



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

MARIA ISABELA BATISTA CLEMENTE

**RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E FRAÇÕES DE
CARBONO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS EM PERÍMETRO IRRIGADO DO
BAIXO-AÇÚ**

MOSSORÓ

2026

MARIA ISABELA BATISTA CLEMENTE

**RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E FRAÇÕES DE
CARBONO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS EM PERÍMETRO IRRIGADO DO
BAIXO-AÇÚ**

Tese 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 Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tratamento e Uso de Resíduos e seus Impactos no Solo e da Água

Orientador: Marcelo Tavares Gurgel, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2026

© 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 tomar-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.

C626r Clemente, Maria Isabela Batista.
RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E
FRAÇÕES DE CARBONO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS EM
PERÍMETRO IRRIGADO DO BAIXO-AÇÚ / Maria Isabela
Batista Clemente. - 2026.
70 f. : il.

Orientador: Marcelo Tavares Gurgel.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2026.

1. Agricultura Irrigada. 2. Salinidade. 3.
Sustentabilidade. 4. Saúde do solo. I. Gurgel,
Marcelo Tavares, orient. II. 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.

MARIA ISABELA BATISTA CLEMENTE

**RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E FRAÇÕES DE
CARBONO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS EM PERÍMETRO IRRIGADO DO
BAIXO-AÇÚ**

Tese 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 Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tratamento e Uso de Resíduos e
seus Impactos no Solo e da Água

Defendida em: 27 / 02 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

Marcelo Tavares Gurgel, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

José Francismar de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Luiz Fernando de Sousa Antunes, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Juan Cruz Colazo, Prof. Dr. (INTA/UNSL)
Membro Examinador

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

Lucas Ramos da Costa, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

*À minha saudosa mãe Maria Helena Batista
Clemente (In Memoriam).*

*Agradeço a Deus, ao meu pai, José Wilson, à minha irmã Marilha Gabriela e minha sobrinha
Mari Hellen.*

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a Deus, por ter me permitido alcançar uma conquista tão significativa. Concluir a graduação e, hoje, finalizar o doutorado é motivo de imensa gratidão. Ao olhar para trás, lembro daquela garotinha, filha de agricultores, e me emociono ao perceber que hoje estou aqui, conquistando o título de doutora. Gratidão.

Agradeço à minha família, em especial à minha saudosa mãe, Maria Helena (*in memoriam*), que, onde estiver, certamente vibra de alegria. Ao meu pai, José Wilson Clemente, que nunca mediu esforços para me proporcionar a melhor educação possível.

À minha irmã, Marilha Gabriela, por estar sempre ao meu lado, compartilhando alegrias e enfrentando comigo os desafios da vida. À minha sobrinha, Mari Hellen, uma verdadeira bênção que veio para iluminar nossos caminhos.

Aos meus amigos e amigas Rodrigo Rafael, Eric, Helena, Luirla, Francismar Maik, Gabriela Carvalho, Micharlyson, Norlan, e a todos os integrantes do Laboratório de Manejo de água e Solo na Agricultura Irrigada, sob coordenação do professor José Francismar de Medeiros, bem como ao Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta do Semiárido – LASAPSA. Agradeço à equipe técnica, aos terceirizados e a cada pessoa que contribuiu para tornar essa caminhada mais leve. Não consigo citar todos individualmente, mas saibam que tenho um carinho imenso por cada um.

À Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, por possibilitar a realização das atividades de pesquisa e pelas amizades construídas ao longo dessa trajetória. Ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água – PPGMSA, pelo corpo docente qualificado e pelas oportunidades oferecidas, em especial o intercâmbio realizado na Argentina, na EEA San Luis, em Villa Mercedes, no Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa durante todo o período do doutorado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Tavares Gurgel, que esteve comigo em toda essa trajetória, contribuindo de forma essencial para essa construção. Ao meu grupo de pesquisa, Núcleo de Estudos em Ambientes Hipersalinos no Semiárido e, em especial, às bolsistas de iniciação científica Suelen e Fernanda e Leonardo irmão de orientação pelo apoio e dedicação durante o desenvolvimento das atividades de campo e laboratório. Aos agricultores e responsáveis pelo DIBA em permitir acesso às áreas e contribuir com a pesquisa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram e fizeram parte dessa grande conquista, meu muito obrigada. OBRIGADA!

A vida é uma longa estrada que tem curvas imprevisíveis e derrapagens inevitáveis.

A sociedade nos prepara para os dias de glória,
mas são os dias de frustração que dão sentido a essa glória.

Augusto Cury

RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E FRAÇÕES DE CARBONO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS EM PERÍMETRO IRRIGADO DO BAIXO-AÇU

RESUMO

A expansão da agricultura irrigada no semiárido brasileiro tem sido fundamental para o desenvolvimento socioeconômico regional. Entretanto, a degradação do solo devido a salinidade e sodicidade, tem-se prejudicado a saúde do solo para um desenvolvimento sustentável dos sistemas produtivos. Esta pesquisa, objetivou-se compreender de maneira integrada, os impactos da salinidade e sodicidade sobre os atributos químicos, físicos e biológicos de solos agrícolas do semiárido brasileiro, fornecendo bases técnicas e científicas para estratégias de manejo voltadas à recuperação da saúde do solo e à sustentabilidade da agricultura irrigada. O estudo foi desenvolvido no Distrito de Irrigação do Baixo Açu (DIBA), localizado no estado do Rio Grande do Norte, em dois lotes com histórico distinto de uso: um desativado (Lote 77) e outro em atividade agrícola (Lote 78). As amostragens foram realizadas nas profundidades de 0 – 10 cm e 10 – 20 cm. Foram avaliados atributos físicos (granulometria, estabilidade estrutural), químicos (pH, CEes, cátions solúveis e trocáveis, CTC, PST e RAS) e indicadores relacionados às frações do carbono orgânico. As análises estatísticas incluíram testes de normalidade e homogeneidade, comparações múltiplas, análise de correlação e análise de componentes principais. Os resultados evidenciaram cenários distintos, porém complementares, de degradação. O Lote 77 apresentou processo avançado de salinização e sodificação, com valores elevados de CEes, PST e RAS, nas camadas, respectivamente. A elevada concentração de Na^+ favoreceu a dispersão de argilas, comprometendo a estabilidade de agregados e a infiltração de água, caracterizando degradação estrutural expressiva. Já o Lote 78, embora em atividade, apresentou sinais de degradação silenciosa e estratificada, com baixa CTC. A integração entre atributos físicos, químicos e frações do carbono orgânico demonstrou que a salinidade e a sodicidade atuam como fatores estruturantes da degradação, influenciando diretamente a estabilidade física e a funcionalidade biológica do solo. No lote 77 e 78 observou-se interação significativa com as variáveis CBM e COP, indicando a presença de atividade microbiana, mesmo na presença de teores expressivos de carbono orgânico, a estabilidade dos agregados em solo salino-sódico em região semiárida é fortemente comprometida. Conclui-se que o aumento da salinidade e da sodicidade compromete a saúde do solo ao promover desequilíbrios químicos, dispersão de partículas, redução da estabilidade estrutural e alterações na dinâmica do carbono. Os resultados reforçam a necessidade de monitoramento integrado do perfil do solo e adoção de práticas de manejo sustentável, como uso de corretivos agrícolas, incremento de matéria orgânica, melhoria da drenagem e manejo adequado da irrigação, visando à sustentabilidade da agricultura irrigada no semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Agricultura Irrigada. Salinidade. Sustentabilidade. Saúde do solo.

RELATIONSHIP BETWEEN CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES AND CARBON FRACTIONS IN SALINE-AFFECTED SOILS IN AN IRRIGATED AREA OF THE BAIXO-AÇÚ REGION

ABSTRACT

The expansion of irrigated agriculture in the Brazilian semi-arid region has been fundamental to regional socioeconomic development. However, soil degradation due to salinity and sodicity has been undermining soil health, hindering the sustainable development of agricultural systems. This study aimed to comprehensively understand the impacts of salinity and sodicity on the chemical, physical, and biological attributes of agricultural soils in the Brazilian semi-arid region, providing technical and scientific foundations for management strategies aimed at restoring soil health and ensuring the sustainability of irrigated agriculture. The study was conducted in the Baixo Açu Irrigation District (DIBA), located in the state of Rio Grande do Norte, on two plots with distinct usage histories: one decommissioned (Plot 77) and another under agricultural use (Plot 78). Sampling was performed at depths of 0–10 cm and 10 – 20 cm. Physical attributes (particle size distribution, structural stability), chemical attributes (pH, cEC, soluble and exchangeable cations, CTC, PST, and RAS), and indicators related to organic carbon fractions were evaluated. Statistical analyses included tests for normality and homogeneity, multiple comparisons, correlation analysis, and principal component analysis. The results revealed distinct yet complementary scenarios of degradation. Plot 77 exhibited an advanced process of salinization and sodification, with high values of EC, PST, and RAS in the soil layers, respectively. The high concentration of Na^+ promoted the dispersion of clays, compromising aggregate stability and water infiltration, indicating significant structural degradation. Plot 78, although under cultivation, showed signs of silent and stratified degradation, with low CTC. The integration of physical and chemical attributes with organic carbon fractions demonstrated that salinity and sodicity act as structuring factors of degradation, directly influencing the physical stability and biological functionality of the soil. In Plots 77 and 78, a significant interaction was observed with the CBM and COP variables, indicating the presence of microbial activity; however, even in the presence of significant levels of organic carbon, aggregate stability in saline-sodic soil in a semi-arid region is severely compromised. It is concluded that increased salinity and sodicity compromise soil health by causing chemical imbalances, particle dispersion, reduced structural stability, and changes in carbon dynamics. The results reinforce the need for integrated monitoring of the soil profile and the adoption of sustainable management practices, such as the use of soil amendments, increasing organic matter, improving drainage, and proper irrigation management, with a view to ensuring the sustainability of irrigated agriculture in the Brazilian semi-arid region.

