



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

WEYDSON LUIZ PEDROSA DA SILVA

**INDICADORES DA SAÚDE DO SOLO EM CULTIVO AGROECOLÓGICO E
CONVENCIONAL NO SEMIÁRIDO POTIGUAR**

MOSSORÓ

2025

WEYDSON LUIZ PEDROSA DA SILVA

**INDICADORES DA SAÚDE DO SOLO EM CULTIVO AGROECOLÓGICO E
CONVENCIONAL NO SEMIÁRIDO POTIGUAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo do Solo e Água

Orientadora: Carolina Malala Martins Souza,
Professora Dra.

Coorientadora: Eulene Francisco da Silva,
Professora. Dra.

MOSSORÓ

2025

® Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S5871 Silva, Weydson Luiz Pedrosa.
Indicadores da saúde do solo em cultivos
agroecológico e convencional no semiárido potiguar
/ Weydson Luiz Pedrosa Silva. – 2025.
67 f. : il.

Orientador: Carolina Malala Martins Souza.
Coorientadora: Eulene Francisco Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo do Solo e Água, 2025.

1. Qualidade do solo. 2. Enzimas do solo. 3.
Agricultura familiar. 4. Transição agroecológica.
5. Preservação do bioma Caatinga. I. Souza,
Carolina Malala Martins, orient. II. Silva,
Eulene Francisco, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva

CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

INDICADORES DA SAÚDE DO SOLO EM CULTIVO AGROECOLÓGICO E CONVENCIONAL NO SEMIÁRIDO POTIGUAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo do Solo e Água

Defendida em: 27 / 11 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **CAROLINA MALALA MARTINS SOUZA**
Data: 27/11/2025 12:28:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Carolina Malala Martins Souza, Prof^a. Dr^a. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **EULENE FRANCISCO DA SILVA**
Data: 27/11/2025 14:43:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eulene Francisco da Silva, Prof^a. Dr^a. (UFERSA)
Membro Examinador Coorientadora

Documento assinado digitalmente
 **GABRIELA CEMIRAMES DE SOUSA GURGEL**
Data: 27/11/2025 11:04:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gabriela Cemírames de Souza Gurgel, Prof^a. Dr^a. (UERN)
Membro Examinador (Externo da UFERSA)

Documento assinado digitalmente
 **JOAQUIM EMANUEL FERNANDES GONDIM**
Data: 27/11/2025 11:12:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Joaquim Emanuel Fernandes Gondim, Prof. Dr. (UEVA)
Membro Examinador (Suplente)

*Ao meu Pai Luiz Joaquim da Silva,
Avôs paternos Júlia e Joaquim
Avôs maternos Nair e Antônio
(In Memoriam).*

*A minha esposa Clarice,
Aos filhos Miguel e Marina
e minha mãe Maria de Fatima
DEDICO.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder o dom da vida, a saúde, a coragem, a sabedoria e o discernimento necessários para concluir mais essa etapa de minha vida.

Agradeço à minha esposa Clarice, pelo amor, paciência, companheirismo e compreensão. Por estar sempre ao meu lado, incentivando e motivando a continuar a superar os desafios da vida, com suas palavras de apoio em todos os momentos.

Aos meus filhos, Miguel e Marina, presentes de Deus na minha vida, com seus sorrisos, aliviam o peso das preocupações e tornam a vida mais leve, fazendo recordar da minha infância.

À minha mãe Fatima, pelo amor incondicional, pelo carinho, pela preocupação, pelas orações e energias positivas constantes, que contribuíram para vencer as batalhas diárias.

Aos meus irmãos, Ana Luiza, André Luiz, Júlio Cesar e Andréia, que mesmo à distância, contribuíram com carinho, pelas palavras de apoio, pelas orações e pelos momentos de descontração que tivemos e ainda teremos.

À minha orientadora, Carolina Malala, por me aceitar como orientado, pelos ensinamentos, por ter sido compreensiva, paciente e por ter norteado nesta pesquisa.

Ao corpo docente do Programa de Manejo de Solo e Água, em especial aos professores doutores das disciplinas cursadas: Carol e sua substituta Priscila, Diana, Eulene, Fábio, Francismar, Jeane, Marcelo, Reginaldo, Steferson e Rafael, pelos conhecimentos transmitidos e pela dedicação à docência e à pesquisa científica. Que o Deus criador do Universo continue iluminando vossos caminhos nessa jornada científica.

Às componentes da Banca Examinadora, Prof^ª. Dr^ª. Carolina Malala Martins Souza, Prof^ª. Dr^ª. Eulene Francisco da Silva, Prof^ª. Dr^ª. Gabriela Cemírames de Souza Gurgel, Prof^ª. Dr^ª. Jeane Cruz Portela e ao Prof^º. Dr. Joaquim Emanuel Fernandes Gondim pelas importantes contribuições dadas no intuito de melhorar o trabalho realizado.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água (PPGMSA) pela oportunidade de possibilitar à comunidade a realização de pós-graduação gratuita e de qualidade, disponibilizando laboratórios, equipamentos e reagentes necessários para as análises de solo. Juntamente com o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA, pela minha liberação durante os últimos dois anos. Sem a valiosa contribuição destas instituições, essa pesquisa não seria possível.

A todos com quem tive a oportunidade de conviver neste período, em especial os que fazem parte das equipes dos Laboratórios de Química e Mineralogia (Alcigerio, Alrivan Junior, Diego, Eduarda, Francisco, Helena, Lunara, Maria Eduarda, Madson, Victor) e do Laboratório de Matéria Orgânica do Solo (Andler, Francisco Eder, Erlen, João Luiz, Ramona) pela convivência saudável e pelo apoio durante a realização das análises laboratoriais e dos trabalhos de campo, pois suas contribuições foram fundamentais para a conclusão da pesquisa.

Aos agricultores do Projeto de Assentamento Paulo Freire/Mossoró-RN, em especial aos que participaram desta pesquisa, Sr. Sueldo, Sr. Alcides, Sr. Pedro e Sr. José, pela possibilidade de realizar coletas de solos em suas áreas de cultivo e pela ajuda durante a amostragem. Desejo que Deus conceda sempre essa grande disposição para ajudar ao próximo e coragem para continuarem nas árduas tarefas diárias que enfrentam os pequenos agricultores e suas famílias.

Aos servidores técnicos dos laboratórios de rotina e pesquisas em Física e Química do solo do PPGMSA: Antônio Carlos, Kaline, Maria Valdete, Simone e Paula, pelos auxílios durante a realização das análises laboratoriais.

Aos servidores terceirizados da UFERSA, que são responsáveis pela manutenção predial e limpeza dos ambientes de convivência diária em toda a universidade, e em especial aos do LASAP e LASAPSA.

A todos os colegas do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água (PPMSA) pela amizade, companheirismo e bom convívio durante todas as fases do mestrado.

*“O homem somente terá saúde se
os alimentos possuírem energia vital.
Os alimentos somente possuem energia
vital se as plantas formem saudáveis.
As plantas somente serão saudáveis
se os solos forem saudáveis.”*
Solo sadio --> Planta sadia --> Humano sadio
Ana Primavesi

RESUMO

A sustentabilidade da agricultura no semiárido brasileiro depende diretamente da saúde do solo, que é fortemente influenciada pelas práticas de manejo. A degradação do solo em sistemas convencionais contrasta com os benefícios potenciais de abordagens agroecológicas. Objetivou-se realizar um diagnóstico comparativo da saúde do solo em diferentes sistemas de uso em um assentamento rural no semiárido potiguar, utilizando um conjunto integrado de indicadores físicos, químicos e bioquímicos do solo. A pesquisa foi conduzida no Projeto de Assentamento Paulo Freire em Mossoró-RN, comparando-se áreas de algodoeiro em sistema agroecológico de algodão consorciado (gergelim e milho), monocultivo convencional de subsistência (milho e feijão-caupi) e áreas com vegetação nativa preservada, utilizada como referência. Cada unidade amostral foi representada por uma área de 800 m² dividida em 4 quadrantes de 200 m². Realizou-se a amostragem dos solos em 5 mini trincheiras por quadrante, coletando amostras simples para formar uma amostra composta em cada quadrante, o que resultou em 20 pontos de coletas que formaram 4 amostras compostas por tratamento. Com as análises laboratoriais obteve-se informações sobre os parâmetros físicos (densidade, porosidade, granulometria), químicos (pH, CE, macronutrientes, carbono orgânico com fracionamento físico) e bioquímicos (carbono da biomassa microbiana e atividade das enzimas β -glicosidase e Arilsulfatase). Com os dados obtidos utilizaram-se as técnicas de estatística multivariada, cujos resultados indicaram que o sistema agroecológico promoveu uma recuperação expressiva da saúde do solo em relação ao monocultivo, evidenciada por menor densidade do solo, teores superiores de carbono orgânico do solo, atividade da β -glicosidase e CBM. As análises de agrupamentos e dos componentes principais confirmaram que os indicadores do sistema agroecológico se aproximaram dos observados na vegetação nativa. Portanto, a transição de um sistema de monocultivo convencional para um sistema de cultivo agroecológico consorciado resultou em uma melhoria da saúde do solo no contexto do semiárido Potiguar. Visto que as áreas com cultivos agroecológicos, quando bem manejadas, apresentam qualidade químicas, físicas e biológicas mais próximas às áreas com vegetação nativa. Conclui-se que a adoção de práticas agroecológicas é uma estratégia eficaz para mitigar a degradação e restaurar a funcionalidade do solo em regiões semiáridas, fortalecendo a resiliência dos agroecossistemas.

Palavras-chave: Qualidade do solo; Enzimas do solo; Agricultura familiar; Transição agroecológica; Preservação do bioma Caatinga.

ABSTRACT

The sustainability of agriculture in the Brazilian semiarid depends directly on soil health, which is strongly influenced by management practices. Soil degradation in conventional systems contrasts with the potential benefits of agroecological approaches. This study aimed to perform a comparative diagnosis of soil health across different land-use systems in a rural settlement in the Potiguar semiarid, using an integrated set of physical, chemical, and biochemical soil indicators. The research was conducted at the Paulo Freire Settlement in Mossoró, Rio Grande do Norte, Brazil, comparing areas of cotton cultivated under an agroecological intercropping system (sesame and maize), conventional subsistence monoculture (maize and cowpea), and preserved native vegetation used as a reference. Each sampling unit comprised an 800 m² area divided into four 200 m² quadrants. Soil sampling was carried out using five mini-trenches per quadrant; simple samples were combined to form a composite sample for each quadrant, yielding 20 sampling points that produced four composite samples per treatment. Laboratory analyses provided information on physical parameters (bulk density, porosity, particle size distribution), chemical parameters (pH, electrical conductivity, macronutrients, and soil organic carbon with physical fractionation), and biochemical parameters (microbial biomass carbon and the activities of β -glucosidase and arylsulfatase). Multivariate statistical techniques were applied to the dataset; results indicated that the agroecological system promoted a marked recovery of soil health relative to the monoculture system, evidenced by lower bulk density, higher soil organic carbon contents, increased β -glucosidase activity, and greater microbial biomass carbon. Cluster and principal component analyses confirmed that the agroecological indicators approached those observed in native vegetation. Therefore, the transition from conventional monoculture to an intercropped agroecological system resulted in improved soil health in the context of the Potiguar semiarid. Well-managed agroecological areas exhibited chemical, physical, and biological qualities more similar to native vegetation. It is concluded that the adoption of agroecological practices is an effective strategy to mitigate degradation and restore soil functionality in semiarid regions, thereby strengthening the resilience of agroecosystems.

Keywords: Soil quality; Soil enzymes; Family farming; Agroecological transition; Preservation of the Caatinga biome.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Valores médios da precipitação pluviométrica e temperatura do município de Mossoró-RN, no período de setembro de 2023 a agosto de 2024.....	32
Figura 2	– Mapa de localização das áreas com seus respectivos cultivos no município de Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.....	33
Figura 3	– Mini trincheira (0,30 x 0,30 x 0,30 m) utilizada na amostragem de solo.....	36
Figura 4	– Resultado da Análise dos Componentes Principais em relação as variáveis.....	40
Figura 5	– Análise dos componentes principais em relação aos tipos usos do solo.....	41
Figura 6	– Análise de agrupamento (cluster) em relação aos tipos de uso do solo.....	42
Figura 7	– Análise de agrupamento (cluster) entre as principais variáveis.....	43
Figura 8	– Carbono orgânico e nitrogênio total sob diferentes usos do solo.....	49
Figura 9	– Carbono orgânico particulado (COP) e associado aos minerais (COAM) sob diferentes usos do solo.....	50
Figura 10	– Carbono da biomassa microbiana e atividade enzimática sob diferentes usos do solo.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Históricos das áreas com seus respectivos cultivos no município de Mossoró - RN, Brasil.....	33
Tabela 2	–	Análise granulométrica e classe textural do solo sob diferentes usos na profundidade de 0 - 0,10 e 0,10 - 0,20 m. Mossoró-RN.....	37
Tabela 3	–	Atributos químicos nas profundidades 0 - 0,10 e 0,10 - 0,20 m, Projeto de Assentamento Paulo Freire, Mossoró-RN.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Análise de grupamento
ACP	Análise de componentes principais
ADA	Argila dispersa em água
AF	Análise fatorial
Al ³⁺	Alumínio
Aril	Arilsufatase
Beta	β -glicosidade
BioAs	Bioanálise de solo
Ca ²⁺	Cálcio
CBM	Carbono da Biomassa Microbiana
CE	Condutividade Elétrica
COAM	Carbono Orgânico Associado aos Minerais
COP	Carbono Orgânico Particulado
COS	Carbono Orgânico do Solo
COT	Carbono Orgânico Total
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
EC	Estoque de Carbono
EF	Efeito priming
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
GPS	Global Positioning System
H+Al	Acidez potencial
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IQS	Índice de Qualidade do Solo
ISS	Índice de Saúde do Solo
K ⁺	Potássio
LASAP	Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta
LASAPSA	Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta do Semiárido
LQMS	Laboratório de Química e Mineralogia do Solo
m	Saturação de Alumínio
Mg ²⁺	Magnésio
MO	Matéria Orgânica
MOS	Matéria Orgânica do Solo
Na ⁺	Sódio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
P ⁺	Fósforo
PA	Projeto de Assentamento
PST	Percentagem de Sódio Trocável
QS	Qualidade do Solo
RPM	Rotação por minutos

SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SS	Saúde do Solo
SB	Soma de Bases Trocáveis
t	CTC efetiva
T	CTC a pH 7,0
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
V	Saturação de bases
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido

LISTA DE SÍMBOLOS

@	Arroba
©	Copyright
®	Marca registrada
%	Porcentagem
\$	Cifrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	17
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1	Agricultura familiar.....	20
2.2	Transição agroecológica no semiárido.....	21
2.3	Qualidade e saúde do solo.....	23
2.4	Indicadores físicos da saúde do solo.....	25
2.5	Indicadores químicos da saúde do solo.....	26
2.6	Indicadores bioquímicos da saúde do solo.....	28
2.7	Manejo e saúde do solo.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E LOCAIS DE ESTUDO.....	31
3.2	AMOSTRAGEM DOS SOLOS E PREPARO DAS AMOSTRAS.....	35
3.3	ANÁLISES FÍSICAS, QUÍMICAS E ORGÂNICAS DO SOLO.....	36
3.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	38
4	RESULTADOS	39
4.1	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO – AC	39
4.2	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS – ACP.....	40
4.3	ANÁLISE DE AGRUPAMENTO – AA.....	41
4.4	FERTILIDADE DO SOLO.....	43
4.5	COS, COP, CBM E ATIVIDADE ENZIMÁTICA.....	49
5	DISCURSÕES.....	52
6	CONCLUSÕES	58
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
8	REFERÊNCIAS.....	61
	ANEXO A – MAPA DE SOLOS DO PA PAULO FREIRE.....	69
	ANEXO B – TABELA DA ANÁLISE DE CORRELAÇÃO.....	70
	ANEXO C – INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO (TECNOLOGIA BIOAS) NA PROFUNDIDADE DE 0 – 0,10 m	71

1. INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura desenvolvida no semiárido brasileiro está inserida em um contexto singular sob os pontos de vista edafoclimático, socioeconômico e ambiental. No âmbito nacional, o bioma Caatinga destaca-se por sua exclusividade e extensão territorial, abrangendo 11% do território brasileiro e cerca de 70% da região Nordeste. Trata-se de uma região marcada por forte variabilidade climática, longos períodos de estiagem, elevada evapotranspiração e solos frequentemente rasos ou pedregosos. Esses fatores moldam profundamente o funcionamento dos agroecossistemas e condicionam a produtividade agrícola, sobretudo em áreas manejadas por agricultores familiares, que representam uma parcela expressiva das unidades produtivas do Nordeste.

A estrutura fundiária dos imóveis na região Nordeste evidencia a predominância da agricultura familiar, responsável por parcela significativa do abastecimento alimentar local. Dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada indicam que cerca de 50% dos estabelecimentos familiares do país concentram-se no Nordeste brasileiro (IPEA, 2021), o que reforça a dimensão social e estratégica do manejo sustentável dos solos nessa região. Contudo, a produtividade frequentemente limitada decorre de restrições climáticas intrínsecas e, sobretudo, de práticas de manejo que, historicamente, não priorizaram a conservação dos atributos edáficos.

Nessa região, coexistem modelos com agricultura de precisão irrigada e a agricultura familiar, esta última é no abastecimento alimentar regional. No entanto, a baixa produtividade observada nos agroecossistemas familiares está frequentemente associada às limitações climáticas e edáficas, somadas à adoção de práticas agrícolas pouco conservacionistas. O manejo inadequado pode levar à compactação do solo, perda de estrutura, esgotamento de nutrientes e menor retenção de água. Nesse sentido, a qualidade do solo surge como um fator determinante para a produtividade agrícola, especialmente em regiões com restrições naturais como o semiárido. A avaliação da qualidade edáfica deve considerar o conjunto de parâmetros físicos, químicos e biológicos, uma vez que a funcionalidade do sistema solo-planta depende da interação sinérgica desses componentes (STEFANOSKI et al., 2013).

Portanto, o solo assume papel central não apenas como suporte físico à produção, mas como regulador de fluxos hídricos, ciclagem de nutrientes, estoque de carbono e manutenção da biodiversidade edáfica. A função dos solos como sumidouros de carbono tem ganhado destaque nas discussões científicas e políticas globais, especialmente diante da urgência em

mitigar as mudanças climáticas, pois estima-se que os solos são um dos compartimentos com grande potencial de armazenar carbono, superando os valores armazenados na vegetação e atmosfera combinadas. Tal fato evidencia seu protagonismo estratégico para reduzir as concentrações de CO₂ emitidas na atmosfera. Entretanto, esse potencial depende fortemente do manejo adotado, ou seja, sistemas de cultivo convencionais, com revolvimento intenso e baixa adição de resíduos orgânicos, tendem a acelerar a mineralização da matéria orgânica e liberar o carbono armazenado no solo para a atmosfera. Em contrapartida, práticas conservacionistas e agroecológicas favorecem o acúmulo e a estabilização do carbono no solo, transformando-o em um importante sumidouro.

