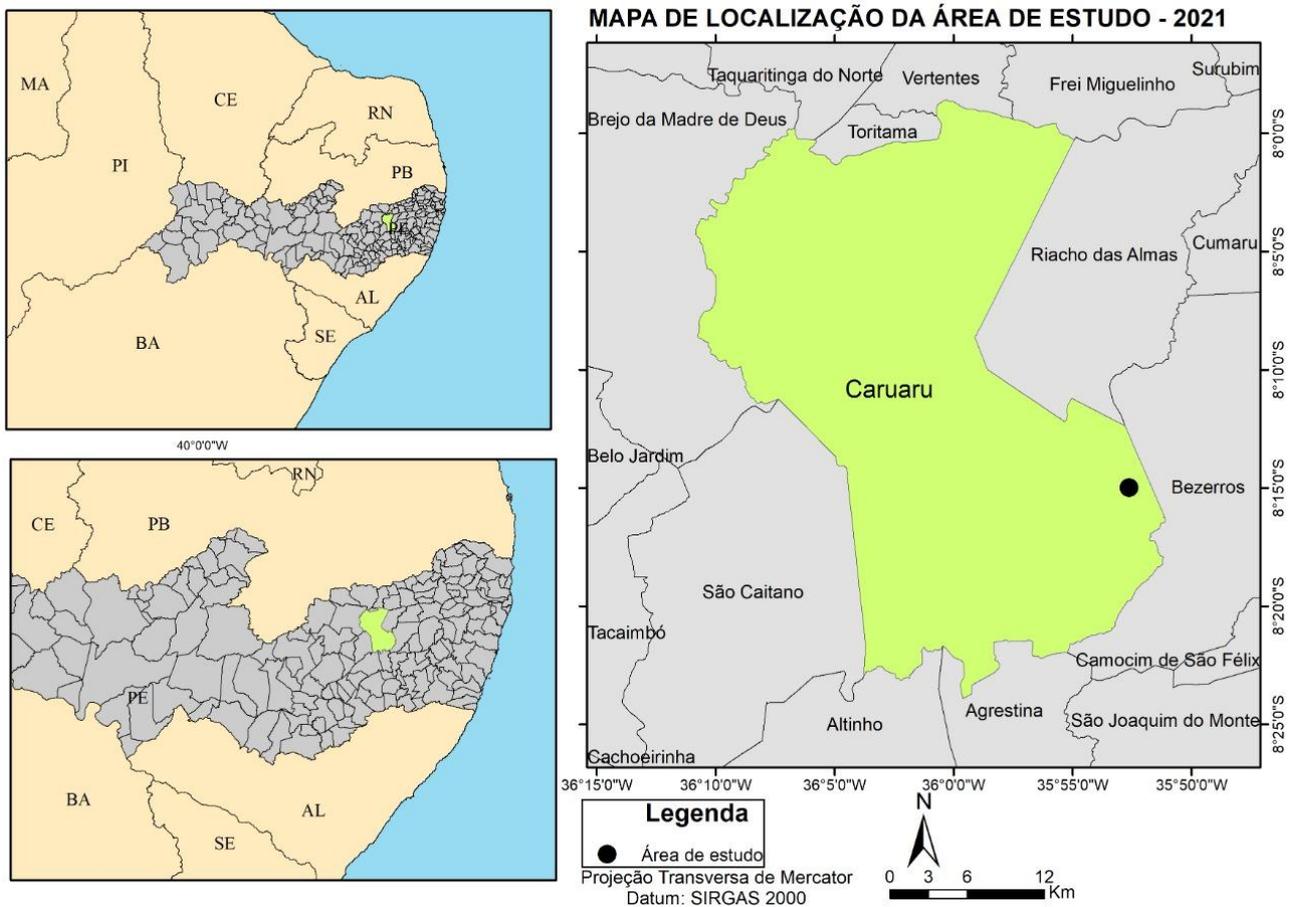
A perda de estoques de carbono no solo influencia consideravelmente o aumento nas emissões de dióxido de carbono na atmosfera terrestre. No Brasil, a conversão de florestas em pastagens é uma das principais atividades que contribui para essas emissões, colocando o país entre os principais contribuintes para as emissões de CO_2 globais, intensificando o efeito estufa e acelerando as mudanças climáticas (AMOAKWAH et al., 2022; MONTOVANI et al., 2024).

3. METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

As áreas de estudo estão localizadas na Fazenda Santa Maria, município de Caruaru - PE, nas coordenadas geográficas S 08°15'00.4" e W 35°52'38.0. A fazenda possui área total de 300 ha e é constituída por Planossolo.

Figura 1. Mapa da localização geográfica da área de estudo. Em destaque o Estado de Pernambuco e o município de Caruaru.



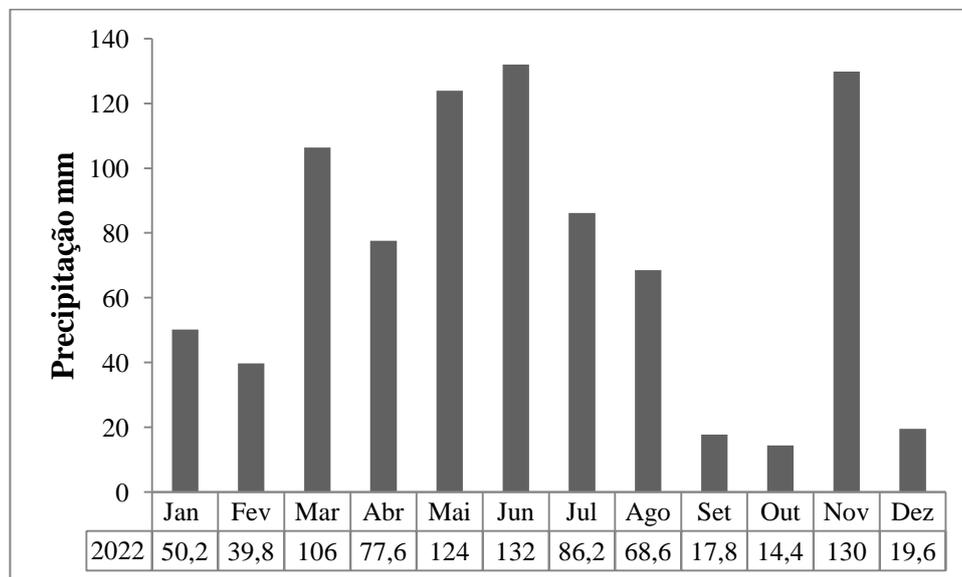
Fonte: Arquivo Pessoal

A topografia é composta por relevo suave ondulado com leve desnível. De acordo com Medeiros (2018), o clima de Caruaru é semiárido (BS_h, classificação climática de Köppen-Geiger), com verões quentes e secos e invernos amenos e relativamente chuvosos e baixo

índice pluviométrico (551 mm anuais), com chuvas concentradas a partir do mês de abril até julho (Figura 2).

Para compor este estudo, foram avaliadas: uma área sob vegetação nativa de Caatinga (área de referência); uma área de pasto degradado sem uso há 20 anos; uma área em processo de revegetação com experimento montado há cinco anos com espécies nativas da Caatinga e *Atriplex nummularia*. As espécies nativas da Caatinga inseridas no experimento são: Aroeira-do-Sertão (*Myracrodruon urundeuva* Allemão), Catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul.), Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), Mulungu (*Erythrina mulungu* Mart. ex Benth.), Pau-Ferro (*Caesalpinia leiostachya* (Benth.) Ducke) e Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.).

Figura 2. Média da precipitação mensal do município de Caruaru em 2022



Fonte: APAC, 2022

3.2. Coleta e tratamento das amostras

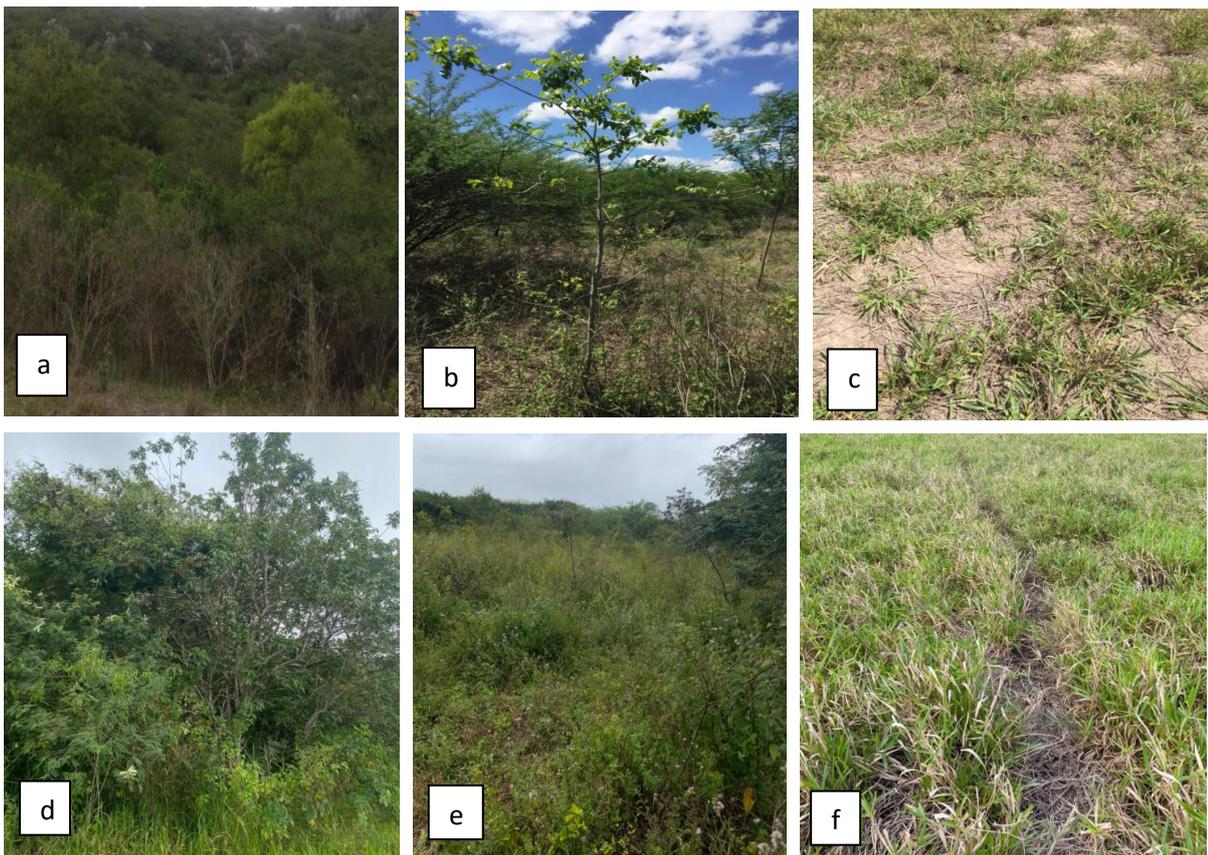
As coletas das amostras de solo ocorreram no início do período chuvoso (Março/2022) e seco (Setembro/2022), em três áreas com diferentes coberturas do solo (uma área de Caatinga preservada - controle, uma em processo de regeneração durante cinco anos e uma sob pastagem degradada). Em cada área foram abertas, ao acaso, 10 mini trincheiras com 50 cm de profundidade, onde foram coletadas amostras de solo em quatro camadas (0-5, 5-10, 10-30, 30-50 cm), contabilizando 10 amostras por área e por camada (Figura 3).

Para as análises biológicas, foram coletadas amostras apenas na camada de 0-5 cm, sendo estas transportadas e mantidas sob refrigeração no laboratório até a realização das análises.

3.3. Análises químicas do solo

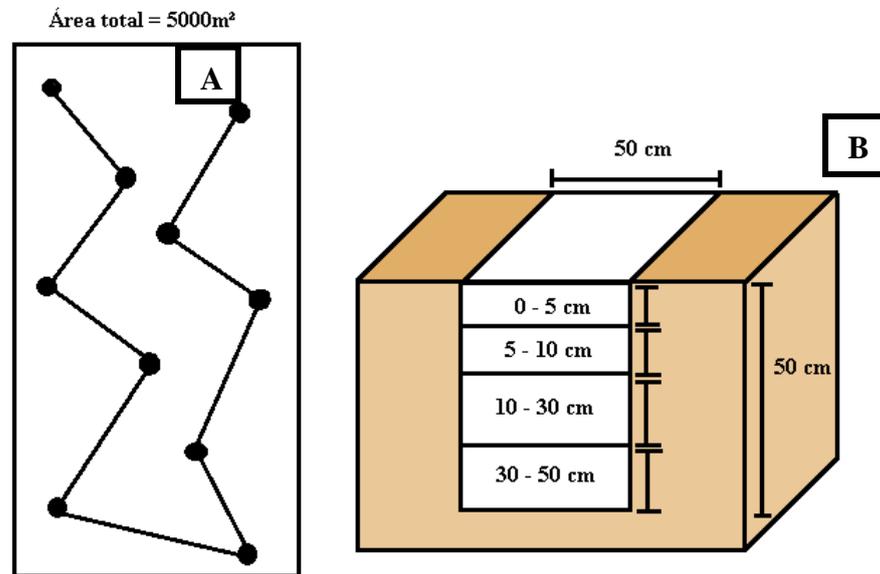
Nas amostras de solo com estrutura deformada, foi realizada a caracterização química do solo nas quatro camadas. Inicialmente, as amostras foram secas ao ar e destorroadas para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Na caracterização da salinidade, foram preparadas pastas de saturação e obtidos os extratos, sendo medidos a condutividade elétrica (CEes) e o pH; e determinados os cátions solúveis do solo (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) (EMBRAPA, 2009). Também foi realizada a medida de pH em água (1:2,5), cátions trocáveis extraídos por acetato de amônio (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), sendo Na^+ e K^+ dosados por fotometria de chama e Ca^{2+} e Mg^{2+} por espectrofotometria de absorção atômica. A capacidade de troca de cátions foi determinada pelo método do cátion índice, com acetato de sódio e acetato de amônio.

Figura 3. Área de Caatinga Nativa no período seco (a) e chuvoso (d); Área de revegetação no período seco (b) e chuvoso (e); Área de pasto degradado no período seco (c) e chuvoso (f)



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 4. Croqui da distribuição das amostras em ziguezague na área (A) e da profundidade das camadas a serem avaliadas nas mini-trincheiras em cada ponto de amostragem (B)



Fonte: Arquivo Pessoal

3.4. Análises físicas do solo

Para as análises físicas que exigiram amostras com estrutura preservada, foram coletadas amostras indeformadas, por meio de cilindro volumétrico, em todas as profundidades, sendo a densidade do solo avaliada pelo método do anel volumétrico. A densidade das partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico; a análise granulométrica (dispersão total) e argila dispersa em água, pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2011). A porosidade total será obtida pela determinação da massa de água necessária para saturar uma amostra de solo de volume total conhecido (EMBRAPA, 2017).

3.5. Determinação de carbono orgânico total (COT) e estoque de C total do solo

O teor de carbono orgânico total (COT) foi obtido pela oxidação por via úmida, com o dicromato de potássio em meio ácido como agente oxidante (EMBRAPA, 2017). Os estoques de C (EstC) foram calculados pela expressão (CARVALHO, 2009):

$$\text{EstC} = [\text{Cs} * \text{Ds} * \left(\frac{\text{Dref}}{\text{Ds}} * e\right)] / 10$$

onde,

EstC= estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg ha⁻¹);

Cs = teor de C orgânico total na profundidade amostrada (g kg⁻¹);

Ds= densidade aparente do solo na profundidade amostrada (kg dm^{-3});

Dref = densidade do solo para profundidade amostrada na área de referência (kg dm^{-3});

e = espessura da camada considerada (cm)

3.6 Índice do manejo do carbono (ICM)

O índice de manejo de carbono (IMC) analisa o estado de degradação do solo e pode ser utilizado como medida das alterações provocadas pelo manejo, quando comparado à situação considerada ideal. Valores inferiores a 100 são indicativos de impacto negativo das práticas de manejo sobre os teores da matéria orgânica e qualidade do solo. Com base nas mudanças nos teores de carbono, entre o manejo de referência e o manejo de uso, foi criado um índice de compartimento de carbono (ICC), calculado como: $\text{ICC} = \text{COT amostra} / \text{COT referência}$. O índice de labilidade (IL) foi determinado como: $\text{IL} = \text{L amostra} / \text{L referência}$. Estes dois índices foram usados para calcular o índice de manejo de carbono (IMC), obtido pela seguinte expressão: $\text{IMC} = \text{ICC} \times \text{IL} \times 100$ (BLAIR et al., 1995).

3.7. Carbono oxidado em permanganato de potássio

O carbono oxidado em permanganato de potássio foi quantificado por colorimetria, considerando-se a perda de KMnO_4 à medida que o carbono do solo era oxidado (RAMÍREZ et al., 2020; WEIL et al., 2003). Resumidamente, 2,5 g de TFSA peneirados foram misturados com 18 mL de água destilada e 2 mL de KMnO_4 $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ em tubos, que foram agitados e deixados em repouso por 10 minutos no escuro. Para interromper a reação, 0,5 mL de solução foi retirado e colocado em novo tubo juntamente com 49,5 mL de água destilada. Determinou-se a absorvância das soluções diluídas em espectrofotômetro ajustado para o comprimento de onda de 550 nm. A variação na concentração do KMnO_4 , estimada a partir da curva-padrão, foi usada para se estimar a quantidade de C oxidado (C lábil).

3.8. Análises biológicas

3.8.1. Carbono da biomassa microbiana

A análise do carbono de biomassa microbiana foi feita por irradiação-estratificação (MENDONÇA; MATOS, 2005). Este método é baseado no rompimento celular, liberando os compostos intracelulares para subsequente extração e quantificação do carbono. O carbono da biomassa microbiana é resultado da diferença entre as quantidades de carbono das amostras irradiadas e das não irradiadas. A solução extratora usada foi o sulfato de potássio (0,5

mol L⁻¹) e a quantificação foi feita por titulação com sulfato ferroso amoniacal (0,03 mol L⁻¹) de uma fração do extrato que foi oxidada com excesso de dicromato de potássio (0,066 mol L⁻¹) em meio ácido.

3.8.2. *Respirometria*

A análise da respirometria (evolução de CO₂ ou C mineralizável), baseia-se na captura de C-CO₂ emitido de uma amostra de solo em solução de NaOH (0,5 mol L⁻¹) e titulado com HCl (0,5 mol L⁻¹), tendo como objetivo medir o quanto de carbono é respirado pela microbiota do solo em determinado período de tempo.