Keywords: Irrigated agriculture. Salinity. Sustainability. Soil health.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I

- Figura 1 – Mapa de localização dos Lotes 77 e 78 no Distrito Irrigado Baixo – Açu (DIBA).
..... 26
- Figura 2 – Matriz de Correlação de Pearson representada pelo heatmap dos atributos físicos - químicos do solo, TS – Teor de Silte; AF – Areia Fina; AG – Areia Grossa; TA – Teor de Argila; CEes – Condutividade Elétrica do extrato de saturação; pH – Potencial Hidrogeniônico; Na^+ – Sódio; K^+ – Potássio; K – Potássio; P – Fósforo; Ca^{2+} - Cálcio; Mg^{2+} - Magnésio; N – Nitrogênio; CTC – Capacidade de troca catiônica; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS - Razão de Adsorção de Sódio, na profundidade de 0 – 10 cm (A); e 10 – 20 cm (B) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo-Açu – DIBA no Rio Grande do Norte..... 34
- Figura 3 – Análise de Componentes Principais (ACP) referente aos dados da física do solo nas profundidades de 0 – 10 cm (A); E 10 – 20 cm (B) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo Açu – DIBA, no Rio Grande do Norte, Brasil..... 35
- Figura 4 – Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos químicos do solo CEes – Condutividade Elétrica do extrato de saturação; pH – Potencial Hidrogeniônico; Na^+ – Sódio; K^+ – Potássio; P – Fósforo; Ca^{2+} - Cálcio; Mg^{2+} - Magnésio; N – Nitrogênio; CTC – Capacidade de troca catiônica; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS - Razão de Adsorção de Sódio nas profundidades de 0 – 10 cm (A); e 10 – 20 cm (B) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo Açu – DIBA, no Rio Grande do Norte, Brasil..... 36

ARTIGO II

- Figura 1 – Localização dos Lotes 77 e 78 e as coordenadas geográficas de cada ponto no campo no Distrito Irrigado Baixo –Açu (DIBA)
..... 47

- Figura 2 – Boxplots dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo na profundidade de (0 – 10 cm) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo-Açu (DIBA), Rio Grande do Norte, Brasil. As variáveis analisadas foram: (A) sódio (Na^+), (B) cálcio (Ca^{2+}), (C) magnésio (Mg^{2+}), (D) argila dispersa em água (ADA), (E) grau de flocculação (GF), (F) diâmetro médio ponderado (DMP), (G) diâmetro médio geométrico (DMG), (H) carbono orgânico total (COT), (I) carbono orgânico particulado (COP), (J) carbono lábil (CL), (K) carbono da biomassa microbiana (CBM), (L) porcentagem de sódio trocável (PST), (M) razão de adsorção de sódio (RAS).....53
- Figura 3 – Boxplots dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo na profundidade de (10 – 20 cm) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo-Açu (DIBA), Rio Grande do Norte, Brasil. As variáveis analisadas foram: (A) sódio (Na^+), (B) cálcio (Ca^{2+}), (C) magnésio (Mg^{2+}), (D) argila dispersa em água (ADA), (E) grau de flocculação (GF), (F) diâmetro médio ponderado (DMP), (G) diâmetro médio geométrico (DMG), (H) carbono orgânico total (COT), (I) carbono orgânico particulado (COP), (J) carbono lábil (CL), (K) carbono da biomassa microbiana (CBM), (L) porcentagem de sódio trocável (PST), (M) razão de adsorção de sódio (RAS).....55
- Figura 4 – Matriz de correlação de Pearson dos atributos físicos, químicos e biológicos, na profundidade de 0 – 10 cm (A) e 10 – 20 cm (B) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo-Açu – DIBA no Rio Grande do Norte, Brasil, das variáveis, Na^+ – Sódio; Ca^{2+} - Cálcio; Mg^{2+} - Magnésio; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS - Razão de Adsorção de Sódio, ADA – Argila Dispersa em Água; GF – Grau de Flocculação; DMP – Diâmetro Médio Ponderado; DMG – Diâmetro Médio Geométrico; COT – Carbono Orgânico Total; CL – Carbono Lábil; COP – Carbono Orgânico Particulado e CBM – Carbono da Biomassa Microbiana.....57
- Figura 5 – Análise de Componente Principal (ACP) dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, Na^+ – Sódio; Ca^{2+} - Cálcio; Mg^{2+} - Magnésio; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS - Razão de Adsorção de Sódio, ADA – Argila Dispersa em Água; GF – Grau de Flocculação; DMP – Diâmetro Médio Ponderado; DMG – Diâmetro Médio Geométrico; COT – Carbono Orgânico

Total; CL – Carbono Labil; COP – Carbono Orgânico Particulado e CBM – Carbono da Biomassa Microbiana, na profundidades de 0 – 10 cm, nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo Açu – DIBA, no Rio Grande do Norte, Brasil.....59

Figura 6 – Análise de Componente Principal (ACP) dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, Na⁺ – Sódio; Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ - Magnésio; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS - Razão de Adsorção de Sódio, ADA – Argila Dispersa em Água; GF – Grau de Floculação; DMP – Diâmetro Médio Ponderado; DMG – Diâmetro Médio Geométrico; COT – Carbono Orgânico Total; CL – Carbono Labil; COP – Carbono Orgânico Particulado e CBM – Carbono da Biomassa Microbiana, na profundidades de 10 – 20 cm, nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo Açu – DIBA, no Rio Grande do Norte, Brasil.....60

LISTA DE TABELAS E QUADROS

ARTIGO I

Quadro 1	–	Coordenadas dos pontos de coleta em campo no Distrito Irrigado do Baixo Açu – DIBA	26
Tabela 1	–	Atributos físicos do solo na profundidade de 0 – 10 cm em diferentes pontos amostrais dos Lotes 77 e 78 no DIBA	30
Tabela 2	–	Atributos físicos do solo na profundidade de 10 – 20 cm em diferentes pontos amostrais dos Lotes 77 e 78 no DIBA.	31
Tabela 3	–	Atributos químicos do solo na profundidade de 0 – 10 cm em diferentes pontos amostrais dos Lotes 77 e 78 no DIBA.	32
Tabela 4	–	Atributos químicos do solo na profundidade de 10 – 20 cm em diferentes pontos amostrais dos Lotes 77 e 78 no DIBA.	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	Análise de Componentes Principais
AF	Areia Fina
AG	Areia Grossa
Al ³⁺	Alumínio
ANOVA	Análise de variância
ASG	Ambiental, Social e Governança
Ca ²⁺	Cálcio
CBM	Carbono da Biomassa Microbiana
CEes	Condutividade elétrica do extrato de saturação
CL	Carbono Lável
COP	Carbono Orgânico Particulado
COT	Carbono Orgânico Total
CTC	Capacidade de troca catiônica
CV	Coeficiente de variação
DIBA	Distrito Irrigado do Baixo Açu
Dr	Doutor
EAA	Espectrometria de Absorção Atômica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Eq.	Equação
FAO	Food and Agriculture Organization
H ⁺	Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K ⁺	Potássio
LASAPSA	Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta do Semiárido
Mg ²⁺	Magnésio
N	Nitrogênio
Na ⁺	Sódio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo

pH	Potencial hidrogeniônico
PST	Percentual/Porcentagem de sódio trocável
RAS	Razão de adsorção de sódio
RN	Rio Grande do Norte
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TA	Teor de Argila
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
TS	Teor de Silte
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semiárido
WRB/FAO	World Reference Base for Soil Resources

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	18
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19
2	ARTIGO I: DIAGNÓSTICO DO SOLO EM PERÍMETRO IRRIGADO: AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E SALINIZAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	22
	RESUMO	22
	ABSTRACT	23
	2.1 INTRODUÇÃO.....	24
	2.2 MATERIAL E MÉTODOS	26
	2.2.1 Localização e características da área do estudo	26
	2.2.2 Amostras e análises de solos	28
	2.2.3 Análises das propriedades físicas do solo	30
	2.2.4 Análises estatísticas dos dados	30
	2.3 RESULTADOS	31
	2.4 DISCUSSÃO.....	37
	2.5 CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
3	ARTIGO II: ESTABILIDADE FÍSICA E FRAÇÕES DE CARBONO: SUAS INTER-RELAÇÕES COM A DEGRADAÇÃO ESTRUTURAL EM SOLO COM PROBLEMAS DE SALINIDADE EM PERÍMETRO IRRIGADO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	44
	RESUMO.....	44
	ABSTRACT	45
	3.1 INTRODUÇÃO.....	46
	3.2 MATERIAL E MÉTODOS	48
	3.2.1 Localização e características do estudo.....	48
	3.2.2 Amostras e análises de solos	49
	3.2.3 Carbono Orgânico Total (COT) e Carbono Orgânico Particulado (COP).....	50
	3.2.4 Carbono Lável (CL).....	51
	3.2.5 Carbono da biomassa microbiana (CBM).....	51
	3.2.6 Bases trocáveis, Argila dispersa em água, Grau de Floculação e agregados	52
	3.2.7 Análises estatísticas dos dados	53
	3.3 RESULTADOS	53

3.4 DISCUSSÃO.....	62
3.5 CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1 INTRODUÇÃO GERAL

O solo é um recurso interativo, responsável por uma diversidade de relações entre os ecossistemas, além da importância para os mecanismos biótico e abiótico. A qualidade do solo depende de vários segmentos que usufruem de seu potencial, como o desenvolvimento econômico, social, ambiental e o setor agrícola.

As áreas afetadas por sais no Brasil ocupam cerca de 16 milhões de hectares, onde aproximadamente 70 % encontram-se localizadas no semiárido (FAO, 2020; Gheyi *et al.*, 2022). O impacto mais perceptível da degradação do solo pelo acúmulo de sais é a perda da cobertura vegetal, isso acontece devido a um estágio avançado da degradação (Dias *et al.*, 2016).

É importante ressaltar que nas regiões áridas e semiáridas têm ocorrido consideráveis perdas na qualidade ambiental e, por conseguinte a diminuição do potencial produtivo do solo (Litalien; Zeeb, 2020). Vale salientar que, solos afetados por excessos de sais, conhecidos como salino-sódico ou solos halomórficos têm origens por processos naturais ou ações antrópicas, que sucede a salinização, e como sabe-se o aumento da concentração de sais solúveis principalmente cloreto, sódio trocável, cálcio e magnésio (Bonilla *et al.*, 2019; Gheyi *et al.*, 2022).

Nesse contexto, verifica-se a diversidade de fatores que intervêm no processo de degradação do solo, dentre eles a baixa ocorrência de precipitação pluvial, deste modo a irrigação tornou-se contundente para o desenvolvimento da agricultura em regiões semiáridas (Albuquerque *et al.*, 2018). Na região Nordeste brasileira, observou-se o crescimento do perímetro irrigado em meados da década de 1980, sabe-se que os perímetros, são essenciais para o desenvolvimento da região em relação a geração de emprego e renda (ANA 2017), a expansão da agricultura irrigada no semiárido brasileiro tem sido fundamental para a produção de alimentos e desenvolvimento regional (EMBRAPA, 2018).

Levando em consideração essa importância dos perímetros irrigados, o Distrito Irrigado do Baixo-Açu (DIBA) está localizado em uma região semiárida, constituído de uma diversidade de culturas agrícolas, como banana, milho, feijão, manga e outras, permitindo a geração de renda e empregos (DIBA, 2024; Justo *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2024).

Entretanto, as condições edafoclimáticas associadas à elevada evapotranspiração e ao manejo inadequado da irrigação favorecem o acúmulo de sais no solo, desencadeando processos de salinização e sodificação (Stavi; Thevs; Priori, 2021). Esses processos podem comprometer a estrutura do solo, intensificar a dispersão de argilas, reduz a estabilidade de agregados e

alteram a dinâmica do carbono orgânico, afetando diretamente os indicadores de saúde do solo (Lopes; Fernandes, 2020).