Amplamente utilizados no Brasil, os sistemas convencionais são caracterizados pelo preparo intensivo, monocultivos, uso frequente de insumos sintéticos e baixa reposição de resíduos orgânicos, e têm sido associados à degradação dos compartimentos físicos, químicos e biológicos do solo. Na parte física, o revolvimento contínuo reduz a estabilidade de agregados, aumenta a densidade do solo e diminui a porosidade funcional, comprometendo a infiltração de água e o crescimento radicular. Do ponto de vista químico, sistemas convencionais tendem a apresentar maior acidificação, redução da matéria orgânica e desequilíbrios nutricionais, especialmente quando há baixa adição de resíduos vegetais. Sistemas de plantios convencionais com uso intensivo de agroquímicos e práticas de manejo disruptivas, tendem a reduzir a diversidade e a funcionalidade das comunidades microbianas, comprometendo processos bioquímicos essenciais.

No Brasil, a agroecologia vem consolidando-se como um campo científico e político capaz de integrar dimensões ambientais, sociais, econômicas e culturais, especialmente em regiões vulneráveis como a região semiárida brasileiro. No eixo ambiental, a agroecologia se destaca por promover práticas que reduzem a degradação do solo, conservam a biodiversidade e aumentam a eficiência no uso da água. A diversificação de cultivos, o uso de adubos orgânicos, a proteção do solo com cobertura vegetal e a redução do uso de agroquímicos contribuem para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, como ciclagem de nutrientes, regulação hídrica e sequestro de carbono. No eixo social, a agroecologia fortalece a autonomia dos agricultores familiares ao reduzir a dependência de insumos externos, promover o uso de recursos locais e estimular a organização comunitária.

Os sistemas agroecológicos possuem maior capacidade de promover melhorias no solo, principalmente pela rotação de cultivos, aplicação de fertilizantes orgânicos e redução dos tratamentos culturais, promovendo o incremento do teor de matéria orgânica do solo. Outra prática

agrícola que melhora a qualidade do solo, quando comparada à forma convencional de cultivo, é o sistema de plantio direto, por proporcionar menor revolvimento do solo e adição anual de resíduos orgânicos, elevando o teor de matéria orgânica, melhorando a estrutura do solo e favorecendo a disponibilização de macro e micronutrientes. (GAMARRA; ROJAS, 2017).

A discussão sobre qualidade do solo no semiárido também se insere em agendas ambientais globais, especialmente no que se refere aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A manutenção da fertilidade e da produtividade agrícola dialoga diretamente com metas de segurança alimentar (ODS 2 e 3), enquanto a conservação da biodiversidade e o aumento do estoque de carbono no solo contribuem para ações de mitigação climática e preservação dos ecossistemas (ODS 13 e 15).

Apesar dos avanços, ainda são escassos os estudos que integram, de forma comparativa, indicadores físicos, químicos e bioquímicos em sistemas de cultivo característicos do semiárido potiguar. A compreensão conjunta desses parâmetros é essencial para diagnosticar a saúde do solo e orientar intervenções que promovam maior resiliência dos agroecossistemas. Diante do exposto, torna-se evidente que a compreensão integrada dos parâmetros físicos, químicos e biológicos do solo é fundamental para o diagnóstico da saúde do solo e para a promoção de sistemas agrícolas mais resilientes no semiárido brasileiro.

Como hipótese espera-se que a utilização de práticas agroecológicas e sua diversidade de espécies cultivadas favoreçam a porosidade, a agregação, a ciclagem de resíduos orgânicos, a disponibilidade de nutrientes, a atividade enzimática e o aumento da biomassa microbiana, proporcionando uma melhor saúde dos solos nestes sistemas em relação ao monocultivo. Os cultivos agroecológicos consorciados estudados, podem elevar a entrada de carbono nas frações lábeis da matéria orgânica, aumentando as frações humificadas, a ação microbiana e as enzimas da β -GLICO e ARIL, favorecendo outros parâmetros de qualidade do solo e assemelhando-se aos resultados obtidos nas áreas de referência.

A presente pesquisa se insere nesta lacuna, fornecendo evidências científicas que possam associar as práticas agroecológicas como estratégia de recuperação e manutenção da saúde do solo nesta região. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi realizar um diagnóstico comparativo da saúde do solo, por meio de um conjunto integrado de parâmetros físicos, químicos e bioquímicos, em sistemas de algodoeiro agroecológico consorciado, monocultivos convencionais de subsistência e área de vegetação nativa como referência em assentamento de reforma agrária em Mossoró-RN.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Agricultura Familiar

A agricultura familiar desempenha um papel socioeconômico fundamental no Brasil, ao qual é responsável pela maior parte das unidades produtivas. De acordo com os dados do Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística de 2017, existiam 5.073.324 propriedades rurais no Brasil, das quais aproximadamente 77 % (3.897.408) pertencentes a agricultores familiares, com sua maior concentração na região Nordeste (1.838.846), com representatividade de 47,2% do total nacional (AQUINO; ALVES; VIDAL, 2020).

A produção da agricultura familiar brasileira é multifuncional, englobando cultivos agrícolas, criação de animais de pequeno porte, coleta de produtos extrativistas e confecção de artesanatos para serem comercializados em mercados locais próximos, ao qual resulta na geração de renda para as famílias rurais. Mesmo com essa relevância, os pequenos produtores sempre sofreram com a escassez de recursos financeiros, riscos climáticos e um cenário sociopolítico desfavorável. Embora existam programas para agricultores familiares, a renda média desses produtores das regiões Norte e Nordeste são incomparáveis com as demais regiões, com respectivamente, R\$ 454,92 e R\$ 467,22 por hectare. Destaca-se a necessidade de políticas públicas específicas para a região Nordeste com ênfase no bioma Caatinga, considerando suas particularidades e potencialidades (GAMARRA-ROJAS e FABRE, 2017; IPEA, 2021).

A partir da década de 90, os produtores familiares passaram a ter uma maior atenção governamental, com a criação de políticas públicas, tais como o Programa de Aquisição de Alimentos – PAA, o Programa Nacional de Alimentação Escolar – PNAE e o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar – PRONAF, programas estes de elevada importância para a soberania e segurança alimentar do país. Em relação ao volume de produção, destaca-se a relevância da agricultura familiar para o abastecimento dos mercados locais e a segurança alimentar das populações rurais e urbanas do país. Isso demonstra que a agricultura familiar é importante em todos os biomas brasileiros, embora apresente diferentes níveis de participação na produção total e área ocupada. A agricultura familiar no bioma Caatinga é bastante representativa na região, refletindo sua importância na estrutura fundiária e socioeconômica da região (RIBEIRO et al., 2019; SANTOS et al., 2021).

Iniciativas envolvendo o cultivo de algodão na forma de consórcios agroecológicos vêm sendo desenvolvidas com apoio de entidades de cooperação internacional e de projetos sociais, sob a liderança e responsabilidade de algumas das organizações que compunham a base de assessoria técnica do Projeto Dom Hélder Câmara (PDHC). As articulações do PDHC com ONGs, movimentos sociais, setor público e privado, entidades de pesquisa e comunidades locais no semiárido resultaram em ações coordenadas para viabilizar a produção agrícola de base agroecológica. Esta rede de apoio vem estimulando pequenos produtores familiares da região semiárida potiguar a iniciarem cultivos de algodão agroecológico consorciados com culturas alimentares, todavia, ainda são poucos os relatos dos impactos ocasionados a saúde dos solos após o retorno dessa cultura, principalmente nas pequenas propriedades rurais do semiárido potiguar (MATTOS et al., 2020).

Ao final do ano de 2024 o Governo Federal, instituiu o Decreto nº 12.287, de 03/12/2024, criando o Programa Nacional de Pesquisa e Inovação para a Agricultura Familiar e Agroecologia (PNPIAF), com o objetivo de promover ações de pesquisa e inovação voltadas para a agricultura familiar, enfatizando a transição agroecológica de sistemas agroalimentares, a sustentabilidade de agroecossistemas e a preservação dos biomas. Este decreto compartilha sua execução entre os ministérios do Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar (MDA), da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), da Educação (MEC), do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA) e da Agricultura e Pecuária (MAPA), por meio da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Representando uma reparação histórica das ações de pesquisa e inovação destinadas à agricultura familiar, envolvendo sistemas produtivos agroecológicos e a transformação dos sistemas agroalimentares. Mesmo com investimentos nas áreas de pesquisa e extensão rural, direcionados para as necessidades da agricultura familiar, ainda é insuficiente para o aumento da produtividade local e regional frente às características climáticas do semiárido brasileiro.

2.2 Transição Agroecológica no Semiárido

A transição agroecológica no Semiárido brasileiro tem se consolidado como um campo de estudo que articula dimensões sociais, ambientais e econômicas, buscando alternativas sustentáveis para enfrentar os desafios impostos pela escassez hídrica e pela vulnerabilidade climática. A adoção de práticas agroecológicas (adubação orgânica,

cobertura e não revolvimento do solo, consórcios/rotações com diferentes espécies, manejo integrado de pragas, sistemas agroflorestais) em cultivos familiares e comunitários representa não apenas uma estratégia de produção agrícola, mas também um movimento cultural de resistência e resgate de conhecimentos. Com a integração de tecnologias de convivência com a seca (cisternas e barragens subterrâneas), fortalece-se a sustentabilidade dos sistemas agroecológicos, permitindo maior autonomia das famílias agricultoras frente às irregularidades pluviométricas, não sendo apenas uma alternativa técnica isolada, mas uma estratégia de sobrevivência e de fortalecimento da soberania alimentar (MELO et al., 2023).

A transição agroecológica é um processo sociotécnico e territorial de redesenho de sistemas produtivos, envolvendo diversificação, redução da dependência de insumos externos e fortalecimento de redes locais de conhecimento, mercados e governança. Entretanto, a transição não se limita ao aspecto técnico, pois estudos evidenciam que experiências inovadoras em comunidades do Semiárido estão profundamente ligadas às territorialidades e às práticas sociais, o que fortalece a soberania alimentar e a capacidade de auto-organização.

No Semiárido, a transição agroecológica deve ser compreendida como mudança paradigmática: superar a ideia do “combate à seca” e adotar a “convivência com o Semiárido” implica reconhecer que os limites ambientais não são barreiras, mas condições para a construção de sistemas resilientes. Por um lado, essa perspectiva cultural e política é uma vantagem, pois fortalece a identidade regional, por outro, exige enfrentamento de resistências históricas e institucionais (BARBOSA; HERNÁNDEZ, 2025).

Em estudo realizado em territórios semiáridos demonstrou-se que as comunidades que adotaram práticas agroecológicas tiveram incremento de até 25% na diversidade de cultivos alimentares, contribuindo diretamente para a segurança alimentar local. Assim, a agricultura familiar desempenha papel decisivo na transição agroecológica, sobretudo pela diversificação de cultivos, reduzindo riscos associados às mudanças climáticas e ampliando a segurança alimentar. Práticas como rotação de culturas, uso de adubação orgânica e irrigação controlada são essenciais para mitigar processos de degradação, como salinização e erosão (CASTRO; SANTOS, 2020; FONSECA et al., 2024; MUNIZ et al., 2023).

Em sistemas agroflorestais sucessionais situados no Semiárido, verificou-se que esses sistemas aumentaram em 30% a cobertura vegetal e em 22% a presença de espécies nativas em comparação com áreas de cultivo convencional. Esses dados reforçam que a eficiência ecológica das agroflorestas mostra-se vantajosa por promover equilíbrio entre

produção e conservação, mas enfrenta obstáculos relacionados ao tempo de maturação das espécies arbóreas e à necessidade de maior investimento inicial. Contudo, ainda ocorrem, com frequência dificuldades relacionadas à falta de acesso a crédito e à assistência técnica, o que limita a expansão dessas práticas, configurando uma desvantagem estrutural para a transição agroecológica (FELIPE et al., 2023).

No Semiárido brasileiro, existem avanços significativos, como o fortalecimento da agricultura familiar, a diversificação de cultivos, a adoção de tecnologias hídricas e o desenvolvimento de agroflorestas. Dentre as vantagens, incluem-se maior resiliência socioecológica, diversificação de cultivos, incremento da renda familiar, segurança alimentar, fortalecimento da identidade cultural e valorização dos saberes tradicionais. Como desvantagens tem-se os desafios enfrentados pelos produtores e pesquisadores em relação às limitações de recursos financeiros, políticas públicas, acesso restrito a crédito, à assistência técnica insuficiente em todas as comunidades rurais e à dificuldade de superar paradigmas culturais enraizados. A transição agroecológica, portanto, não é apenas técnica, mas também política e social, exigindo articulação entre comunidades, instituições e governos para que se torne efetiva e duradoura.

2.3 Qualidade e Saúde do Solo

O aumento da quantidade de pesquisas sobre Qualidade do Solo (QS) iniciou na década de 1990, quando a importância do solo do ponto de vista da qualidade ambiental começou a ser abordada nas publicações científicas, motivado pelo aumento da degradação dos recursos naturais e pelas funções do solo na sustentabilidade agrícola. Houve um aumento considerável no interesse sobre o tema QS, cerca de 75 % dos artigos científicos da área foram publicados entre 2010-2020, sendo que 50 % destes artigos científicos foram publicados entre 2015-2020 ((VEZZANI; MIELNICZUK, 2009; CHERUBIN; SCHIEBELBEIN, 2020).

Os conceitos da qualidade do solo foram evoluindo ao longo do tempo, partindo de uma visão mais produtivista até atingir uma visão integrada dos parâmetros físicos, químicos e biológicos que refletem a saúde dos solos. O termo “qualidade do solo”, em artigos científicos agrícolas, tem sido predominantemente usado em um contexto amplo, mas principalmente para se referir às condições adequadas do solo para o crescimento de plantas.

Entretanto os conceitos ainda são controversos entre os pesquisadores, pois definições estáticas muitas vezes não conseguem representar o que realmente é a QS. Portanto, a QS representa a capacidade de propiciar, dentro de um sistema natural ou manejado, a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e servir de suporte para habitações e saúde humana. O conceito de QS evoluiu com adequação ao ponto de vista agrônomo e da sustentabilidade, envolvendo a capacidade produtiva de forma sustentável, mantendo as características desejáveis do solo (teor de MOS, estabilidade dos agregados, atividade biológica) para as práticas agrícolas (KARLEN et al., 1997; SIMON et al, 2022; BALOTA, 2024).

Atualmente, o termo Saúde do Solo (SS) substitui a expressão qualidade do solo, pois reconhece o solo como um ecossistema vivo que desempenha múltiplas funções ambientais, tais como suporte à produção (alimentos, fibras e biocombustíveis), ciclagem de nutrientes, armazenamento de carbono atmosférico, habitat para a biodiversidade, regulação do fluxo de água no perfil, fornecimento de matéria-prima à indústria (farmacêutica, cosmética e construção civil), além de ser um patrimônio e herança cultural. A verificação da QS não pode ser exatamente determinada, mas pode ser estimada, a partir de diversos indicadores. Esses podem ser qualitativos ou quantitativos, além de passíveis de medição e verificação. É necessário escolher indicadores sensíveis ao manejo utilizado no solo, contribuindo para a detecção de alterações na qualidade do solo mais precocemente. Torna-se importante que os IQS utilizem parâmetros do solo de fácil avaliação, sensíveis aos diversos manejos do solo, devendo apresentar baixa variabilidade dos resultados e limites claros entre as condições de sustentabilidade e as não sustentáveis. É necessário, para avaliar a QS, a utilização de um conjunto de indicadores que englobem as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, pois avaliação de indicadores isolados não é suficiente. A avaliação conjunta de parâmetros químicos, físicos e biológicos é necessária para um diagnóstico completo da qualidade do solo (SANTOS, 2015; SILVA et al., 2020; CHERUBIN; SCHIEBELBEIN, 2022; BALOTA, 2024).

Embora a avaliação integrada seja ideal, alguns trabalhos focam mais em indicadores físicos e químicos, enquanto outros destacam a relevância dos bioindicadores, propondo metodologias específicas para eles. Diversas metodologias são aplicadas para verificar a qualidade dos solos, desde análises visuais em campo até análises laboratoriais dos parâmetros físicos, químicos e biológicos. Tais abordagens ajudam a entender as condições

atuais do solo e a identificar possíveis problemas como salinização, compactação, indisponibilidade de nutrientes, baixa atividade microbiológica, entre outras (MENDES et al., 2015; SANTIAGO et al., 2018; MENDES, 2020; SILVA et al., 2020).

A integração dessas técnicas avaliativas com práticas de manejo sustentável contribui para mitigar os efeitos adversos das condições climáticas extremas, promovendo a resiliência dos ecossistemas e a segurança alimentar. Isso permite não apenas a identificação de áreas degradadas e a tomada de medidas corretivas, mas também a prevenção precoce de problemas futuros, garantindo a sustentabilidade ambiental e a viabilidade econômica das atividades agrícolas. Portanto, compreender e identificar a saúde e a qualidade dos solos são ações essenciais para adequar o manejo agrícola aos recursos naturais disponíveis, principalmente em regiões semiáridas

2.4 Indicadores Físicos da Saúde do Solo

As propriedades físicas estão envolvidas em vários processos no solo, relacionados principalmente ao crescimento radicular, armazenamento e disponibilidade de água e trocas gasosas no seu interior. Os indicadores físicos da qualidade do solo comumente utilizados incluem densidade do solo, estabilidade de agregados, condutividade hidráulica, textura, estrutura das partículas, resistência à penetração das raízes, capacidade de retenção de água e porosidade total. As variáveis físicas da textura, densidade, porosidade, compactação e agregados estão relacionadas e expressam, uma relação direta com a qualidade física do solo. As características analisadas como indicadores físicos neste trabalho foram a densidade do solo, densidade de partículas, argila dispersa em água e granulometria. Com os resultados destas análises, foi possível estimar a porosidade total, o grau de floculação e a classe textural de cada amostra (BALOTA et al., 2011; REICHARDT; TIMM, 2012; BRADY; WEIL, 2013).

Dentre as análises físicas realizadas, a granulometria quantifica a distribuição das partículas sólidas do solo (areia, silte e argila), em que as proporções dessas partículas definem a classe textural do solo desde arenoso ao mais argiloso, que está diretamente relacionada à capacidade do solo em reter água e suportar o crescimento de plantas. A classe textural do solo possui influência pedogenética e apresenta influência na densidade, porosidade e condutividade hidráulica. Além desses fatores, a textura do solo é um importante indicador, pois influencia diretamente a habilidade do solo de reter nutrientes, a

formação de grumos e a melhoria da estrutura, retenção de matéria orgânica (FAO, 2017; SILVA et al., 2020; BALOTA, 2024).

A densidade do solo é a relação entre a massa do solo seco por unidade de volume e representa o solo incluindo o espaço poroso existente. Esta propriedade influencia a produtividade e a qualidade ambiental, pois solos com alta densidade apresenta redução dos espaços porosos, o que dificulta o crescimento das raízes e a infiltração da água no perfil, revelando informações sobre a compactação atual do solo. Portanto, podemos esperar que solos com vegetação nativa preservada apresentem menor densidade do que áreas com práticas intensivas de manejo do solo. A densidade das partículas é dependente das partículas que constituem o solo, apresenta baixa variação entre os diferentes solos e possui valores próximos ao das rochas, como exemplo, temos o Quartzo = $2,65 \text{ kg/m}^3$ (REICHARDT; TIMM, 2012; PARRON et al., 2015; SILVA et al., 2020; LEPSCH, 2021).