As amostras foram coletadas e as análises realizadas com duas repetições, no qual foram pesadas e fechadas hermeticamente 50 g de TFSA. Foi realizado o ajuste da umidade do solo. Em cada recipiente contendo solo foram adicionados 30 mL de solução de NaOH (0,5 mol L⁻¹) para captura de CO₂ e outro contendo 30 mL de H₂O. Os recipientes foram hermeticamente fechados e incubados a 25 °C. O processo foi repetido uma vez, adicionando sempre uma nova solução de NaOH (0,5 mol L⁻¹). Para a titulação foram adicionados 10 mL de solução de BaCl₂ (0,05 mol L⁻¹) juntamente com 3 gotas do indicador fenolftaleína (1%), titulados com solução HCl (0,25 mol L⁻¹), onde se foi observada a mudança de cor, passando de violeta para incolor. O processo se repetiu em dias espaçados após o início da incubação.

O cálculo usado para a quantificação de C-CO₂ foi realizado a partir da equação:

$C\text{-CO}_2 \text{ (mg)} = (B - V) \times M \times 12 \times (v1/v2)$, onde:

B = volume do HCl no branco (mL);

V = volume de HCl gasto na amostra (mL);

M = concentração real do HCl (mol L⁻¹);

12 = peso equivalente do carbono;

v1 = volume total de NaOH usado na captura de CO₂;

v2 = volume total de NaOH usado na captura de CO₂;

O somatório dos valores obtidos em cada amostragem resulta na quantidade total de C-CO₂ produzido (MENDONÇA; MATOS, 2005).

3.8.3. *Quociente metabólico do solo (qCO₂)*

O quociente metabólico do solo (qCO₂) é a razão entre a respiração basal do solo por unidade de carbono da biomassa microbiana do solo (ANDERSON; DOMSCH, 1993). Pode ser usado como indicador de estresse quando a biomassa microbiana do solo é afetada. O

cálculo qCO_2 da respiração basal do solo foi avaliado a partir da equação: $qCO_2 = RBS/CBM$, sendo:

qCO_2 : Quociente metabólico do solo ($mg\ C-CO_2\ kg^{-1}\ CO_2\ dia^{-1}$);

RBS: Respiração basal do solo ($mg\ de\ C-CO_2\ kg^{-1}\ dia^{-1}$);

CBM: Carbono da biomassa microbiana do solo ($mg\ de\ CO_2\ kg^{-1}$).

3.8.4. Quociente microbiano ($qmic$) e quociente de mineralização ($qMin$)

O quociente microbiano ($qMic$) foi definido pela relação entre o carbono da biomassa microbiana (CBM) e o carbono orgânico total (COT), determinado pela equação: $qMic = CBM/COT$, sendo expresso em porcentagem (ANDERSON; DOMSCH, 1993). Onde, CBM - Carbono da biomassa microbiana ($mg\ kg^{-1}$); e COT - Carbono orgânico total ($mg\ kg^{-1}$).

O quociente de mineralização ($qMin$) é a razão entre o carbono mineralizado e o carbono orgânico total, determinado pela equação $qMin = Cmin/COT$ (% dia) (SHARMA; SINGHE; SODHI, 2020).

3.8.5. Substâncias húmicas

As substâncias húmicas (SH), metodologicamente, são fracionadas em função de sua solubilidade a diferentes valores de pH em: ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) e humina (HUM), no qual podem ser fracionadas química e fisicamente. Quando se estuda a dinâmica da matéria orgânica do solo é mais utilizado o fracionamento químico (MENDONÇA; MATOS, 2005).

O fracionamento químico das substâncias húmicas foi efetuado com base na solubilidade em meio ácido e alcalino, utilizando NaOH $0,1\ mol\ L^{-1}$ na relação solo:extrator de 0,2:10 p/v, onde as frações ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (H) foram separadas conforme o método de Stevenson (1994). Em seguida, foi determinado o C orgânico em cada fração conforme a EMBRAPA (1997). A porcentagem de C humificado foi obtida por meio do somatório das três frações; e o C não-humificado, pela diferença entre COT e C humificado. Por fim, foi calculada a relação AH:AF e C:N (BARRETO et al., 2008).

3.9. Análise estatística

A amostragem foi realizada em três áreas distintas e em quatro camadas, com 10 repetições por área, em dois períodos, totalizando 240 amostras. Os resultados foram submetidos à análise da variância, teste de Fisher com $p < 0,05$, em função das áreas. Para as variáveis que apresentarem diferença significativa pelo teste F, as médias observadas em cada cobertura do solo foram comparadas entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas no software Sisvar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Atributos físicos

A cobertura do solo influenciou nos resultados de areia fina, silte, densidade do solo e densidade das partículas (Tabela 1), com média de 91% areia, 4% de silte e 5% de argila, sendo classificado como solo de textura arenosa. A argila teve o maior coeficiente de variação, comparada com as demais frações granulométricas, isso representar maior variabilidade, podendo ser um indicativo de áreas com características do solo mais heterogêneas (Tabela 1). Solos arenosos costumam apresentar maior densidade devido a sua composição (LIMA et al., 2021). Nestes solos, os grãos de areia fina e silte ocupam os espaços vazios, obstruindo os poros formados pela areia mais grossa e causando uma estrutura mais densa (RIBEIRO et al., 2017).

Tabela 1. Fonte de variação para atributos físicos do solo, em relação às diferentes coberturas e profundidades analisadas

FV	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Ds ¹	Dp ²
Cobertura	0,90 ^{ns}	5,34 [*]	4,31 [*]	2,67 ^{ns}	17,12 [*]	15,51 [*]
Profundidade	2,94 [*]	5,29 [*]	1,35 ^{ns}	4,62 [*]	1,56 ^{ns}	1,43 ^{ns}
C x P	1,77 ^{ns}	0,99 ^{ns}	2,63 [*]	2,01 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,46 ^{ns}
CV	9,59	22,96	52,42	101,46	6,28	10,21

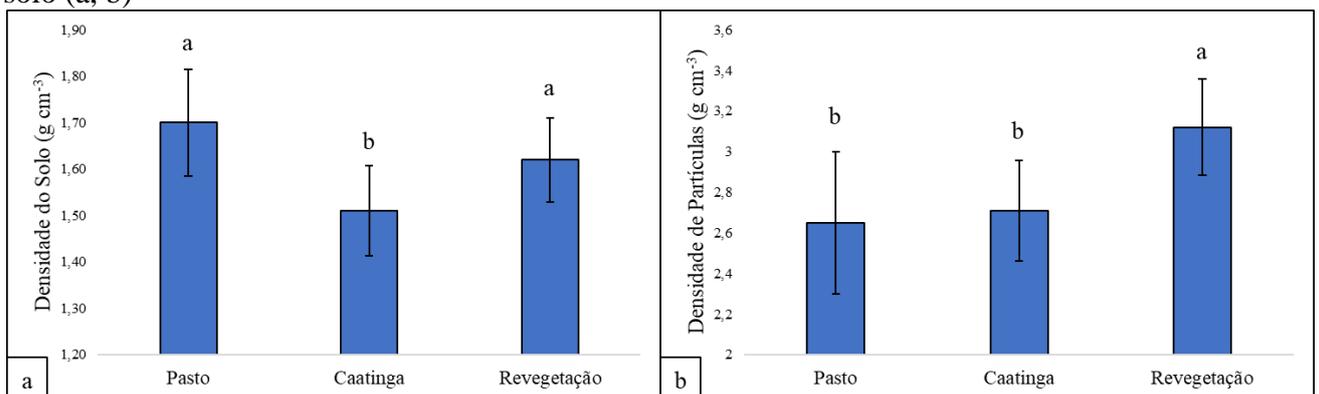
¹Densidade do solo; ²Densidade das partículas.

O uso e manejo do solo influencia a densidade do mesmo, podendo alterar a estrutura e o espaço poroso associados a ela, influenciando na porosidade, capacidade de aeração, quantidade da água disponível, permeabilidade e taxa de infiltração (SOUZA et al., 2019). Em estudo realizado por Sol et al. (2021), avaliando a influência das propriedades físicas e carbono orgânico em camadas do solo sob diferentes usos e manejos nos cerrados do Oeste da Bahia, Brasil, foi observado que houve diferença significativa na densidade do solo a 1% de probabilidade com relação aos sistemas de uso do solo. Em relação à profundidade verificou-se que não houve diferença significativa com relação à densidade do solo, também observado por Ramos et al. (2023), em estudo sobre estoque de carbono de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes usos.

Analisando os dados de densidade do solo (Figura 5), constata-se que as áreas de pasto e revegetação apresentaram valores maiores de densidade em relação à área sob caatinga nativa, e a área sob pasto degradado teve o maior valor. Corroborando com esse resultado, Troian et al. (2020) afirmaram que os maiores valores de densidade do solo nas áreas de pastagem evidenciam presença de camadas compactadas, como consequência do pisoteio animal nestas áreas. Por outro lado, a mata nativa (Caatinga) apresentou os menores valores de densidade do solo, possivelmente, por apresentar maior número de indivíduos arbóreos. Estes valores são mais baixos, também, pela ausência de qualquer tipo de manejo do solo ou pastejo animal nesta área devido à vegetação existente, condição que promove elevada presença de raízes e deposição de material orgânico (ALMEIDA et al., 2021; TROIAN et al., 2020).

A área sob revegetação apresentou maior densidade das partículas (Figura 5b) e maior teor de argila (Figura 6e) quando comparada com as demais coberturas do solo. De acordo com Lima et al. (2022), a densidade das partículas está associada com o tipo e qualidade dos componentes minerais e orgânicos, considerando a medida de todas as partículas do solo, excluindo a porosidade, ainda que possa ser afetada em razão de algumas frações de poros inclusos nos minerais.

Figura 5. Valores de densidade do solo e densidade de partículas sob diferentes coberturas de solo (a, b)

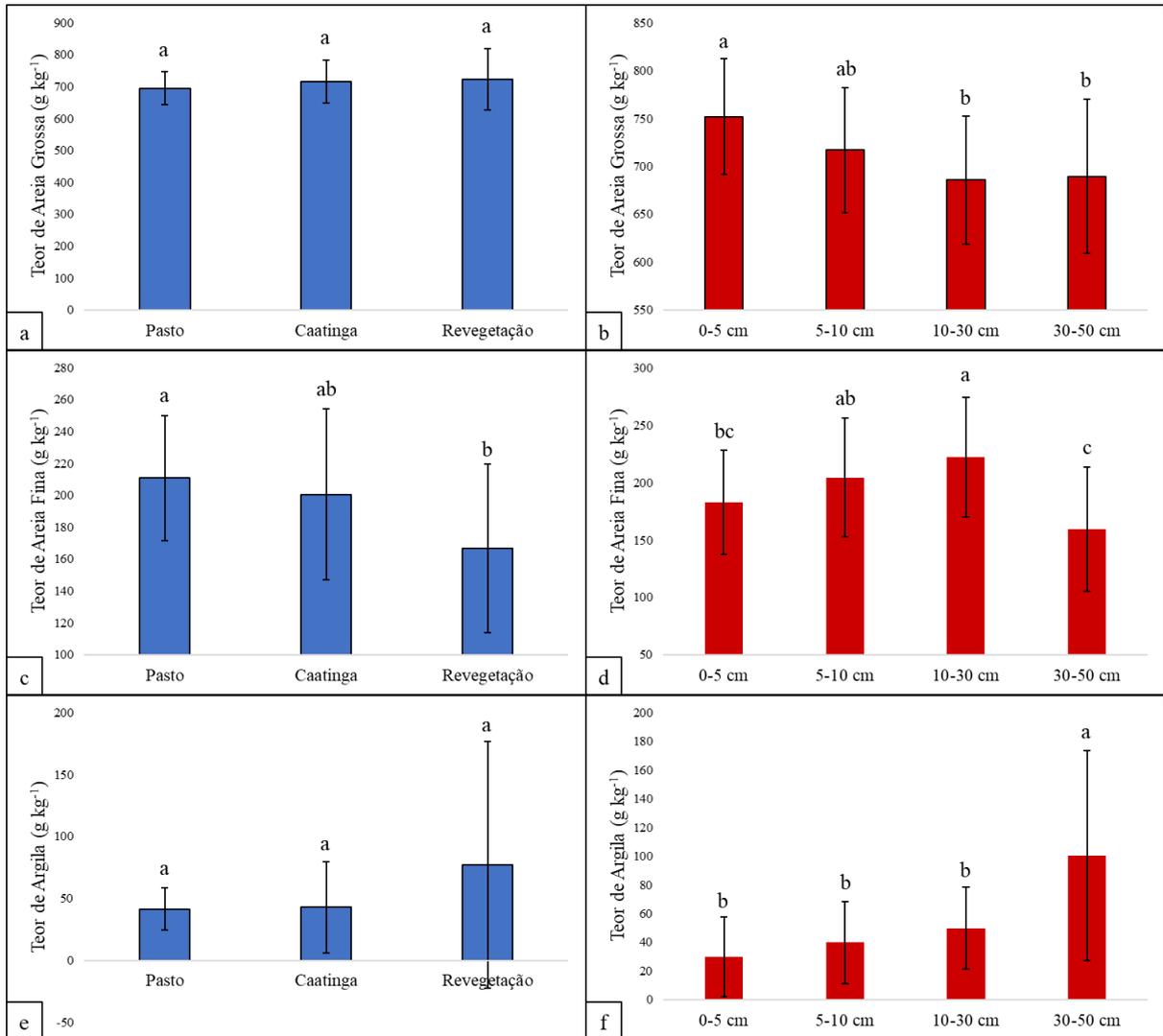


Os teores de areia grossa diferiram apenas com a profundidade (Tabela 1), já os teores de areia fina diferiram em função da cobertura e da profundidade, com maior valor no pasto degradado e na camada de 10-30 cm (Figura 6).

Quando comparadas com silte e argila, pelo seu tamanho, as partículas de areia possuem baixa superfície específica, retendo pouca água e nutrientes e não têm boa agregação. De acordo com Fushimi; Oliveira; Rodrigues (2023), como consequência, os solos arenosos são

soltos, vulneráveis à desintegração dos agregados e apresentam baixa fertilidade. O teor elevado de areia fina, associada a outros fatores, pode promover obstrução de poros, contribuindo para a formação de camadas adensadas (SILVA et al., 2002). A areia fina pode aumentar o risco de compactação do solo, especialmente em condições frequentes de pisoteio animal, levando ao fechamento dos poros, reduzindo a infiltração de água e o aumento do escoamento superficial e perda de nutrientes. Conforme observado em estudo, a presença de areia fina intensifica o processo de erosão, já que esses sedimentos são facilmente transportados pela água e pelo vento, aumentando a dispersão dos mesmos (FUSHIMI; OLIVEIRA; RODRIGUES, 2023). Em contrapartida, a depender do sistema de manejo e das características do solo, é possível uma boa agregação mesmo em solos arenosos (BORGES; CALONEGO; ROSOLEM, 2019; DAÍ et al., 2019; ROSA et al., 2018).

Figura 6. Teores de areia grossa em função da cobertura do solo (a) e em função da profundidade (b), de areia fina em função da cobertura do solo (c) e da profundidade (d) e de argila em função da cobertura do solo (e) e da profundidade (f)

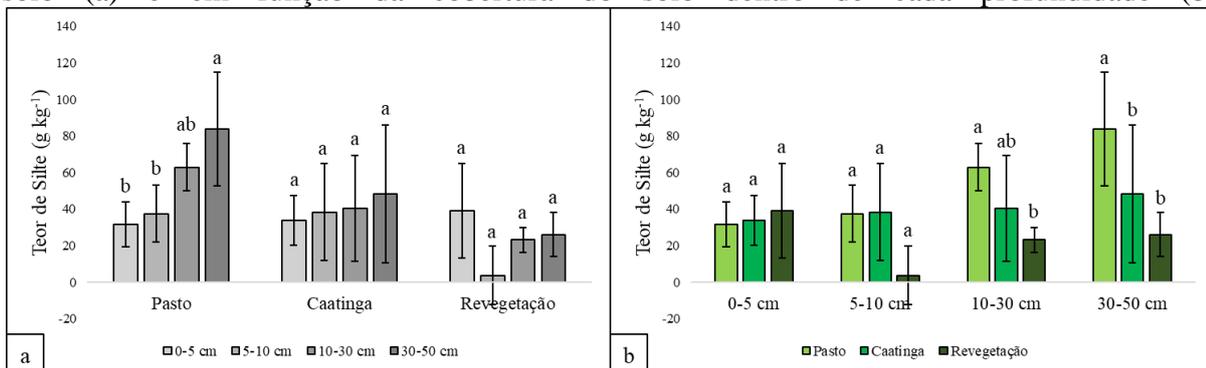


O teor de argila não diferiu em função da cobertura do solo (Figura 6e), porém apresentou diferença em relação à profundidade, com maior valor na camada de 30-50 cm (Figura 6f). A fração granulométrica de menor tamanho é a argila, isso facilita o deslocamento por translocação interna no perfil do solo ou até por escoamento superficial (LIMA et al., 2021). Corroborando com os resultados encontrados neste estudo, Oliveira et al. (2023) verificaram elevado teor de areia na superfície e o acréscimo de argila em profundidade, tendo em vista que os horizontes superficiais apresentam maior susceptibilidade ao intemperismo, com o quartzo como mineral geralmente predominante na fração areia e que tem alta resistência ao intemperismo. Vale ressaltar que o teor de argila foi maior na área sob revegetação. A presença de matéria orgânica no solo é responsável pela melhoria da sua qualidade estrutural, impactando significativamente na floculação da argila em solos arenosos (SILVA et al. 2021).

Quanto às partículas da fração silte, a interação entre a cobertura do solo e a profundidade, foi significativa (Figura 7). Este resultado pode ser atribuído a uma combinação de fatores, incluindo compactação do solo, composição orgânica, erosão e variação da distribuição das partículas ao longo do perfil do solo. O que também foi constatado em estudo de Ruth; Lennartz (2008), que afirmaram que os conteúdos de argila e silte aumentaram de acordo com a profundidade, indicando efeito da gravidade e processos erosivos.

Esta diferenciação foi observada na área sob pasto degradado, com maiores valores de silte na camada 30-50 cm, chegando a aproximadamente 80 g kg⁻¹ (Figura 7a). Nas áreas sob Caatinga e revegetação o teor de silte não diferiu entre as camadas avaliadas. De acordo com estudo realizado por Galindo et al. (2008), os teores de silte foram significativamente maiores nas áreas intensamente degradadas em comparação com ambientes conservados, apresentando maior tendência à formação de crostas superficiais.