A FAO (2025) reforça a importância de que a saúde do solo é indispensável para manter um ambiente propício para o desenvolvimento das atividades agrícolas. A recuperação de solos afetados por sais é discutida como uma estratégia dos planos de desenvolvimento dos países (Basak *et al.*, 2022). Para tal propósito, é fundamental compreender que recuperação de áreas degradadas tem o intuito de viabilizar ao ambiente degradado, a possibilidade de reestruturação, corroborando para melhoria nas condições físicas, químicas e biológicas. Observa a necessidade de realizar estudos com técnicas de recuperação das áreas degradadas voltadas a recuperação de solo salino-sódico, que utilizem plantas adaptadas ao ambiente e restabeleça a capacidade produtiva e minimize o abandono das terras.

Diante da problemática sobre a degradação do solo salino/sódico, a hipótese central que norteia esta tese é que o aumento da salinidade e da sodicidade em solos agrícolas do semiárido desencadeia desequilíbrios químicos que promovem dispersão de argilas, desagregação estrutural e alterações na dinâmica das frações do carbono orgânico, resultando na redução da qualidade e funcionalidade do solo.

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi compreender, de maneira integrada, os impactos da salinidade e sodicidade sobre os atributos químicos, físicos e biológicos de solos agrícolas do semiárido brasileiro, fornecendo bases técnicas e científicas para estratégias de manejo voltadas à recuperação da saúde do solo e à sustentabilidade da agricultura irrigada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A. S.; FONSÊCA, N. C.; SANTOS, R. V. D.; MEDEIROS, W. P. Atributos químicos em solo salino-sódico e efeito do ácido sulfúrico no crescimento da *Prosopis juliflora*. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 61, 2018. Disponível em: <https://ajaes.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/2811>. Acesso em: 24 fev. 2026.

BASAK, N.; RAI, A. K.; SUNDHA, P.; MEENA, R. L.; BEDWAL, S.; YADAV, R. K.; SHARMA, P. C. Assessing soil quality for rehabilitation of salt-affected agroecosystem: A comprehensive review. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 935785, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.935785/full>. Acesso em: 1 fev. 2026.

BONILLA, O. H.; DIAS, F. Y. E. D. C.; LUCENA, E. M. P. D.; LACERDA, C. F. D.; LOIOLA, M. I. B. Comunidade Halofítica Herbáceo-arbustiva em Perímetro Irrigado do Município de Pentecoste-CE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 5, p. 1934–1951, 2019. Disponível em:

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/241384>. Acesso em: 24 fev. 2026.

DIAS, N. da S.; BLANCO, F. F.; SOUZA, E.; FERREIRA, J. F. S.; SOUZA NETO, O.; QUEIROZ, Í. S. R. de. Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade. *In: MANEJO DA SALINIDADE NA AGRICULTURA: ESTUDO BÁSICO E APLICADO*. 2. ed. , 2016. p. 151–162.

DIBA. DIBA – Distrito de Irrigação do Baixo Açu. *In: 2024*. Disponível em: <https://diba.org.br/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

EMBRAPA. **Visão: o futuro da agricultura brasileira**. : Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao/o-futuro-da-agricultura-brasileira>. Acesso em: 23 nov. 2025.

FAO. Campaign Report. Caring for soils, measure, monitor, manage. *In: GLOBAL SOIL PARTNERSHIP (GSP)*, 2025, Rome, Italy. **Anais [...]**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2025. p. 51. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd5378en>. Acesso em: 23 nov. 2025.

FAO. **Mapping of salt-affected soils – Technical manual**. : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/ca9215en>. Acesso em: 23 nov. 2025.

GHEYI, H. R.; LACERDA, C. F.; FREIRE, M. B. G. S.; COSTA, R. N. T.; SOUZA, E. R. D.; SILVA, A. O. D.; FRACETTO, G. G. M.; CAVALCANTE, L. F. Management and reclamation of salt-affected soils: general assessment and experiences in the Brazilian semiarid region. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA**, v. 53, 2022. Disponível em: <http://periodicos.ufc.br/revistacienciaagronomica/article/view/88905>. Acesso em: 24 fev. 2026.

JUSTO, J. F. A.; BARRETO, A. C.; SILVA, J. F. D.; FERREIRA NETO, M.; SÁ, F. V. D. S.; OLIVEIRA, R. P. D. Identification and diagnosis of salt-affected soils in the Baixo-Açu irrigated perimeter, RN, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 7, p. 480–484, 2021. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662021000700480&tlng=en. Acesso em: 5 fev. 2026.

LITALIEN, A.; ZEEB, B. Curing the earth: A review of anthropogenic soil salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation. **Science of The Total Environment**, v. 698, p. 134235, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719342184>. Acesso em: 24 fev. 2026.

LOPES, L. D.; FERNANDES, M. F. Changes in microbial community structure and physiological profile in a kaolinitic tropical soil under different conservation agricultural practices. **Applied Soil Ecology**, v. 152, p. 103545, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0929139319315197>. Acesso em: 27 jan. 2026.

SILVA, J. F. D.; FERREIRA NETO, M.; PORTELA, J. C.; GONDIM, J. E. F.; MELO, S. B. D.; FREITAS, D. F. D.; MEDEIROS, J. F. D.; DIAS, N. D. S.; PEIXOTO, T. D. C.; SÁ, F. V. D. S. Soil Classification Based on Local and Scientific Knowledge in an Irrigated District in the Semi-Arid Region of Brazil. **Land**, v. 13, n. 10, p. 1559, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/10/1559>. Acesso em: 2 fev. 2026.

STAVI, I.; THEVS, N.; PRIORI, S. Soil Salinity and Sodicity in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring, and Restoration Measures. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 712831, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.712831/full>. Acesso em: 26 jan. 2026.

2 ARTIGO I: DIAGNÓSTICO DO SOLO EM PERÍMETRO IRRIGADO: AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E SALINIZAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

A agricultura constitui um dos pilares da economia e da segurança alimentar. No semiárido brasileiro, contudo, os solos vêm sofrendo processos de degradação que exigem manejo adequado. Diante desse cenário, a saúde do solo surge como conceito central e indicador decisivo para a sustentabilidade agrícola. Assim, objetivou-se com este estudo avaliar a saúde do solo por meio de indicadores físicos e químicos, em uma área agrícola do semiárido brasileiro, propiciando bases técnicas para o manejo adequado e a recuperação de solos degradados. Foram coletadas amostras em dois lotes (Lote 77 – desativado e o Lote 78 – em atividade), nas profundidades de 0 – 10 cm e 10 – 20 cm no Distrito Irrigado do Baixo Açu – DIBA localizado no Rio grande do Norte, Brasil. As análises incluíram textura, pH, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), cátions solúveis e trocáveis (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), capacidade de troca catiônica (CTC), percentual de sódio trocável (PST) e razão de adsorção de sódio (RAS). Os dados foram submetidos a testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett e Levene). Em seguida, aplicou-se a análise paramétrica de Kruskal-Wallis, com comparações múltiplas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) e correção de Bonferroni. Todas as análises foram realizadas no R Studio. Os resultados revelaram que no Lote 77 de 10 – 20 cm, observou-se processo avançado de salinização, com CEes elevada (até $3,14 \text{ dS m}^{-1}$), PST crítica (até 47,15%) e RAS acima de $100 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. A textura variou significativamente entre os lotes, influenciando a retenção de água e nutrientes. A análise de componentes principais (PCA) destacou a segregação espacial dos atributos, com a salinidade (Na^+ , CEes, PST, RAS) como fator dominante na diferenciação das áreas. A degradação observada é resultado da combinação de fatores naturais e antrópicos. A alta concentração de Na^+ promove a dispersão das argilas, comprometendo a estrutura do solo e a infiltração de água. A baixa CTC no Lote 78 limita a disponibilidade de nutrientes, tornando o sistema dependente de insumos externos. O lote 77 apresenta um processo de degradação salino/sódico nítido que exige um monitoramento integrado do perfil do solo. O lote 78 passa por uma degradação de forma silenciosa e estratificada que exige monitoramento integrado. Os achados do presente trabalho fornecem bases técnicas para orientar práticas de manejo visando à recuperação de solos degradados no semiárido. Recomenda-se o monitoramento contínuo da salinidade e da sodicidade ao longo do perfil, a adoção de culturas tolerantes, a aplicação de corretivos como gesso agrícola para reduzir o PST, e o incremento de matéria orgânica para melhorar a CTC e o uso de drenagem e manejo da irrigação.

Palavras – chave: Salinidade. Segurança alimentar. Manejo sustentável. Objetivos de desenvolvimento sustentáveis.

PAPER 1: SOIL DIAGNOSIS IN IRRIGATED PERIMETER: PHYSICAL-CHEMICAL EVALUATION AND SALINIZATION IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION

ABSTRACT

Agriculture is one of the pillars of the economy and food security. In Brazil's semi-arid region, however, soils have been undergoing degradation processes that require proper management. Given this scenario, soil health emerges as a central concept and a decisive indicator for agricultural sustainability. Thus, the objective of this study was to assess soil health using physical and chemical indicators in an agricultural area of the Brazilian semi-arid region, providing a technical basis for proper management and the recovery of degraded soils. Samples were collected from two plots (Plot 77 — deactivated and Plot 78 — in use) at depths of 0–10 cm and 10–20 cm in the Baixo Açu Irrigated District (DIBA) located in Rio Grande do Norte, Brazil. The analyses included texture, pH, electrical conductivity of the saturation extract (EC_{se}), soluble and exchangeable cations (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), cation exchange capacity (CEC), percentage of exchangeable sodium (PES), and sodium adsorption ratio (SAR). The data were subjected to tests for normality (Shapiro-Wilk) and homogeneity of variances (Bartlett and Levene). Next, the Kruskal-Wallis parametric analysis was performed, with multiple comparisons using Tukey's test ($p \leq 0.05$) and Bonferroni correction. All analyses were conducted in R Studio. The results revealed that in Plot 77 (10 – 20 cm), an advanced salinization process was observed, with high EC (up to 3.14 dS m⁻¹), critical PST (up to 47.15%), and RAS above 100 cmolc dm⁻³. Texture varied significantly among plots, influencing water and nutrient retention. Principal component analysis (PCA) highlighted the spatial segregation of attributes, with salinity (Na⁺, EC, PST, RAS) as the dominant factor in differentiating the areas. The observed degradation is the result of a combination of natural and anthropogenic factors. The high concentration of Na⁺ promotes the dispersion of clays, compromising soil structure and water infiltration. The low CTC in Plot 78 limits nutrient availability, making the system dependent on external inputs. Plot 77 exhibits a clear saline/sodic degradation process that requires integrated monitoring of the soil profile. Plot 78 is undergoing a silent, layered degradation process that requires integrated monitoring. The findings of this study provide a technical basis for guiding management practices aimed at the recovery of degraded soils in the semi-arid region. We recommend continuous monitoring of salinity and sodicity throughout the soil profile, the adoption of tolerant crops, the application of soil amendments such as agricultural gypsum to reduce the PST, and the addition of organic matter to improve CTC, as well as the use of drainage and irrigation management.