Com a determinação dos valores das densidades, é possível estimar de forma indireta a porosidade total (PT) das amostras, essa variável representa uma medida do espaço poroso do solo influenciada diretamente pela densidade. Nesta interação o volume total dos poros é afetado pelo nível de compactação do solo. A porosidade do solo provoca influência no seu desempenho produtivo, auxiliando na compreensão dos impactos provocados pela passagem de máquinas pesadas e pelo pisoteio dos animais, os quais provocam redução do espaço poroso e, conseqüentemente, menor infiltração de água no solo (REICHARDT; TIMM, 2012; SILVA et al., 2020).

O conjunto de parâmetros físicos permite uma identificação mais precisa da capacidade de uso dos solos, por meio das informações sobre sua estrutura, textura, compactação e infiltração. Contudo, a qualidade física do solo é intrinsecamente dependente da sua composição química e mineralógica, que determinam a disponibilidade de nutrientes e a estabilidade dos agregados, que serão abordados nas próximas seções.

2.5 Indicadores Químicos da Saúde do Solo

A análise dos parâmetros químicos do solo é uma ferramenta de avaliação e monitoramento da fertilidade do solo, visto que os macronutrientes serem essenciais durante

o crescimento e desenvolvimento saudável das plantas. Os indicadores químicos da qualidade dos solos (QS) estão relacionados diretamente ao armazenamento e à disponibilidade de nutrientes, entre os procedimentos analíticos mais comuns estão a quantificação das bases trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+), do fósforo (P) disponível, do N total (NT) além dos parâmetros ligados à acidez do solo (pH, Al^{3+} e $\text{H} + \text{Al}$). Pois além de serem informações importantes aos cultivos, tais parâmetros são considerados indicadores sensíveis às variações promovidas pelos usos e manejos agrícolas.

A ciclagem de nutrientes promove a mineralização de nutrientes e o estoque de carbono, fundamentais para a manutenção da fertilidade dos solos cultivados. As alterações antrópicas no manejo do solo têm na matéria orgânica um importante indicador da saúde do solo, pela capacidade de regular a umidade e a fertilidade, além de influenciar diversas características biológicas, químicas e físicas do solo. A variação do pH influencia a disponibilidade de nutrientes para as plantas, quando apresenta valores adequados favorece a absorção de nutrientes pelas raízes. Por outro lado, a verificação da condutividade elétrica (CE) indica a presença de sais no solo, apresentando valores elevados nos solos salinos, o que afeta diretamente o desenvolvimento da maioria das plantas cultivadas (BENBI et al., 2015; PARRON et al., 2015; ANNING et al., 2023).

A matéria orgânica do solo (MOS) compreende o carbono orgânico existente nos solos minerais e orgânicos, ou seja, o carbono orgânico é parte da MOS e fonte de recursos essenciais para a atividade microbiana do solo. Proveniente de resíduos vegetais e animais adicionados ao solo, possui propriedades importantes na retenção de nutrientes, estruturação e retenção de umidade nos solos tropicais. A MOS é comumente utilizada como indicador da qualidade do solo, tendo suas diferentes frações utilizadas para compor índices que possibilitam medir as mudanças causadas pelo manejo. Este componente do solo, exerce forte influência nas propriedades físicas, químicas e biológicas, principalmente na camada superficial (RÜGNITZ et al., 2009; SEQUEIRA; ALLEY, 2011; BRADY; WEIL, 2013; PARRON et al., 2015; AMELUNG et al., 2020).

Com relação ao seu tamanho a MOS pode ser dividida em duas frações: matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada a minerais (MOAM), apenas 1 a 2% está presente na matéria orgânica dissolvida. A MOP reflete o material orgânico fragmentado leve proveniente dos resíduos orgânicos adicionados ao solo e relativamente não decomposto, sendo mais sensível e responsivo ao manejo do solo, enquanto com a MOAM, representa o material orgânico associado a silte e argila, apresentando maior

persistência e estabilidade no solo. A MOP possui curto tempo médio de residência no solo (poucos anos a décadas), em comparação com MOAM que apresenta tempo médio mais longo desde décadas até séculos. Portanto, a MOAM, representa uma forma mais eficiente no sequestro de carbono no solo por longos períodos (HADDIX et al., 2020; LAVALLEE et al., 2020; BAI E COTRUFO, 2022; MATOS et al., 2023).

Desta forma, com a identificação da qualidade química do solo e associando aos demais indicadores de qualidade do solo, podemos adotar um manejo da fertilidade e da matéria orgânica mais indicado às necessidades individuais das áreas agrícolas avaliadas, visando a manutenção da saúde dos solos.

2.6 Indicadores Bioquímicos da Saúde do Solo

O solo é um ecossistema dinâmico, repleto de diversidade biológica responsável por processos fundamentais à sua funcionalidade. No Brasil, foram descritas aproximadamente 50 mil espécies que habitam o solo e a serrapilheira, representando a macrofauna, mesofauna e microfauna. A maior parte das pesquisas utilizando bioindicadores da qualidade do solo avaliam cultivos sob sistema de plantio convencional (SPC) e sistema de plantio direto (SPD). Estes bioindicadores são componentes comumente utilizados para a avaliar a atividade biológica do solo, pois agregam informações sobre a saúde e a funcionalidade do ecossistema existente (GARDIN et al., 2014; MENDES et al., 2022).

Como bioindicadores podemos considerar uma coleção de organismos, um organismo, parte de organismo, o produto de um organismo (enzimas) ou um processo biológico que possa fornecer informações sobre a qualidade de todo ou parte do ambiente. Entre os parâmetros existentes para avaliar a saúde dos solos, temos as análises de carbono da biomassa microbiana, respiração basal e atividades enzimáticas, sendo estas indicadas para estimar o componente biológico dos solos (UTOBO; TEWARI, 2013; MENDES et al., 2015; ROCHA et al., 2022).

As informações sobre a biomassa microbiana e a atividade enzimática podem revelar a saúde do solo e seu funcionamento microbiológicos, sendo utilizadas nas avaliações de áreas de cultivo (MENDES et al., 2015; MENDES 2020; SANTOS, 2021). Com a análise da biomassa microbiana do solo, podemos quantificar a massa dos microrganismos no solo, obtendo resultados em mg de C, N, e/ou P dos microrganismos por Kg de solo,

representando a parte viva da MOS, constituída principalmente por fungos e bactérias. Existe uma estreita relação entre a atividade de enzimas, como β -glicosidase e Arilsulfatase, e o conteúdo de COS. A atividade das enzimas no solo relaciona-se com a quantidade de biomassa microbiana existente, refletindo na ciclagem de nutrientes provenientes da MOS (UTOBO; TEWARI, 2013; ZAGO, 2016; MENDES et al., 2018; CHAER et al., 2023).

A adoção do uso de enzimas do solo como indicadores reside na sua sensibilidade às mudanças nas condições do solo, incluindo o uso da terra e as práticas de manejo. Conforme demonstrado, em pesquisas recentes, essas enzimas são capazes de refletir mudanças nas condições do solo antes mesmo que alterações em outros parâmetros físico-químicos sejam detectáveis. Dessa forma, as enzimas podem indicar alterações na qualidade do solo antes que essas mudanças se manifestem em outros parâmetros mais estáveis, como o teor de carbono orgânico total. A presença da enzima β -glicosidase é fundamental no ciclo do carbono por atuar na decomposição da celulose presente na matéria orgânica do solo, catalisando a hidrólise da celobiose e de outros glicosídeos para liberar glicose para a microbiota e facilitando a ciclagem do carbono com a mineralização da matéria orgânica. Paralelamente, a enzima Arilsulfatase catalisa a hidrólise de ésteres de sulfato orgânico, sendo importante no ciclo do enxofre pois disponibiliza enxofre para as plantas (UTOBO; TEWARI, 2013; ZAGO, 2016; MENDES et al., 2022; BARBOSA et al., 2023; CHAER et al., 2023).

Diferentemente dos indicadores químicos e físicos, que podem levar anos para refletir alterações significativas, os indicadores bioquímicos, como a atividade das enzimas β -glicosidase e Arilsulfatase, funcionam como sentinelas da saúde do solo. Sua atividade responde prontamente às mudanças no aporte de matéria orgânica e às perturbações do manejo, oferecendo um diagnóstico precoce e funcional do estado de conservação do ecossistema edáfico (CHAER et al., 2023; MENDES et al., 2022).

2.7 Manejo e Saúde do Solo

O uso inadequado do solo é a principal causa da degradação e da perda de qualidade ambiental, resultando em redução da matéria orgânica e alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas. A sustentabilidade em agroecossistemas está diretamente ligada à diversidade, nesse sentido, as técnicas de consórcios ou policultivos promovem maior diversidade vegetal, resultando em melhorias na qualidade do solo e na segurança alimentar

(MORAIS et al., 2017; LOBO FILHO et al., 2022).

A avaliação da QS representa um importante conjunto de informações utilizadas para a manutenção de sua conservação, prevenindo a degradação que compromete a sustentabilidade dos agroecossistemas. Para tanto, devem, ser selecionados indicadores que melhor reflitam as modificações sofridas pelo solo. Com uma visão integrada a QS reflete a combinação entre as propriedades físicas, químicas e biológicas, ajudando a compreender os limites de cada solo e as medidas necessárias para sua recuperação (SANTOS, 2015; MORAIS et al., 2017; SILVA et al., 2020).

Para promover a saúde do solo, são necessárias práticas conservacionistas, como a adoção de plantio direto ou mínimo revolvimento do solo, a cobertura permanente do solo com o cultivo de plantas de cobertura, e a rotação e/ou consórcio de culturas, que favorecem a reciclagem dos nutrientes pelos microrganismos durante a decomposição de resíduos orgânicos. A estrutura do solo é alterada pelo manejo, e a redução do revolvimento ou o não revolvimento da superfície vegetal pode melhorar a agregação e proteger contra a erosão. A MOS é de fundamental importância para a manutenção e preservação da agricultura, pois influencia propriedades químicas, físicas e biológicas, a infiltração, a retenção de água, a suscetibilidade à erosão e a ciclagem de nutrientes (OLIVEIRA, 2016; SILVA et al., 2020; BOCALETI et al., 2021).

Em sistemas de plantio direto, o acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo melhora a agregação e aumenta o Carbono Orgânico Total (COT), especialmente na camada superficial. Variáveis químicas como pH, Ca, Mg, Matéria Orgânica (MO), CTC efetiva e V% foram encontradas em maior proporção nos sistemas de manejo agroecológico do que nas áreas de pasto. Áreas com policultivos promovem maiores teores e estabilização de nutrientes em relação à vegetação nativa, sendo que quanto mais antigos apresentam melhorias na qualidade química, mas para isso é necessário adição de MO (OLIVEIRA, 2016; ROCHA et al., 2021; LOBO FILHO et al., 2022).

A agroecologia pode ser definida por princípios de práticas que melhoram os sistemas ecológicos, incluindo a reciclagem de nutrientes, a melhoria dos solos e o aumento da biodiversidade. Sistemas com revolvimento excessivo do solo e/ou ausência de cobertura vegetal favorecem a degradação química e física. Estudos demonstram que os bioindicadores

são mais sensíveis que indicadores químicos e físicos para detectar, com mais antecedência, alterações que ocorrem no solo em virtude do seu uso e do manejo adotado (MENDES et al., 2015; OLIVEIRA, 2016; ROCHA et al., 2021).

As enzimas expressam alterações ambientais decorrentes da gestão do solo e podem indicar, de forma precoce, o estado de conservação do solo. Quando ocorre uma maior atividade de certas enzimas do solo, induzida por práticas de conservação, favorece-se a melhoria de outros parâmetros de qualidade do solo, como conteúdo de matéria orgânica, agregação das partículas e infiltração de água no solo, fundamentais para a sustentabilidade e produtividade agrícola (ADETUNJI et al., 2017; CHAER et al., 2022; ROCHA et al., 2021).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área e locais estudados

O estudo foi realizado em áreas produtivas no Projeto de Assentamento (PA) Paulo Freire, localizados no município de Mossoró, estado do Rio Grande do Norte, Brasil em 2023. As coordenadas geográficas do município são 5° 16' 51.1'' S, 37° 11' 45.2'' W e altitude de 16 m. O clima da região, de acordo com Köppen, é BSh, semiárido quente e seco, marcado por dois períodos bem definidos: seco (prolongado) e úmido (curto e irregular). A temperatura e a precipitação pluviométrica médias mensais são apresentados na Figura 1. A cobertura vegetal da área corresponde a uma formação florestal sazonalmente seca, caracterizada como Caatinga hiperxerófila, doravante denominada vegetação nativa, composta por espécies herbáceas e arbóreo-arbustivas, tipicamente caducifólias e xerófilas, com grande variedade de espécies espinhosas (DUBREUIL et al, 2018; SANTOS et al., 2021; INMET, 2024).

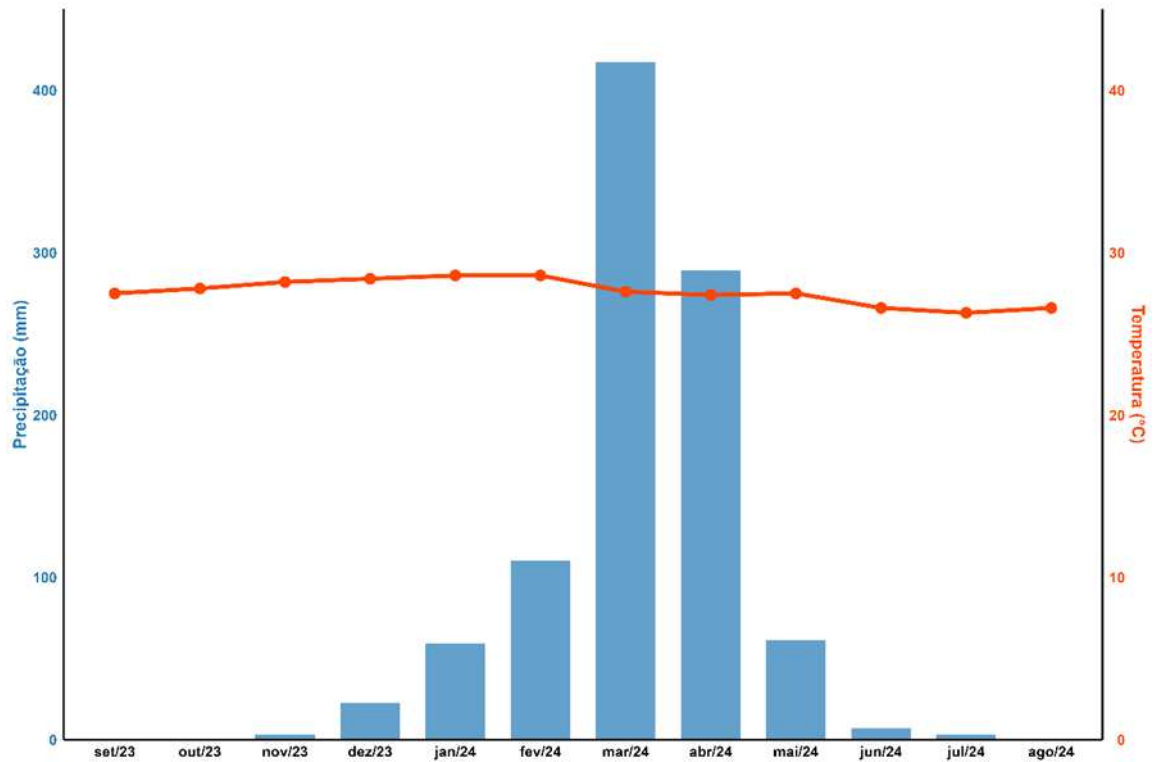


Figura 1: Valores médios da precipitação pluviométrica e temperatura do município de Mossoró-RN, no período de setembro de 2023 a agosto de 2024. Fonte: INMET, 2024.

O município de Mossoró está inserido na porção emersa da Bacia Sedimentar Potiguar, onde o arcabouço estrutural cretáceo é composto por arenitos flúvio-deltaicos altamente porosos da Formação Açu e, calcários rasos da Formação Jandaíra, cuja intensa fraturação e dissolução cárstica influenciam a drenagem, a morfogênese e a hidrogeologia regional. As coberturas neógeno-quaternárias, especialmente a Formação Barreiras e depósitos eólicos/costeiros, originam superfícies tabulares, ravinas e mantos arenosos que condicionam a erosão e a infiltração (VIEIRA et al., 2025; COSTA et al., 2024; DINIZ et al., 2024).

Foram selecionados quatro usos diferentes do solo (dois tratamentos com cultivo agroecológico de algodão e dois com monocultivos convencionais) e, duas áreas de vegetação nativas com diferentes graus de preservação. O mapa de localização das áreas e os pontos amostrais são apresentados na Figura 2. Os históricos das áreas com seus respectivos cultivos, são apresentados na Tabela 1.

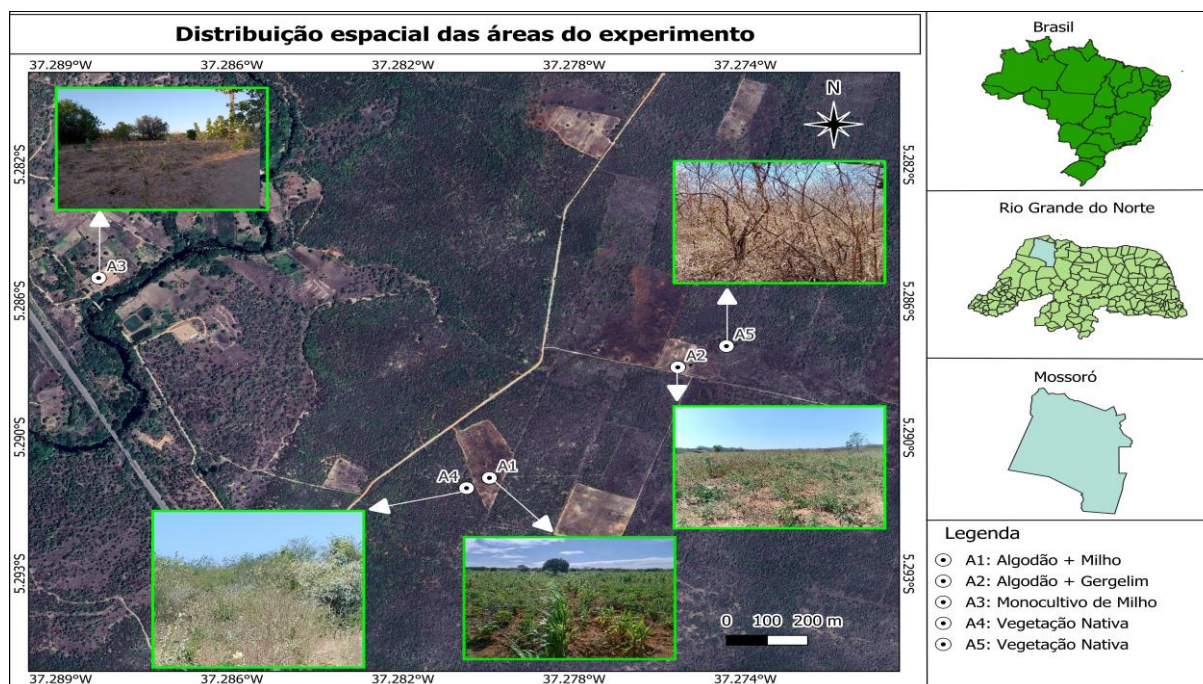


Figura 2. Mapa de localização das áreas com seus respectivos cultivos no município de Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil. Em destaque as imagens dos usos do solo e Caatinga.