Figura 7. Teores de silte em função da profundidade de coleta dentro de cada cobertura do solo (a) e em função da cobertura do solo dentro de cada profundidade (b)



A textura do solo e a cobertura vegetal desempenham papel essencial na estabilidade do solo, influenciando as características dos agregados e da porosidade, tornando a avaliação da textura do solo fundamental para compreensão de seu comportamento e manejo, garantindo soluções adequadas para o melhoramento das áreas (SILVA et al., 2024).

4.2. Atributos químicos

Foram observadas diferentes respostas dos atributos químicos dos solos aos fatores avaliados (época de coleta e cobertura do solo), com alguns sendo modificados pela interação desses fatores e outros pelo efeito individual. As tabelas de análise da variância por camada (0-5, 5-10, 10-30 e 30-50 cm) estão nos anexos.

Em todas as camadas de solo avaliadas, os valores de CE foram similares entre as duas épocas de coleta, apesar de terem sido detectadas variações nos teores de alguns cátions trocáveis e solúveis em função da coleta na época úmida ou seca (Tabela 2). Especialmente o cálcio, nas formas solúvel e trocável, aumentou na época seca em quase todas as camadas. Já o potássio trocável teve comportamento inverso, com menores teores na época seca em todas as camadas e o magnésio trocável na camada de 0-5 cm. Não foram observadas diferenças para a maioria dos resultados de pH, CE, cátions trocáveis e solúveis entre a época úmida e a seca. Isso pode ser explicado pela grande variabilidade do solo nesta área, com elevados valores de coeficiente de variação, dificultando a detecção dessas mudanças.

Tabela 2. Atributos químicos do solo em função da época de coleta nas camadas avaliadas

Profundidade	Época	pH _{H2O}	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
cm		1:2,5	dS m ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹				mmol _c L ⁻¹			
0-5	Úmida	6,24 a	1,08 a	19,71 b	9,08 a	5,47 a	4,58 a	2,13 b	2,74 a	2,69 a	3,89 a
	Seca	5,69 b	1,45 a	31,64 a	6,46 b	3,29 b	4,85 a	4,21 a	4,76 a	2,92 a	3,23 a
5-10	Úmida	5,94 a	1,25 a	12,48 b	5,99 a	3,98 a	3,77 a	2,23 a	3,39 a	1,86 a	3,87 a
	Seca	5,55 b	0,93 a	25,92 a	5,39 a	1,98 b	2,05 a	3,13 a	3,64 a	2,01 a	2,63 a
10-30	Úmida	5,63 a	1,23 a	7,29 b	4,22 a	3,28 a	3,02 a	1,78 b	2,76 a	0,99 a	4,05 a
	Seca	5,65 a	1,19 a	29,36 a	5,97 a	1,52 b	1,93 a	4,03 a	3,76 a	1,57 a	3,15 a
30-50	Úmida	5,81 a	1,46 a	7,16 b	3,94 a	3,30 a	3,01 a	1,78 b	2,75 a	0,98 a	4,04 a
	Seca	5,79 a	1,18 a	29,37 a	5,97 a	1,52 b	1,92 a	4,02 a	3,76 a	1,57 a	3,14 a

¹Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre a época dentro de cada camada de solo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

No entanto, ao se avaliar os mesmos atributos em função da cobertura do solo, diferenças mais consistentes puderam ser verificadas (Tabela 3). O pH na área sob vegetação nativa de caatinga variou de 5,27 a 5,97, não apresentando diferença das demais coberturas vegetais nas camadas superficiais, assim como os valores obtidos por Castro e Santos (2020) em seu estudo sobre salinidade do solo e risco de desertificação na região semiárida. Estes autores destacam que os valores podem ser explicados devido à homogeneidade das caatingas que se diferenciam apenas em espécies arbóreas ou arbustivas sem grandes alterações decorrentes de ações antrópicas. Entretanto, nas camadas mais profundas (10-30 e 30-50 cm), o pH da área sob caatinga nativa teve menores valores que os solos das áreas sob pastagem e revegetação (Tabela 3).

Por outro lado, os outros atributos químicos estudados, em geral, foram mais altos na área sob revegetação. Com maior concentração de sais (CE), acompanhada pelo acúmulo dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ , solúveis e trocáveis (Tabela 3). Vale ressaltar que a área sob revegetação estava degradada e sem cobertura vegetal, tendo sido implantado experimento de recuperação com o cultivo de espécies arbóreas nativas em agosto de 2016. Mesmo com desenvolvimento lento, estas plantas conseguiram se estabelecer na área, contribuindo para a melhoria das condições gerais e possibilitando o desenvolvimento da vegetação espontânea. Mas o processo de recuperação é lento e deve ser mantido por muito tempo até que resultados possam ser alcançados. Considerando a área sob caatinga como padrão, a CE da área sob revegetação foi 143% maior na camada de 0-5 cm e chegou a ser 700% mais alta na camada de 30-50 cm de profundidade. A área sob pastagem está em situação intermediária, entre a de vegetação nativa de caatinga e a área sob revegetação.

Tabela 3. Atributos químicos em função da cobertura do solo nas camadas avaliadas

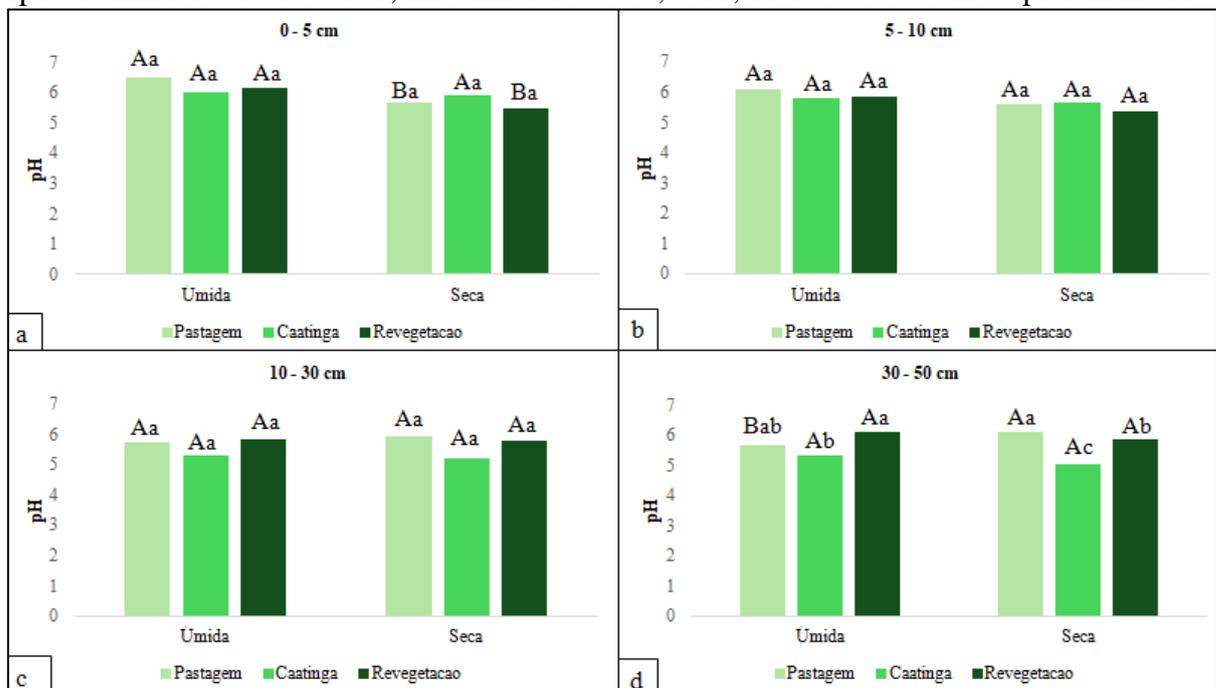
Profundidade	Cobertura	pH _{H₂O} (1:2,5)	CE ¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
cm			dS m ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹			mmol _c L ⁻¹				
0-5	Pastagem	6,10 a	1,01b	16,92b	4,26b	4,49a	2,64b	2,72 ^a	1,04b	2,6ab	3,97ab
	Caatinga	5,97 a	0,81b	31,13a	8,10 ^a	3,69a	2,48b	2,54 ^a	3,11ab	1,51b	1,92b
	Revegetação	5,84 a	1,97a	28,98a	10,95 ^a	4,96a	9,02 ^a	4,25a	7,11a	4,27a	4,78a
5-10	Pastagem	5,87 a	0,71b	15,73 b	3,92 b	3,16a	2,07ab	2,62a	1,81b	1,60b	2,68b
	Caatinga	5,74 a	0,46b	18,34ab	4,26 b	2,91a	1,76 b	1,90a	1,21b	1,32b	1,54b
	Revegetação	5,63 a	2,10a	23,54a	8,88 a	2,86a	4,92 a	3,52a	7,52a	2,89a	5,53a
10-30	Pastagem	5,85 a	0,60b	14,49 b	3,68 b	2,79a	2,01 a	3,02ab	1,32a	1,03a	2,05a
	Caatinga	5,27b	0,44b	20,02ab	4,74ab	2,50a	1,52 a	1,80 b	3,29a	1,07a	1,78a
	Revegetação	5,80 a	2,59a	20,47 a	6,88 a	1,91a	3,90 a	3,90 a	5,17a	1,74a	6,97a
30-50	Pastagem	6,10 a	0,63b	14,49b	3,68 a	2,79a	2,01 a	3,02ab	1,32a	1,03a	2,05b
	Caatinga	5,29b	0,38b	20,02ab	4,74 a	2,50a	1,51 a	1,79 b	3,28a	1,06a	1,77b
	Revegetação	6,01 a	3,04a	20,95 a	6,58 a	1,87a	3,92 a	3,90 a	5,16a	1,74a	6,96a

¹Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre as coberturas dentro de cada camada de solo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Na caatinga nativa, nas épocas seca e chuvosa, o valor de pH variou de 5,14 a 6,03. De acordo com Rezende et al. (2022), as áreas de vegetação nativa preservada costumam ter pH do solo ácido devido à mineralização da matéria orgânica do solo e à liberação exsudatos ácidos pelo sistema radicular das plantas. No geral, os valores de pH foram próximos quando comparados sob diferentes manejos, entretanto, houve diferença significativa na camada de 30-50 cm, apresentando aumento nas áreas de pasto degradado e revegetação tanto na época de chuva, quanto na de seca (Figura 8).

Resultados semelhantes foram encontrados em pesquisa sobre a avaliação da salinidade do solo em diferentes condições de uso da terra na região semiárida do Nordeste do Brasil por Pessoa et al. (2022). As áreas de pastagem e revegetação também apresentaram diferença significativa na profundidade 0-5 cm, quando comparadas em diferentes épocas (Figura 8), que pode ser causado pelo aumento de sódio e potássio na época chuvosa, como também pelo aumento do valor de sódio sob revegetação na época seca (Tabelas 4 e 5).

Figura 8. Potencial hidrogeniônico do solo em função de diferentes coberturas do solo nas épocas úmida e seca de coleta, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-30 e 30-50 cm de profundidade



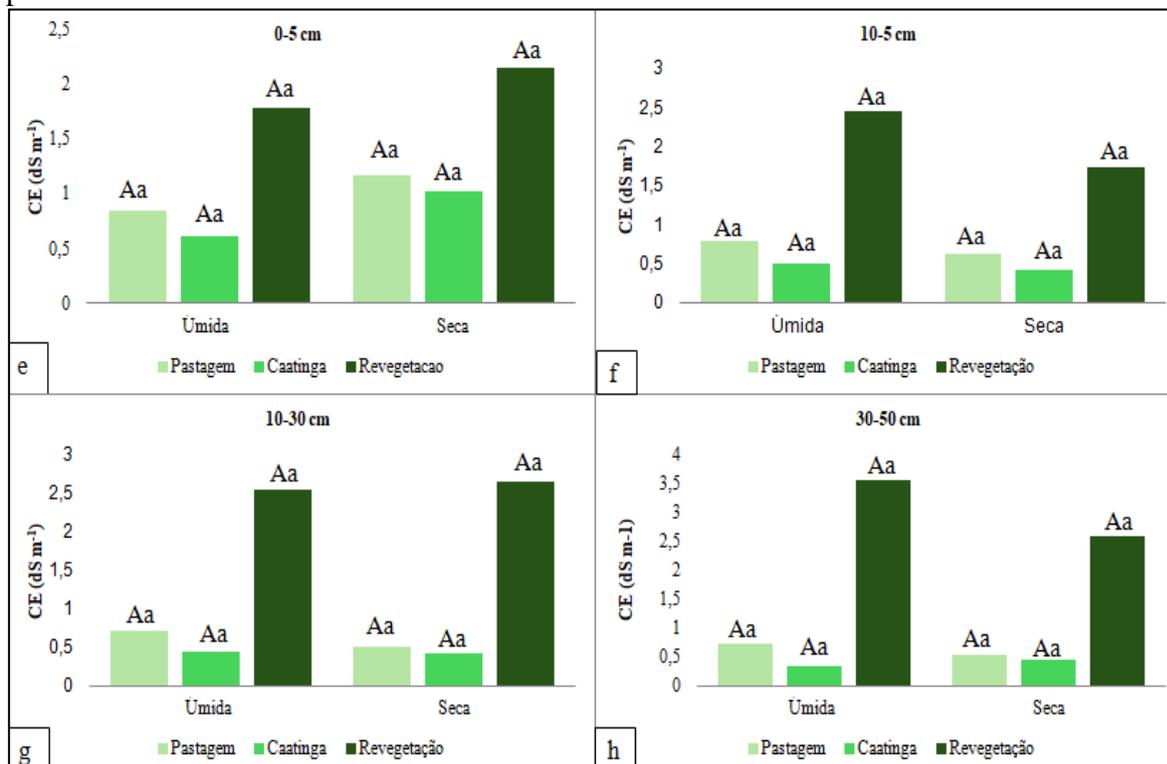
Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente entre as épocas de coleta (úmida e seca), e pela mesma letra minúscula entre as coberturas do solo, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O aumento do pH do solo pode ocorrer devido a um desequilíbrio na composição iônica causado pelo excesso de sódio, carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (PESSOA et al., 2022;

SUNKARI et. al., 2021; ZHANG, et. al., 2020). O pH do solo é de suma importância para as plantas, devido a sua influência sobre a disponibilidade dos elementos essenciais à nutrição, atividade de microrganismos, solubilidade de elementos, condições físicas do solo e, conseqüentemente, sobre a habilidade de competição entre diferentes espécies de plantas (SILVA et al., 2020).

Entre as épocas úmida e seca de coleta, a condutividade elétrica não diferiu significativamente (Figura 9), apresentando valores de 0,32 a 3,55 e de 0,42 a 2,65 dS m^{-1} para época úmida e seca, respectivamente. Apesar destes valores não superarem os limites que classificam os solos como salinos, já foram detectados aumentos da CE com a degradação pelo acúmulo de sais, indicando que o processo de salinização está em curso, podendo dificultar o desenvolvimento de espécies mais sensíveis aos sais. A CE do extrato de saturação tem que ser maior ou igual a $4,0 \text{ dS m}^{-1}$ para que o solo seja considerado salino (USSL, 1954).

Figura 9. Condutividade elétrica do solo em função de diferentes coberturas do solo nas épocas úmida e seca de coleta, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-30 e 30-50 cm de profundidade



Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente entre as épocas de coleta (úmida e seca), e pela mesma letra minúscula entre as coberturas do solo, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Quando avaliada a interação entre as épocas de coleta (úmida e seca) do solo sob diferentes manejos (pasto degradado, caatinga nativa e revegetação), também foi

possível observar aumento nas concentrações de Ca^{2+} trocável na época de seca, em que a área sob revegetação apresentou os maiores valores deste cátion (Tabela 4). Por outro lado, foi observado que os valores de K^+ na camada de 0-5 cm responderam de forma inversa, diferindo significativamente, onde a época úmida apresentou valores mais elevados. Já na época de seca, a diferença foi entre os manejos, no qual revegetação > pastagem > caatinga.

Os valores de Na^+ também divergiram entre épocas e manejos diferentes, com destaque para a época seca, em que houve um aumento expressivo nos teores de Na^+ trocável na área sob revegetação (Tabela 4). Estes resultados se justificam sabendo-se do histórico de degradação desta área, que vem sendo recuperada e monitorada há alguns anos. Na solução do solo na camada de 0-5 cm, Mg^{2+} e K^+ foram superiores na área sob revegetação (Tabela 5), no entanto, o Na^+ concentrou-se muito mais na época seca, sendo esta a época de menor disponibilidade de água e maior dificuldade de sobrevivência de plantas nas áreas de semiárido. Além da restrição hídrica, isso pode indicar maior competição catiônica entre o Na^+ e os nutrientes, com este superando os demais. Mesmo sem caracterizarem diferença significativa, os teores de Na^+ solúvel mais elevados que os outros cátions pode conduzir as plantas ao risco de desbalanço nutricional por esta competição.

Tabela 4. Cátions trocáveis em função de diferentes coberturas do solo nas épocas de coleta úmida e seca, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-30 e 30-50 cm de profundidade

Profundidade cm	Cobertura	Ca ²⁺		Mg ²⁺		K ⁺		Na ⁺	
		Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca
		mmol _c kg ⁻¹							
0-5	Pastagem	12,89Aa	20,95Aa	5,80 Aa	2,71Aa	6,25Aa	2,74Bab	5,06Aa	0,21 Bb
	Caatinga	26,57Aa	35,70Aa	9,21 Aa	6,99Aa	5,15Aa	2,24Bb	4,21Aa	0,76 Ab
	Revegetação	19,68Aa	38,28Aa	12,24Aa	9,67Aa	5,02Aa	4,89Aa	4,48Ba	13,57Aa
5-10	Pastagem	9,96 Ba	21,49Ab	3,92 Aa	3,93Aa	4,21Aa	2,11 Aa	4,06Aa	0,07 Bb
	Caatinga	15,03Ba	21,64Ab	5,87 Aa	2,66Aa	4,22Aa	1,60 Aa	3,48Aa	0,04 Ab
	Revegetação	12,45Ba	34,63Aa	8,17 Aa	9,58Aa	3,50Aa	2,23 Aa	3,78Aa	6,05 Aa
10-30	Pastagem	7,40 Ba	21,59Ab	3,77 Aa	3,59Aa	4,20Aa	1,38 Aa	3,60Aa	0,42 Ab
	Caatinga	6,55 Ba	33,48Aa	2,70 Aa	6,78Aa	3,40Aa	1,60 Aa	2,91Aa	0,12 Ab
	Revegetação	7,93 Ba	33,01Aa	6,21 Aa	7,55Aa	2,23Aa	1,60 Aa	2,56Aa	5,24 Aa
30-50	Pastagem	7,41 Ba	21,57Ab	3,76 Aa	3,58Aa	4,19Aa	1,39 Aa	3,60Aa	0,42 Ab
	Caatinga	6,56 Ba	33,49Aa	2,71 Aa	6,78Aa	3,41Aa	1,59 Aa	2,91Aa	0,12 Ab
	Revegetação	7,54 Ba	33,02Aa	5,49 Aa	7,55Aa	2,18Aa	1,59 Aa	2,46Aa	5,24 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente entre as épocas de coleta (úmida e seca), e pela mesma letra minúscula entre as coberturas do solo, ambas dentro de cada camada de solo, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Avaliações cuidadosas das proporções de Na^+ trocável em relação à CTC dos solos, pelo cálculo da PST (porcentagem de sódio trocável), e do Na^+ solúvel com o cálculo da RAS (relação de adsorção de sódio), devem ser realizadas para que seja possível entender este equilíbrio entre os cations nestes solos. Só assim, seria possível agir na melhoria das condições para o cultivo de plantas.