Keywords: Salinity. Food security. Sustainable management. Sustainable development goals.

2.1 INTRODUÇÃO

A agricultura constitui um dos pilares fundamentais da economia e da segurança alimentar, desempenhando papel crucial no desenvolvimento socioeconômico do país. O Brasil consolidou-se como um dos maiores produtores e exportadores de *commodities* agrícolas do mundo, um feito notável que, no entanto, convive com complexos desafios ambientais e regionais (EMBRAPA, 2018).

Os desafios referentes às mudanças climáticas, a degradação do solo e tendo a necessidade de alimentar uma população que cresce globalmente (Wang *et al.*, 2025). Diante deste contexto, a compreensão dos sistemas agrícolas em regiões áridas e semiáridas é necessária para avaliar a vulnerabilidade frente a esses desafios, visto que, representa cerca de aproximadamente 40% das terras terrestres do mundo, sendo caracterizada por precipitação baixa e instável, além de enfrentar um perigo iminente devido à ameaça da desertificação (Wang *et al.*, 2022; Pal *et al.*, 2023).

O semiárido brasileiro como um recorte territorial se estende por onze estados do Nordeste, e uma pequena porção do Espírito Santo e no norte de Minas Gerais, ocupa no total 15,3% do território brasileiro. É caracterizada por regime pluviométrico irregular, com precipitações pluviais médias anuais frequentemente inferiores a 800 mm, altas taxas de evaporação e ocorrência de secas periódicas (SUDENE, 2021). Dado que esse ambiente possui limitações para o desenvolvimento da agricultura convencional, necessitando a adoção de manejo adequado, que evidencie a compatibilização a geração de renda com a conservação dos recursos naturais.

Por isso, além dos desafios da degradação física e da redução da matéria orgânica, a salinização dos solos configura-se como ameaça silenciosa e crescente na região semiárida, isso está ligado as condições naturais, como a alta taxa de evaporação, manejo inadequado da irrigação e drenagem natural deficiente dos solos, favorecendo o acúmulo de sais (Dias *et al.*, 2017; FAO, 2020).

Neste contexto, a qualidade do solo emerge como um conceito central e um indicador-chave para a sustentabilidade agrícola. Segundo a (FAO, 2025), a saúde do solo é definida como a capacidade contínua do solo funcionar como um ecossistema vital, gerenciar a saúde do solo permite ações que possam vim a melhorar a produtividade, aumentar a resiliência e mitigar os impactos das mudanças climáticas.

Um solo saudável não é apenas um suporte físico para o crescimento das plantas, mas um sistema dinâmico capaz de regular processos ecológicos essenciais, sustentar a biodiversidade e promover a ciclagem de nutrientes, contribuindo para a resiliência dos

sistemas produtivos. No semiárido, entretanto, fatores como o clima, os baixos teores de matéria orgânica, a compactação, a reduzida capacidade de infiltração da água, a susceptibilidade à erosão e, muitas vezes, o manejo inadequado, intensificam os processos de degradação do solo (Lima; Cavalcante; Marin, 2011; Wang *et al.*, 2025).

O Distrito de Irrigação do Baixo Açu – DIBA, localiza-se em uma região semiárida caracterizada por elevados índices de evapotranspiração e baixa precipitação pluvial. Neste contexto, a ausência de um manejo adequado do solo e da água torna o ambiente particularmente susceptível ao processo de salinização, um fenômeno que pode inviabilizar a continuidade das atividades agrícolas. Apesar desse desafio, o DIBA constitui um polo produtivo de grande relevância socioeconômica, suportando uma diversidade de culturas como banana, milho, feijão e manga, o que fundamenta a geração de renda e empregos na região (Tezteslaf, 2017; DIBA, 2024; Silva *et al.*, 2024).

Diante desta dualidade referente à vulnerabilidade ambiental e a importância econômica, torna-se imprescindível aprofundar estudos que elucidem os determinantes da saúde do solo, visando embasar práticas de manejo sustentáveis que assegurem a produtividade agrícola e a conservação da biodiversidade em longo prazo. Visto isso, a degradação do solo, não é apenas um problema ambiental, mas um limitante direto à produtividade e à viabilidade econômica da atividade agrícola, tendo a necessidade de adoção de práticas de manejo e conservação que visem à recuperação do solo.

Ao investigar os atributos físico-químicos do solo no semiárido, é imprescindível conectar e fornecer subsídios técnicos para o alcance de múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS da Agenda 2030 das Organizações das Nações Unidas – ONU, alinhando a recuperação de solos salinizados, e garantir a segurança alimentar, a conservação dos recursos hídricos, a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e a preservação dos ecossistemas semiáridos, dando ênfase nas seguintes metas: Vida terrestre (ODS 15) – Combater a desertificação e neutralidade da degradação do solo, Fome zero (ODS 2) – Agricultura resiliente e sustentável e Ação climática (ODS 13) – Resiliência a secas e sequestro de carbono.

O estudo desenvolvido na área contribui para o avanço do conhecimento sobre solos salino-sódicos em regiões semiáridas sob atividade agrícola, ao abordar lacunas ainda existentes nessa temática. Especificamente, a pesquisa integra a avaliação do potencial de armazenamento de carbono, a caracterização detalhada do estado físico do solo e a análise mineralógica, considerando sua influência nos processos de salinização, sodificação e degradação do solo. Além disso, o trabalho amplia a discussão ao evidenciar a necessidade de

mensurar as perdas associadas à degradação desses solos, não apenas sobre a perspectiva produtiva, mas também considerando os impactos econômicos, sociais e ambientais.

Diante da escassez de informações detalhadas sobre a saúde do solo em perímetros irrigados do semiárido brasileiro, estudos como este tornam-se fundamentais para preencher lacunas de conhecimento e fornecer subsídios técnicos para o manejo adequado e a recuperação de solos degradados. A hipótese que fundamenta este estudo é que a elevação da salinidade e da sodicidade em solos agrícolas do semiárido provoca desequilíbrios químicos e físicos, culminando na redução da qualidade e da funcionalidade do solo. Portanto, este artigo tem como objetivo principal avaliar a saúde do solo por meio atributos físicos e químicos que podem ser utilizados como indicadores, em uma área do Distrito Irrigado do Baixo-Açu - DIBA no semiárido brasileiro, propiciando bases técnicas para o manejo adequado e a recuperação de solos degradados.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Localização e características da área do estudo

O Projeto de Irrigação Osvaldo Amorim, integrado ao Distrito de Irrigação do Baixo Açu – DIBA, está localizado na microrregião do Vale do Açu, na região centro-oeste do estado do Rio Grande do Norte, abrangendo os municípios de Afonso Bezerra e Alto do Rodrigues, conforme ilustrado na Figura 1. As coordenadas geográficas de cada ponto de amostragem encontram-se apresentadas no Quadro 1.

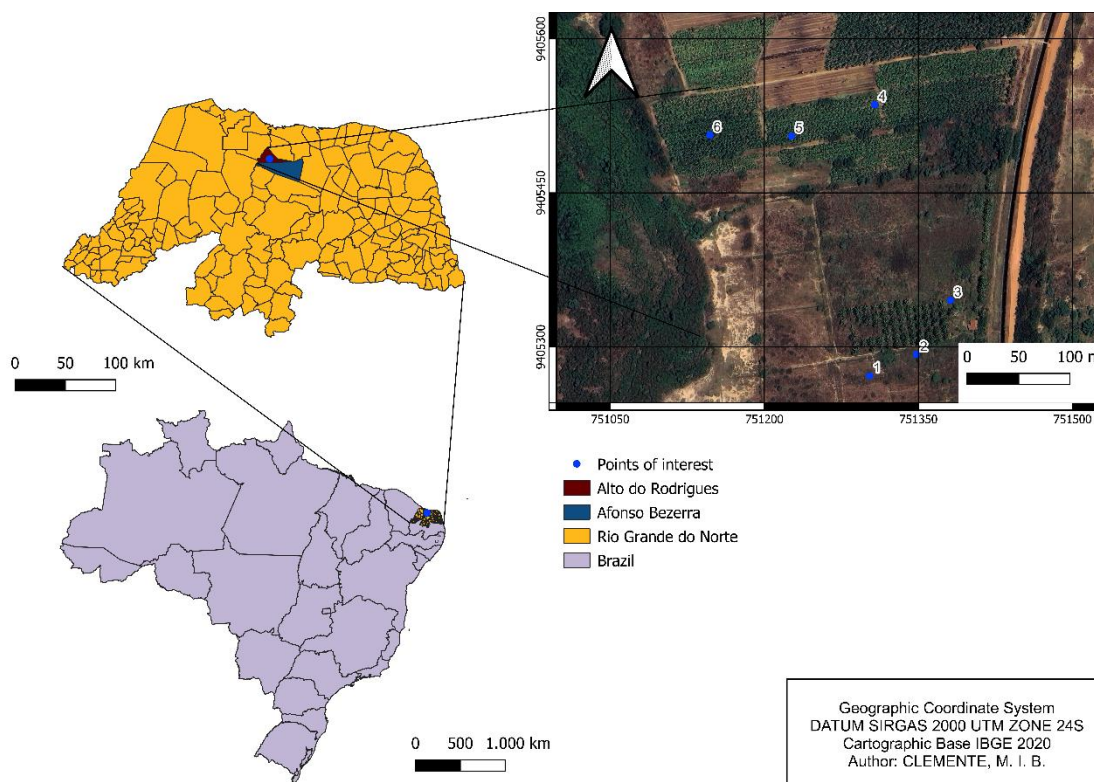


Figura 1. Mapa de localização dos Lotes 77 e 78 no Distrito Irrigado Baixo – Açú (DIBA).

Quadro 1. Coordenadas dos pontos de coleta em campo no Distrito Irrigado do Baixo Açú – DIBA.

Ponto	Lote	Latitude	Longitude
P1	77	5°22'34.74"S	36°43'56.21"O
P2	77	5°22'34.06"S	36°43'54.74"O
P3	77	5°22'32.34"S	36°43'53.67"O
P4	78	5°22'26.15"S	36°43'56.08"O
P5	78	5°22'27.15"S	36°43'58.71"O
P6	78	5°22'27.13"S	36°44'1.29"O

O sistema de drenagem local é influenciado pelo Rio Piranhas-Açú, um curso de água doce que não apresenta problemas relacionados ao excesso de sais, sendo distribuído no distrito por meio de canais de irrigação. A seguir, apresenta-se a classificação dos principais tipos de solos predominantes no DIBA, que são Cambissolos, Latossolos, Planossolos, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS); pelo WRB/FAO - Cambisols, Ferralsols e Planossols; já pela *Soil Taxonomy* - Inceptisols, Oxisols e Alfisols (DIBA, 2024; Silva *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2025).