Tabela 1. Históricos das áreas com seus respectivos cultivos no município de Mossoró-RN, Brasil.

Usos do solo	Histórico das áreas
A1 - Cultivo de algodão (<i>Gossypim hirsutum</i> L.) agroecológico consorciado com milho (<i>Zea mays</i> L.).	Área de 1 hectare, desmatada com corte raso da Caatinga com início do cultivo em 2012. No preparo do solo utilizou-se aração e gradagem, adubação com esterco de bovinos e uso de agrotóxicos (herbicidas e inseticidas) e, as culturas semeadas foram milho e feijão, permanecendo até final de 2022. Em 2023, incentivado pela Secretaria do Desenvolvimento Rural e da Agricultura Familiar do RN (SEDRAF/RN), os produtores aderiram ao programa do algodão agroecológico realizando a conversão do sistema de cultivo convencional para plantio do algodão agroecológico consorciado com milho em sistema de sequeiro, com adoção de adubação orgânica (esterco de ovinos) e sem uso de agrotóxicos. No entanto, ainda utilizaram para preparo de solo aração e gradagem no preparo do solo. O solo foi

	classificado como Cambisol, de acordo com a Base de Referência Mundial para Recursos de Solos (IUSS, 2022), e como Cambissolo, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018) ¹ .
A2 - Cultivo de algodão agroecológico em consórcio com gergelim	Área de 1 hectare, desmatada com corte raso da Caatinga com início do cultivo em 2013. Nesta área utilizou-se plantio convencional (aração e gradagem), com plantio de milho e feijão, com os mesmos tratos culturais que o anterior, até 2022. Incentivado pela SEDRAF/RN iniciou o cultivo do algodão (<i>Gossypim hirsutum</i>) consorciado com gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) em 2023, em sistema de sequeiro, com adoção de adubação orgânica (esterco de bovino) e sem uso de agrotóxicos. O solo foi classificado como Cambisol (IUSS, 2022), e como Cambissolo (Santos et al., 2018).
A3 - Monocultivo de milho híbrido	Área de 1 hectare, onde o produtor adquiriu a propriedade rural desmatada, não sabendo informar a data de origem do desmatamento da Caatinga. O monocultivo de milho híbrido teve início em 2019, onde nos tratos culturais utilizou-se aração e gradagem, fertilização com adubos minerais, e uso de agrotóxicos (herbicidas e inseticidas). A cultura é irrigada por aspersão com água do rio limítrofe ao lote. O solo foi classificado como Cambisol, (IUSS, 2022), e como Cambissolo (Santos et al., 2018).
A4 - Vegetação Nativa da Caatinga mais preservada	Área de vegetação primária sem uso antrópico e bem preservada utilizada como referência. Entre as espécies constavam plantas herbáceas, - arbustivas e arbóreas, com características caducifólias, xerófilas e com população vegetal mais densa. A cobertura vegetal da área corresponde a espécies herbáceas e arbóreas-arbustivas, caducifólias e xerófilas, com grande variedade de espécies espinhosas. Alguns exemplares foram abundantes como: Mofumbo (<i>Combretum leprosum</i> L.), Aroeira (<i>Schinustere binthifolius</i>), Marmeleiro (<i>Cydonia oblonga</i> Mill), Jurema-preta (<i>Mimosa hostilis</i> Benth) e diversas cactáceas. O solo foi classificado como Cambisol, (IUSS, 2022), e como Cambissolo (Santos et al., 2018).

A5 - Vegetação Nativa da Caatinga com menor grau de preservação	Área de vegetação secundária sem uso antrópico atual aparente, porém com menor grau de preservação. Esta área apresentava porte e densidade inferiores às da vegetação primária intacta, maior presença de espécies caducifólias e xerófilas, elevada proporção de caules retorcidos ou entrelaçados e dominância de adaptações à aridez (espinhos, folhas pequenas, raízes superficiais expansivas). Constatou-se um mosaico regenerativo em que a recuperação florística e estrutural estava condicionada a espécies pioneiras de rápido estabelecimento e à posterior colonização por espécies de clímax adaptadas ao semiárido, o que refletiu tanto o histórico de uso humano, quanto o potencial natural de regeneração do bioma. Alguns exemplares de mofumbo, aroreira, marmeleiro e jurema-preta (<i>Mimosa hostilis</i> Benth). também foram observados, mas em menores proporções que A5. O solo foi classificado como Cambisol, (IUSS, 2022), e como Cambissolo (Santos et al., 2018).
--	---

¹ Mapa dos solos do Projeto de assentamento Paulo Freire, elaborado utilizando base de dados da Embrapa Solos, disponível no anexo A.

3.2 Amostragem dos solos e preparo das amostras

A amostragem de solo ocorreu no período seco, entre os meses de setembro e outubro de 2024. Cada área, com os diferentes usos do solo, foi dividida em quatro quadrantes de 800 m² (20 x 40 m), que constituíram as repetições. Cada repetição (amostra composta) foi oriunda de cinco subamostras, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, retiradas com o auxílio de enxada e pá reta em uma mini trincheira (Figura 3), acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e levadas ao Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Coletaram-se amostras indeformadas (por meio de torrão) e deformadas. As amostras de solo deformadas foram secas, destorroadas e passadas em peneiras de 2 mm, obtendo, terra fina seca ao ar (TFSA), para realizar análises físicas e químicas de solo. Para as análises de carbono orgânico do solo, subamostras de TFSA foram trituradas e passadas em peneira de 60 mesh. Para as análises de carbono da biomassa microbiana do solo, as amostras deformadas foram colocadas em sacos

plásticos e armazenadas em isopor com gelo no campo. Ao chegar no laboratório, essas amostras foram refrigeradas a 4°C e analisadas no terceiro dia.

Figura 3: Mini trincheira (0,30 x 0,30 x 0,30 m) utilizada na amostragem de solo.



3.3 Análises físicas, químicas e bioquímicas do solo

A análise física granulométrica para caracterização do solo foi realizada pelo método da pipeta, com dispersante químico hexametáfosfato de sódio e água destilada, em 20 g de TFSA. A areia foi quantificada por peneiramento, a argila, por sedimentação, e o silte, por diferença entre areia e argila. Posteriormente, realizou-se a classificação textural (Tabela 2).

Tabela 2: Análise granulométrica e classe textural do solo sob diferentes usos na profundidade de 0,00 - 0,10 e 0,10 - 0,20 m. Mossoró-RN.

Uso do solo	Areia total	Silte	Argila	Classe textural
	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	
0,00 - 0,10 m				
A1	324,2	331,6	344,2	Franco-argilosa
A2	355,4	321,7	322,9	Franco-argilosa
A3	596,8	193,2	210,0	Franco-argilo-arenosa
A4	331,1	282,0	386,9	Franco-argilosa
A5	287,6	251,9	460,5	Argila
0,10 - 0,20 m				
A1	279,2	365,9	354,9	Franco-argilosa
A2	286,3	402,4	311,3	Franco-argilosa
A3	607,7	181,3	211,0	Franco-argilo-arenosa
A4	310,0	279,5	410,5	Argila
A5	259,7	229,0	511,3	Argila

Usos do solo: A1 - Cultivo de algodão (*Gossypim hirsutum* L.) agroecológico consorciado com milho (*Zea mays* L.); A2 - Cultivo de algodão agroecológico em consórcio com gergelim (*Sesamum indicum* L.); A3 - Monocultivo de milho híbrido; A4 - Vegetação Nativa da Caatinga mais preservada; A5 - Vegetação Nativa da Caatinga com menor grau de preservação.

Os parâmetros químicos avaliados incluíram o pH e a condutividade elétrica (CE), obtidos a partir do extrato de saturação com água destilada. Os teores de cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) trocáveis foram determinados após extração com solução de cloreto de potássio (KCl - 1 mol L⁻¹) e leitura por titulação. O fósforo (P), o sódio (Na⁺) e o potássio (K⁺) foram extraídos por Mehlich-1, sendo o P quantificado por colorimetria e, Na⁺ e K⁺ por fotometria de chama. A acidez potencial (H⁺+Al³⁺) foi estimada a partir de extração com acetato de cálcio e titulação com solução de NaOH 0,025 mol. L⁻¹. Todos os procedimentos analíticos químicos seguiram a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017). A partir dos resultados foi possível calcular a soma de bases (SB), a saturação por bases (V), a capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva (t), a CTC com pH 7,0 (T) e o percentual de sódio trocável (PST), conforme Teixeira et al. (2017).

O carbono orgânico do solo (COS) foi quantificado pelo método de oxidação por via úmida em meio ácido, com aquecimento externo e titulação com sulfato ferroso amoniacal, de acordo com Yeomans; Bremner, (1988). O fracionamento físico da matéria orgânica do solo (TFSA) foi realizado com base na separação por classes de tamanho de partículas, distinguindo-se o carbono orgânico particulado (COP) ($> 53 \mu\text{m}$) do carbono orgânico associada aos minerais (COAM) ($< 53 \mu\text{m}$). As frações foram obtidas por meio da dispersão química com solução de hexametáfosfato de sódio e subsequente peneiramento úmido, conforme os procedimentos descritos por Cambardella e Elliott (1992). O teor de carbono na biomassa microbiana do solo foi determinado pelo método da irradiação-extração em forno micro-ondas (800 J por 96s), em subamostras de 10g de TFSA. O carbono presente nas amostras irradiadas e não irradiadas foi extraído utilizando K_2SO_4 0,5 mol. L^{-1} na proporção de 1:2,5 (relação entre solo e extrator), de acordo com o método proposto por Islam e Weil (1998). Na avaliação da atividade enzimática do solo, foram selecionadas enzimas relacionadas aos ciclos do carbono e do enxofre, sendo elas β -glicosidase (BG) e Arilsulfatase (ARYL) (DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024).

A atividade da β -glicosidase foi determinada por meio da liberação colorimétrica de p-nitrofenol após incubação do solo com o substrato p-nitrofenil- β -D-glicosídeo, conforme o método descrito por Eivazi e Tabatabai (1988). A atividade da arilsulfatase foi quantificada pela liberação de p-nitrofenol proveniente da hidrólise do p-nitrofenil sulfato de potássio, de acordo com Tabatabai (1970). Todas as análises foram conduzidas em triplicata, e ambos os resultados foram expressos em mg de p-nitrofenol $\text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Para as análises enzimáticas, as amostras de TFSA foram encaminhadas para laboratório credenciado pela EMBRAPA e os dados interpretados segundo a tecnologia de Bioanálise do Solo – BioAs (BALOTA et al. 2011; MENDES et al., 2021; RODRIGUES et al. 2022).

3.4 Análises estatísticas

Os resultados médios de todas as variáveis obtidas foram submetidos a técnicas de estatística multivariada, utilizando o software Statistic 9. Inicialmente calculou-se a estatística básica (média, desvio padrão e erro padrão), em seguida, os valores dos parâmetros físicos, químicos e bioquímicos foram utilizados para a elaboração da matriz de correlação de Pearson

($p \leq 0,05$). Essa matriz de correlação avalia a relação linear entre pares de variáveis, com valores variando entre 1 e -1, possibilitando avaliar a proximidade entre as variáveis, servindo de ponto de partida para a realização das análises de agrupamento (AA) e da análise dos componentes principais (ACP).

A ACP foi conduzida de forma conjunta utilizando as 20 melhores variáveis das propriedades físicas, químicas e bioquímicas analisadas, com o objetivo de reduzir a dimensão do conjunto de dados para que permaneçam os componentes principais que retêm a maior capacidade de representação, evitando a multicolinearidade.

4. RESULTADOS

4.1 Análise de Correlação – AC

A tabela com a matriz de correlação utilizando 20 variáveis está presente no Anexo B. De modo geral, dentre os parâmetros físicos o teor de argila apresentou correlação positiva com as enzimas o CBM, com as enzimas analisadas e com os macronutrientes cálcio (Ca^{2+}) e potássio (K^+). Entretanto, apresentou correlação negativa com saturação de bases (V%) e com o fósforo (P).

Com relação aos parâmetros químicos, a condutividade elétrica (CE) demonstrou haver correlação com V%, pH, e PST. Enquanto a variável pH correlacionou-se em maior intensidade com o PST. Podemos observar que a acidez potencial (H^+Al), soma de bases (SB) e a CTC estão altamente correlacionadas positivamente com a argila, Ca^{2+} , K^+ , carbono da biomassa microbiana (CBM) e com as enzimas.

Dentre as bases trocáveis do solo, o P revelou estar negativamente associado a todas as variáveis do estudo. Entretanto, os macronutrientes Ca^{2+} e K^+ além de apresentarem elevada correlação ($r > 0,90$) com a H^+Al e a CTC, seguiram a mesma tendência com as variáveis orgânicas CBM e enzimas estudadas. Em paralelo, as bases trocáveis Na^+ e Mg^{2+} somente apresentaram correlação positiva entre si e com a PST.

Em relação ao fracionamento físico o carbono orgânico do solo (COS) demonstrou possuir correlações positivas com o teor de nitrogênio do solo e com a fração do COAM. Enquanto a fração do COP não possui correlação significativa com as variáveis analisadas. Dentre as variáveis bioquímicas (CBM e enzimas) demonstraram possuir forte correlação

entre si ($r > 0,90$) e com as bases trocáveis Ca^{2+} e K^+ , mas estão correlacionadas negativamente com V e CE.

4.2 Análise de Componentes Principais – ACP

Portanto, mantendo apenas as variáveis que obtiveram maiores valores na correlação linear de Pearson, sendo as variáveis argila total, pH, CE, N, bases trocáveis, CTC, PST, V, acidez potencial, frações orgânicas e todas as variáveis bioquímicas CBM, Aril e Beta (Figura 4). Resultou-se em um conjunto com 20 variáveis que explicaram 86,89 % da variabilidade total, com a componente principal 1 representando 56,25 % (horizontal) do resultado e a componente principal 2 com 30,64 % (vertical). A figura 4 demonstra que as variáveis foram mais independentes entre si, com a grande maioria das variáveis apresentando elevada importâncias como componentes principais.

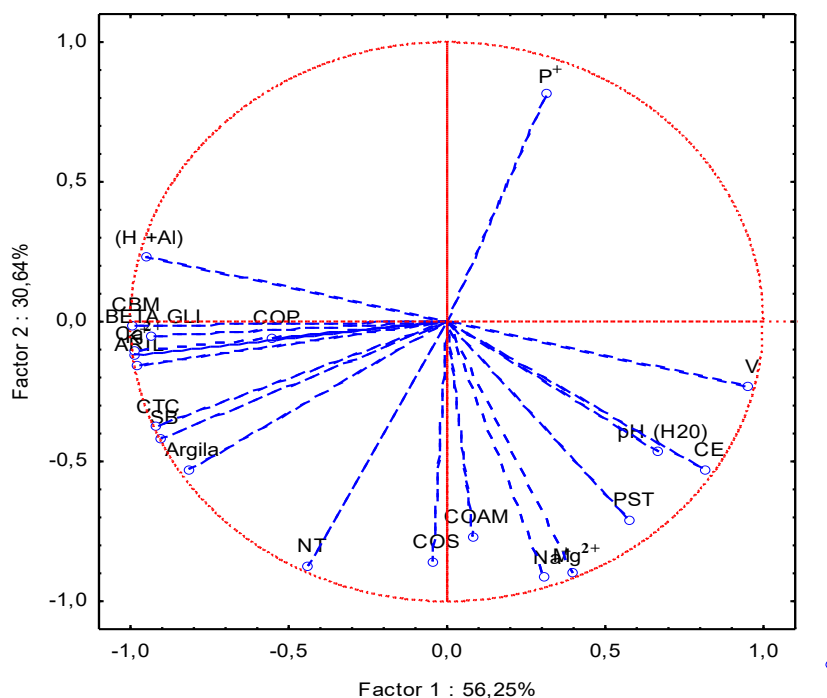


Figura 4: Resultado da Análise dos Componentes Principais em relação as variáveis.

O fator 1 possui maior representatividade dos dados nesta análise, com as variáveis mais próximas do eixo x apresentando maior relevância do conjunto de dados analisados, servindo de indicadores promissores na avaliação da qualidade dos solos sob condições de clima semiárido. Dentre as variáveis principais, mais aproximadas ao fator 1, destacam-se as enzimas estudadas, o CBM, Ca^{2+} e K^+ , seguidos de H+Al, CTC, argila, V% e CE.

Ao analisar os três tipos de uso do solo (Figura 5) observou-se que o monocultivos (A3) distanciou-se dos demais usos do solo, enquanto o conjunto de variáveis nos cultivos

agroecológicos (A1 e A2) revelou-se mais assemelhado à área com vegetação mais preservada (A4).

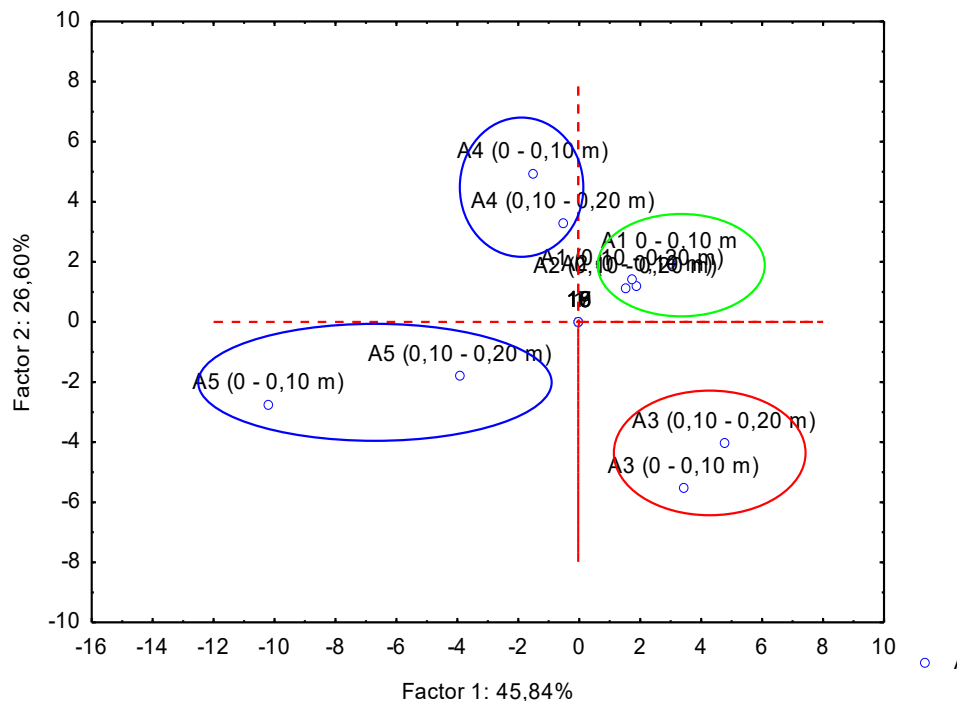


Figura 5: Análise dos componentes principais em relação aos tipos usos do solo.