Tabela 5. Cátions solúveis do solo sob o efeito de diferentes coberturas do solo em distintas épocas de coleta, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-30 e 30-50 cm de profundidade

Profundidade	Cobertura	Ca ²⁺		Mg ²⁺		K ⁺		Na ⁺	
		Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca
cm		mmol _c L ⁻¹							
0-5	Pastagem	1,38Aa	4,07Aa	1,27Aa	0,81 Ab	3,16Aa	2,10Ab	4,11Aab	3,83 Aa
	Caatinga	1,67Aa	3,41Aa	1,38Aa	4,84Aab	1,15Aa	1,88Ab	1,95 Ab	1,89 Aa
	Revegetação	3,34Aa	5,16Aa	5,59Aa	8,64 Aa	3,77Aa	4,78Aa	5,60 Aa	3,96 Aa
5-10	Pastagem	1,51Aa	3,73Aa	1,35Aa	2,28 Aa	2,04Aa	1,16Aa	3,26 Aa	2,09 Aa
	Caatinga	1,39Aa	2,41Aa	1,21Aa	1,20 Aa	0,78Aa	1,87Aa	1,63 Aa	1,45 Aa
	Revegetação	3,78Aa	3,26Aa	7,60Aa	7,45 Aa	2,77Aa	3,01Aa	6,71 Aa	4,35 Aa
10-30	Pastagem	1,38Aa	4,66Aa	1,34Aa	1,31 Aa	1,25Aa	0,81Aa	2,18 Aa	1,92 Aa
	Caatinga	1,15Aa	2,44Aa	0,87Aa	5,71 Aa	0,57Aa	1,57Aa	1,25 Aa	2,30 Aa
	Revegetação	2,83Aa	4,98Aa	6,07Aa	4,27 Aa	1,15Aa	2,33Aa	8,71 Aa	5,22 Aa
30-50	Pastagem	1,37Aa	4,65Aa	1,33Aa	1,30 Aa	1,24Aa	0,81Aa	2,18 Aa	1,91 Aa
	Caatinga	1,15Aa	2,44Aa	0,86Aa	5,71 Aa	0,56Aa	1,57Aa	1,25 Aa	2,30 Aa
	Revegetação	2,82Aa	4,98Aa	6,06Aa	4,27 Aa	1,15Aa	2,33Aa	8,71 Aa	5,21 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente entre as épocas de coleta (úmida e seca), e pela mesma letra minúscula entre as coberturas do solo, ambas dentro de cada camada de solo, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4.3. Atributos biológicos e pools de carbono

Da mesma maneira que os atributos químicos do solo, os biológicos alternaram nas respostas em relação aos fatores examinados (época de coleta e cobertura do solo), com a RB sendo alterada pela interação entre os fatores, outros influenciados individualmente por um dos fatores (CBM e qMic) e outros sem serem influenciados por nenhum deles (q-CO₂ e q-Min) (Tabela 6). Na camada superficial, tanto o carbono da biomassa microbiana quanto o quociente microbiano variaram significativamente entre as épocas de coleta (úmida e seca), mas a respiração basal sofreu influencia da interação entre as épocas de coleta e diferentes manejos, sendo possível avaliar com maior detalhe (Figura 10).

Tabela 6. Análise de variância para atributos biológicos do solo na camada de 0-5 cm de profundidade

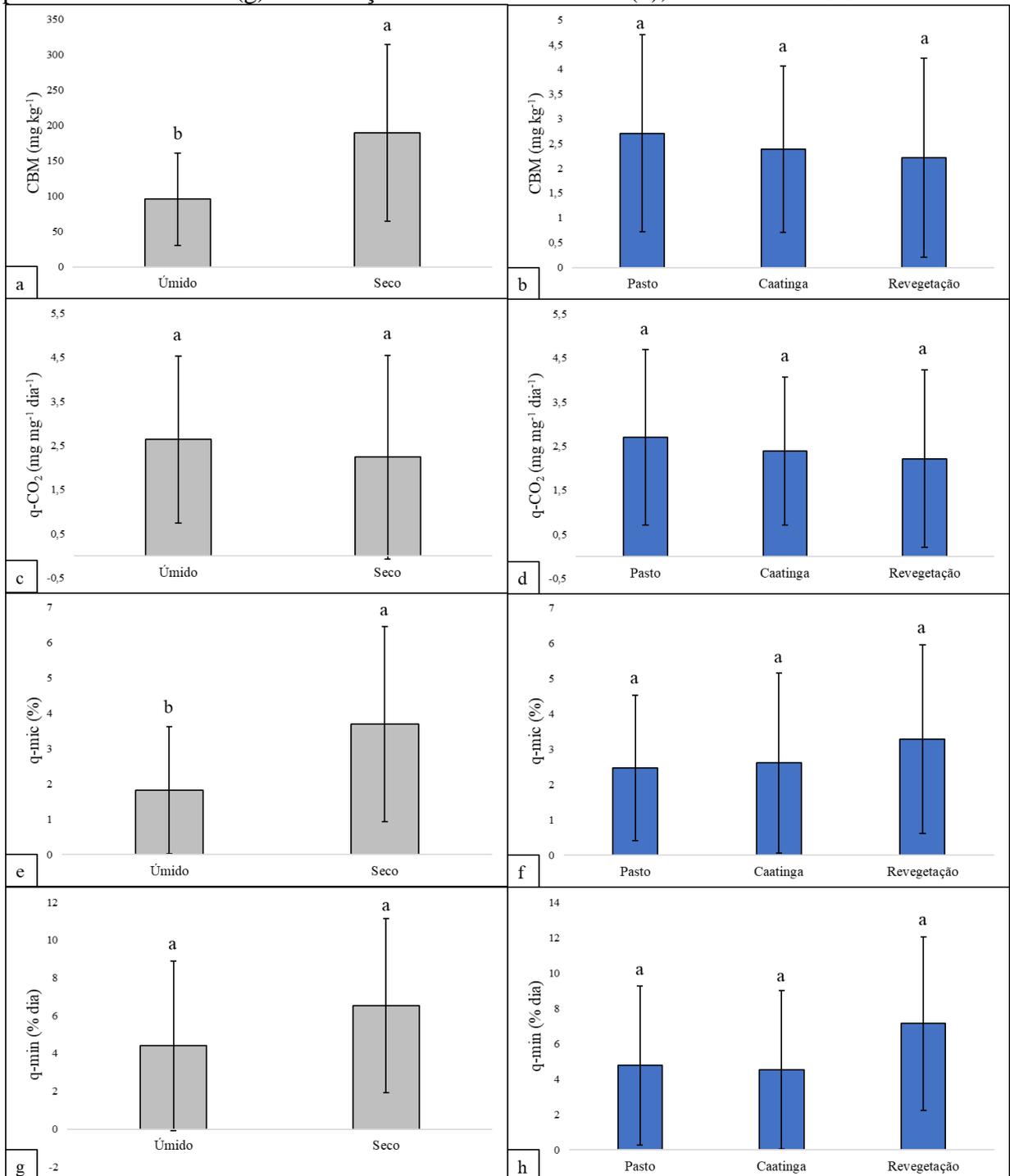
FV	CBM ¹	RB ²	q-CO ₂ ³	q-mic ⁴	q-min ⁵
Coleta	12,26*	7,48*	0,46 ^{ns}	8,15*	3,28 ^{ns}
Cobertura	1,19 ^{ns}	4,38*	0,22 ^{ns}	0,51 ^{ns}	2,05 ^{ns}
Col x Cob	1,84 ^{ns}	5,02*	1,76 ^{ns}	1,54 ^{ns}	0,64 ^{ns}
CV (%)	68,59	35,61	85,43	84,30	81,91

¹Carbono da biomassa microbiana, ²Respiração basal, ³Quociente metabólico, ⁴Quociente microbiano, ⁵Quociente de mineralização. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Fisher; ^{ns}Não significativo.

Os atributos biológicos foram similares em função da cobertura do solo. Em diferentes épocas de coleta, o carbono da biomassa microbiana (CBM) e o quociente microbiano (q-mic) apresentaram diferenças estatísticas, ambos com maiores teores na época de seca (Figura 10). Corroborando com os resultados, em estudo sobre estoque de carbono da biomassa microbiana do solo e sua relação com fatores climáticos e ambientais, DAS et al. (2023) observaram que a CBM mostrou tendência crescente de acordo com o aumento da temperatura média anual, enquanto diminuía significativamente com o aumento da precipitação. Ressaltaram, ainda, que fatores como o impacto das chuvas irregulares e elevadas na época do inverno, podem eliminar a população microbiana ou os microrganismos do solo, além da entrada de detritos no solo e variações na produtividade da vegetação, afetando os estoques de carbono da biomassa.

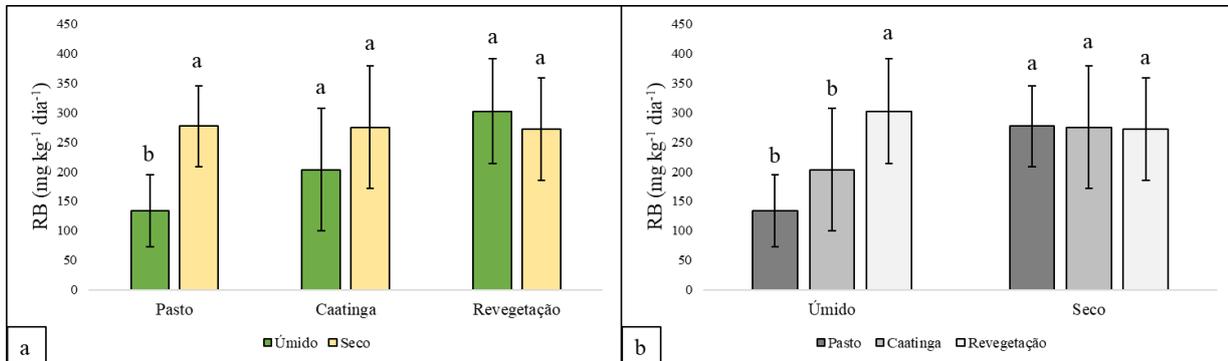
Quando avaliada a interação entre as duas épocas de coleta do solo e suas coberturas, a respiração basal na área de pasto degradado foi maior na época seca do que na época úmida (Figura 11). A área sob revegetação apresentou maiores valores de respiração basal na época úmida, no entanto, isso não foi verificado na época seca (Figura 11b). Em estudo sobre estoque de carbono e emissão de CO₂ em áreas manejadas e nativa na Região Cone-Sul de Mato Grosso do Sul, realizado por Santos et al. (2021), foi possível observar picos de C-CO₂ na área sob revegetação. Os autores denominaram este fenômeno de efeito *priming*, onde há estimulação da atividade microbiana a partir da adição de resíduos orgânicos e/ou maior disponibilidade de MOS prontamente decomponível, favorecendo a aceleração da decomposição da MOS e, conseqüentemente, aumentando a evolução de C-CO₂ no sistema.

Figura 10. Carbono da biomassa microbiana no solo em função do período úmido e seco (a) e em função da cobertura do solo (b); quociente metabólico em função do período úmido e seco (c) e em função da cobertura do solo (d); quociente microbiano em função do período úmido e seco (e) e em função da cobertura do solo (f); quociente de mineralização em função do período úmido e seco (g) e em função da cobertura do solo (h), na camada de 0-5 cm



Letras iguais indicam semelhança entre os períodos úmido e seco dentro de cada cobertura do solo (a) e entre as coberturas do solo dentro de cada período (úmido e seco), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 11. Respiração basal do solo em função das épocas de coleta (úmida e seca) dentro das coberturas do solo avaliadas (a) e em função das coberturas nas épocas de coleta úmida e seca (b)



Letras iguais indicam semelhança entre os períodos úmido e seco dentro de cada cobertura do solo (a) e entre as coberturas do solo dentro de cada período (úmido e seco), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para os solos deste estudo, foram observadas diferentes respostas do carbono orgânico e seus compartimentos (COT, COP, FAF, FAH, HUM) aos fatores avaliados (época de coleta e cobertura do solo), sendo alguns modificados pela interação dos fatores e outros pelo efeito individual. As tabelas de análise da variância por camada (0-5, 5-10, 10-30 e 30-50 cm) estão nos anexos.

As alterações nos valores de carbono orgânico total ocorrem primeiramente na camada mais superficial (SANTOS et al., 2021), por ser esta ser a camada mais próxima ao sistema radicular das plantas e sua microbiota associada, bem como pela maior facilidade de trocas gasosas com a atmosfera. A camada 0-5 cm foi a única a apresentar diferença significativa no conteúdo de COT em relação às épocas de coleta do solo (Figura 12a). O aumento dos teores de COT na época úmida pode ser explicado devido à restauração da vegetação e aumento do material orgânico (TROIAN et al., 2020). De acordo com Zhang (2023), os resultados de carbono orgânico do solo foram significativamente maiores no inverno, corroborando com os resultados apresentados. E ainda, de acordo com Gomes et al (2019) o fator mais importante para o acúmulo de COT foi o climático (soma da temperatura média mensal e precipitação), sugerindo efeito cumulativo de longo prazo.

Entretanto, estes valores são muito baixos em comparação a solos de outras regiões. Em estudo sobre os principais solos do semiárido, Gama e Jesus (2020) relataram que o COT variou de 7,6 a 12,2 g.kg⁻¹ entre as diferentes classes de solo estudadas nessa área. Ainda afirmaram que, de modo geral, os solos do semiárido possuem baixos teores de carbono orgânico total. Os teores de carbono refletem diretamente nos valores de estoque de carbono

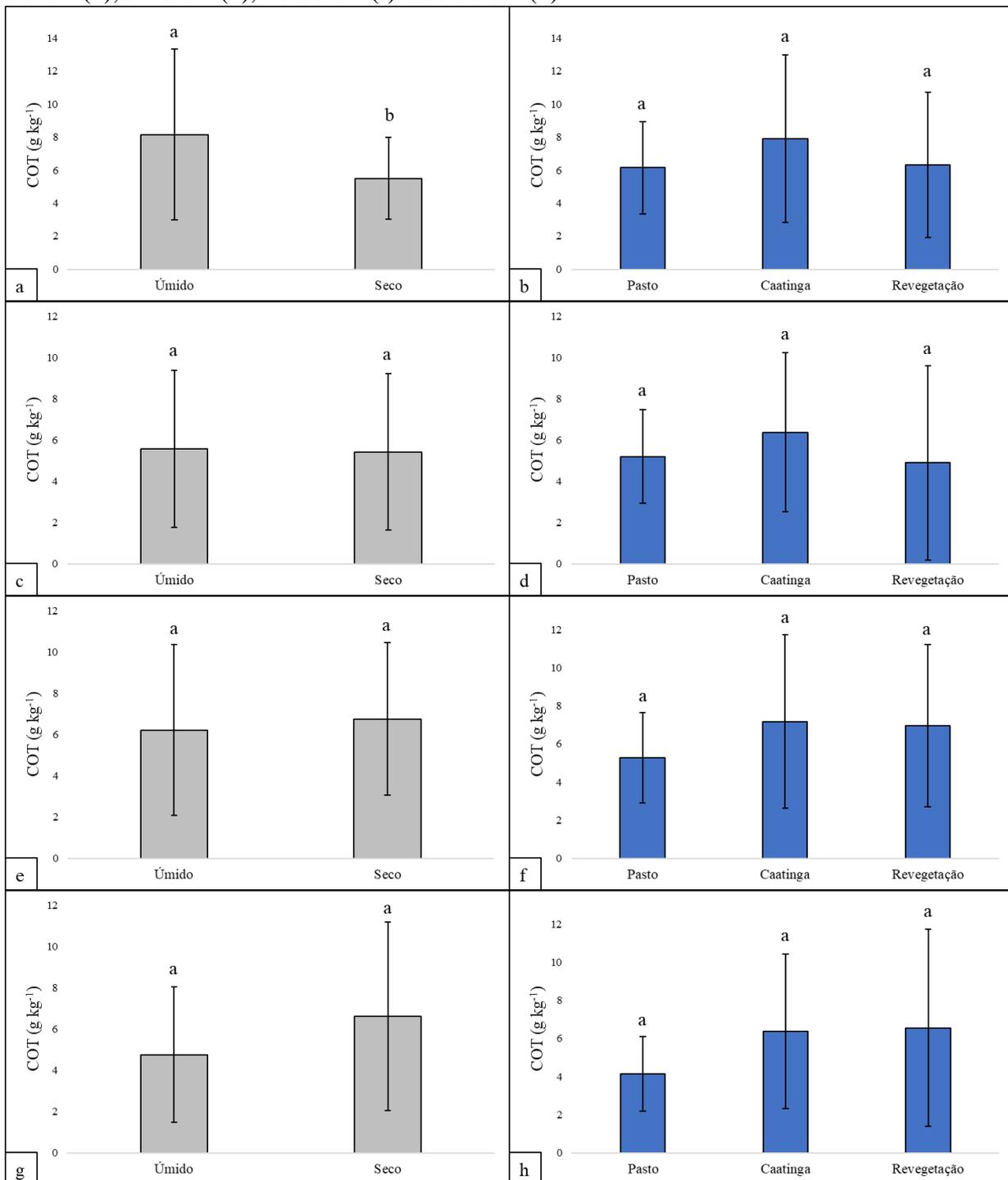
dos solos. Os maiores teores de estoque de COT ocorrem no sul do Brasil e no noroeste da Amazônia, enquanto os menores ocorreram no nordeste do Brasil, caracterizado pelo bioma caatinga onde possui baixa pluviosidade anual, altas temperaturas e condições de solo pouco intemperizados, cobertos por plantas xeromórficas (MAIA et al., 2008; GOMES et al., 2019; SANTOS et al., 2021).