A característica climática da região, segundo a classificação de Köppen é BSh (quente e seco), com temperatura média é de 27,5 °C, com máxima de 33,6 °C e mínima de 21,5 °C. O

período de chuva tem início em janeiro, com uma maior concentração nos meses de março e abril. A vegetação é constituída por Caatinga Hiperxerófila, ou seja, vegetação adaptada ao clima mais seco, com abundância de cactáceas (Alvares *et al.*, 2013).

O DIBA possui uma área total do projeto de 9.020 hectare (ha) e conta com 3 etapas abertas, sendo ativos: 7 lotes técnico de (16,32 ha cada), 150 lotes familiares (8,16 ha cada) e 22 lotes empresariais; Inativos: 2 lotes técnico, 22 lotes familiares e 24 lotes empresariais, atualmente o distrito possui uma área irrigável de 5.413,34 hectare.

2.2.2 Amostras e análises de solos

Para determinar as unidades de coleta de solo, foram definidas da seguinte forma, lote 77 área desativada com problemas de sais; lote 78, foi definido pontos dentro de uma área que recentemente tinha sido cultivado com banana e demonstrava indícios de problema com salinidade. Vale ressaltar que ambos os lotes, aparentemente, possuem indícios de problema com a drenagem.

Os lotes foram selecionados a partir de um levantamento exploratório preliminar de informações sobre o uso e a ocupação dos solos, consulta ao responsável pelo distrito, visitas de campo in loco e diálogos com os agricultores. Os pontos de amostragem foram definidos de acordo com o acesso às áreas e a incidência de problemas relacionados à presença de sais. Em função disso, as profundidades avaliadas foram selecionadas por concentrarem a maior parte dos nutrientes e suscetíveis aos efeitos da salinidade/sodicidade.

Em cada lote, foram coletadas três amostras simples nas profundidades de 0 – 10 e 10 – 20 cm. As amostras de mesma profundidade dentro de um mesmo lote foram homogeneizadas para formar uma amostra composta, as quais foram definidos da seguinte forma: (lote 77: P1; P2; e P3) e (lote 78: P4; P5 e P6), totalizando seis amostras compostas por cada área, obtendo-se doze amostras compostas.

A expansão histórica e intensiva da agricultura irrigada na região de estudo resultou na ampla modificação do uso e manejo do solo. Consequentemente, não foi possível usar uma área de referência (solos sobre vegetação nativa ou condições não irrigadas) em proximidade imediata às áreas estudadas, que compartilhassem a mesma posição na paisagem e a mesma litologia, para servir como controle direto (Qiao *et al.*, 2022).

Esta é uma limitação inerente ao estudo de ecossistemas fortemente antropizados. Para contornar esta limitação e garantir a robustez da análise, foi adotado como estratégia, o controle teórico, com base em estudos na região semiárida e dando ênfase a estudos realizados na referida área de (Justo *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2024).

Após as coletas dos solos estes foram trazidas para o Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta do Semiárido - LASAPSA do Departamento de Ciências Agronômicas e Florestais da Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA, Campus, Mossoró-RN.

As amostras foram submetidas ao processo de obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) por um período de cinco dias. Após a secagem, o material foi destorroado, homogeneizado, peneirado em malha de 2 mm e acondicionado em recipientes plásticos devidamente identificados. Em seguida, foram realizadas as análises químicas e físicas do solo, utilizando metodologias adaptadas de Richards (Richards, 1954; Freire; Pessoa; Gheyi, 2016; Teixeira, *et al.*, 2017), sendo estas:

- Cátions Solúveis

Foi preparado o extrato de saturação do solo para a determinação do potencial hidrogeniônico (pH) e da condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes). As medições foram realizadas em pHmetro de bancada e condutivímetro digital. Posteriormente, foram determinadas as concentrações dos cátions solúveis, sendo o sódio (Na^+) e o potássio (K^+) quantificados por fotometria de chama, enquanto o cálcio (Ca^{2+}) e o magnésio (Mg^{2+}) foram analisados por espectrometria de absorção atômica (EAA). Com base nos valores obtidos dos cátions solúveis, procedeu-se ao cálculo da Razão de Adsorção de Sódio (RAS) do extrato de saturação do solo (Eq. 1).

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\left(\frac{\sqrt{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}}{2} \right)^{0,5}}$$

Eq. 1

Em que:

RAS = Razão de adsorção de sódio, $(\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3})^{0,5}$;

Na^+ = concentração de sódio, $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$;

Ca^{+2} = concentração de cálcio, $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$;

e Mg^{+2} = concentração de magnésio, $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

- Cátions Trocáveis

A determinação dos teores de sódio (Na^+) e potássio (K^+) foi realizada utilizando-se 5 cm^3 de terra fina seca ao ar (TFSA) acondicionados em um erlenmeyer, aos quais foi adicionada a solução extratora de *Mehlich 1*. A mistura foi agitada em mesa agitadora circular e deixada

em repouso por 24 horas para decantação. No dia seguinte, foi retirada uma alíquota de 10 mL do extrato para leitura em fotômetro de chama. Para a determinação de cálcio (Ca^{2+}) e da soma cálcio + magnésio ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), empregou-se a solução extratora de KCl 1 mol L^{-1} , na proporção de 5 cm^3 de solo para extração. Em seguida, foi coletada uma alíquota de 10 mL para titulação com EDTA, conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017).

A porcentagem de sódio trocável (PST) foi calculada pela Eq. 2:

$$\text{PST} = \frac{\text{Na}^+}{T} \times 100$$

Eq. 2

Em que:

PST = percentual de sódio trocável, %;

T = capacidade de troca catiônica, $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

A capacidade de troca de cátions (CTC) do solo foi determinada pela soma dos teores dos cátions trocáveis cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+) e potássio (K^+), juntamente com a acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$).

2.2.3 Análises das propriedades físicas do solo

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta. Inicialmente, 20 g de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) foram tratadas com 250 mL de água destilada e 10 mL de hexametáfosfato de sódio como agente dispersante químico. A suspensão foi submetida à agitação mecânica contínua em agitador do tipo Wagner a 50 rpm, por período de 16 horas para garantir a completa dispersão das partículas. Posteriormente, a fração areia ($2 - 0,05 \text{ mm}$) foi isolada por tamisação. A quantificação da argila ($< 0,002 \text{ mm}$) deu-se pelo princípio de sedimentação, utilizando-se o método da pipeta para coleta de alíquotas em tempos calculados conforme a lei de Stokes. Por fim, o teor de silte ($0,05 - 0,002 \text{ mm}$) foi calculado por diferença em relação à massa total.

2.2.4 Análises estatísticas dos dados

Os dados foram submetidos a testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e dois testes de homogeneidade (Bartlett e Levene), após verificar a normalidade e homogeneidade das variâncias, foi tomada decisão para teste paramétrico como análise de variância e teste Tukey e regressão ou teste paramétrico Kruskal Wallis e um teste de comparações múltiplas de Student

a 5% com ajuste none e Bonferroni no software R com pacote agricolae (Mendiburu, 2021). Também foi utilizado o pacote Hmisc (Harrell Jr., 2020), para realizar o teste de correlação (teste t, $p < 0,01$) e para o componente principal, utilizou-se a função prcomp do software R e o pacote factoextra (Kassambara; Mundt, 2020).

2.3 RESULTADOS

Os resultados obtidos da granulometria apresentaram diferenças estatisticamente significativas de ($p \leq 0,05$), conforme a Tabela 1.

A determinação da textura do solo, identificou a classe franco-argilosa-arenosa. A análise dos atributos físicos na profundidade de 0 – 10 cm, revelou diferenças texturais significativas entre os lotes estudados (Tabela 1). O lote 77 apresentou teores de argila significativamente superior de (26,27 – 31,80 %) nos pontos de P3 e P2, quando comparado com o lote 78 (15,07 – 22,03 %), enquanto a areia total mostrou comportamento inverso, com valores mais elevados no Lote 78 nas áreas amostrais (P4 e P5) com teores de (68,23 – 76,97 %).

Embora o lote 78 apresente teor de argila significativamente inferior ao do lote 77, os teores de silte no lote 77, nos pontos P1 e P2, apresentaram valores intermediários, variando entre 9,87 e 12,00 %. Já no lote 78, os valores de silte oscilaram entre 7,60 e 9,70 % nos pontos P4 e P5.

Tabela 1. Atributos físicos do solo na profundidade de 0 – 10 cm em diferentes pontos amostrais dos Lotes 77 e 78 no DIBA.

Atributos	Lote 77 (0 - 10 cm)			Lote 78 (0 - 10 cm)			CV (%)*
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
Areia Fina (%)	43,27 d	40,80 e	44,67 d	48,60 c	58,37 a	55,10 b	13,57
Areia Grossa (%)	16,00 d	17,47 cd	17,37cd	19,63 ab	18,60 bc	21,07 a	9,93
Areia Total (%)	59,27 e	58,30 f	62,00 d	68,23 c	76,97 a	76,13 b	11,68
Argila (%)	28,73 b	31,80 a	26,27 c	22,03 d	15,50 e	15,07 e	28,08
Silte (%)	12,00 a	9,87 b	11,67 a	9,70 b	7,60 c	8,80 b	16,22

Nota: Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV: Coeficiente de variação. * Valor do CV refere-se aos seis pontos de coleta.

Os dados referentes a textura do solo na profundidade de 10 – 20 cm analisados em conjunto com o histórico de manejo dos lotes, revelaram diferenças significativas entre os pontos amostrais (Tabela 2). No lote 77 verificou-se o teor de areia total menor nas áreas amostrais (P3 e P2) com os seguintes valores (50,67 – 56,90 %) quando comparado com o lote

78 que obteve valores de 75,10 % (P6). Quanto ao quantitativo de argila da referida profundidade, foi notório que o maior teor apresentou no P2 de 34,70 %. Observou-se que o teor de silte apresentou alta variabilidade (CV = 52,81%), refletindo um comportamento heterogêneo entre as unidades amostrais. Essa dispersão fica evidente ao comparar os valores extremos de 24,27% no P3 com 7,33% no P5.

Tabela 2. Atributos físicos do solo na profundidade de 10 – 20 cm em diferentes pontos amostrais dos Lotes 77 e 78 no DIBA.