Portanto, a figura acima sintetiza e confirma as tendências observadas nas análises multivariadas realizadas neste estudo, sendo possível observar a separação dos grupos destacados com círculos. Este resultado demonstra as distintas assinaturas edáficas impostas pelos diferentes sistemas de manejo nestas áreas analisadas. Os tratamentos agroecológicos (A1, A2) posicionam-se em uma posição superior ao monocultivo, caracterizando-se como uma trajetória de recuperação da saúde do solo em direção à qualidade dos solos nas áreas de referência com vegetação nativa. Confirmando a premissa de que as práticas agroecológicas não apenas mitigam a degradação, mas também promovem a recuperação funcional dos ecossistemas.

4.3 Análise de Agrupamento – AA

A análise de agrupamento, foi realizada com o objetivo de identificar as semelhanças entre os tipos de usos do solo, possibilitando classificar essas variáveis em grupos, de acordo com as suas semelhanças. Foi utilizado nesta análise a técnica de ligação completa,

juntamente com a medida de distância Euclidiana. O ponto de corte para definição dos grupos foi estabelecido em 40% de dissimilaridade, resultando na formação de três grupos distintos:

- Grupo 1: Áreas antropizadas com manejo agroecológico (A1 e A2) e monocultivo (A3);
- Grupo 2: Vegetação Nativa A4;
- Grupo 3: Vegetação Nativa A5.

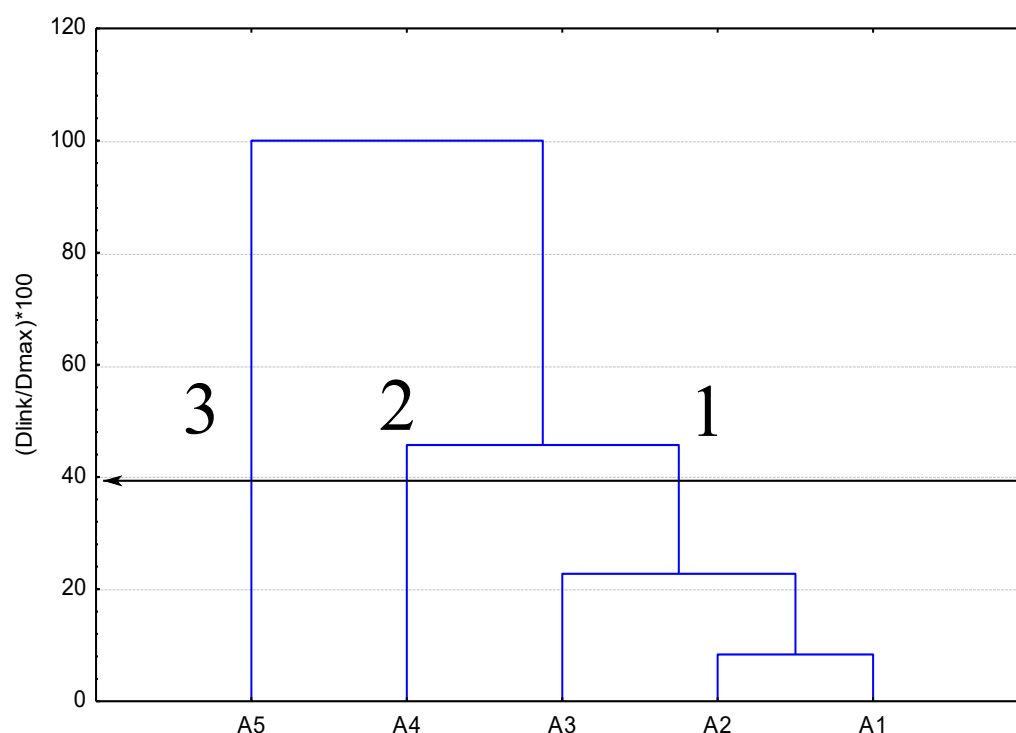


Figura 6: Análise de agrupamento (cluster) em relação aos tipos de uso do solo.

Em relação às variáveis analisadas a figura 7 revelou que houve a formação de três grupos distintos entre si, sendo o maior agrupamento formado pelas variáveis químicas, enzimas e frações orgânicas. O segundo grupo foi formado apenas pelo CBM e K^+ , restando o teor de argila isolado no agrupamento, mas interagindo com todas as variáveis analisadas.

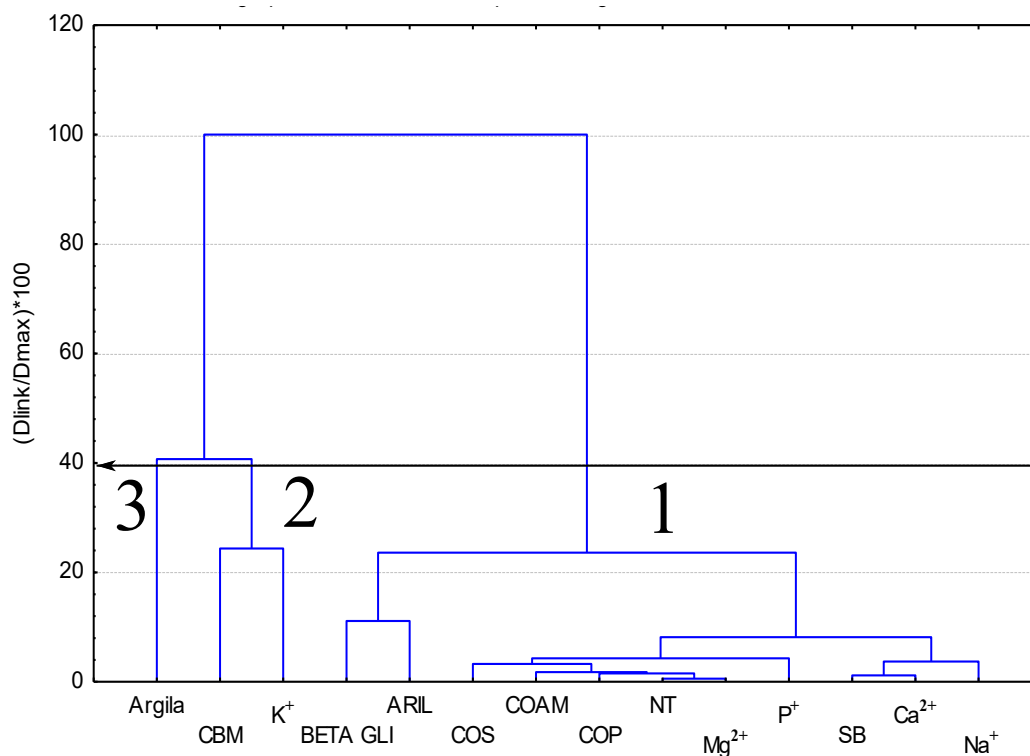


Figura 7: Análise de agrupamento (cluster) entre as principais variáveis.

4.4 Fertilidade do solo

A tabela química revelou contrastes marcantes na fertilidade e na dinâmica dos cátions entre os diferentes usos do solo no Semiárido, evidenciando o efeito combinado do manejo agrícola e do estado de conservação da Caatinga. Na camada superficial (0 – 0,10 m), os sistemas agroecológicos (A1 e A2) apresentaram pH alcalino ($> 8,0$), baixa salinidade ($CE \leq 0,18 \text{ dS m}^{-1}$) e valores elevados de Ca^{2+} ($20,8 - 23,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), mantendo $V = 100 \%$, indicando saturação completa das bases e ausência de acidez potencial. O monocultivo de milho (A3) exibiu comportamento semelhante quanto ao pH e ao $V\%$, porém destacou-se pelo P muito superior ($31,6 \text{ mg dm}^{-3}$) e menor teor de Ca^{2+} ($19,26 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), sugerindo aporte fosfatado recente e menor capacidade de retenção de cátions.

Os solos sob vegetação nativa mais preservada (A4) apresentaram o pH alcalino (7,3), moderados teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e, CTC ($31,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), e ausência de H^+Al , refletindo menor influência antrópica e maior controle pedogenético. Em contraste, a vegetação nativa menos preservada (A5) também mostrou pH alcalino, baixa salinidade, maior acúmulo de K^+ ($11,84 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), elevadas bases trocáveis e aumento da CTC (até $36,89 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), evidenciando ciclagem mais intensa de nutrientes ou aporte antrópico

histórico. A PST manteve-se baixa em todos os usos, indicando ausência de risco de sodificação do solo.

Na profundidade de 0,10 – 0,20 m, os padrões gerais se mantiveram, os sistemas de cultivo conservacionistas (A1 e A2) seguiram com alto pH, $V = 100\%$ e CTC elevada, enquanto o monocultivo de milho (A3) apresentou novamente elevado teor de P ($23,1 \text{ mg dm}^{-3}$) e redução na CTC, sugerindo menor acúmulo de cargas negativas com o aumento da profundidade. Os solos sob vegetação nativa (A4 e A5) apresentaram novamente altas concentrações de Ca^{2+} , K^+ e CTC, além de pH moderadamente alcalino.

No conjunto, os resultados demonstram que o manejo agroecológico preserva a fertilidade e a estabilidade química do solo, enquanto o monocultivo revelou estar concentrar fósforo e reduzir a capacidade de troca catiônica, enquanto a vegetação nativa representou as condições pedogenéticas naturais, sobretudo na área mais preservada, com maiores teores de nutrientes e menor alcalinidade.

Sobre as variáveis que compõem os índices SB e CTC, pode-se afirmar que os resultados encontrados para o Ca^{2+} contribuíram significativamente para os valores elevados de saturação de bases (V%). Entre os usos avaliados, os valores do Ca^{2+} foram superiores na vegetação nativa e nos cultivos agroecológicos quando comparados com o monocultivo, sendo que este elemento químico contribuindo em mais de 90% da saturação de bases (SB) na vegetação nativa e mais de 80 % da SB ocupada pelo Ca^{2+} no manejo agroecológico. Entretanto, o tratamento com monocultivo (A3) apresentou os menores teores de Ca^{2+} nas profundidades avaliadas.

Em relação ao nutriente magnésio (Mg^{2+}), o maior teor observado na camada superficial ocorreu no tratamento com vegetação nativa A4, enquanto na camada subsuperficial as maiores médias observadas ocorreram nos cultivos agroecológicos A1 e A2. Entretanto, o monocultivo apresentou resultados melhores do que as áreas com vegetação nativa em subsuperfície. Para o teor de P disponível, é possível afirmar que o monocultivo destacou-se com valores superiores entre demais usos dos solos nas profundidades avaliadas.

Tabela 3: Atributos químicos nas profundidades 0 - 0,10 e 0,10 - 0,20 m, Projeto de Assentamento Paulo Freire, Mossoró-RN.

Tratamentos	CE	pH	pH	Na	K	P	Ca	Mg	(H + Al)	CTC	V	PST
	(dS m ⁻¹)	(H ₂ O)	(KCl)	(cmol _c dm ⁻³)	(cmol _c dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	(cmol _c dm ⁻³)	(cmol _c dm ⁻³)	(cmol _c dm ⁻³)	(cmol _c dm ⁻³)	(%)	(%)
0 – 0,10 cm												
A1	0,18 ± 0,01	8,02 ± 0,02	6,97 ± 0,06	1,74 ± 0,02	3,51 ± 0,37	1,49 ± 0,15	20,81 ± 0,84	3,84 ± 0,52	0,00 ± 0,00	25,17 ± 1,17	100,00 ± 0,00	0,69 ± 0,04
A2	0,15 ± 0,01	8,06 ± 0,02	7,16 ± 0,02	1,35 ± 0,04	3,50 ± 0,37	1,84 ± 0,29	23,08 ± 2,13	3,65 ± 0,46	0,00 ± 0,00	27,21 ± 2,35	100,00 ± 0,00	0,5 ± 0,04
A3	0,16 ± 0,03	7,59 ± 0,02	7,07 ± 0,04	0,58 ± 0,10	2,73 ± 0,38	31,62 ± 0,73	19,26 ± 1,64	1,50 ± 0,46	0,00 ± 0,00	21,09 ± 1,32	100,00 ± 0,00	0,28 ± 0,04
A4	0,15 ± 0,01	7,73 ± 0,03	6,84 ± 0,01	1,67 ± 0,01	6,75 ± 0,16	2,58 ± 0,54	24,71 ± 0,41	5,60 ± 0,42	0,00 ± 0,00	31,15 ± 1,03	100,00 ± 0,00	0,53 ± 0,10
A5	0,08 ± 0,01	7,47 ± 0,02	6,62 ± 0,02	0,81 ± 0,01	11,84 ± 0,13	3,56 ± 0,31	33,55 ± 0,53	1,06 ± 0,37	1,01 ± 0,33	36,89 ± 1,23	97,26 ± 2,69	0,23 ± 0,03
0,10 – 0,20 cm												
A1	0,13 ± 0,01	8,12 ± 0,02	7,07 ± 0,02	1,73 ± 0,04	1,35 ± 0,03	1,41 ± 0,28	22,92 ± 1,15	3,89 ± 0,33	0,00 ± 0,00	27,12 ± 0,98	100,00 ± 0,00	0,64 ± 0,02
A2	0,14 ± 0,01	8,10 ± 0,03	7,14 ± 0,03	1,26 ± 0,08	1,61 ± 0,17	2,24 ± 0,26	23,56 ± 1,84	4,06 ± 0,49	0,00 ± 0,00	27,90 ± 1,71	100,00 ± 0,00	0,46 ± 0,04
A3	0,08 ± 0,01	7,73 ± 0,06	7,12 ± 0,06	0,86 ± 0,22	1,96 ± 0,30	23,10 ± 2,08	12,53 ± 2,55	3,34 ± 0,79	0,00 ± 0,00	16,15 ± 3,27	100,00 ± 0,00	0,52 ± 0,03
A4	0,14 ± 0,01	7,87 ± 0,01	6,90 ± 0,06	1,70 ± 0,04	3,59 ± 0,12	2,76 ± 0,22	25,40 ± 0,55	2,11 ± 0,09	0,21 ± 0,12	28,25 ± 0,77	99,26 ± 2,74	0,60 ± 0,07
A5	0,06 ± 0,01	7,32 ± 0,03	6,53 ± 0,04	0,89 ± 0,03	5,72 ± 0,03	3,48 ± 0,16	32,35 ± 0,44	2,81 ± 0,09	0,00 ± 0,00	35,82 ± 0,66	100,00 ± 0,00	0,25 ± 0,02

Os dados apresentados foram interpretados conforme sugestões dos valores de referência apresentados por Holanda et al. (2017) e Dantas (2022).

4.5 Carbono orgânico do solo, particulado, biomassa microbiana e atividade enzimática

Sobre os resultados de carbono orgânico do solo (COS) e do nitrogênio total (N), apresentados na Figura 8, foi possível afirmar que os tratamentos com vegetação nativa (A4 e A5) apresentaram maiores teores de COS e N, seguidos dos cultivos agroecológicos (A1 e A2).

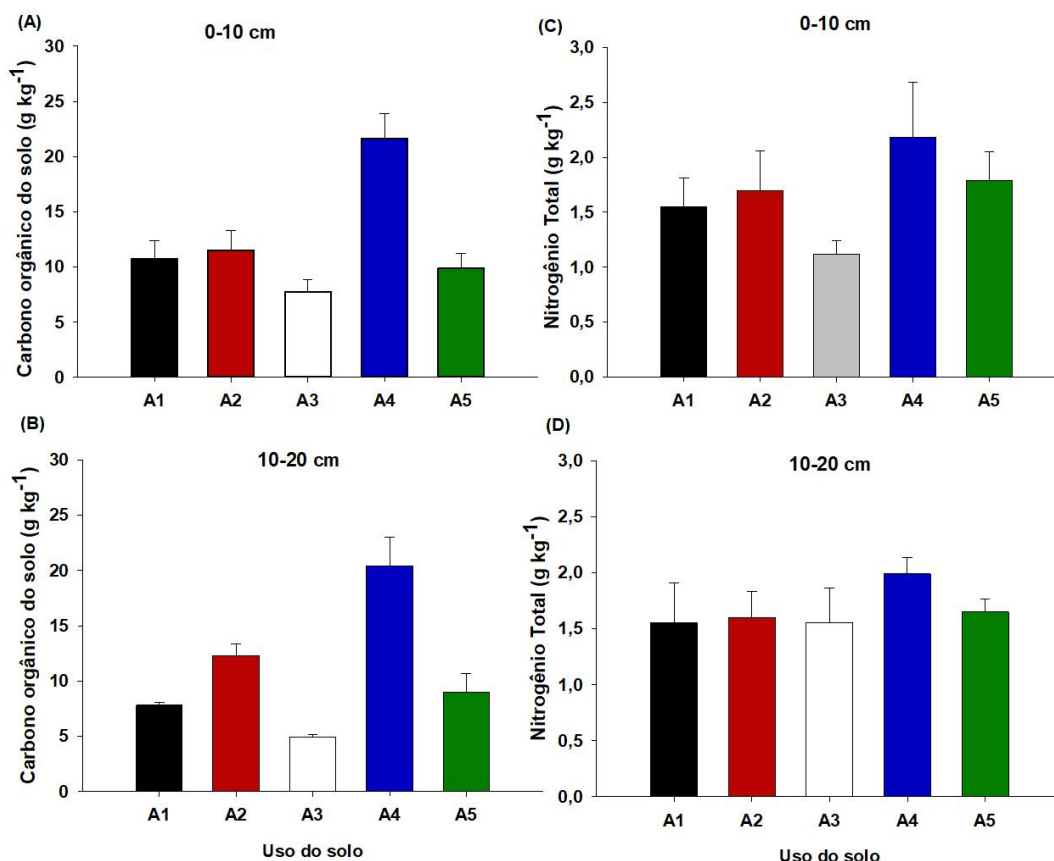


Figura 8. Carbono orgânico e nitrogênio total sob diferentes usos do solo. Usos do solo: A1 - Cultivo de algodão (*Gossypim hirsutum* L.) agroecológico consorciado com milho (*Zea mays* L.); A2 - Cultivo de algodão agroecológico em consórcio com gergelim (*Sesamum indicum* L.); A3 - Monocultivo de milho híbrido; A4 - Vegetação Nativa da Caatinga mais preservada; A5 - Vegetação Nativa da Caatinga com menor grau de preservação.