Por outro lado, os teores de COT não foram modificados pela cobertura do solo (Figura 12b, 12d, 12f e 12h) Isso pode indicar a baixa capacidade de retenção de carbono deste solo, uma vez que mesmo na área sob vegetação nativa de caatinga os teores são baixos. Contudo, ressalta-se a grande variabilidade dos dados, característica de solos degradados do semiárido. Esta variabilidade pode ter dificultado a observação de diferenças significativas entre a área sob pasto e as de caatinga e revegetação. Lima et al (2023), apresentaram valores de COT variando entre 8,2 e 17,7 g.kg⁻¹no solo semiárido nordestino. A Caatinga, quando comparada com outras formações, naturalmente possui menor potencial de produção e biomassa vegetal, fonte primária da matéria orgânica do solo (MOS) e, conseqüentemente, do carbono orgânico (ARAÚJO FILHO et al., 2022). Ainda de acordo com os autores, apesar das condições adversas para acúmulo de CO em larga escala, não podem ser menosprezados os estoques desse elemento nos solos da região semiárida.

O aumento nos teores de COT é fundamental quando se trata da recuperação de áreas degradadas, induzindo à maior disponibilidade de nutrientes e melhoria nos atributos do solo, com ligação direta com a qualidade do solo (DENARDIN et al., 2019). Vale ressaltar que a recuperação dos conteúdos originais de carbono orgânico no solo da Caatinga é um processo lento, estabelecido na escala de décadas (ARAÚJO FILHO et al., 2018).

O carbono oxidado em permanganato de potássio é um indicador apropriado para identificar mudanças na dinâmica da matéria orgânica e qualidade do solo (OLIVEIRA et al., 2018). Para os solos deste estudo, na camada 0-5 cm, foi possível observar que a área sob caatinga, seguida da área de revegetação, apresenta maior valor, que pode ser explicado pelo maior aporte de matéria orgânica, resíduos vegetais e revestimento do solo nestas áreas, diferindo significativamente da área de pasto degradado (Figura 13b). Geralmente os solos sob florestas preservadas possuem maior quantidade de macroagregados que protegem o COP pela oclusão física dentro dos agregados, resultando no sequestro do carbono (TOMAZ et al., 2023).

Figura 12. Carbono orgânico total em função da época de coleta do solo nas camadas 0-5 cm (a), 5-10 cm (c), 10-30 cm (e) e 30-50 cm (g); e em função da cobertura do solo na camada de 0-5 cm (b), 5-10 cm (d), 10-30 cm (f) e 30-50 cm (h)

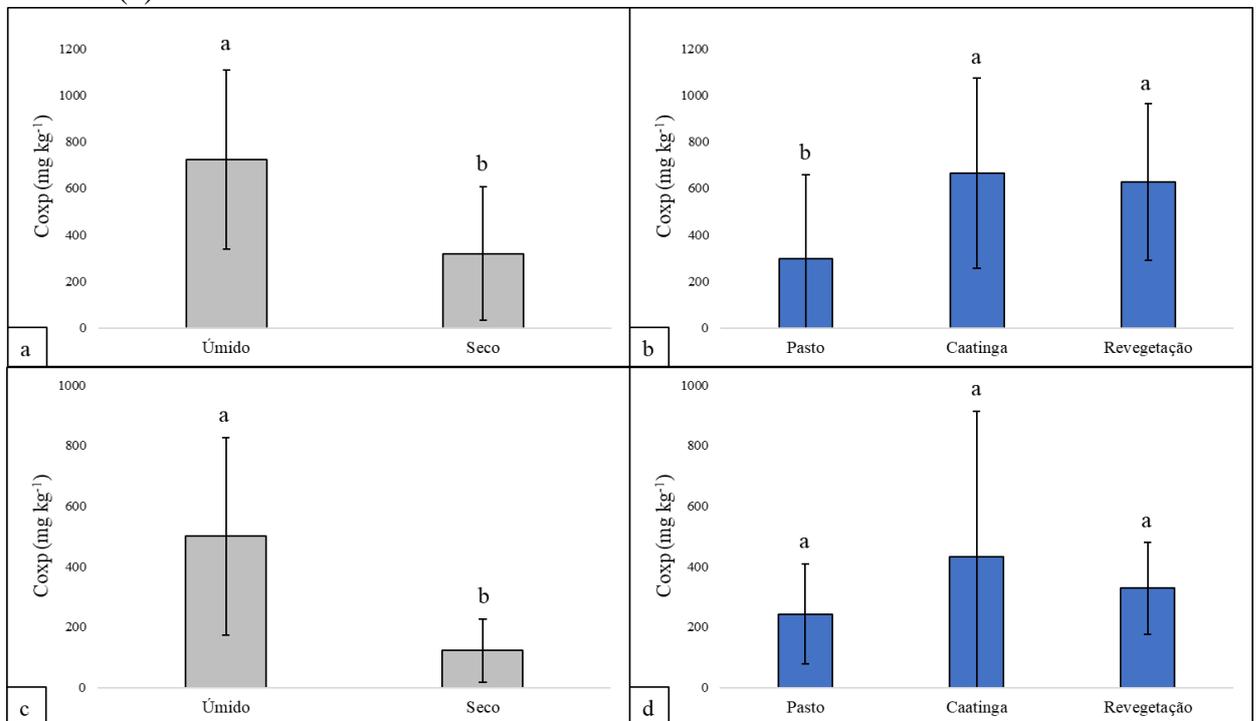


Letras iguais indicam semelhança entre os períodos úmido e seco dentro de cada cobertura do solo (a) e entre as coberturas do solo dentro de cada período (úmido e seco), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Pelas altas temperaturas e baixos valores de precipitação pluvial durante a maior parte do ano, a vegetação nativa presente nessas áreas tem ciclos de desenvolvimento curtos,

perdendo as estruturas vegetativas nos períodos secos para sua sobrevivência. A biomassa vegetal perdida fica depositada sobre o solo, entrando em decomposição lenta, pela restrição hídrica, protegendo o solo. Enquanto isso, nas áreas sob cultivo de pasto não há este aporte de estruturas vegetativas, seja pelo consumo animal, pisoteio e ou baixa capacidade de proteção inerentes das espécies. Assim, cria-se um ciclo vicioso de degradação, culminando, muitas vezes, pelo abandono da área.

Figura 13. Carbono oxidado em permanganato de potássio em função da época de coleta na camada 0-5 cm (a) e 5-10 cm (c) e em função da cobertura do solo na camada de 0-5 cm (b) e 5-10 cm (d)



Letras iguais indicam semelhança entre os períodos úmido e seco dentro de cada cobertura do solo (a) e entre as coberturas do solo dentro de cada período (úmido e seco), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Também houve diferença entre as épocas de coleta, onde na época úmida o carbono oxidado em permanganato de potássio foi maior do que na seca (Figura 13a e 13c). Segundo Ramírez et al (2020), o carbono oxidado em permanganato de potássio representa a fração lábil mais fortemente relacionado com o carbono orgânico do solo e é particularmente sensível às variações climáticas e ambientais.

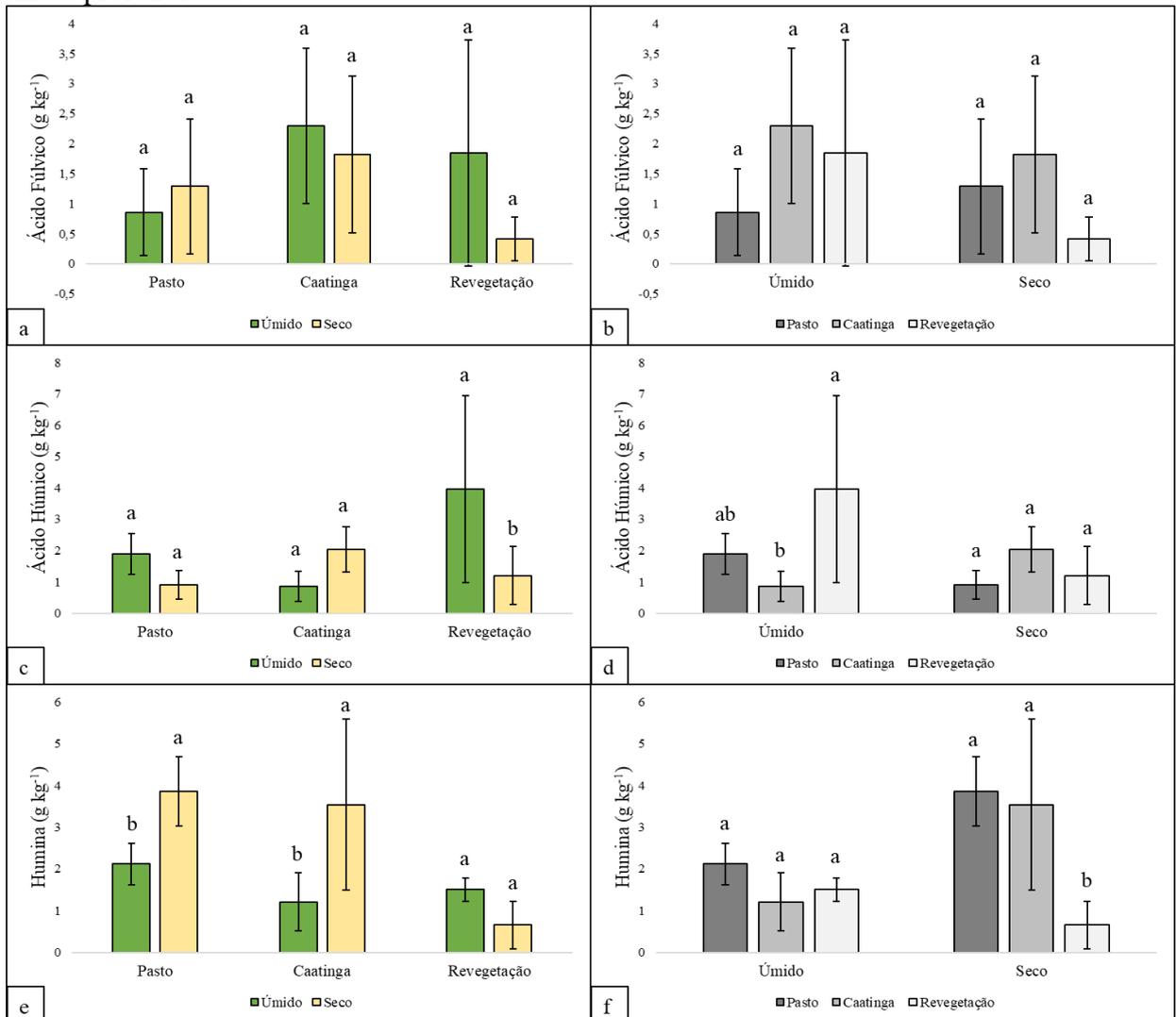
O entendimento das proporções de carbono nas diversas frações da matéria orgânica também pode esclarecer o entendimento dos processos de perda ou acúmulo deste no

ambiente. Por exemplo, os ácidos húmicos (AH) são elementos primordiais das substâncias húmicas, demonstrando a capacidade de estimular o crescimento das plantas, facilitar a absorção de nutrientes e influenciar o metabolismo secundário das plantas, além de desempenhar papel significativo nos ciclos biogeoquímico. Sua estrutura complexa e a presença de numerosos grupos funcionais os tornam compostos orgânicos dinâmicos e versáteis, capazes de interagir com outros componentes do solo. Essa interação resulta em mais carbono disponível, que serve como fonte de energia para os microrganismos do solo, melhorando assim o fornecimento de nutrientes para as plantas. As substâncias húmicas também contribuem para a assimilação do carbono atmosférico, ou seja, no sequestro de carbono, auxiliando na regulação do impacto das mudanças climáticas nos agroecossistemas (TIWARI et al., 2023).

A concentração de carbono das frações húmicas do solo diminuiu com o aumento da profundidade, com valores máximos na camada de 0-5 cm e mínimos na camada de 30-50 cm, apresentando variação em AF, AH e HUM (Figuras 14, 15, 16 e 17). Concordando com estes resultados, nos estudos de Araújo Filho et al. (2018) e Marinho Júnior et al. (2021), os autores atribuem que a elevada concentração de carbono nas frações húmicas do solo na camada superficial é consequência da morte de raízes finas principalmente da disposição da biomassa herbácea, vegetal no solo e à atividade microbiana que atua na estabilização da matéria orgânica deste solo.

Na camada superficial, foram obtidas maiores concentrações de carbono respectivamente em HUM, AH e AF. Reforçando a maior estabilidade do AH e da HUM e uma maior labilidade do AF com menores níveis de C nesta fração. Corroborando com estudo realizado por Marinho Júnior et al (2021) em estudo sobre a dinâmica do carbono em diferentes coberturas vegetais no sul do Tocantins. Os teores de carbono na fração do ácido húmico em superfície foram maiores para a revegetação tanto em diferentes épocas, quanto em diferentes coberturas (Figuras 14c e 14d), que pode indicar melhoria na estabilidade e fertilidade do solo, como também melhora na capacidade de retenção de água e nutrientes. Também foi observado que as áreas de pasto degradado e caatinga nativa apresentaram maiores teores de carbono na fração húmica em época de seca (Figuras 14e e 14f).

Figura 14. Teores de carbono nas frações ácidos fúlvicos em função da época de coleta (a) e da cobertura do solo (b), ácidos húmicos em função da época de coleta (c) e da cobertura do solo (d) e humina em função da época de coleta (e) e da cobertura do solo (f), na camada de 0-5 cm de profundidade

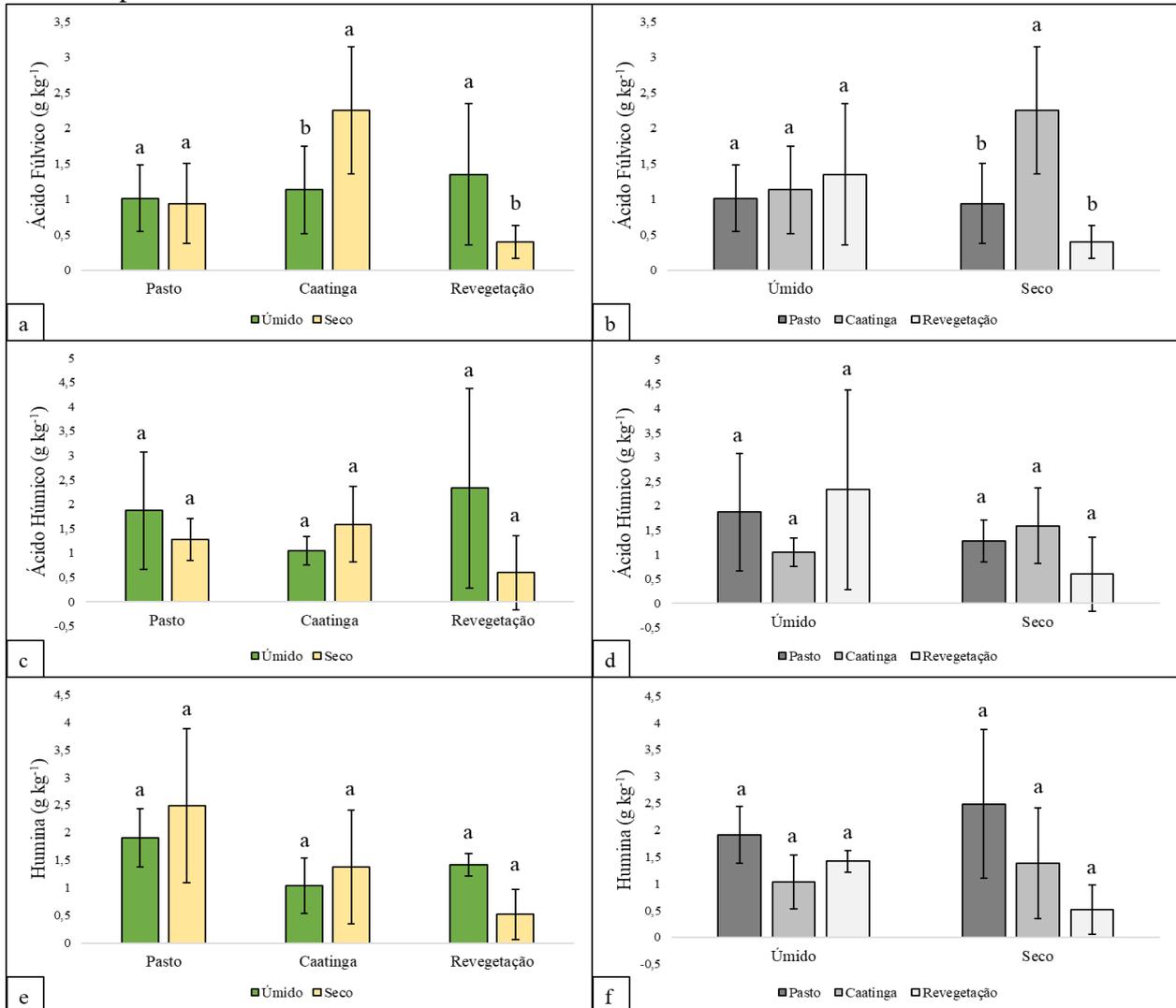


Letras iguais indicam semelhança entre os períodos úmido e seco dentro de cada cobertura do solo (a) e entre as coberturas do solo dentro de cada período (úmido e seco), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na época de seca, a baixa pluviosidade impede o processo completo de decomposição da matéria orgânica, explicando a presença de níveis mais elevados de ácidos fúlvicos (AF) nesta época na área sob caatinga (Figura 15). Nas camadas de 5-10 e 10-30 cm, os ácidos fúlvicos (Figura 15a) e húmicos (Figura 16c) apresentam diferenças entre as épocas seca e úmida para a área de caatinga e revegetação. Em ambas as camadas, no período seco, os teores mais elevados encontram-se na área de caatinga nativa quando comparados com os demais manejos estudados (Figuras 15b e 16d). Na camada de 30-50 cm, os valores de ácidos