Atributo	Lote 77 (10 - 20 cm)			Lote 78 (10 - 20 cm)			CV (%)*
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
Areia Fina (%)	40,20 c	42,80 c	33,33 d	50,13 b	47,87 b	55,37 a	16,69
Areia Grossa (%)	16,70 ab	14,10 b	17,37 ab	21,30 a	15,70 b	19,67 ab	17,2
Areia Total (%)	56,93 d	56,90d	50,67 e	71,47 b	63,57 c	75,10 a	14,16
Argila (%)	28,30 b	34,70 a	25,03 c	20,23 d	29,10 b	16,30 e	24,51
Teor de Silte (%)	14,77 b	8,40 c	24,27 a	8,30 c	7,33 c	8,60 c	52,81

Nota: Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV: Coeficiente de variação. * Valor do CV refere-se aos seis pontos de coleta.

Para agregar com os dados da física, foi realizado as análises químicas da camada superficial (0 – 10 cm), que revelou dois cenários distintos de degradação nos lotes estudados (Tabela 3). No Lote 77, os elevados teores de sódio trocável como visto na PST de 14,27 – 28,81%, RAS crítica com valores de 70,70 – 111,90 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e condutividade elétrica entre 1,41 – 1,64 dS m^{-1} , diante dos resultados observa-se que o referido lote apresenta um processo de salinização, inerente tanto as condições naturais e antrópicas. No entanto, observa-se que no P1 é visto uma variabilidade espacial em relação as condições químicas, significativamente melhores que os demais pontos.

No lote 77 (0 – 10 cm), no P3 evidencia a fertilidade com teor elevado de fósforo até 167,13 mg/kg. O pH no lote 78 (0 – 10 cm) nos pontos de P4 ao P6 apresentou valores consideráveis adequados de (7,49 – 7,59), nos mesmos pontos, em análise constatou-se indicadores preocupantes para a saúde do solo na camada superficial apresentando uma baixa CTC com teores de 22,43 – 31,77 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Observa uma diferença nos lotes 77 e 78, referente a distribuição do (K), nos pontos P2 ao P3 obteve teores variáveis de 22,93 – 38,50 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, quando comparado com os P4 ao P6 com valores de 5,33 – 7,73 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Tabela 3. Atributos químicos do solo na profundidade de 0 – 10 cm em diferentes pontos amostrais dos Lotes 77 e 78 no DIBA.

Atributo	Lote 77 (0 - 10 cm)			Lote 78 (0 - 10 cm)			CV (%)
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
pH	6,61 e	7,59 a	7,23 d	7,49 c	7,59 a	7,53 b	4,89
CEes (dS m⁻¹)	0,70 d	1,64 a	1,41 b	0,62 e	0,96 c	0,34 f	49,21
Na (cmol_c dm⁻³)	2,47 d	17,63 a	9,57 b	6,87 c	3,30 d	1,87 d	81,47
K (cmol_c dm⁻³)	0,79 c	2,29 b	3,85 a	0,54 f	0,66 e	0,77 d	84,06
P (mg/kg)	3,93 c	100,03 c	167,13 a	29,47 d	117,03 bc	129,33 b	64,83
Ca (cmol_c dm⁻³)	21,87 a	17,67 b	17,53 b	18,63 ab	13,17 c	12,10 c	21,07
Mg (cmol_c dm⁻³)	1,15 ab	3,00 a	1,31 ab	0,89 ab	1,21 ab	0,76 b	73,07
N (g/kg)	1,29 bc	1,31 ab	1,50 a	1,09 cd	1,00 d	1,32 ab	14,44
CTC (cmol_c dm⁻³)	33,40 c	61,20 b	66,90 a	31,77 c	24,23 d	22,43 d	45,14
PST (%)	7,37 d	28,81 a	14,27 c	21,65 b	13,70 c	8,21 d	49,68
RAS (cmol_c dm⁻³)	21,80 f	111,90 a	70,70 b	60,80 c	40,20 d	27,70 e	56,54

Nota: CEes – Condutividade Elétrica do extrato de saturação; pH – Potencial Hidrogeniônico; Na⁺ – Sódio; K⁺ – Potássio; K – Potássio; P – Fósforo; Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ - Magnésio; N – Nitrogênio; CTC – Capacidade de troca catiônica; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS - Razão de Adsorção de Sódio; CV- Coeficiente de variância. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Ao analisar a camada subsuperficial de 10 – 20 cm, com base nos resultados apresentados na Tabela 4, observou-se, no lote 77, que os atributos químicos do solo indicam concentração de sais migrados para essa profundidade. No ponto P2, foram registrados valores de CEes = 3,14 dS m⁻¹, Na⁺ = 31,13 cmol_c dm⁻³ e PST = 47,15%, evidenciando condições químicas críticas abaixo da superfície. Com estes resultados observa-se que o lote 78, está passando por desequilíbrio químico, reafirmando a variabilidade nos macronutrientes (P e K) com CV % alto de (64,83 e 84,23 %), podendo ser que o P do lote 77 seja responsável pela variabilidade. Os teores de Na⁺ no ponto P5 observa-se valores de 13,13 cmol_c dm⁻³, elevando uma preocupação sobre a área atualmente em atividade para o desenvolvimento da agricultura.

Tabela 4. Atributos químicos do solo na profundidade de 10 – 20 cm em diferentes pontos amostrais dos Lotes 77 e 78 no DIBA.

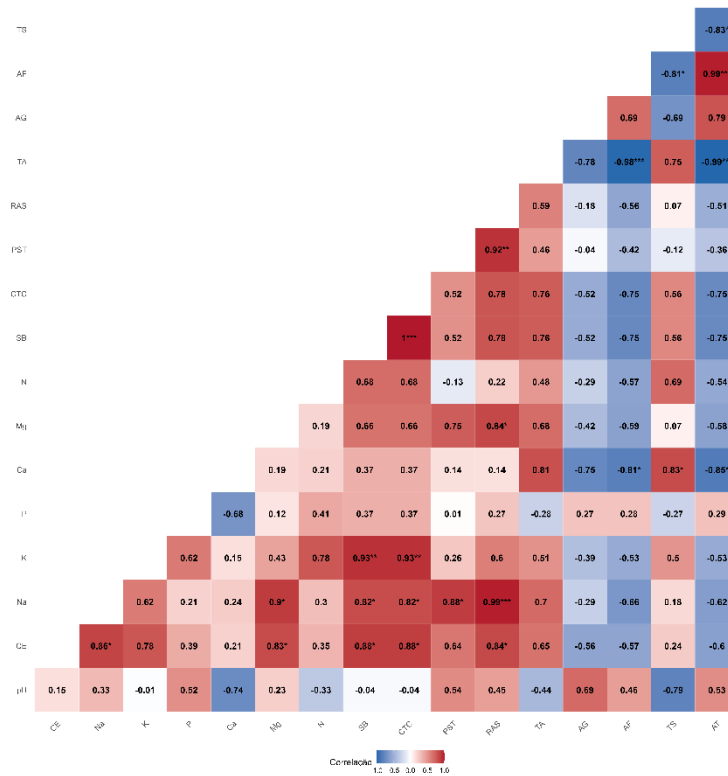
Atributo	Lote 77 (10 – 20 cm)			Lote 78 (10 – 20 cm)			CV (%)
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
pH	7,69 a	7,04 d	7,02 e	7,38 c	7,43 b	7,01 f	3,64
CEes (dS/m)	0,80 d	3,14 a	0,93 c	0,69 e	1,22 b	0,43 f	76,89
Na⁺ (cmol_c dm⁻³)	9,27 c	31,13 a	10,30 c	6,30 d	13,13 b	2,13 e	78,63
K⁺ (cmol_c dm⁻³)	0,42 f	1,24 b	3,83 a	0,46 e	0,49 d	0,54 c	108,37
P (mg/kg)	1,17 c	57,53 b	246,17 a	15,83 c	28,37 bc	55,17 b	126,66
Ca²⁺ (cmol_c dm⁻³)	21,60 a	21,20 a	19,60 a	14,83 b	20,37 a	9,40 c	25,81
Mg²⁺ (cmol_c dm⁻³)	2,39 ns	1,22 ns	0,79 ns	1,21 ns	1,53 ns	2,99 ns	70,18
N (g/kg)	0,95 b	0,98 b	1,09 a	0,64 c	0,69 c	0,98 b	19,33
CTC (cmol_c dm⁻³)	37,43 c	65,93 b	69,03 a	26,97 d	39,93 c	19,90 e	43,91
PST (%)	24,73 c	47,15 a	14,97 d	23,42 c	32,88 b	10,85 e	47,91
RAS (cmol_c dm⁻³)	67,50 c	41,90 e	82,70 a	63,80 d	71,00 b	37,00 f	27,37

Nota: CEes – Condutividade Elétrica do extrato de saturação; pH – Potencial Hidrogeniônico; Na⁺ – Sódio; K⁺ – Potássio; K – Potássio; P – Fósforo; Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ - Magnésio; N – Nitrogênio; CTC – Capacidade de troca catiônica; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS - Razão de Adsorção de Sódio; CV- Coeficiente de variância. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Considerando-se a Matriz de Correlação de Pearson representada pelo heatmap, onde correlações positivas indicam que o aumento de uma variável tende a acompanhar o aumento da outra, a matriz retrata padrões diretamente associados não apenas à degradação química, mas também aos impactos físicos decorrentes dos problemas associados ao excesso de sais nos lotes estudadas, nas profundidades de 0 – 10 e 10 – 20 cm (Figura 2). Na camada superficial de 0 – 10 cm (Figura 2 A) observam-se correlações fortes e positivas entre os atributos químicos CE, Na⁺, PST e RAS, não representam apenas salinização química, mas um processo amplo de perda de saúde do solo. O fósforo (P) correlacionou negativamente com o teor de argila.

As correlações positivas na camada de 10 – 20 cm (Figura 2 B), constatou que o Na⁺ e CEes apresentam uma elevada correlação entre si, evidenciando processos de salinização atuantes na superfície e subsuperfície do solo. Já o Na⁺ e Mg²⁺, revelam a competição deste cátion monovalente com cátions bivalentes nos sítios de troca, ocasionando relação negativa entre esses atributos, fenômeno que afeta diretamente a estabilidade estrutural.