A avaliação do fracionamento do carbono orgânico do solo, apresentada na Figura 8, evidencia uma tendência de que os tratamentos com vegetação nativa (A4 e A5) e com cultivos agroecológicos (A1 e A2) apresentaram teores mais elevados de carbono orgânico particulado (COP) em comparação aos monocultivos, nas profundidades avaliadas. Os teores de carbono orgânico associado aos minerais (COAM), de modo geral, apresentaram valores

inferiores aos observados para o carbono orgânico particulado (COP), exceto no tratamento A4, onde ocorreu o inverso nas profundidades avaliadas. É possível observar nas figuras abaixo, que todos os tratamentos apresentaram concentrações mais elevadas de COP na camada de 0,00 – 0,10 m do que na subsuperfície.

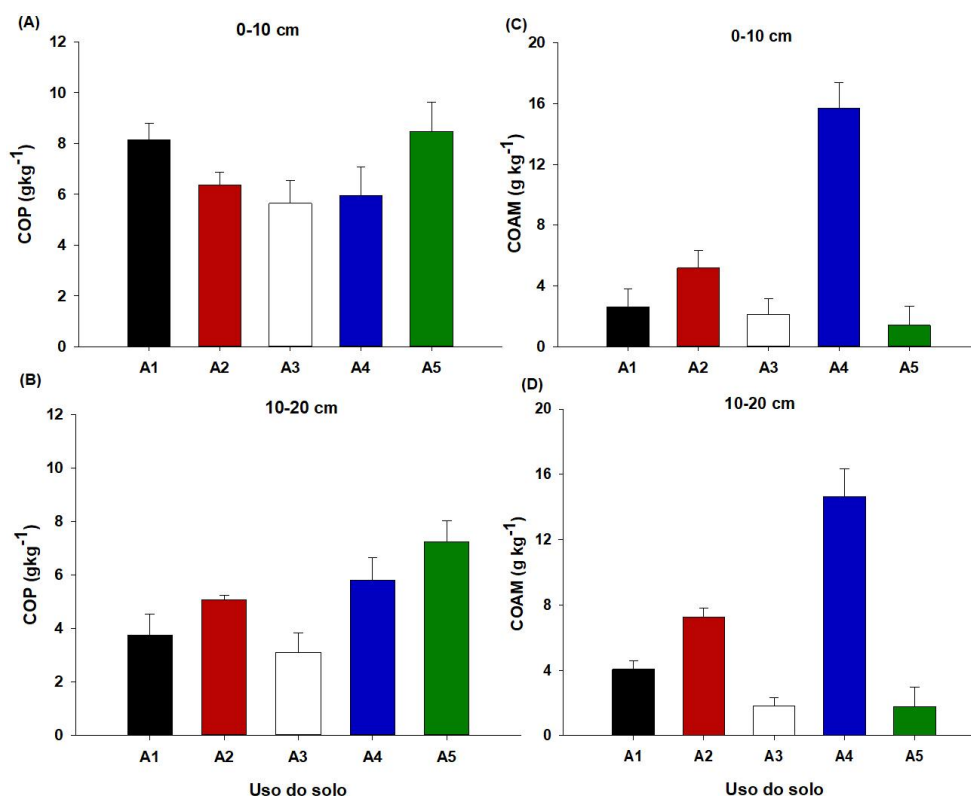


Figura 9. Carbono orgânico particulado (COP) e associado aos minerais (COAM) sob diferentes usos do solo. Usos do solo: A1 - Cultivo de algodão (*Gossypim hirsutum* L.) agroecológico consorciado com milho (*Zea mays* L.); A2 - Cultivo de algodão agroecológico em consórcio com gergelim (*Sesamum indicum* L.); A3 - Monocultivo de milho híbrido; A4 - Vegetação Nativa da Caatinga mais preservada; A5 - Vegetação Nativa da Caatinga com menor grau de preservação.

Na Figura 10, observa-se que os tratamentos com vegetação nativa (A4 e A5) e o cultivo agroecológico A2 apresentaram valores de CBM mais elevados na camada superficial. Os tratamentos com vegetação nativa apresentaram os maiores valores para as enzimas avaliadas no estudo. Entretanto, os cultivos agroecológicos apresentaram valores de Aril maiores em relação ao monocultivo, entretanto os valores obtidos para a enzima Beta-Glico foram menores do que no monocultivo. Nas áreas com vegetação nativa (A4 e A5) os valores observados para as enzimas Beta-Glico e Aril foram superiores aos tratamentos com monocultivo e os agroecológicos.

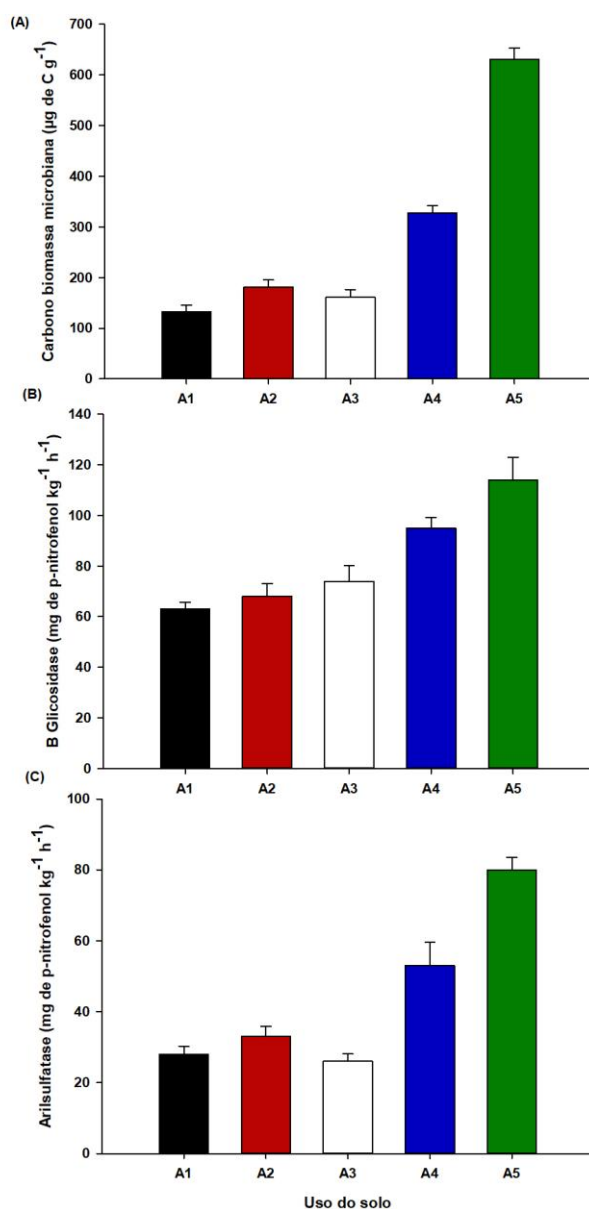


Figura 10. Carbono da biomassa microbiana e atividade enzimática sob diferentes usos do solo. Usos do solo: A1 - Cultivo de algodão (*Gossypim hirsutum* L.) agroecológico consorciado com milho (*Zea mays* L.); A2 - Cultivo de algodão agroecológico em consórcio com gergelim (*Sesamum indicum* L.); A3 - Monocultivo de milho híbrido; A4 - Vegetação Nativa da Caatinga mais preservada; A5 - Vegetação Nativa da Caatinga com menor grau de preservação.

5. DISCUSSÕES

A avaliação conjunta de parâmetros químicos, físicos e biológicos é necessária para um diagnóstico completo da qualidade do solo. As análises de solo revelaram uma elevada quantidade do macronutriente Ca^{2+} . Isto ocorre principalmente pelo fato dos solos deste assentamento rural serem provenientes do material de origem denominado Calcário Jandaíra existente na Chapada do Apodi. Ocorre uma menor dispersão de argila em solos com maiores teores de cálcio e magnésio, demonstrando a importância desses cátions para a agregação das partículas do solo (SANTOS, 2015; OLIVEIRA, 2016; HOLANDA et al., 2017).

Porém, com tratamento do monocultivo (A3) pode estar ocorrendo a interação do Ca^{2+} com os elevados teores observados do macronutriente fósforo (P), proveniente da adubação inorgânica realizada nesta área de cultivo. Os teores de P obtidos no monocultivo (textura média) são considerados altos na superfície e médios na subsuperfície, enquanto na vegetação nativa (textura argilosa) e nos cultivos agroecológicos (textura franco-argilosa) apresentaram valores considerados baixos nas profundidades avaliadas, de acordo com tabela interpretativa elaborada por Dantas (2022). Esse resultado contrasta com obtido por Silva et al. (2015), que observaram a ocorrência do P disponível em maiores teores na vegetação nativa e no cultivo orgânico do que no cultivo convencional. Provavelmente, a concentração elevada do macronutriente P no monocultivo seja proveniente do manejo da adubação adotada pelo produtor, o qual realiza adubação inorgânica durante os cultivos anuais do milho.

Entretanto, conforme a tabela proposta pela EMPARN para interpretação de análises em solos realizadas no Rio Grande do Norte, considerando a classe textural nos tratamentos, o teor de potássio (K^+) do monocultivo é considerado mediano e abaixo dos valores obtidos na vegetação nativa (muito elevados) e nos cultivos agroecológicos (elevados) na profundidade mais superficial. Enquanto na subsuperfície, o monocultivo apresentou valor inferior apenas ao da vegetação nativa e valor 30% superior aos cultivos agroecológicos. Foi possível verificar que existe uma tendência nas áreas com cultivos agroecológicos, quando bem manejadas, apresentarem qualidades químicas, físicas e bioquímicas mais aproximadas das áreas com vegetação nativa. Em consonância, o uso de consórcios e a incorporação de matéria orgânica contribuem para a qualidade do solo (SANTOS, 2015; HOLANDA et al., 2017; DANTAS, 2022).

O desempenho integrado dos parâmetros do solo, é uma ferramenta útil para tomadas de decisões que visem elevar a qualidade do solo e a sustentabilidade ambiental dos sistemas

agrícolas, melhorando a convivência com o semiárido. O uso de consórcios de culturas e a incorporação de matéria orgânica são práticas agrícolas reconhecidas por melhorar a qualidade do solo, embora seus efeitos variem conforme a classe e o tempo de cultivo. O aumento do teor de matéria orgânica está diretamente associado à maior fertilidade, à disponibilidade de água e estabilidade estrutural, fatores essenciais à sustentabilidade dos sistemas agrícolas (SANTOS, 2015; SANTIAGO et al., 2018; FAO, 2020).

O estudo está alinhado com os resultados obtidos por Lobo Filho et al. (2022), observaram maiores teores de COS e macronutrientes em policultivos quando comparados com a vegetação nativa, proporcionando melhorias na qualidade química do solo nos tratamentos com maiores aportes de resíduos orgânicos no solo. Em estudo com plantio direto comparado ao plantio convencional, o primeiro proporcionou maior quantidade de COS, o que servirá de energia à comunidade microbiana do solo, possibilitando a formação e estabilização de agregados do solo e protegendo o habitat da comunidade microbiana, refletindo em melhorias na qualidade do solo (BALOTA, 2024).

Por meio do acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo houve melhoria na agregação das partículas do solo, associado ao aumento de COS, especialmente na camada superficial. Conforme esperado, nos tipos de uso do solo avaliados, houve redução da quantidade do COS com o aumento da profundidade, com exceção do tratamento A2, que apresentou comportamento inverso. Os tratamentos seguiram uma tendência comumente encontrada, referente à redução dos teores de COS com o aumento da profundidade, pois o carbono do solo é originário do material orgânico depositado na superfície. Em geral, o monocultivo convencional apresentou maior degradação do solo, principalmente em função dos baixos teores das frações do COS em comparação aos demais tratamentos (OLIVEIRA, 2016; LOBO FILHO et al., 2022).

Em pesquisa realizada com sistemas de cultivo e espécies florestais, os valores obtidos de COT, COP e COAM foram superiores em vegetação de cerrado nativo devido maior aporte de resíduos vegetais e à ausência de ação antrópica. Comparando áreas de vegetação nativa recém-preparada e cultivo de milho sob sistema convencional irrigado, o estudo mostrou que o COP foi maior na área cultivada devido à incorporação de resíduos, enquanto o COAM foi maior na vegetação nativa, atribuído à menor perturbação do solo. Em paralelo, o manejo convencional, com revolvimento frequente, reduziu o COAM, indicando maior mineralização da matéria orgânica estável (NANZER et al., 2019; PINHEIRO JUNIOR et al., 2021).

Neste sentido, o efeito da deposição e decomposição contínua de resíduos orgânicos, sem revolvimento do solo, na vegetação nativa mais preservada está contribuindo para o elevado estoque de carbono orgânico associado aos minerais (COAM), sobretudo na camada subsuperficial, representando uma maior estabilização da matéria orgânica do solo. Entretanto, na vegetação nativa menos preservada, os valores obtidos de COAM foram inferiores aos dos tratamentos com monocultivo (A3) e agroecológicos (A1 e A2). Os componentes orgânicos adicionados ao solo promovem a união entre partículas minerais, formando agregados com consistência favorável ao manejo agrícola, pois substâncias aglutinantes produzidas por organismos do solo (incluindo microrganismos, exsudatos de raízes e resíduos orgânicos) estabilizam esses agregados melhorando a estrutura do solo (GOEDE et al., 2025; SILVA et al., 2022).

Quando ocorrem correlações negativas entre COP e COAM, nas diferentes camadas avaliada, estas indicam a ocorrência do possível efeito “priming” (EP), motivado pela adição de matéria orgânica lábil de baixa relação C/N, aumentando a decomposição da MOS estabilizada. Portanto, esta relação inversa entre COAM e COP revela que a MOS lábil adicionada ao solo pode estimular a degradação da MOS associada aos minerais (LIMA et al., 2016).

A composição química e a recalcitrante da MOS (presença de lipídios, cutina, suberina) influenciam na aceleração da decomposição da MOS mais estabilizada, aumentando o EP. Enquanto a proteção físico-química forte (presença de óxidos de Fe, Al, Ca e microagregados) dificulta o acesso microbiano ao COAM, reduzindo o EP. Com a adição ao solo de resíduos orgânicos de fácil decomposição (açúcar simples, compostos lábeis e resíduos vegetais ricos em carboidratos) ocorre um estímulo ao rápido crescimento microbiano, acelerando a decomposição COAM (mais recalcitrante) e produzindo um EP positivo. Por outro lado, com a entrada de resíduos orgânicos de difícil decomposição (vegetais com elevada relação C/N, ligninas, suberinas, celulosas, carboidratos complexos) pode levar os microrganismos a utilizarem preferencialmente as fontes de carbono recém adicionadas, inibindo a decomposição da COAM e produzindo um efeito priming negativo (CHEN et al., 2019; ZHANG et al., 2025)

É necessário evitar que ocorra o efeito priming positivo, como ocorreu em quase todos os tratamentos (A1, A2, A3 e A5), pois resulta no aumento da liberação de COS, contribuindo potencialmente para as emissões de CO₂ na atmosfera. Enquanto o efeito priming negativo é desejável, pois protege o estoque de COS mantendo-o no solo por mais tempo. As alterações

nos teores de COAM estão associadas ao manejo utilizado, à humificação da MOS mais lábil e à interação com frações de silte e argila. A relação COP-COAM influencia a direção e a magnitude do priming, com substratos lábeis promovendo maior mineralização do COAM, enquanto a intensidade do EP é regulada principalmente pelo tipo de substrato de entrada do carbono no solo, quantidade do COS existente, razão C/N do resíduo vegetal, pH, textura, temperatura e umidade do solo (LIMA et al., 2016; TAO; LIU, 2025).

O carbono da biomassa microbiana (CBM) está presente nos microrganismos existentes na matéria orgânica do solo (bactérias, fungos, actinomicetos, leveduras e protozoários). Estes possuem grande importância na ciclagem de nutrientes por serem decompositores do material orgânico existente no solo. O acúmulo de CBM está intimamente relacionado à disponibilidade de substratos orgânicos, como resíduos vegetais e exsudatos radiculares, que promovem o crescimento microbiano e, conseqüentemente, a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes (BALOTA, 2024).

Além disso, o CBM é um indicador sensível de mudanças na qualidade biológica do solo, refletindo variações na atividade microbiana e na eficiência do uso de carbono. As áreas de cultivo agroecológico apresentam melhor qualidade do solo, com maiores valores de CBM, β -glicosidase e Arilsulfatase, indicando maior atividade de funções básicas como movimento e fornecimento de água, ciclagem de nutrientes e alta produtividade. Estes resultados corroboram a hipótese de que a matéria orgânica do solo é um substrato importante para a atividade microbiana e, conseqüentemente, para a produção e funcionamento de enzimas no solo (ROCHA et al., 2021; ALI et al., 2020; SCHNECKER et al., 2023; SANTOS JÚNIOR, 2023).

Conforme observado por Araújo et al. (2019), o CBM foi superior na camada mais superficial (0 - 0,10 m), pois nesta camada ocorre maior disponibilidade de substrato para os microrganismos do solo. Contrapondo essa afirmação, os cultivos agroecológicos (A1 e A2) apresentaram valores de CBM mais elevados na profundidade de 0,10 – 0,20 m. Entretanto, o monocultivo A3 e as áreas com vegetação nativa apresentaram comportamento oposto aos cultivos agroecológicos em relação aos valores do CBM. Este comportamento das áreas agroecológicas ao apresentarem maior quantidade de CBM na subsuperfície, pode ser explicado pela redistribuição de resíduos orgânicos e exsudatos radiculares para horizontes mais profundos, aliada a condições microambientais mais estáveis que favorecem o acúmulo microbiano. Além disso, a dinâmica da taxa de renovação (*turnover*) microbiana tende a ser

menor em profundidade, permitindo maior retenção de CBM mesmo com atividade relativamente reduzida (ALI et al., 2020; SCHNECKER et al., 2024; LI et al., 2021).

A quantificação das enzimas β -glicosidase e Arilsulfatase são apresentados no Anexo C. Estas informações, que representam sobre bioindicadores de qualidade do solo, surgem como uma inovação nas análises de rotina em diversos laboratórios credenciados pelo país. A bioanálise de solo (BioAs) pode ser comparada a um exame de sangue, no qual podemos avaliar o estado atual da saúde do solo, servindo como um alerta aos produtores sobre o manejo aplicado nos cultivos agrícolas. Pesquisas conduzidas pela Embrapa têm validado a utilização das enzimas Beta e Aril como bioindicadores de qualidade do solo, desenvolvendo tabelas de interpretação que correlacionam os níveis enzimáticos com o potencial produtivo e os teores de matéria orgânica nos solos para o bioma Cerrado. Atualmente os demais biomas não foram contemplados com essas tabelas de interpretação dos resultados. Entretanto, conforme estabelecido para as análises químicas do solo, devido à ausência de tabelas interpretativas para o RN ou para o bioma Caatinga, podem-se interpretar os resultados utilizando informações de outros estados ou biomas mais próximos.