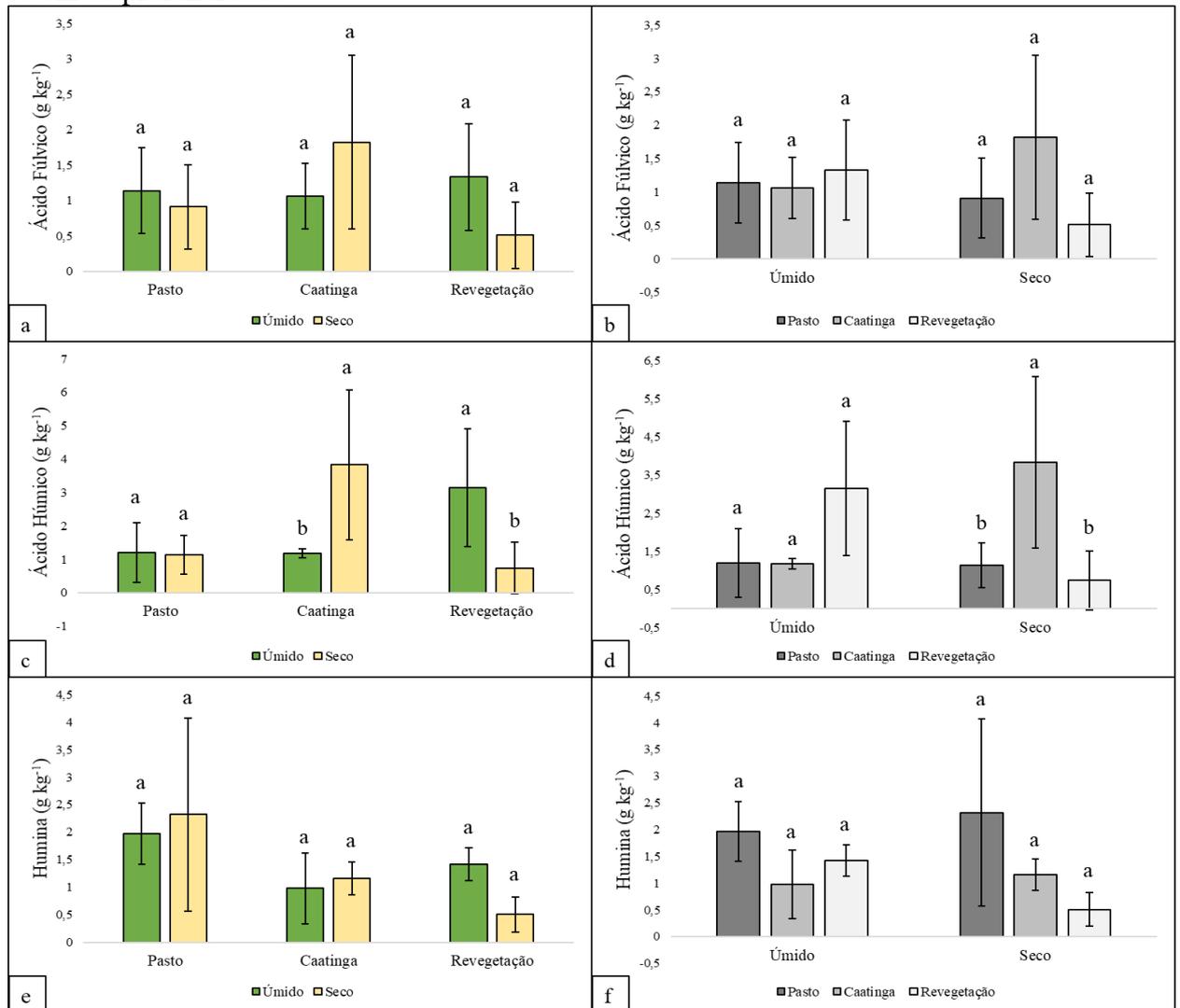
fúlvicos, húmicos e humina foram similares sob diferentes manejos e entre as duas épocas de coleta (Figura 17).

Figura 15. Teores de carbono nas frações ácidos fúlvicos em função da época de coleta (a) e da cobertura do solo (b), ácidos húmicos em função da época de coleta (c) e da cobertura do solo (d) e humina em função da época de coleta (e) e da cobertura do solo (f), na camada de 5-10 cm de profundidade



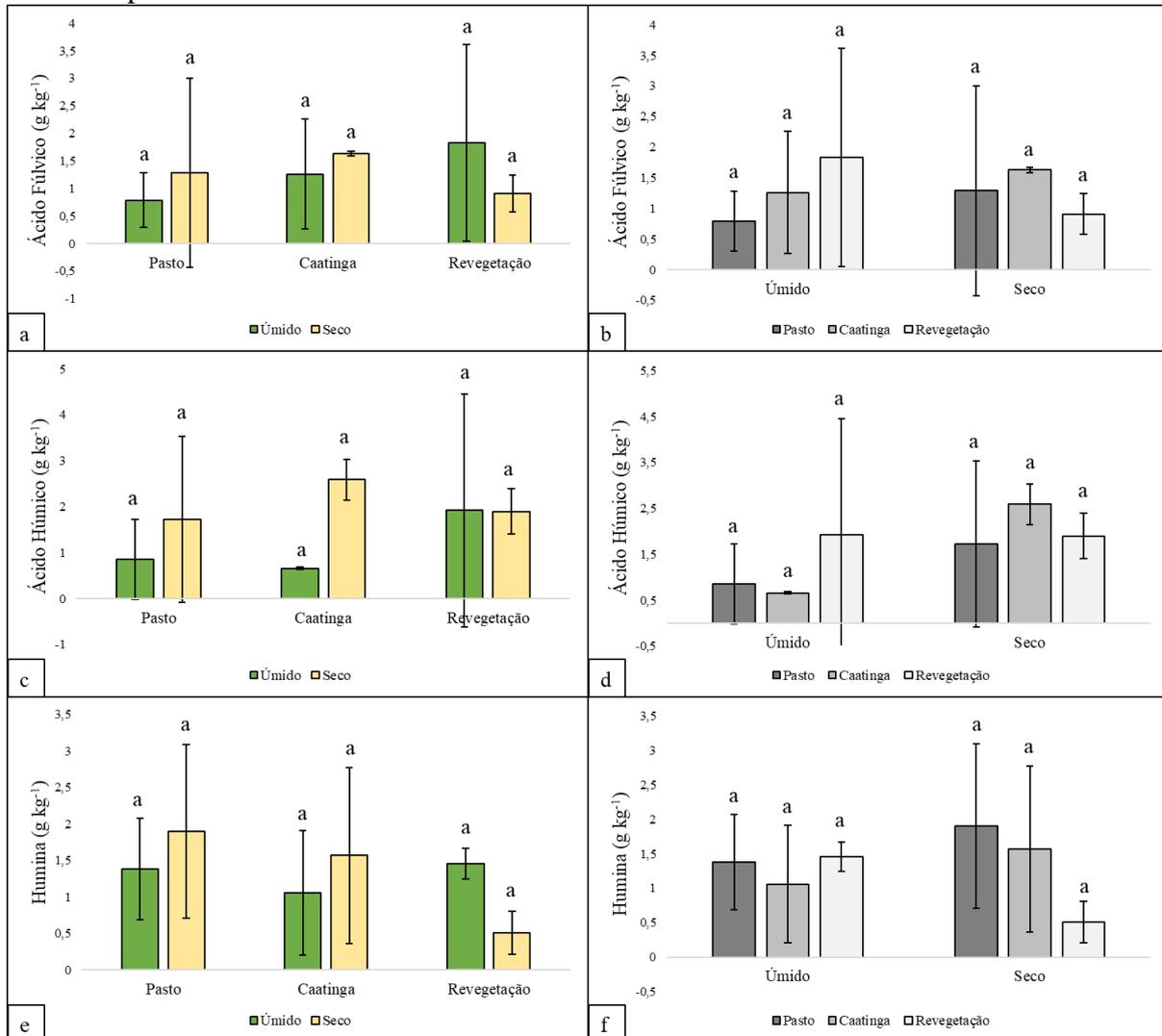
Letras iguais indicam semelhança entre os períodos úmido e seco dentro de cada cobertura do solo (a) e entre as coberturas do solo dentro de cada período (úmido e seco), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 16. Teores de carbono nas frações ácidos fúlvicos em função da época de coleta (a) e da cobertura do solo (b), ácidos húmicos em função da época de coleta (c) e da cobertura do solo (d) e humina em função da época de coleta (e) e da cobertura do solo (f), na camada de 10-30 cm de profundidade



Letras iguais indicam semelhança entre os períodos úmido e seco dentro de cada cobertura do solo (a) e entre as coberturas do solo dentro de cada período (úmido e seco), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

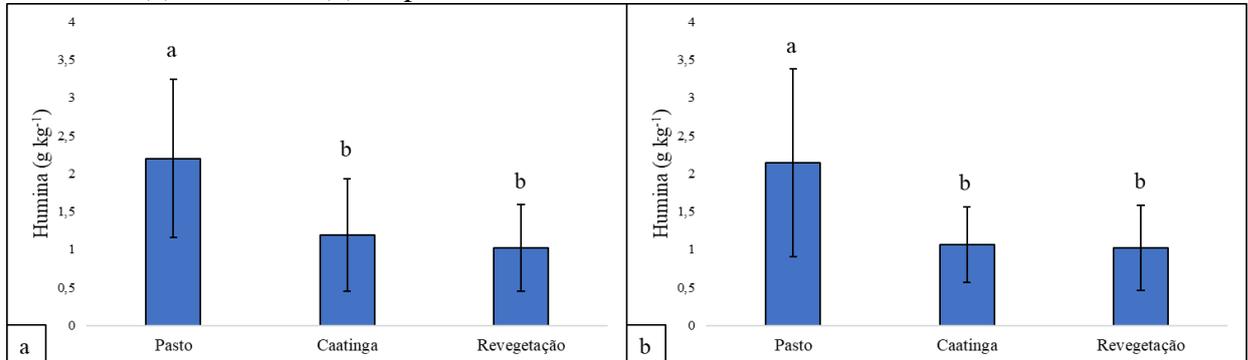
Figura 17. Teores de carbono nas frações ácidos fúlvicos em função da época de coleta (a) e da cobertura do solo (b), ácidos húmicos em função da época de coleta (c) e da cobertura do solo (d) e humina em função da época de coleta (e) e da cobertura do solo (f), na camada de 30-50 cm de profundidade



Letras iguais indicam semelhança entre os períodos úmido e seco dentro de cada cobertura do solo (a) e entre as coberturas do solo dentro de cada período (úmido e seco), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nas duas camadas avaliadas, os maiores teores de humina foram obtidos no pasto degradado (Figura 18), que pode ser explicado pelo fato da humina representar a forma de fração mais recalcitrante e mais persistente no solo, resistente à biodegradação, sendo favorecida pela formação de complexos organominerais estáveis (CRESPO et al., 2024), que tendem a ser menos afetados pelo manejo pouco conservador. Vale ressaltar que em sítios de trocas organomineral, as frações mais humificadas da MOS tornam-se menos acessíveis aos microrganismos e suas enzimas, sendo assim, persistem no solo por longo período.

Figura 18. Teores de carbono na fração humina em função da cobertura do solo nas camadas de 0-5 cm (a) e 5-10 cm (b) de profundidade



Letras iguais indicam semelhança entre os períodos úmido e seco dentro de cada cobertura do solo (a) e entre as coberturas do solo dentro de cada período (úmido e seco), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores de estoque de COT apresentaram diferenças entre os períodos de coleta na camada 0-5 cm, e os diferentes tipos de cobertura alteraram os estoques de COT em todas as camadas (Tabela 7). Contudo, a interação entre os fatores época de coleta e cobertura do solo não foi significativa em nenhuma delas.

Tabela 7. Tabela da análise da variância para o estoque do carbono orgânico total em função da época de coleta e da cobertura do solo no município de Caruaru – PE

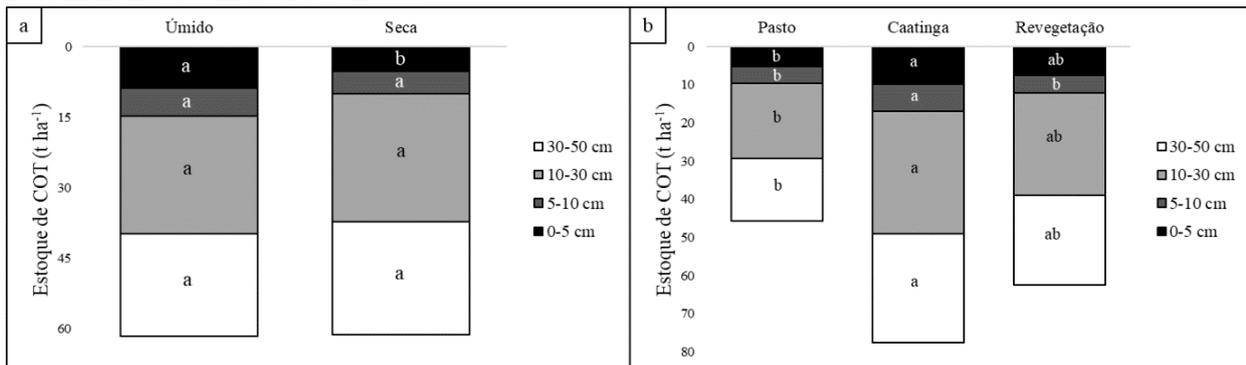
FV	Estoque de COT			
	0-5 cm	5-10 cm	10-30 cm	30-50 cm
Coleta	17,65*	2,66 ^{ns}	0,50 ^{ns}	0,27 ^{ns}
Cobertura	9,26*	5,26*	4,23*	5,19*
Col x Cob	2,24 ^{ns}	1,54 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,53 ^{ns}
CV (%)	30,56	35,63	36,57	36,96

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Fisher; ^{ns}Não significativo.

Os diferentes tipos de cobertura do solo influenciaram os valores do estoque de carbono (Figura 19), concordando com o que foi observado em outros estudos (TROIAN et al., 2020; LOPES et al., 2022). Os maiores valores de estoque de COT foram encontrados na área sob caatinga nativa, o que era esperado e pode ser explicado pela ausência da interferência antrópica, principalmente pela falta de perturbação do solo, preservando os compartimentos de carbono.

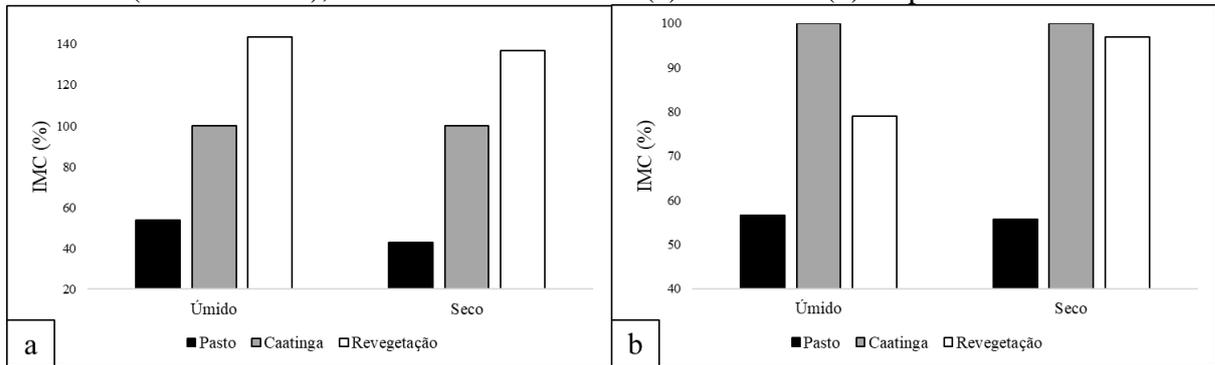
Estudos mostram resultados semelhantes, em que áreas não manejadas apresentam maiores aportes de C do que áreas manejadas (ALCÂNTARA et al., 2023; TROIAN et al., 2020). Os menores valores de estoque de COT foram encontrados na área sob pastagem degradada (Figura 19b). Em estudo sobre pastagens no Brasil, Oliveira et al. (2022), concluíram que em pastagens degradadas ocorrem perdas de até $0,25 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e que simples adoções de manejo podem assegurar melhorias na recuperação dos estoques de carbono dessas áreas. Como também foi observado neste estudo, em que a revegetação de uma área salina e degradada, apresentou melhorias na estocagem de COT. Entre as épocas de coleta, os resultados apontam que apenas na camada 0-5 cm houve diferença significativa, apresentando maiores valores de estoque de COT na época úmida (Figura 19a).

Figura 19. Estoques de COT em função do período de coleta (a) e da cobertura do solo (b) nas diferentes camadas avaliadas



Os menores valores do índice de manejo de carbono (IMC) foram observados na área de pastagem (Figura 20). De acordo com Blair et al. (1995), valores inferiores a 100 sugerem que as práticas de manejo estão impactando negativamente os níveis de matéria orgânica e a qualidade do solo. Corroborando com esse resultado, em estudo realizado na Índia, Sahu et al. (2023) apresentaram valores superiores de IMC nas terras florestais quando comparadas com as pastagens, sugerindo que os valores inferiores na pastagem podem estar relacionados com a exposição dessas áreas à chuva, à erosão eólica e à degradação superficial após o pastoreio contínuo do gado. Também relataram que o elevado valor do IMC sugere a qualidade superior da matéria orgânica e apresenta informações valiosas sobre o carbono orgânico protegido.

Figura 20. Índice de manejo do carbono em função da cobertura do solo dentro dos períodos de coleta (úmido e seco), nas camadas de 0-5 cm (a) e 5-10 cm (b) de profundidade



Por desempenhar um papel crucial nas melhorias dos atributos físicos, químicos e biológicos, o carbono orgânico do solo, não fornece apenas nutrientes essenciais para microbiota do solo, como também influencia significativamente no armazenamento e liberação de nutrientes na solução do solo, desempenhando papel fundamental na disponibilidade de água para as plantas e organismos do solo e contribuindo para a formação e estabilização dos agregados (OLIVEIRA et al., 2020). A dinâmica global do ciclo do carbono é impulsionada por uma interação complexa de processos químicos e bioquímicos que ocorrem nos tecidos das plantas e na matéria orgânica dos solos. Esses processos estão intimamente ligados aos fatores climáticos, tipos de relevo presentes na região e manejo do solo (SILVA et al., 2024).

5. CONCLUSÕES

O solo sob pastagem degradada apresentou menores fluxos de CO₂ em comparação ao solo sob revegetação na época de seca, entretanto, manteve-se similar na época de chuva.