(A)



(B)

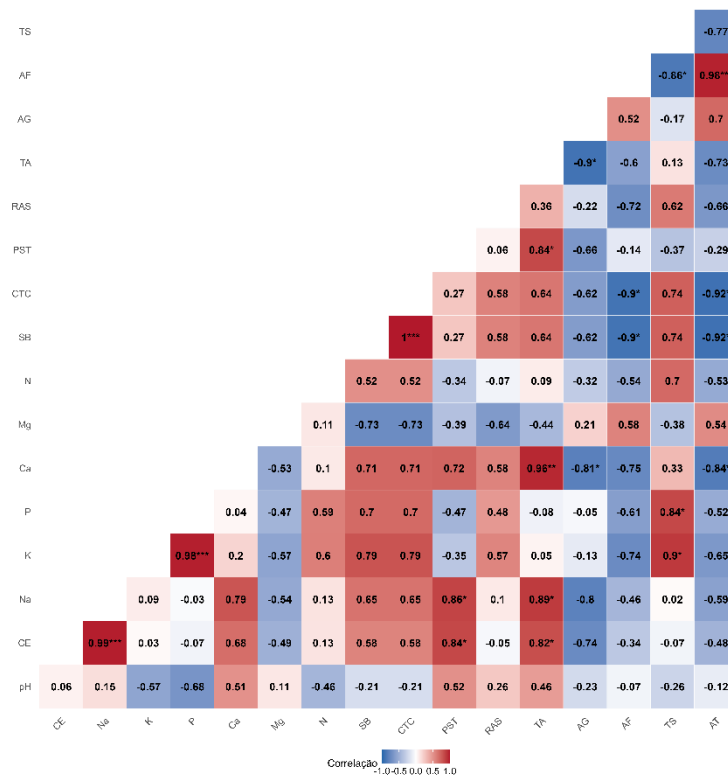


Figura 2. Matriz de Correlação de Pearson representada pelo heatmap dos atributos físicos - químicos do solo, TS – Teor de Silte; AF – Areia Fina; AG – Areia Grossa; TA – Teor de Argila; CEes – Condutividade Elétrica do extrato de saturação; pH – Potencial Hidrogeniônico; Na⁺ – Sódio; K⁺ – Potássio; K – Potássio; P – Fósforo; Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ - Magnésio; N – Nitrogênio; CTC – Capacidade de troca catiônica; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS

- Razão de Adsorção de Sódio, na profundidade de 0 – 10 cm (A); e 10 – 20 cm (B) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo-Açu – DIBA no Rio Grande do Norte.

No que se refere aos atributos físicos do solo, percebeu-se a segregação espacial em relação às áreas estudadas em ambas as profundidades (Figura 3). Observa-se, na figura 3 A, que na camada de 0 – 10 cm, a CP1 equivaleu a 84,3% e a CP2 a 9,2% totalizando 93,5%, indicando que as diferenças texturais são o fator dominante na distinção entre as áreas, trazendo o lote 77 com maior concentração de teores de argila e silte, quando corroboram com o lote 78. Ao investigar a subsuperfície na camada de 10 – 20 cm, constata-se maior homogeneidade interna dentro de cada lote, com o CP1 de 64,4% e a CP2 a 28,6% explicando 93% da variância total, indicando que o gradiente argila-areia se torna ainda mais preponderante com a profundidade (Figura 3 B).

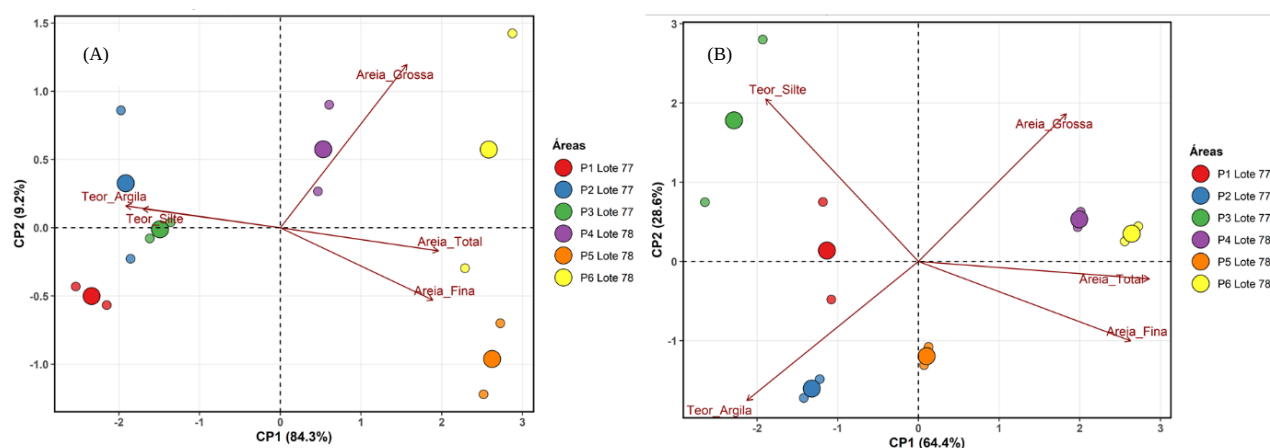


Figura 3. Análise de Componentes Principais (ACP) referente aos dados da física do solo nas profundidades de 0 – 10 cm (A); E 10 – 20 cm (B) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo Açu – DIBA, no Rio Grande do Norte, Brasil.

As análises de componentes principais (ACP) dos atributos químicos evidenciaram (Figura 4), para a camada de 0 – 10 cm, valores de CP1 = 48,2% e CP2 = 25,7%, explicando conjuntamente 73,9% (Figura 4 A). Na camada superficial (0 – 10 cm), verificou-se maior contribuição dos atributos químicos relacionados ao processo de salinização no lote 77, especialmente Na^+ , CEEs, PST e RAS, os quais apresentaram forte associação com a CP1, além de serem indicadores da degradação da qualidade do solo. Por outro lado, no lote 78, a distribuição dos atributos químicos mostrou-se mais dispersa, refletindo variabilidade espacial intrínseca e menos concentrada em indicadores de salinidade.

Na camada de 10 – 20 cm, a CP1 explicou 40,8% da variabilidade e a CP2 28,0%, totalizando 68,8% da variância dos dados. Nessa zona subsuperficial, observa-se distribuição mais heterogênea dos atributos químicos; embora (Na^+ e CEes) permaneçam como variáveis determinantes na composição da CP1, obtendo redução na variabilidade associada a esses atributos (Figura 4 B).

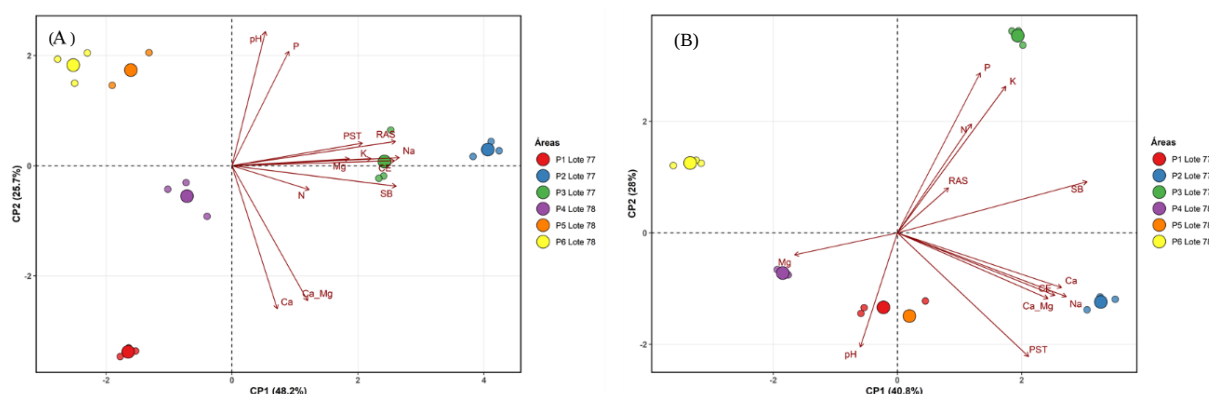


Figura 4. Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos químicos do solo CEes – Condutividade Elétrica do extrato de saturação; pH – Potencial Hidrogeniônico; Na^+ – Sódio; K^+ – Potássio; P – Fósforo; Ca^{2+} - Cálcio; Mg^{2+} - Magnésio; N – Nitrogênio; CTC – Capacidade de troca catiônica; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS - Razão de Adsorção de Sódio nas profundidades de 0 – 10 cm (A); e 10 – 20 cm (B) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo Açu – DIBA, no Rio Grande do Norte, Brasil.

2. 4 DISCUSSÃO

Levando em consideração os resultados obtidos nas tabelas de ANOVA (física e química), observa que a saúde do solo traz consigo uma discussão pertinente em relação à adequação do manejo para o desenvolvimento da agricultura, atendendo os interesses econômicos, sociais e ambientais. Estudos confirmam que solos agrícolas apresentam variações significativas nos teores de argila, areia e silte entre diferentes áreas, especialmente na camada superficial de (0 – 10 cm), mesmo em áreas pequenas. Os problemas físicos em solos do semiárido mostram que a textura arenosa não garante a ausência dos problemas físicos (Saba; Karaca, 2023).

A variabilidade dos teores de areia, argila e silte na profundidade de (10 – 20 cm) é fortemente influenciada tanto por fatores intrínsecos do solo, quanto pelo histórico de manejo das áreas em solos agrícolas (Mendes *et al.*, 2022; Tomaz *et al.*, 2022), nota-se uma

variabilidade nos teores de areia, argila e silte, sendo comum em solos agrícolas, mesmo em pequenas escalas espaciais.

Os atributos do solo sofrem alterações recorrentes em decorrência do manejo e do uso, o que pode afetar negativamente a capacidade produtiva das áreas. Os teores intermediários de silte observados em diferentes pontos dos lotes também são relatados em estudos que mostram variações naturais de textura em função do material de origem e processos de intemperismo (Lopes *et al.*, 2022; Mendes *et al.*, 2022).

A constatação de baixos teores de argila, tanto na camada superficial quanto na subsuperficial, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2, pode ser explicada pela mineralogia e pelo histórico de uso da área. Considerando-se a predominância de argilas do tipo 2:1, de elevada atividade, essas apresentam características marcantes de expansividade e contração, as quais influenciam a dinâmica estrutural do solo e podem favorecer processos de desagregação, redistribuição e perda relativa da fração argila ao longo do perfil.

Os autores (Alnmr; Ray, 2024; Fernández-Ugalde *et al.*, 2013; Lopes *et al.*, 2022), explicam que a mineralogia da fração argila é fundamental para entender o comportamento físico do solo, então argilas do tipo 2:1 (esmectita, illita) são conhecidas por sua alta atividade, expansividade e influência na estabilidade de agregados e na compactação, nesse contexto os principais problemas que podem ocorrer em áreas agrícolas com solos de argila 2:1, é a drenagem ineficiente no local, compactação, dificuldade no preparo do solo, quando úmidos, são plásticos e pegajosos e secos, tornam-se extremamente duros

Os teores elevados de PST e RAS encontrados confirmam que é um solo com problemas de salinidade e sodicidade. Outros trabalhos discutem que, altos teores de PST, RAS e CEes em torno de 1 – 2,5 dS/m são típicos de solo salino-sódico em regiões áridas e semiáridas, considerando o perfil do solo, nessa condição Na^+ e CEes altos, demonstram excesso de sódio que promove a dispersão de argilas e obstrução de poros, redução da infiltração de água, desequilíbrio na disponibilidade de nutrientes o crescimento radicular das plantas e a redução da produtividade agrícola., afetando negativamente a saúde do solo (Mendieta-Mendoza *et al.*, 2023; Tian; Kong, 2025).