A atividade da Arilsulfatase variou entre níveis moderados nos cultivos agroecológicos até níveis adequados na vegetação nativa e no monocultivo. A atividade da β -glicosidase, por sua vez, manteve-se elevada na maioria dos tratamentos, indicando que essas enzimas atuam como bioindicadores eficazes para o monitoramento da sustentabilidade e da qualidade biológica do solo em sistemas agrícolas de base familiar. Em experimentos realizados em Latossolos do Cerrado, observou-se que sistemas com manejo conservacionista apresentam aumentos de 3 a 8 vezes na atividade dessas enzimas quando comparados a solos submetidos a manejos convencionais à monocultura. No entanto, nas condições semiáridas, verificou-se uma tendência diferente pois os tratamentos agroecológicos, quando comparados ao monocultivo (A3), apresentaram valores aproximados para a enzima Beta e Aril. Entretanto, houve tendência de os valores obtidos na vegetação nativa serem superiores aos demais usos estudados, com os indicadores enzimáticos aproximados aos valores encontrados para os cultivos agroecológicos (CHAER et al., 2022).

Houve o comportamento de existir valores elevados da enzima β -glicosidase no monocultivo A3, superando os sistemas agroecológicos. Isto pode ser explicado pela combinação de fatores como o histórico de adubação inorgânica que altera o pH do solo, aproximando-o de uma faixa ótima para a atividade de certos grupos microbianos. Além disso, a presença constante da cultura do milho, com seu sistema radicular superficial e o

acumulação da palhada sobre o solo após a colheita, pode ter favorecido uma comunidade microbiana adaptada e altamente eficiente na ciclagem do carbono mais lábil. Contudo, apesar da alta atividade desta enzima específica, outros indicadores químicos e físicos foram inferiores aos dos sistemas agroecológicos, sugerindo que uma alta atividade enzimática isolada não garante a saúde do solo.

As enzimas β -glicosidase e a Arilsulfatase têm demonstrado serem robustos bioindicadores da qualidade do solo devido à sua sensibilidade e correlação com outros parâmetros importantes, devendo incorporar-se em análises de solo de rotina. Deste modo, solos saudáveis devem apresentar atividades elevadas das enzimas no solo favorecendo a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e a posterior disponibilização de nutrientes na solução do solo (CHAER et al, 2022).

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos corroboram plenamente o objetivo geral de realizar um diagnóstico comparativo da saúde do solo por meio de indicadores físicos, químicos e bioquímicos em sistemas agroecológicos de algodoeiro consorciado, monocultivo convencional de subsistência e vegetação nativa como referência, no Projeto de Assentamento Paulo Freire, Mossoró-RN.

O fracionamento da matéria orgânica revelou tendências de aumento no carbono orgânico do solo (COS), pois, nos tratamentos com plantios agroecológicos e na vegetação nativa ocorreu maior acúmulo da fração mais lábil (COP) nas profundidades avaliadas, resultando em ciclagem mais rápida de nutrientes e maior perda de carbono estocado no solo para a atmosfera. Refletindo na redução do teor da matéria orgânica mais estável (COAM) nos solos estudados, com exceção do tratamento com vegetação nativa mais preservada, o qual não apresentou o efeito priming nas profundidades avaliadas.

A análise dos componentes principais (ACP) revelou que os 20 indicadores integrados utilizados explicaram 86,89% da variabilidade total, ordenando as áreas com cultivos agroecológicos (A1 e A2) mais aproximadas das áreas de vegetação nativa (A4 e A5) em relação ao monocultivo convencional (A3). Os resultados das análises de agrupamento (AA) confirmaram a separação clara entre sistemas de uso do solo, com os agroecológicos aproximando-se das áreas de vegetação nativa e distanciando-se do monocultivo convencional, demonstrando uma trajetória de recuperação funcional e não apenas variações isoladas em indicadores individuais.

Confirmando a hipótese inicial, as práticas agroecológicas consorciadas promoveram a recuperação e a melhoria da saúde do solo em ambiente semiárido, aproximando os parâmetros físico-químicos e bioquímicos daqueles observados em áreas de vegetação nativa. Em particular, os sistemas agroecológicos estudados apresentaram mudanças positivas nas propriedades físicas, elevação do teor de carbono orgânico do solo (COS), maior carbono da biomassa microbiana (CBM) e atividade enzimática (β -glicosidase e Arilsulfatase) quando comparados ao monocultivo convencional, o que indica maior capacidade de ciclagem de nutrientes e maior funcionalidade microbiana nos agroecossistemas.

A avaliação bioquímica, através das enzimas β -glicosidase e Arilsulfatase e do carbono da biomassa microbiana (CBM), demonstraram serem ferramentas diagnósticas extremamente sensíveis. Por meio destes indicadores observa-se que atividade enzimática

ocorreu de forma mais intensa nos solos sob com vegetação nativa e manejo agroecológico, indicando que estes usos do solo favorecem a formação de um ecossistema funcionalmente mais ativo e resiliente.

Estes resultados demonstram que os tipos de usos do solo escolhido pelos produtores afetam diretamente nos perfis edáficos e nas suas propriedades físicas, químicas e bioquímicas. Embora o monocultivo apresente picos pontuais (maior teor de P disponível associado à adubação mineral), esse padrão não se traduz em melhoria integrada da saúde do solo, pois os demais parâmetros analisados apresentaram valores indesejáveis. Assim, a transição de monocultivo para sistemas de cultivos com manejo mais conservacionista constitui uma estratégia eficaz para mitigar processos de degradação e restaurar a funcionalidade do solo no semiárido potiguar.

Portanto, a transição de um sistema de monocultivo convencional para o sistema de cultivo agroecológico consorciado resultou em melhoria da saúde do solo no contexto do semiárido potiguar. Esta superioridade foi demonstrada através do conjunto integrado de indicadores físicos, químicos e bioquímicos, revelando que o manejo agroecológico apresentou condições edáficas mais próximas à vegetação nativa de referência quando comparado ao monocultivo. A adoção de práticas agroecológicas, representa uma estratégia eficaz e viável, pois pode ajudar a reverter a degradação dos solos, aumentando a resiliência e favorecendo a sustentabilidade da agricultura familiar em regiões semiáridas.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo fornece evidências integradas (físicas, químicas e bioquímicas) sobre os benefícios da transição agroecológica em assentamentos familiares do semiárido. Demonstra-se que indicadores sensíveis (CBM, β -glicosidase, Arilsulfatase, frações do COS) respondem positivamente a práticas agroecológicas e se aproximam dos valores de referência da Caatinga preservada, o estudo contribui para uma proposta de validação de protocolos de monitoramento de saúde do solo aplicáveis às regiões de clima semiárido, fornecendo alguns elementos para propor melhorias nas políticas públicas de fomento agrícola e nos programas de assistência rural.

Recomenda-se o monitoramento de longo prazo destas áreas para avaliar a evolução da saúde do solo, juntamente com a expansão de estudos similares para outros tipos de usos e classes de solos existentes em outros assentamentos rurais da região, pois esta pesquisa foi aplicada em apenas um assentamento e em um determinado período do ano. Portanto, a extrapolação espacial e temporal é indicada para que seja possível comparar os efeitos da sazonalidade sobre a velocidade e a magnitude da recuperação nos solos do semiárido potiguar.

O efeito priming observado entre as frações de carbono orgânico sugere que nem toda entrada de matéria orgânica resulta automaticamente em sequestro estável de carbono, pois o estoque de carbono mais recalcitrante depende de vários fatores edafoclimáticos, entre eles a quantidade e a qualidade dos resíduos adicionados e as interações físico-químicas com minerais são determinantes.

Portanto, esta dissertação demonstra que a transição agroecológica é viável e eficaz para restaurar a funcionalidade do solo em ambiente com clima semiárido, promovendo simultaneamente a oferta de serviços ecossistêmicos essenciais e fortalecendo a sustentabilidade da agricultura familiar.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adetunji, A. T.; Lewu, F. B.; Mulidzi, R.; Ncube, B. The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, p. 794-807, 2017.
- Ali, R. S.; Poll, C.; Kandeler, E. Soil properties control microbial carbon assimilation and its mean residence time. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, p. 33, 2020. DOI: 10.3389/fenvs.2020.00033.
- Almeida, J. V. C. S.; Santos, J. C.; Santos, D. J.; Vasco, A. N.; Perin, L. Quantificação de enzimas arilsulfatase e β -glicosidase em solos sob sistema agroecológico de produção no estado de Sergipe. **Cadernos de Agroecologia** – ISSN 2236-7934 - Anais do XII Congresso Brasileiro de Agroecologia, Rio de Janeiro, RJ- v. 19, n. 1, 2024.
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 06/04/2024.
- Amelung, W.; Bossio, D.; Vries, W.; Kögel-Knabner, I.; Lehmann, J.; Amundson, R.; Bol, R.; Collins, C.; Lal, R.; Leifeld, J.; Minasny, B.; Pan, G.; Paustian, K.; Rumpel, C.; Sanderman, J.; van Groenigen, J. W.; Mooney, S.; van Wesemael, B.; Wander, M.; Chabbi, A. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. **Nature Communications**, p. 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>.
- Anning, D. K.; Ghanney, P.; qiu, H.; Abalorl, T. A.; Zhang, C.; Luo, C. Stimulation of soil organic matter fractions by maize straw return and nitrogen fertilization in the Loess Plateau of Northwest China. **Applied Soil Ecology**, v. 191, p. 105061, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105061>. Acesso em: 10/04/2024.
- Aquino, J. R.; Alves, M. O.; Vidal, M. F. Agricultura familiar no nordeste do brasil: um retrato atualizado a partir dos dados do censo agropecuário 2017. **Rev. Econ. NE**, Fortaleza, v. 51, suplemento especial, p. 31-54, 2020.
- Araújo Filho, J. C.; Marques, F. A.; Amaral, A. J.; Cunha, T. J. F.; Souza Jr, V. S.; Galvão, P. V. M. **Solos do Semiárido Características e estoque de carbono**. In: Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira. Embrapa, Brasília-DF: 2022. p. 93 - 112. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1150080>. Acesso em: 05/03/2024.
- Bail, Y.; Cotrufo, M. F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. **Science**, v. 377, p. 603–608, 2022. DOI: 10.1126/science.abo2380.
- Balota; E. L.; Machineski, O.; Truber, P. V. Soil enzyme activities under pig slurry addition and different tillage systems. **Acta Scientiarum. Agronomy**. Maringá. v. 33, n. 4. 2011. p. 729-737. DOI: 10.4025/actasciagron.v33i4.9816.
- Barbosa, A. G.; Hernández, D. G. A convivência com o Semiárido como superação do combate à seca no rural do Nordeste brasileiro. In: História Agrária, v. 96, p. 203-241, 2025. DOI: 10.26882/histagrar.096e07b.

Benbi, D. K.; Kiranvir, B.; Sharma, S. Sensitivity of labile soil organic carbon pools to long-term fertilizer, straw and manure management in rice-wheat system. **Pedosphere**, v. 25, p. 534-545, 2015. DOI:10.1016/S1002-0160(15)30034-5.

Brady, N. C.; Weil, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Tradução técnica: Igo Fernando Lepsch. 3. ed. Dados eletrônicos. – Porto Alegre: Bookman, 2013. p.716.

Bocaleti, L. H. R.; Gasparotto, F.; Pariz, S.; Schmidt Filho, E.; Paccola, E. A. S. Sustentabilidade agrícola e saúde do solo. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.5, p.1-13, 2021. DOI:10.6008/CBPC2179-6858.2021.005.0001.

Cambardella, C. A.; Elliott, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 56. 1992. p. 777-783

Chaer, C. M.; Mendes, I. C.; Dantas. O. D.; Malaquias, J. V.; Reis Junior, F. B.; Oliveira, M. I. L.; Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**. v. 183. 2023. p. 11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104742>.

Chen, L.; Liu, L.; Qin, S.; Yang, G.; Fang, K.; Zhu, B.; Kuzyakov, Y.; Chen, P.; Xu, Y.; Yang, Y. Regulation of priming effect by soil organic matter stability over a broad geographic scale. **Nature Communications**, ed. 10, p. 5112, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13119-z>.

Cherubin, M. R.; Schiebelbein, B. E. **Saúde do solo: múltiplas perspectivas e percepções** (e-book). ESALQ-USP, Piracicaba, p. 127, 2022. DOI:10.11606/9786587391342.

Castro, F. C.; Santos, A. M. Salinidade do solo e risco de desertificação na região semiárida. **Mercator**, Fortaleza, v. 19, e. 19002, p. 1-13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19002>.

Costa, A. P.; Cavalcante, R.; Dantas, A. R.; Oliveira, R. G.; Melo, S. C.; Lages, G. A. **Áreas de relevante interesse mineral (ARIM): evolução crustal e metalogenia da província mineral do Seridó: estados do Rio Grande do Norte e Paraíba**. Serviço Geológico do Brasil - SGB. Recife. 2023.

Costa. S. S. S.; Saraiva Junior, J. C.; Lima, Z. M. C; Nascimento, M. A. L.; Silva, M. L. N. Coastal Cliffs of the Rio Grande do Norte State: Geoheritage Characterization and Valorization in Northeast Brazil. **Geoheritage**, v. 16, ed. 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12371-023-00911-z>.

Dantas, José Araújo. **Análise de solos: coleta de amostras, determinações e interpretações de resultados**. Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN, Parnamirim, ed. 1, p. 33, 2020.

Diniz, M. T. M.; Oliveira, G. P. D.; Maia, R. P.; Ferreira, B. Geomorphology of Rio Grande do Norte State. In: Sales, V. C.; Sobrinho, J. F. Geomorphology of the Northeast Region of

Brazil. The Latin American Studies Book Series. **Springer**, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-58874-7_5

Doran, J.W. Soil quality and sustainability. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Anais. Rio de Janeiro, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1997. CD-ROM.

Dubreuil, V.; Fante, K. P.; Planchon O.; Sant'anna Neto, J. L. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015, **Confins**, n 37, 2018. Disponível em: <http://journals.openedition.org/confins/15738>; DOI <https://doi.org/10.4000/confins.15738>. Acesso em: 6/8/2024.

Eivazi, F.; Tabatabai, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biol. Biochem.** v. 20 (5), 1988. p. 601–606. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90141-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90141-1).

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Soil Organic Carbon: the hidden potential**, Rome, p. 90, 2017. Disponível em: www.fao.org/publications. Acesso em: 01/05/2025.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Soil Organic Carbon: the hidden potential**. Rome: FAO, p. 74, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca7828en>. Acesso em: 6/10/2025.

Felipe, R. T. A.; Rayol, B. P.; Vasconcelos, B. N. F.; Sales, E. F.; Peneireiro, F. N.; Franco, F. S.; Fonsêca, F. D.; Nobre, H. G.; Siddique, I.; Padovan, M. P.; Kato, O. R.; Sá, T. D. A.; Steenbock, W. Sistemas agroflorestais agroecológicos: trajetórias, perspectivas e desafios nos territórios do Brasil. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 18, n. 1, p. 09–43, 2023. DOI: 10.33240/rba.v18i1.23702.

Fonseca, R. B.; Pereira, G. M. C. L.; Oliveira, J. B.; Magalhães, C. A. S.; Oliveira F. F. Agroecologia e Mudanças Climáticas no Semiárido: a Contribuição da Agricultura Familiar para a Segurança Alimentar. **Cadernos de Agroecologia - Anais do 2º Congresso Internacional de Agroecologia e Desenvolvimento Territorial**. – Recife, PE - v. 20, n 1, 2025.

Gamarra-Rojas, G.; Fabre, N. Agroecologia e mudanças climáticas no trópico semiárido. **Redes** - Santa Cruz do Sul. v.22, n. 2, p. 174 – 188, 2017. DOI: 10.17058/redes.v22i2.9359.

Gao, Y., Wang, S., Chen, L., Wu, F., & Yu, G. Achieving accurate regional carbon-sink accounting and its significance for “missing” carbon sinks. **The Innovation**, v.5, n 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100552>.

Gardi, C.; Angelini, M.; Barceló, S.; Comerma, J.; Gaistardo, C. C.; Rojas, A. E.; Jones, A.; Krasilnikov, P.; Brefin, M. L. M. S.; Montanarella, L.; Ugarte, O. M.; Schad, P.; Rodríguez, M. I. V.; Vargas, R. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. Comisión Europea – **Oficina de Publicaciones de la Unión Europea**, Luxembourg, p. 176, 2014. DOI: 10.2788/37334.

Gerlach, Luís Felipe Rossetto. Atividade Enzimática De Solo E Sua Relação Com Sistemas De Plantas De Cobertura Em Período Outonal. **Dissertação**. Universidade Federal de Santa Maria-UFSM, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/26036>.

Goede, S. P. C.; Hannula, S. E.; Jansen, B.; Morriën, E. Fungal-mediated soil aggregation as a mechanism for carbon stabilization. **The ISME Journal**, v. 19, p. 1421-1435, 2025. DOI: 10.1093/ismejo/wraf074.

Haddix, M. L.; Gregorich, E. G.; Helgason, B. L.; Janzen, H.; Ellert, B. H.; Cotrufo, M. F. Climate, carbon and soil texture control the formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. **Geoderma**, v. 363, p. 114160, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114160>. Acesso em: 25/8/2024.

Holanda, J. S.; Dantas, J. A.; Medeiros, A. A.; Ferreira Neto, M.; Medeiros, J. F. V.; Guedes, F. X. **Indicações para adubação de culturas em solos do Rio Grande do Norte**. Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN, Parnamirim, ed. 1, p. 63, 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomass e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil**. Série Relatórios Metodológicos, Coordenação de Recursos Naturais, v.45, 2019.

Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (INMET/BDMEP). **Dados históricos de precipitação**. 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/servicos/bdmep-dados-hist%C3%B3ricos> Acesso em: 10/06/ 2024.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Agricultura familiar nordestina, políticas públicas e segurança alimentar**. IPEIA: Rio de Janeiro, p. 43, 2021.

Islam, K. R.; Weil, R. R., A rapid microwave digestion method for colorimetric measurement of soil organic carbon. **Commun. Soil Science. Plant Anal.** v. 29. p. 2269–2284. 1988. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103629809370110>.

IUSS. **World reference base for soil resources 2022: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences, ed. 4, 2022. Disponível em: https://www.isric.org/sites/default/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf. Acesso em: 13/05/2025.

Karlen, D.L.; Mausbach, M.J.; Doran, J.W.; Cline, R.G.; Harris, R.F.; Schuman, G.E. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997.

Karlen, D. L.; Ditzler, C. A.; Andrews, S. S. Soil quality: why and how? **Geoderma**, v. 114, n. 3-4, p. 145-156, 2003.

Lavallee J. M.; Soong J. L.; Cotrufo, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Glob Change Biol**. V. 26, p. 261-73, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.

Li, J.; Pei, J.; Dijkstra, F. A.; Nie, M.; Pendall, E. Microbial carbon use efficiency, biomass residence time, and soil carbon temperature sensitivity co-determine the fate of soil carbon in

a warming world. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 152, p. 108-117, 2021. DOI: 10.1016/j.soilbio.2020.108117.

Lima, C. E. P.; Fontenelle, M. R.; Madeira, N. R.; Silva, J.; Guedes, I. M. R.; Silva, L. R. B.; Soares, D. C. Compartimentos de carbono orgânico em Latossolo cultivado com hortaliças sob diferentes manejos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.51, n.4, p.378-387, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000400011.

Lobo Filho, I. G.; Aguiar, M. I.; Almeida, M. V. R.; Blum, S. C.; Zuliane, D. Q. Qualidade química do solo em sistemas de produção agroecológicos. **Agrarian Academy**. Centro Científico Conhecer. Jandaia, v. 9, n. 18, p. 44-54, 2022. DOI: 10.18677/Agrarian_Academy_2022B5.