Houve variação nas concentrações de carbono no solo entre as épocas de coleta.

As espécies arbóreas nativas da Caatinga cultivadas na área sob revegetação conseguiram se estabelecer e contribuíram para a melhoria das condições gerais do solo, além de possibilitar o desenvolvimento da vegetação espontânea. Ainda é possível observar melhores condições biológicas e aporte de carbono nas camadas superficiais das áreas sob Caatinga e sob revegetação.

De modo geral, é possível observar melhorias na área sob revegetação, mesmo com as adversidades que ocorrem na área de experimento, que a princípio deveria ser totalmente isolada dos animais, mas mostrou sinais de interferência durante o processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÂNTARA, L. C.; NEVES, I.; ROSSET, J. S.; OZORIO, J. M. B.; PANACHUKI, E.; CASTILHO, S. C. P.; SCHIAVO, J. A.; FARIAS, P. G. S.; SOUZA, C. B. S.; SANTOS, W. V.; MARRA, L. M. Effect of soil management on carbon stock and soil aggregation in a natural recovery area and surrounding systems, Brazil. 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3332393/v1>
- ALMEIDA, D. F.; MACEDO, G. T.; JÚNIOR, J. G. C.; DA SILVA, C. M.; DA SILVA, A.; DA SILVA, W.A. Indicadores Físicos Do Solo Em Sistema Silvopastoril No Ecótono Cerrado-Floresta Amazônica Maranhense / Indicadores Físicos do Solo em Sistema Silvopastoril no Ecótono Cerrado-Mazon. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, v. 5, pág. 43729–43734, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-002>
- AMOAKWAH, E.; LUCAS, S. T.; DIDENKO, N. A.; RAHMAN, M. A.; ISLAM, K. R. Impact of deforestation and temporal land-use change on soil organic carbon storage, quality, and lability. **Plos one**, v. 17, n. 8, p. 1-25, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263205>
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effect of environmental condition, such as pH on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 23, n. 3, p. 393-395, 1993. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7)
- ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; MATSUMOTO, M.; FONSECA, C. R. Chronic anthropogenic disturbance on caatinga dry forest fragments. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 10, p. 2064–2074, 2020.
- ARAÚJO, E. L. Estoque de Carbono em Áreas de Agricultura Familiar na Mesorregião Oeste Potiguar. Monografia (Bacharel em Agronomia). Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020. <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/5975>
- ARAÚJO FILHO, J. C.; MARQUES, F. A.; AMARAL, A. J.; CUNHA, T. J. F.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; GALVÃO, P. V. M. Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2022. cap. 6, p. 93-112.
- ARAÚJO FILHO, R. N.; FREIRE, M. B. G. S.; WILCOX, B. P.; WEST, J. B.; FREIRE, F. J.; MARQUES, F. A. Recovery of carbon stocks in deforested Caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, v. 407, p. 210-220, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.002>
- BARRETO, A. C.; FREIRE, M. B. G. S.; NACIF, P. G. S.; ARAÚJO, Q. R.; FREIRE, F. J.; INÁCIO, E. S. B. Fracionamento Químico e Físico do Carbono Orgânico Total em um Solo de Mata Submetido a Diferentes Usos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 32, p.1471-1478, 2008.
- BARRETO-GARCIA, P. A. B.; BATISTA, S. G. M.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; PAULA, A.; BATISTA, W. C. A. Short-Term Effects Of Forest Management On Soil Microbial Biomass And Activity In Caatinga Dry Forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 481, p. 118790, 1 fevereiro 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118790>

BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index, for agricultural systems. **Crop & Pasture Science**, v. 46, n. 7, p. 1459–1466, 1995. <https://doi.org/10.1071/AR9951459>

BORGES, W. L. B, CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Impact of crop-livestock-forest integration on soil quality. **Agroforestry Systems**, v. 93 , n. 6, p. 2111–2119, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0329-0>

CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; FEIGEL, B.J.; PICCOLO, M.C.; GODINHO, V.P.; CERRI, C.C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazil Amazon. **Soil and Tillage Research**, v. 103, p.342-349, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.022>

CARVALHO, J. N. de; BECKMANN-CAVALCANTE, M. Z.; RODRIGUES, R. G.; FONTANA, A. P.; PIFANO, D. S. Native Caatinga Species For The Recovery Of Degraded Areas In The Brazilian Semiárid Region. **Revista Árvore**, v. 46, 2022. <https://doi.org/10.1590/1806-908820220000010>

CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. Salinidade Do Solo E Risco De Desertificação Na Região Semiárida. **Mercator**, v. 19, 2020. <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19002>

CRESPO, C. M. G.; PISCOYA, V. C.; MORAES, A. S.; FRANÇA, M. V.; FERNANDES, M. M.; CUNHA FILHO, M.; CAVALCANTE, N. L. L.; MELO, R. C. P.; PISCOYA, T. F. PISCOYA-RONCAL, J.; PEREIRA, L. M. GOMES FILHO, R. R.; HOLANDA, F. S. R.; PEDROTTI, A.; CASTRO, J. B.; ARAÚJO FILHO, R. N. Humic fractions of soil carbon under agroforestry system in altitude swamp Pernambucano. **Ciência Floresta**, v. 34, n. 1, p. 1-19, 2024. <https://doi.org/10.5902/1980509865061>

DAI, H.; CHEN, Y.; LIU, K.; LI, Z.; QIAN, X.; ZANG, H.; YANG, X.; ZHAO, Y.; SHEN, Y.; LI, Z.; SUI, P. Water-stable aggregates and carbon accumulation in barren sandy soil depend on organic amendment method: A three-year field study. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 393-400, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.013>

DAS, S.; DEB, S.; SAHOO, S. S.; SAHOO, U. K. Soil microbial biomass carbon stock and its relation with climatic and other environmental factors in forest ecosystems: A review. **Acta Ecologica Sinica**, v. 43, n. 6, p. 933-945, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.12.007>

DENARDIN, L. G. D. O.; CARMONA, F. D. C.; VELOSO, M. G.; MARTINS, A. P.; DE FREITAS, T. F. S.; CARLOS, F. S.; MARCOLIN, E.; CAMARGO, F. A. O.; ANGHINONI, I. No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 64-69, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.006>

EMBRAPA. **Chave do SIBCS: Planossolos**. Embrapa Agência de Informação Tecnológica. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/planossolos>>. Acesso em: 17 jun. 2024.

EMBRAPA. **Planossolos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga/solos/planossolos>>. Acesso em: 17 jun. 2024.

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

212p.<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/104933/1/Manual-de-Mtodos-de-Analise-de-Solo.pdf>

EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. Brasília-DF: Embrapa Informação Tecnológica, p.191-234, 2009.

FERNANDES, M. M.; FERNANDES, M. R. de M.; GARCIA, J. R.; MATRICARDI, E. A. T.; ALMEIDA, A. Q. de; PINTO, A. S.; MENEZES, R. S. C.; SILVA, A. de J.; LIMA, A. H. de S.; Assessment of Land Use and Land Cover Changes and Valuation of Carbon Stocks in the Sergipe Semiarid Region, Brazil: 1992–2030. **Land Use Policy**. V. 99, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104795>

FUSHIMI, M.; DE OLIVEIRA, R. C.; RODRIGUES NUNES, J. O. Propriedades físicas do solo e cobertura e uso da terra como subsídio à compreensão dos processos erosivos lineares na bacia hidrográfica do rio dos Cachorros, Amazônia Maranhense. **Ateliê Geográfico**, v. 17, n. 2, p. 205–227, 2023. DOI: 10.5216/ag.v17i2.73918. <https://doi.org/10.5216/ag.v17i2.73918>

GALINDO, I. C. de L.; RIBEIRO, M. R. ; SANTOS, M. de F. de A. V. S.; LIMA, J. F. W. F. L.; FERREIRA, R. F. de A e F. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1283-1296, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300036>

GAMA, D. C. e DE JESUS, J. B. Principais solos da região semiárida do Brasil favoráveis ao cultivo do eucalyptus l' heritier main soils of the semiarid region of Brazil for Eucalyptus L' heritier. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 2, p. 214-221, 2020.

<http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v5i2.70968>

GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. S. M.; GAVA, C. A. T. Carbono no Sistema Solo-Planta no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**. V. 6, p. 1233-1253, 2011. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v4i6.232769>

GIONGO, V.; GALVÃO, S. R. S.; MENDES, A. M. S.; GAVA, C. A. T.; CUNHA, T. J. F. Soil Organic Carbon in the Brazilian Semi-arid Tropics. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*.

Global Science Book Plant, v. 5, n. 1, p. 12-20, 2011.

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/53766/1/Vanderlise-2011.pdf>

GOMES, J. P. S.; SILVA, V. P da. Recuperação de Áreas Degradadas Sobre o Bioma Caatinga: Uma Análise Bibliométrica. **Revista On-line Geo Ambiente**, n. 46. 19 junho 2023.

<https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/75233>

GOMES, L. C.; FARIA, R. M.; SOUZA, E. VELOSO, G. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil.

Geoderma, v. 340, p. 337-350, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>

INSA – Instituto Nacional do Semiárido. Acervo digital. O Semiárido Brasileiro. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/rede-mcti/insa/semiario-brasileiro>>. Acesso em: Out. 2021.

JARDIM, A. M. da R. F.; MORAIS, J. E. F. de; SOUZA, L. S. B. de; LOPES, D. de C.; SILVA, M. V. da; PANDORFI, H.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. de; SILVA, J. L. B. da; NETO, A. J. S.; MORELLATO, L. P. C.; LIMA, J. L. M. P. de; SILVA, T. G. F. da. A Systematic Review Of Energy And Mass Fluxes, And Biogeochemical Processes In Seasonally Dry Tropical Forests And Cactus Ecosystems. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 126. 2 abril 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104330>

LAL, R. Soil processes and greenhouse effect. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWART, B. A. (Ed.). *Methods for assessment of soil degradation*. Boca Raton: CRC Press, (Advances in Soil Science, 9). P. 199-212, 1997. <https://doi.org/10.1201/9781003068716>

LAL, R. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. **Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1–9, 2020. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548>

LAL, R. Carbon Farming by Recarbonization of Agroecosystems. **Pedosphere**, v. 33, n. 5. P. 676-679. Outubro 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.07.024>

LIMA, C. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; LIMA, J. L. M. P.; ALMEIDA, T. A. B.; SANTOS, J. C. N. Uso de Coberturas Alternativas do Solo para o Controle de Perdas de Solo em Regiões Semiáridas. **Eng Snit Ambient**. V. 25, n. 3, maio/jun 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020193900>

LIMA, B. da S.; VIEIRA, S. G; A. F.; DA COSTA E COSTA, N. .; GOUVÊA, A. G. Análise morfológica do solo de um fragmento florestal da universidade federal do Amazonas – ufam, campus de Manaus (setor norte). **Pensar geografia**, v. 6, n. 2, p. 25–45, 2022. <https://doi.org/10.26704/rpgeo>

LIMA, B. R. D.; NEVES, B. R.; OLIVEIRA, E. P.; BEBÉ, F. V.; LIMA, P. A.; JÚNIOR, E. P. D.; FERNANDES, E. da C.; PEREIRA, E. G. Caracterização física de solos sob diferentes usos e manejos em propriedades de agricultura familiar em Candiba-Bahia / Physical characterization of soils under different uses and management in family farms in Candiba-Bahia. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 1220–1233, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-082>

LIMA, J. R. S.; SOUZA, R. M. S.; SAMPAIO, E. V. S. B.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S.; MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; FERREIRA, C. R. P. C.; MENEZES, R. S. C.; HAMMECKER, C. Moisture, temperature and respiration of two soil classes under pasture and tropical dry forest in the semiarid Brazilian region, **Journal of Arid Environments**, v. 214, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104981>.

LOPES, G. T., ROSSET, J. S., OZÓRIO, J. M. B., SILVA, O. M. M., SANTOS, W. V.; SANTOS, J. V. H.; GONÇALVES, A. S.; MARRA, L. M. Impact of different use systems on total and mineralizable organic carbon in a sandy soil. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 9, n. 3, 2022. <https://doi.org/10.32404/rean.v9i3.6991>

MACEDO, R. S.; BEIRIGO, R. M.; MEDEIROS, B. M.; FELIX, V. J. L.; SOUZA, R. F. da S.; BAKKER, A. P. Processos Pedogenéticos E Susceptibilidade Dos Solos À Degradação No Semiárido Brasileiro. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 18, 21 junho 2021.

<https://doi.org/10.14393/RCG228155397>

MACEDO, R. S.; MORO, L.; LAMBAIS, E. O.; LAMBAIS, G. R.; BAKKER, A. P de. Effects of Degradation on Soil Attributes Under Caatinga in The Brazilian Semi-arid. **Revista Árvore**, v. 47, 2023. <https://doi.org/10.1590/1806-908820230000002>

MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAÚJO FILHO, J. A. Nitrogen fractions in a Luvisol under agroforestry and conventional systems in the semi-arid zone of Ceará, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n. 1, p. 381-392. 2008 <http://dx.doi.org/10.1590/S010006832008000100036>.

MAPBIOMAS. **Relatório Anual de Desmatamento 2022**. São Paulo: MapBiomass, 2023. 125 páginas. Disponível em: <<http://alerta.mapbiomas.org>>. Acesso em: 29 fevereiro 2024.

MARINHO JUNIOR, J. L.; PISCOYA, V. C.; FERNANDES, M. M.; GONÇALVES, S. B.; HOLANDA, F. S. R.; FILHO, M. C.; FILHO, R. R. G.; PEDROTTI, A.; FILHO, R. N. A. Carbon Dynamics in Humic Fractions of Soil Organic Matter Under Different Vegetation Cover in Southern Tocantins. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 2, 2021.

<https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2020-0024>

MEDEIROS, J. A.; OLIVEIRA, V. P. V. A Importância da Faveleira na Conservação da Caatinga: Uma Análise Após o Ciclo de Secas 2012-2018 em Área em Processo de Desertificação. **GEOTemas**, Pau dos Ferros – RN, v. 10, n. 2, 2020.

<https://doi.org/10.51249/hp21.2022.105>

MEDEIROS, R. M. O Balanço Hídrico E O Aquecimento No Município De Caruaru – PE, Brasil. **Revista Equador (UFPI)**, Vol. 7, Nº 2, p.126 – 146, 2018.

<https://doi.org/10.26694/equador.v7i2.7647>

MELO, R. F.; VOLTOLINI, T. V. Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido. Editores técnicos Embrapa Brasília – DF, 2019.

<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1114220>

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. Matéria Orgânica do Solo: Métodos e Análises. Viçosa, MG, 2005.

MENEZES, R. S. C.; SALS, A. T.; PRIMO, D. C. ALBUQUERQUE, E. R. G. M.; JESUS, K. N.; PAREYN, F. G. C.; SANTANA, M. S.; SANTOS, U. J.; MARTINS, J. C. R.; ALTHOFF, T.D.; NASCIMENTO, D. M.; GOUVEIA, R. F.; FERNANDES, M. M.; LOUREIRO, D. C.; FILHO, J. C. A.; GIONGO, V.; DUDA, G. P.; ALVES, B. J. R.; IVO, W. M. P. M.; ANDRADE, E. M.; PINTO, A. S.; SAMPAIO, E. V. S. B. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. **Geoderma**, v. 390, 114943, 15 May 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Caatinga. Disponível em:
<<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-ecossistemas/ecossistemas/biomas/caatinga>>. Acesso em 27 fev 2024.

MONTOVANI, V. A.; TERRA, M. de C. N. S.; RODRIGUES, A. F.; SILVA, C. A.; GUO, L.; MELLO, J. M de.; MELLO, C. R. de. Unprecedentedly high soil carbon stocks and their spatial variability in a seasonally dry Atlantic Forest in Brazil. *Catena*, v. 235, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107696>

OLIVEIRA, D.C., MAIA, S.M.F., FREITAS, R.D.C.A., CERRI, C.E.P. Changes in soil carbon and soil carbon sequestration potential under different types of pasture management in Brazil. *Regional Environmental Change*, v. 22, n. 3, p. 1-11, 2022.
<https://doi.org/10.1007/s10113-022-01945-9>

OLIVEIRA, E. S.; REATTO, A.; ROIG, H L. Estoques de Carbono do Solo Segundo os Componentes da Paisagem. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 32, n. 1/2, p. 71-93, jan./ago, 2015.

OLIVEIRA, G. L. de; FLORENTINO, H. da S. Educação ambiental contextualizada para a convivência com o semiárido: saberes e práticas de estudantes de uma escola no sertão paraibano. *Revista de Ensino de Ciências e Matemática*. v. 14, n. 1, p. 1–23, 2023.
<https://doi.org/10.26843/rencima.v14n1a26>

OLIVEIRA, L. S.; SOUSA, A. M.; PINHEIRO, J. I.; SILVA, V. B. Manejo do solo como fonte de alteração na dinâmica do carbono orgânico. *Enciclopedia biosfera*, v. 17, n. 31, 2020.
https://doi.org/10.18677/EnciBio_2020A14

OLIVEIRA, R. S.; MOREAU, A. M. S. dos S; REIS, A. D. dos; TOMAZ, A. R. Caracterização, aptidão agrícola e capacidade de uso de um Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico abrupto: Estudo de caso em Itapetinga-BA. *Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages*, v. 22, n. 2, p. 329–338, 2023. <https://doi.org/10.5965/223811712222023329>

OLIVEIRA, T. P. de; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; NANZER, M. C.; BARRETA, P. G. V.; SILVA, M. F. G.; QUEIROZ, G. R. S. dos S.; PRADO, E. A. F. do. Carbono lábil e frações oxidáveis de carbono em solos cultivados sob diferentes formas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)*, v.8, n.3, p.49-56, 2018.
<https://doi.org/10.21206/rbas.v8i4.3068>

PARAHYBA, R. da B. V.; SILVA, A. F.; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVIERA, L. J. de. Metodologia técnico-científica de caracterização geoambiental participativa de agroecossistemas no Semiárido brasileiro. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL INTERDISCIPLINAR, 1.; CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL INTERDISCIPLINAR, 6.; WORKSHOP DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL INTERDISCIPLINAR, 9., 2023, Juazeiro, BA. Sustentabilidade em ação: anais. Juazeiro: Univasf: São Paulo: UICLAP Editora, 2024.

PAULA, T.A.; FERREIRA, M.A. Utilização de pastagens em regiões semiáridas: Aspectos agronômicos e valor nutricional. *Revista Arquivos do Mudi*, v.24, n.2, p.140-163, 2020.
<http://doi.org/10.4025/arqmudi.v24i2.53567>

PEREIRA, A. P. A.; MENDES, L. W.; OLIVEIRA, F. A. S.; ANTUNES, J. E. L.; MELO, V. M. M.; ARAÚJO, A. S. F. Land Degradation Affects The Microbial Communities In The Brazilian Caatinga Biome. *Catena*, v. 211, 105961, 2022.
<http://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105961>

PESSOA, L. G. M.; FREIRE, M. B. G. dos S.; GREEN, C. H. M.; MIRANDA, M. F. A.; FILHO, J. C. de A.; PESSOA, W. R. L. S. Assessment of soil salinity status under different land-use conditions in the semiarid region of Northeastern Brazil. *Ecological Indicators*, v. 141, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109139>

PORTO, E. R.; HERMES, L. C.; FERREIRA, R. S.; VEIGA, H. P.; SAIA, A. Agricultura bioassalina: desafios e alternativas para o uso de águas salobras e salinas no semiárido brasileiro. Embrapa Meio Ambiente-Documents (INFOTECA-E), 2019.
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/202816/1/Agricultura-Bioassalina-Porto-Doc-121.pdf>

RAMÍREZ, P. B.; CALDERÓN, F. J.; FONTE, S. J.; SANTIBÁÑEZ, F.; BONILLA, C.A. Spectral responses to labile organic carbon fractions as useful soil quality indicators across a climatic gradient. *Ecological Indicators*, v. 111, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106042>

RAMOS, H. M. M.; DE SOUSA, R. S.; LEAL NUNES, L. A. P.; MATOS FILHO, C. H. A.; DE MOURA, J. S. Estoque de carbono de um neossolo quartzarênico sob diferentes usos: Carbon stock in a quartzarenic neosol under different land uses. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 6, n. 1, p. 910–922, 2023.
<https://doi.org/10.34188/bjaerv6n1-080>

REZENDE, J. S.; FREIRE, J. F.; FILHO, J. C. A.; FREIRE, M. B. G. dos S.; ALMEIDA, B. G. de; SANTOS, L. R. C.; Impact of deforestation on the soil physical and chemical attributes, and humic fraction of organic matter in dry environments in Brazil. *iForest*, v. 15, p. 465-475, 2022. <https://doi.org/10.3832/ifer4016-015>

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de F.; SAMPAIO, F. de M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras, MG. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007.
<https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400033>

ROSA, S. F. da; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; FLEIG, F. D.; RODRIGUES, M. F.; GELAIN, N. S. Propriedades físicas e químicas de um argissolo sob cultivo de *Eucalyptus dunnii* Maiden no pampa gaúcho. *Ciência Florestal*, v. 28, n. 2, p. 580–590, 2018.
<https://doi.org/10.5902/1980509832040>

RÜGNITZ, M. T.; CHACÓN, M. L.; Porro R. Guia para Determinação de Carbono em Pequenas Propriedades Rurais -- 1. ed. -- Belém, Brasil.: Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). p. 81, 2009.

RUTH, B.; LENNARTZ, B. Spatial variability of soil properties and rice yield along two catenas in Southeast China. *Pedosphere*, Amsterdam, v. 18, n. 4, p. 409–420, 2008.
[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(08\)60032-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60032-6)

SAHU, C., MISHRA, R., BASTI, S. Land-use change affects carbon storage and lability in tropical soil of India. *Geoderma Regional*, v. 32, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00621>

SANTOS, A. R. M.; BEZERRA, R. C. A.; CORDEIRO, L. R. B. A.; LEITE, M. L. M. V.; SALVADOR, K. R. S.; SOUSA, L. D. C.; NOGUEIRA, J. C.; Calaça, J. S. G.; CARVALHO, F. G.; SANTOS, W. R.; SILVA, T. G. F. Valor Nutritivo de Plantas Forrageiras Cultivadas no Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, p. 1466-1489, 15 abril 2023. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

SANTOS, M de O.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; MONROE, H. M. PAULA, A. de. Efeito do manejo florestal da Caatinga no estoque de carbono orgânico em agregados do solo. *Scientia Forestalis*, v. 49, n. 129, 2021. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.16>

SANTOS, T. V., EDSON-CHAVES, B., OLIVEIRA, F. M. C. Xerofitismo e suculência. *Revista de Ciência Elementar*. v. 9, n. 2, 15 junho 2021. <https://doi.org/10.24927/rce2021.043>

SANTOS, T. M. D. dos; OZÓRIO, J. M. B.; ROSSET, J. S.; BISPO, L. S.; FARIA, E.; CASTILHO, S. C. de P. Estoque de carbono e emissão de CO₂ em áreas manejadas e nativa na Região Cone-Sul de Mato Grosso do Sul. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 14, n. 2, p. 339-354, 2021. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n2e7666>

SILVA, F. E. L. da, & BEZERRA, J. A. Região E Território: Um Breve Olhar Sobre A Nova Delimitação Do Semiárido Brasileiro. *Revista Homem, Espaço E Tempo*, 14(2), 66-82. Jan/Dez, 2020. rhet.uvanet.br/index.php/rhet/article/view/457

SILVA, J. de B.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, F. P. de; MACEDO, R. S.; BRITO FILHO, E. G. A ERODIBILIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE FLORESTA E PASTAGENS SOB DIFERENTES POSIÇÕES DA PAISAGEM EM AREIA, PARAÍBA. *Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente*, v. 14, n. 2, p. 558–572, 2024. <https://doi.org/10.31072/rcf.v14i2.1315>

SILVA, J. N. B da; GALVÍNCIO, J. D.; SILVA, J. L. B. da; SOARES, G. A. S.; SILVA, J. F. da. Análise da distribuição espacial dos fluxos de carbono no ecossistema da caatinga. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.5, n.1. p. 115-123, 2024.

SILVA, M. L. O.; LOPES, K. P.; LEITE, M. I. A.; CAMPOS, K. W. N.; SOARES, A. K. F. Áreas degradadas no Semiárido: Causas, Situação e Alternativas de Recuperação. *Ciências Rurais em Foco*. Cap. 2, p. 23 – 37. Belo Horizonte – BH, 2021. <https://doi.org/10.36229/978-65-5866-093-4>

SILVA, M. O.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L do; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D. de F.; COSTA, K. D. da S. Chemical and physical indicators of soil quality. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-431>

SILVA, M. S. L. da.; KLAMT, E.; CAVALCANTI, A. C.; KROTH, P.L. Adensamento subsuperficial em solos do semi-árido: processos geológicos e/ou pedogenéticos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 2, p. 314-320, 2002. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000200021>

SILVA, P. L. F. da; OLIVEIRA, F. P. de; PEREIRA, W. E.; MARTINS, A. F.; ZONTA, J. H.; AMARAL, A. J. do; TAVARES, D. D.; SILVA, A. J. da. Qualidade física de solo arenoso em ambiente semiárido sob sistema de integração lavoura-pecuária. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v. 15, n. 4, p. 598-616, 2021.

<https://doi.org/10.18011/bioeng2021v15n4p598-616>

SILVA, T. G. F.; QUEIROZ, M. G.; ZOLNIER, S.; SOUZA, L. S. B.; SOUZA, C. A. A.; MOURA, M. S. B. et al. Soil Properties And Microclimate Of Two Predominant Landscapes In The Brazilian Semiarid Region: Comparison Between A Seasonally Dry Tropical Forest And A Deforested Area. *Soil and Tillage Research*, v. 207, p. e104852, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104852>

SOL, P. J. S. N., de SOUZA SILVA, L., NETO, J. P. S., NUNES, H. B., & ROSA, V. A. Propriedades físicas e carbono orgânico em camadas do solo sob diferentes usos e manejos nos cerrados do Oeste da Bahia, Brasil. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 8, p. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0001>

SOUSA, A. J. J. de; SOBRINHO, A. I. A importância do reflorestamento nos processos de recuperação das áreas degradadas do sertão paraibano. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental*, v. 10, n. 1, p. 31-36, 2016.

<https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RBGA/article/view/4361>

SOUSA, E. C.; CAMPOS, K. C.; LEMOS, J. de J. S.; LESSA, L. C. R. Instabilidade Pluviométrica na Produção Agrícola de Sequeiro no Estado do Piauí. *Revista de Economia e Agronegócio*, v. 20, n. 2, 15 janeiro 2023. <https://doi.org/10.25070/rea.v20i2.15083>

SOUZA, L. S., MAFRA, A. L., SOUZA, L. D., SILVA, I., & KLEIN, V. A. Inter-relação entre manejo e atributos físicos do solo. BERTOL, I.; MARIA, IC; SOUZA, LS. Manejo e conservação do solo e da água. Viçosa: SBCS, p. 193-243, 2019.

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Delimitação do semiárido – 2021 – Relatório Final. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/8-relatoriometodologia_semiarido2021_v9_versaodefinitiva__1_.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2024.

SUNKARI, E.D.; ABU, M.; ZANGO, M.S. Geochemical evolution and tracing of groundwater salinization using different ionic ratios, multivariate statistical and geochemical modeling approaches in a typical semi-arid basin. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 236, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103742>

TAVARES, K. C. de O.; SILVA, A. F. da.; OLIVEIRA, G. P de.; CORRÊA, A. C. de B. Identificação da Degradação dos Solos no Semiárido Pernambucano: A Partir de Uma Análise Temporal de Áreas de Vulnerabilidade do Município de Belém de São Francisco-PE. *Revista Contexto Geográfico*, V. 9, n. 18. 10 setembro 2023.

<https://doi.org/10.28998/contegeo.9i.18.16860>

TIWARI, J.; RAMANATHAN, A.; BAUDDH, K.; KORSTAD, J. Humic substances: Structure, function and benefits for agroecosystems—a review. *Pedosphere*, v. 33, n. 2, p. 237-249, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.07.008>

TOMAZ, A. R.; FERREIRA, A. O.; LAL, R.; AMADO, T. J. C.; SILVA, B. O. T.; SILVA, W. R.; FRACETTO, F. J. C.; INAGAKI, T. M.; FREIRE, M. B. G. S.; NUNES, E. O. S. Can natural undisturbed revegetation restores soil organic carbon to levels under native climax vegetation under tropical semiarid climate? *Land Degradation & Development*, v. 35, n. 15, p. 1–11, 2024. <https://doi.org/10.1002/ldr.5036>

TROIAN, D.; ROSSET, J. S.; MARTINS, L. F. B. N.; OZÓRIO, J. M. B.; CASTILHO, S. C. de P.; MARRA, L. M. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 13, n.4, p. 1447-1469, 2020. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n4p1447-1469>

UNITED STATES SALINITY LABORATORY. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington DC: Us Department of Agriculture, 1954. 160 p. (USDA Agricultural Handbook,60). <https://doi.org/10.2136/sssaj1954.03615995001800030032x>

WEIL, R. R.; ISLAM, K. R.; STINE, M. A.; GRUVER, J. B.; SAMSON-LIEBIG, S. E. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, v. 18, n. 1, p. 3-17, 2003. <https://doi.org/10.1079/AJAA2003003>

ZHANG, J.; LAN, Z.; LI, H.; JAFFAR, M. T.; LI, X.; CUI, L.; HAN, J. Coupling effects of soil organic carbon and moisture under different land use types, seasons and slope positions in the Loess Plateau. *Catena*, v. 233, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107520>

ZHANG, Y.; YANG, J.; YAO, R.; WANG, X.; XIE, W.; 2020. Short-term effects of biochar and gypsum on soil hydraulic properties and sodicity in a saline-alkali soil. *Pedosphere*. V. 30, p. 694–702, 2020. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60051-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60051-7)

ANEXOS

Anexo A - Análise da variância para atributos químicos do solo na camada de 0-5 cm de profundidade

FV	pH _{H2O}	CE	Cátions trocáveis				Cátions solúveis			
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
Época de coleta	21,64*	1,82 ^{ns}	18,83*	4,65*	16,82*	0,04 ^{ns}	4,87*	1,24 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,89 ^{ns}
Cobertura do solo	1,65 ^{ns}	6,80*	10,35*	10,13*	1,93 ^{ns}	11,55*	1,31 ^{ns}	3,87*	6,39*	5,85*
Coleta x Cobertura	3,37*	0,01 ^{ns}	1,48 ^{ns}	0,04 ^{ns}	3,81*	12,22*	0,10 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,03 ^{ns}	0,49 ^{ns}
CV (%)	7,68	84,02	41,48	60,73	47,01	104,13	115,36	187,07	87,56	76,61

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Fisher; ^{ns}Não significativo.

Anexo B - Análise da variância para atributos químicos do solo na camada de 5-10 cm de profundidade

FV	pH _{H2O}	CE	Cátions trocáveis				Cátions solúveis			
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
Época de coleta	16,66*	1,44 ^{ns}	55,03*	0,38 ^{ns}	26,30*	2,98 ^{ns}	2,37 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,12 ^{ns}	2,86 ^{ns}
Cobertura do solo	2,42 ^{ns}	13,92*	6,43*	10,70*	0,22 ^{ns}	4,07*	2,56 ^{ns}	6,42*	4,95*	10,53*
Coleta x Cobertura	1,22 ^{ns}	0,55 ^{ns}	6,44*	1,96 ^{ns}	1,01 ^{ns}	4,02*	1,84 ^{ns}	0,05 ^{ns}	1,73 ^{ns}	0,74 ^{ns}
CV (%)	6,39	96,61	36,54	66,55	50,82	132,43	84,64	175,02	86,73	87,23

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Fisher; ^{ns}Não significativo.

Anexo C - Análise de variância para atributos químicos do solo na camada de coleta de 10-30 cm de profundidade

FV	pH _{H2O}	CE	Cátions trocáveis				Cátions solúveis			
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
Época de coleta	0,05 ^{ns}	1,01 ^{ns}	119,10*	3,14 ^{ns}	19,38*	1,37 ^{ns}	19,63*	0,39 ^{ns}	3,71 ^{ns}	0,73 ^{ns}
Cobertura do solo	18,21*	13,99*	3,6*	3,64*	1,67 ^{ns}	2,41 ^{ns}	5,84*	1,93 ^{ns}	2,32 ^{ns}	10,18*
Coleta x Cobertura	1,31 ^{ns}	0,06 ^{ns}	3,86*	1,60 ^{ns}	2,49 ^{ns}	4,10*	1,29 ^{ns}	1,54 ^{ns}	2,87 ^{ns}	1,63 ^{ns}
CV (%)	6,05	118,13	42,74	74,87	64,41	146,32	67,43	190,03	91,72	113,74

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Fisher; ^{ns}Não significativo.

Anexo D - Análise de variância para atributos químicos do solo na camada de coleta de 30-50 cm de profundidade

FV	pH _{H2O}	CE	Cátions trocáveis				Cátions solúveis			
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
Época de coleta	0,03 ^{ns}	0,64 ^{ns}	116,76*	4,37*	19,16*	1,29 ^{ns}	5,01*	0,16 ^{ns}	27,89*	2,75 ^{ns}
Cobertura do solo	24,53*	23,67*	3,86*	2,98 ^{ns}	1,76 ^{ns}	2,34 ^{ns}	3,77*	2,53 ^{ns}	3,72*	12,27*
Coleta x Cobertura	5,91*	0,99 ^{ns}	3,46*	1,51 ^{ns}	2,32 ^{ns}	4,08*	3,59*	3,04 ^{ns}	7,63*	5,05*
CV (%)	6,87	100,51	42,78	75,24	65,09	148,59	74,55	190,53	69,44	113,51

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Fisher; ^{ns}Não significativo.

Anexo E - Análise da variância dos teores de carbono orgânico total e seus compartimentos na camada de 0-5 cm de profundidade

FV	COT ¹	COP ²	FAF ³	FAH ⁴	HUM ⁵
Coleta	6,31*	11,31*	0,91 ^{ns}	2,72 ^{ns}	10,40*
Cobertura	1,14 ^{ns}	3,73*	1,82 ^{ns}	2,81 ^{ns}	8,12*
Col x Cob	0,72 ^{ns}	0,50 ^{ns}	1,37 ^{ns}	4,64*	5,82*
CV (%)	59,44	59,28	84,88	74,91	46,11

¹Carbono orgânico total, ²Carbono oxidado em permanganato de potássio, ³Fração dos ácidos fúlvicos, ⁴Fração dos ácidos húmicos e ⁵Fração das huminas. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Fisher; ^{ns}Não significativo.

Anexo F - Análise da variância dos teores de carbono orgânico total e seus compartimentos na camada de 5-10 cm de profundidade

FV	COT ¹	COP ²	FAF ³	FAH ⁴	HUM ⁵
Coleta	0,03 ^{ns}	14,92*	0,01 ^{ns}	1,94 ^{ns}	0,08 ^{ns}
Cobertura	0,85 ^{ns}	1,28 ^{ns}	3,03 ^{ns}	0,19 ^{ns}	6,28*
Col x Cob	1,85 ^{ns}	3,13 ^{ns}	5,21*	2,34 ^{ns}	2,26 ^{ns}
CV (%)	68,23	68,93	58,14	75,14	52,98

¹Carbono orgânico total, ²Carbono oxidado em permanganato de potássio, ³Fração dos ácidos fúlvicos, ⁴Fração dos ácidos húmicos e ⁵Fração das huminas. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Fisher; ^{ns}Não significativo.

Anexo G - Análise da variância dos teores de carbono orgânico total e seus compartimentos na camada de 10-30 cm de profundidade

FV	COT ¹	FAF ²	FAH ³	HUM ⁴
Coleta	0,27 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Cobertura	1,34 ^{ns}	0,96 ^{ns}	2,41 ^{ns}	5,38*
Col x Cob	0,49 ^{ns}	2,79*	9,23*	1,52 ^{ns}
CV (%)	60,58	63,23	67,34	59,56

¹Carbono orgânico total, ²Fração dos ácidos fúlvicos, ³Fração dos ácidos húmicos e ⁴Fração das huminas.

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Fisher; ^{ns}Não significativo.

Anexo H - Análise da variância dos teores de carbono orgânico total e seus compartimentos na camada de 30-50 cm de profundidade

FV	COT ¹	FAF ²	FAH ³	HUM ⁴
Coleta	3,43 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,91 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Cobertura	2,43 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,04 ^{ns}	1,34 ^{ns}
Col x Cob	1,14 ^{ns}	0,98 ^{ns}	2,12 ^{ns}	2,35 ^{ns}
CV (%)	68,17	93,44	103,93	61,34

¹Carbono orgânico total, ²Fração dos ácidos fúlvicos, ³Fração dos ácidos húmicos e ⁴Fração das huminas.

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Fisher; ^{ns}Não significativo.