Matos, P. S.; Pinto, L. A. D. S. R.; Lima, S. S. D.; Alves, T. D. C.; Cerri, E. P.; Pereira, M. G.; Zonta, E. Soil organic carbon fractions in agroforestry system in Brazil: seasonality and short-term dynamic assessment. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 47, 2023. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220095>. Acesso em: 30/8/2024.

Melo, R. F.; Lima, P. H. C.; Araújo, E. R.; Silva, M. S. L.; Oliveira, A. R.; Anjos, J. B. **Integração de tecnologias hídricas para sustentabilidade de sistemas agroecológicos no Semiárido brasileiro**. In: Água e agroecologia. Brasília, DF: Embrapa, cap. 6, p. 249-277, 2023. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1158564>.

Mendes, I.C., Sousa, D.M.G., Reis Junior, F.B., Lopes, A.A.C., Souza, L.M. Soil bionalysis: theoretical and practical aspects. In: **Tópicos em Ciência do Solo**, Brazilian Soil Science Society, Viçosa, v. X, p. 399, 2019.

Mendes, I.C., Souza, L.M., Sousa, D.M.G., Lopes, A.A.C., Reis Junior, F.B., Lacerda, M.P.C., Malaquias, J.V. Critical limits for microbial indicators in tropical oxisols at postharvest: the FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**. v. 139, p. 85-93, 2019b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.

Mendes, I. C.; Chaer, G. M.; Reis Junior, F. B.; Sousa, D. M. G.; Dantas, O. D.; Oliveira, M. I. L.; Malaquias, J. V. **Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo**. Embrapa Cerrados, Planaltina, 2021.

Mendes, I. C.; Sousa, D. M. G.; Dantas, O. D.; Lopes, A. A. C.; Reis Junior, F. B.; Oliveira, M. I. L.; Chaer, G. M. Soil quality and grain yield: a win-win combination in clayey tropical oxisols. **Geoderma** v. 388, p. 114880, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114880>.

Mendes, I.C., Sousa, D.M.G., Chaer, G.M., Reis Junior, F.B., Lopes, A.A.C., Dantas, O.D., Souza, L.M. **Soil bioanalysis: a simple and effective tool to access and interpret soil health**. In: Proceedings of the Global Symposium on Soil Biodiversity. Rome, p. 256–261, 2021c. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb7374en>.

Mendes, I. C.; Marchão, R. L.; Reis Junior, F. B.; Chaer, G. M.; Salton, J. C.; Vilela, L.; Oliveira, M. I. L.; Tomazi, M.; Benites, V. M. **Saúde do solo em sistemas de integração lavoura pecuária**. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1146437/1/Saude-do-solo-em-sistemas-de-integracao-cap.-7-2022.pdf>.

Moreira, C. S. Qualidade do solo em áreas de consórcio agroecológico e cultivos convencionais no alto sertão sergipano e na serra da Capivara-PI. **Monografia**. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2022. p. 58.

Morais, E. G.; Silva Júnior, D. N.; Santos, A. Y. O.; Bezerra, G. F. R.; Silva, G. G. C. Avaliação da qualidade do solo no semiárido brasileiro. **Anais II Congresso Internacional de Diversidade do Semiárido**. ISSN: 2526-186X. 2017. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/33197>.

Muniz, M. M. P.; Nunes, X. P.; Nascimento, D. M. R.; Oliveira, L. M. S. R.; Pifano, D. S.; Freitas, H. R. Experiências inovadoras na transição agroecológica no semiárido brasileiro. In: **Transição agroecológica e territorialidades: concepções, experiências e desafios**. Editora Atena. p. 255- 276, 2023. DOI: 10.22533/at.ed.03323050914.

Nanzer, M. C.; Ensinas, S. C.; Barbosa, G. F.; Barreta, P. G. V.; Oliveira, T. P.; Silva, J. R. M.; Paulino, L. A. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. v. 18. 2019. p. 136-145. DOI: 10.5965/223811711812019136.

Oliveira, L. L. P. Influência do sistema de cultivo e manejo do solo nas propriedades físico-químicas e hídricas em cambissolo no semiárido potiguar. **Dissertação**. Universidade Federal Rural do Semi-árido – UFERSA, Mossoró. 2016. p. 86.

Parron, L. M.; Rachwal, M. F. G.; Maia, C. M. B. F. Estoques de carbono no solo como indicador de serviços ambientais. In: **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. Embrapa. Brasília, p. 92-100, 2015.

Pinheiro Junior, C. R.; Pereira, M. G.; Schultz, N.; Beutler, S. J.; Silva, C. F. Fertilidade do solo e dinâmica da matéria orgânica em áreas no perímetro irrigado Jaguaribe-Apodí, CE. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos-PB, v.17, n.1, p 1-6, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v17i1.1190>.

Reichardt, K.; Timm, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Manole, Barueri, ed 3, p. 584, 2016.

Rocha, A. F. B.; Siquieroli, A. N. S.; Silva, A. A.; Carneiro, A. M. L.; Vasconcelos, B. N. F.; Gondim, D. D. R. Indicators of Soil Quality in Agroecological Systems in the Cerrado Mineiro. **Sociedade e Natureza**. Uberlândia. v.34. 2022. p. 1-14. DOI: 10.14393/SN-v34-2022-62940.

Rodrigues, R. N.; Reis Junior, F. B.; Lopes, A. A. C.; Rocha, O. C.; Guerra, A. F.; Veiga, A. D.; Mendes, I. C. Soil enzymatic activity under coffee cultivation with different water regimes associated to liming and intercropped brachiaria. **Ciência Rural**. Santa Maria. v. 52. 2022. <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200532>.

Santigo, F. S.; Montenegro, S. M. G. L.; Pinheiro, M. R. A. Index of soil quality in agroecological and conventional farming in potiguar semiarid, Brazil. Pombal. **Revista**

Verde. v. 13, n. 1, 2018. p. 97-105. Disponível em: <https://gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/5333>. Acesso em: 28/7/2024.

Santos, Fabiana do Nascimento. Qualidade do solo em cultivos consorciados de fava em agroecossistemas familiares no agreste da Paraíba. **Tese**. UFPB. Areia-PB. 2015. p. 110.

Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A. V.; Lumbreras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Araújo Filho, J. C.; Oliveira, J. B. X.; Cunha, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Brasília, ed. 5, p. 356, 2018.

Santos Júnior, Carlos César Ornel dos. Avaliação de correlações entre enzimas biológicas β -glucosidases e arilsulfatases com parâmetros físico-químicos de solos. **Monografia**. Universidade de Caxias do Sul – UFCS, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/11338/12499>.

Santos, K. S.; Silva, M. T.; Oliveira, A. B.; Dias, J. L.; Câmara, R. K. C.; Almeida, G. S. S.; Justino, F. F. S.; Temporal variability of the cover of the dry forest (caatinga) in the state of Rio Grande do Norte. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, 13(8), 2022. DOI: 10.6008/cbpc2179-6858.2022.008.0011.

Schnecker, J.; Böckle, T.; Horak, J.; Martin, V.; Sandén, T.; Spiegel, H. Improving measurements of microbial growth, death, and turnover by accounting for extracellular DNA in soils. **SOIL**, v. 10, p. 521–531, 2024. DOI: 10.5194/soil-10-521-2024.

Schnecker, J.; Baldaszti, L.; Gündler, P.; Pleitner, M.; Sandén, T.; Simon, E.; Spiegel, F.; Spiegel, H.; Malo, C. U.; Zechmeister-Boltenstern, S.; Richter, A. Seasonal dynamics of soil microbial growth, respiration, biomass, and carbon use efficiency in temperate soils. **Geoderma**, v. 440, p. 116693, 2023. DOI: 10.1016/j.geoderma.2023.116693.

Sequeira, C. H.; Alley, M. M. Soil Organic Matter Fractions as Indices of Soil Quality Changes. **Soil Science Society of America Journal**. Madson, v. 75, n. 5, p. 1766-1773, 2011. DOI:10.2136/sssaj2011.0067.

Silva, G. F.; Santos, D.; Silva, A. P.; Souza, J. M. Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 3. 2015. p. 25 – 35. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252015v28n303rc>.

Silva, M. O.; Veloso, C. L.; Nascimento, D. L.; Oliveira, J.; Pereira, D. F.; Costa, K. D. S. Chemical and physical indicators of soil quality. Curitiba: **Brazilian Journal of Development**. V. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-431.

Silva, J. F.; Gontijo Neto, M. M.; Silva, G. F.; Oliveira, E.; Calonego, J. C. Soil organic matter and aggregate stability in soybean, maize and *Urochloa* production systems in a very clayey soil of the Brazilian Savanna. **Agronomy**, v. 12, n. 7, p. 1652, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12071652.

Simon, C. P.; Gomes, T. F.; Pessoa, T. N.; Soltangheisi, A.; Bieluczyk, W.; Camargo, P. B.; Martinelli, L. A.; Cherubin, M. R.; Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, p. 1-21, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210103>.

Stefanoski, D. C.; Santos, G. G.; Marchão, R. L.; Petter, F. A.; Pacheco, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p.1301–1309, 2013. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br>. Acesso em: 19/09/2024.

Tao, J.; Liu, X. Identification of the key regulators of the soil carbon priming effect: A data synthesis. **Plant Soil**, 514, p. 555–569, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07409-3>.

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Wenceslau, A. F.; Teixeira G. **Manual de métodos de análise de solo**. ed. 3. Brasília: Embrapa, 2017. p. 574.

Troian, D.; Rosset, J. S.; Martins, L. F. B. N.; Ozório, J. M. B.; Castilho, S. C. P.; Marra, L. M. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 13, n.4, p. 1447–1469, 2020. DOI:10.17765/2176-9168.2020v13n4p1447-1469.

Utobo, E. B.; Tewari, L. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. **Applied ecology and environmental research** Alöki Kft.: Budapest. v. 13 p. 147-169, 2013. DOI: 10.15666/aeer/1301_147169.

Vieira, B. A.; dos Santos Júnior, O. F. Physical, chemical, and mineralogical characterization of soils from the Jandaíra formation: A case study in the municipality of Mossoró. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, 19(5), 1-13, 2025. DOI:10.24857/rgsa.v19n5-062

Vezzani, Fabiane Machado; Mielniczuk, João. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743-755, 2009. Disponível em: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=180214069001>.

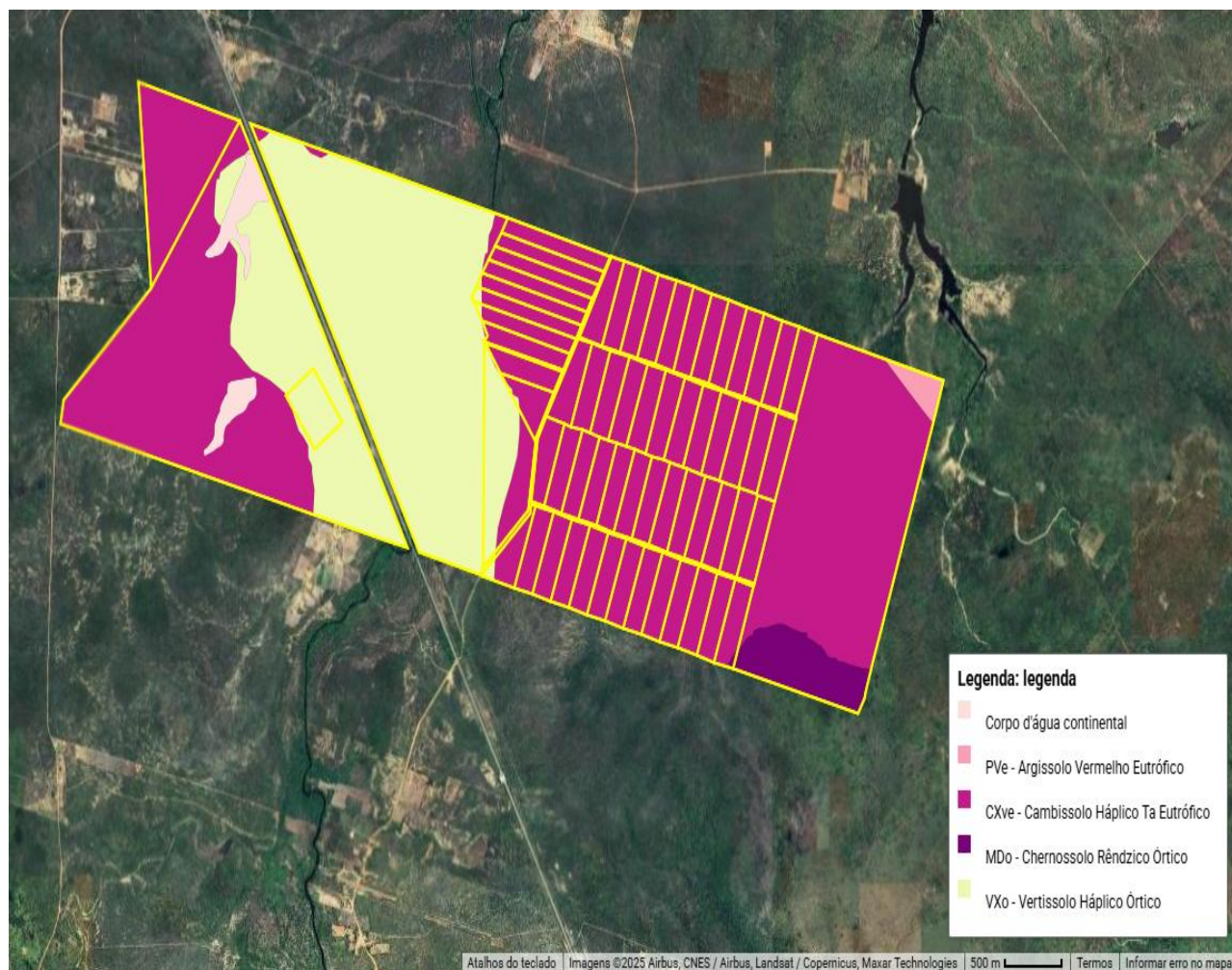
Yeomans, J. C.; Bremner, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**. v.19, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>.

Zago, Leciana de Menezes Sousa. Uso de enzimas como bioindicadores em solos com diferentes culturas no Cerrado goiano. **Dissertação**. Universidade Estadual de Goiás - UEG. Anápolis, p. 83, 2016.

Zhang, S., Zhang, Z., Wang, F. et al. Advancing the comprehensive understanding of soil organic carbon priming effect: definitions, mechanisms, influencing factors, and future perspectives. **Environ Geochem Health**, 47, p. 201, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02516-7>.

ANEXO A

Mapas dos solos no Projeto de Assentamento Paulo Freire, Mossoró-RN.



ANEXO B

Matriz de correlação de Person ($p < 0,05$) utilizando 20 variáveis (físicas, químicas e bioquímicas).

Variable	Correlations (novos dados estatística) Marked correlations are significant at $p < ,05000$ N=5 (Casewise deletion of missing data)																			
	CE	pH (H2O)	Na ⁺	K ⁺	P ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	(H +Al)	SB	CTC	V	PST	Argila	NT	COS	COP	COAM	CBM	ARIL	BETA GLI
CE	1,00																			
pH (H2O)	0,83	1,00																		
Na ⁺	0,79	0,72	1,00																	
K ⁺	-0,74	-0,65	-0,20	1,00																
P ⁺	-0,22	-0,44	-0,74	-0,38	1,00															
Ca ²⁺	-0,75	-0,54	-0,20	0,98	-0,45	1,00														
Mg ²⁺	0,77	0,59	0,90	-0,28	-0,52	-0,31	1,00													
(H +Al)	-0,87	-0,65	-0,45	0,91	-0,20	0,93	-0,62	1,0												
SB	-0,53	-0,37	0,09	0,94	-0,65	0,95	0,01	0,8	1,00											
CTC	-0,56	-0,40	0,05	0,95	-0,62	0,96	-0,04	0,8	1,00	1,00										
V	0,87	0,65	0,45	-0,91	0,20	-0,93	0,62	-1,0	-0,77	-0,80	1,0									
PST	0,93	0,85	0,94	-0,45	-0,54	-0,48	0,80	-0,6	-0,24	-0,27	0,6	1,00								
Argila	-0,34	-0,20	0,29	0,87	-0,75	0,87	0,11	0,7	0,96	0,95	-0,7	-0,01	1,00							
NT	0,06	0,04	0,60	0,53	-0,78	0,52	0,64	0,2	0,77	0,73	-0,2	0,28	0,77	1,00						
COS	0,34	0,09	0,65	0,16	-0,47	0,09	0,85	-0,3	0,38	0,34	0,3	0,40	0,37	0,86	1,00					
COP	-0,24	-0,04	0,12	0,55	-0,53	0,58	-0,31	0,7	0,51	0,53	-0,7	0,06	0,67	0,12	-0,30	1,00				
COAM	0,37	0,10	0,56	0,03	-0,31	-0,05	0,84	-0,4	0,24	0,19	0,4	0,35	0,19	0,76	0,98	-0,45	1,00			
CBM	-0,82	-0,71	-0,32	0,99	-0,28	0,97	-0,37	0,9	0,90	0,92	-0,9	-0,60	0,80	0,46	0,10	0,49	-0,02	1,00		
ARIL	-0,74	-0,64	-0,15	1,00	-0,35	0,98	-0,24	0,9	0,95	0,96	-0,9	-0,45	0,86	0,58	0,23	0,48	0,10	0,99	1,00	
BETA GLI	-0,78	-0,75	-0,31	0,95	-0,17	0,89	-0,26	0,8	0,86	0,87	-0,8	-0,61	0,72	0,51	0,26	0,29	0,17	0,96	0,96	1,00

ANEXO C

Indicadores de qualidade do solo (Tecnologia BioAs) na profundidade de 0 – 0,10 m das áreas estudadas, Assentamento Paulo Freire, Mossoró-RN.

	Aril	Beta	MOS (g/dm ³)	Argila	IQS Fertibio	IQS Biológico	IQS Químico	Ciclagem	Armazenamento de nutrientes	Suprimento de nutrientes
0 - 0,10 m										
A1	28	63	13	36	0.54	0.55	0.54	0.55	0.56	0.53
A2	33	68	13	35	0.57	0.59	0.56	0.59	0.55	0.57
A3	26	74	6	21	0.67	0.73	0.64	0.73	0.53	0.75
A4	53	95	19	45	0.61	0.68	0.58	0.68	0.61	0.54
A5	80	114	17	55	0.58	0.74	0.50	0.74	0.44	0.56

Padrão de interpretação da Tecnologia BioAs: Para os valores de atividade enzimática e matéria orgânica, a escala de cores (do vermelho para o verde escuro) refere-se aos níveis muito baixos, baixo, médio, alto e muito alto. Para os Índices de Qualidade do Solo e das funções, a escala de cores segue conforme abaixo:

	0,81 – 1	muito elevado
	0,61 - 0,80	elevado
	0,41 - 0,60	médio
	0,21 -0,40	baixo
	0 - 0,20	muito baixo