Na tabela 3 expõem valores de P (167,13 mg/kg) e K (3,83 cmolc/dm³), essa heterogeneidade pode estar associada aos efeitos da salinidade e da sodicidade, que influenciam a dinâmica dos cátions trocáveis, favorecem desequilíbrios nutricionais e contribuem para a degradação física e química do solo na camada superficial. É nítido que em sistemas degradados por manejo intensivo, há relatos tanto de empobrecimento de P móvel, como elevados teores de P disponível em áreas adubadas acima da necessidade, ambos caracterizando formas

distintas de degradação da fertilidade e da qualidade ambiental. (Hailu, 2021; Wang *et al.*, 2022).

A degradação do solo ao longo do perfil indica baixa qualidade ou manejo inadequado, associado a processos de salinização e sodificação, interferindo diretamente à saúde do solo. Estudos semelhantes foram observados em agroecossistemas do Semiárido brasileiro e de outras regiões semiáridas, nos quais as frações texturais argila e silte constituem os eixos dominantes da variabilidade espacial e da diferenciação entre usos e manejos do solo (Mendes *et al.*, 2022).

Na matriz de correlação de Pearson obtida para os lotes agrícolas no semiárido, os padrões observados indicam forte acoplamento entre degradação química por sais e impactos físicos na estrutura do solo nas camadas de 0 – 10 e 10 – 20 cm. O aumento simultâneo da condutividade elétrica e do sódio trocável está associado a maior risco de perda da qualidade do solo (Lopes *et al.*, 2022; Pessoa *et al.*, 2022). Estudos discutem que, o excesso de sais, em especial de Na^+ , compromete simultaneamente a fertilidade química, a qualidade física, saúde do solo e do fluxo de água, configurando o quadro típico de degradação em áreas agrícolas do semiárido (Pessoa *et al.*, 2022).

Considerando os resultados das ACP representadas pelas figuras 4 e 5 deste trabalho e corroborando com outros estudos desenvolvidos em solos agrícolas de clima semiárido, mostraram que a ACP tende a concentrar grande parte da variância nas duas primeiras componentes (Lopes *et al.*, 2022). De forma semelhante, em planícies aluviais de clima semiárido, a ACP aplicada a um grande conjunto de propriedades selecionou argila e areia como indicadores-chave, tanto na camada superficial quanto na subsuperfície, reforçando que a textura controla a variabilidade vertical e a interfere diretamente na qualidade do solo (Lalitha *et al.*, 2024).

2.5 CONCLUSÃO

O lote 77 apresenta um processo de degradação salino/sódico nítido que exige um monitoramento integrado do perfil do solo. O lote 78 passa por uma degradação de forma silenciosa e estratificada que exige monitoramento integrado.

Por meio da análise de componentes principais, verificou-se que indicadores de salinidade (Na^+ , PST, RAS e CEes) revelam o cenário de degradação química e estrutural.

Sugere-se, para estudos futuros, a realização de monitoramento do tipo de argila e da composição mineralógica em solos salino-sódicos, a fim de aprofundar a compreensão dos processos físico-químicos que influenciam sua dinâmica e qualidade.

Os achados do presente trabalho fornecem bases técnicas para orientar práticas de manejo visando à recuperação de solos degradados no semiárido. Recomenda-se o monitoramento contínuo da salinidade e da sodicidade ao longo do perfil, a adoção de culturas tolerantes, a aplicação de corretivos como gesso agrícola para reduzir o PST, e o incremento de matéria orgânica para melhorar a CTC e o uso de drenagem e manejo da irrigação. Tais medidas são essenciais para reverter o processo de degradação e garantir a sustentabilidade agrícola na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALNMR, A.; RAY, R. Investigating the Impact of Varying Sand Content on the Physical Characteristics of Expansive Clay Soils from Syria. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 42, n. 4, p. 2675–2691, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10706-023-02698-w>. Acesso em: 16 jan. 2026.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078>. Acesso em: 14 maio 2025.

DIAS, N. da S.; BLANCO, F. F.; SOUZA, E. R. de; FERREIRA, J. F. da S.; SOUSA NETO, O. N. de; QUEIROZ, Í. S. R. de. Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade. In: MANEJO DA SALINIDADE NA AGRICULTURA: ESTUDOS BÁSICOS E APLICADOS. 2. ed. : Expressão Gráfica, 2017. p. 152–162.

DIBA. DIBA – Distrito de Irrigação do Baixo Açu. In: 2024. Disponível em: <https://diba.org.br/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

EMBRAPA. **Visão: o futuro da agricultura brasileira**. : Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao/o-futuro-da-agricultura-brasileira>. Acesso em: 23 nov. 2025.

FAO. Campaign Report. Caring for soils, measure, monitor, manage. In: GLOBAL SOIL PARTNERSHIP (GSP), 2025, Rome, Italy. **Anais [...]**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2025. p. 51. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd5378en>. Acesso em: 23 nov. 2025.

FAO. **Mapping of salt-affected soils – Technical manual**. : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/ca9215en>. Acesso em: 23 nov. 2025.

FERNÁNDEZ-UGALDE, O.; BARRÉ, P.; HUBERT, F.; VIRTO, I.; GIRARDIN, C.; FERRAGE, E.; CANER, L.; CHENU, C. Clay mineralogy differs qualitatively in aggregate-size classes: clay-mineral-based evidence for aggregate hierarchy in temperate soils. **European Journal of Soil Science**, v. 64, n. 4, p. 410–422, 2013. Disponível em: <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ejss.12046>. Acesso em: 16 jan. 2026.

FREIRE, M. B. G. S.; PESSOA, L. G. M.; GHEYI, H. R. Métodos de análises químicas para solos afetados por sais. In: MANEJO DA SALINIDADE NA AGRICULTURA: ESTUDOS BÁSICOS E APLICADOS. : Expressão Gráfica, 2016. p. 123–148.

HAILU, B. Impacts of Soil Salinity/Sodicity on Soil-Water Relations and Plant Growth in Dry Land Areas: A Review. **Journal of Natural Sciences Research**, v. 12, 2021. Disponível em: <https://iiste.org/Journals/index.php/JNSR/article/view/55656>. Acesso em: 20 jan. 2026.

HARRELL JR., F. E. **Hmisc: Harrell Diversos**. , 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/Hmisc/index.html>. Acesso em: 9 jul. 2025.

JUSTO, J. F. A.; BARRETO, A. C.; SILVA, J. F. D.; FERREIRA NETO, M.; SÁ, F. V. D. S.; OLIVEIRA, R. P. D. Identification and diagnosis of salt-affected soils in the Baixo-Açu irrigated perimeter, RN, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 7, p. 480–484, 2021. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662021000700480&tlng=en. Acesso em: 5 fev. 2026.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. : CRAN: Contributed Packages.The R Foundation, , 2020. Disponível em: <https://cloud.r-project.org/web/packages/factoextra/factoextra.pdf>). Acesso em: 9 jul. 2025.

LALITHA, M.; KALAISELVI, B.; DHARUMARAJAN, S.; ANIL KUMAR, K. S.; RAMESH KUMAR, S. C.; SRINIVASAN, R.; RAMAMURTHY, V.; HEGDE, R. Determining soil quality indicators for alluvial plains in the semi-arid tropics. **Soil Use and Management**, v. 40, n. 1, p. e12929, 2024. Disponível em: <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/sum.12929>. Acesso em: 20 jan. 2026.

LIMA, R. da C. C.; CAVALCANTE, A. de M. B.; MARIN, A. M. P. **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. : Insa, 2011.

LOPES, T. C. de S.; PORTELA, J. C.; BATISTA, R. O.; BANDEIRA, D. J. da C.; LEITE, I. de O.; RAMALHO, L. B.; GONDIM, J. E. F.; COSTA, J. D. da; GURGEL, M. T.; SOUZA, C. M. M.; SILVA, E. F. da; SOUZA, E. R. de; OLIVEIRA, F. H. T. de; MIRANDA, N. de O.; SÁ, F. V. da S. Clay Fraction Mineralogy and Structural Soil Attributes of Two Soil Classes under the Semi-Arid Climate of Brazil. **Land**, v. 11, n. 12, p. 2192, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/12/2192>. Acesso em: 16 jan. 2026.

MENDES, K. da R.; PORTELA, J. C.; GONDIM, J. E. F.; RIBEIRO, M. A.; MEDEIROS, J. F. de; QUEIROZ, G. C. M. de. Physical, chemical and structural attributes of soil in agroecosystems in the Brazilian Semiarid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, p. e20207630, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/Dw49dRVPxyQ3F8TWSypkWhH/?lang=en>. Acesso em: 16 jan. 2026.

MENDIBURU, F. de. **Agricolae: Procedimentos Estatísticos para Pesquisa Agrícola**. , 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/index.html>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MENDIETA-MENDOZA, A.; RENTERIA-VILLALOBOS, M.; RANDALL, H.; RUÍZ-GÓMEZ, S.; RÍOS-LÓPEZ, M. Chemical degradation of agricultural soil under arid conditions by the accumulation of potentially toxic elements and salts. **Geoderma Regional**, v. 35, p.

e00736, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352009423001323>. Acesso em: 20 jan. 2026.

PAL, S. C.; CHATTERJEE, U.; CHAKRABORTTY, R.; ROY, P.; CHOWDHURI, I.; SAHA, A.; TOWFIQUL ISLAM, A. R. Md.; ALAM, E.; ISLAM, M. K. Anthropogenic drivers induced desertification under changing climate: Issues, policy interventions, and the way forward. **Progress in Disaster Science**, v. 20, p. 100303, 2023. Disponível em: Acesso em: 23 nov. 2025.

PESSOA, L. G. M.; FREIRE, M. B. G. D. S.; GREEN, C. H. M.; MIRANDA, M. F. A.; FILHO, J. C. D. A.; PESSOA, W. R. L. S. Assessment of soil salinity status under different land-use conditions in the semiarid region of Northeastern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 141, p. 109139, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X22006112>. Acesso em: 20 jan. 2026.

QIAO, L.; WANG, X.; SMITH, P.; FAN, J.; LU, Y.; EMMETT, B.; LI, R.; DORLING, S.; CHEN, H.; LIU, S.; BENTON, T. G.; WANG, Y.; MA, Y.; JIANG, R.; ZHANG, F.; PIAO, S.; MÜLLER, C.; YANG, H.; HAO, Y.; LI, W.; FAN, M. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 6, p. 574–580, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01376-8>. Acesso em: 20 nov. 2025.

RICHARDS, L. A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. **Soil Science**, v. 78, n. 2, p. 154, 1954. Disponível em: Acesso em: 8 jul. 2025.

SABA, M.; KARACA, U. Ç. **Exploring the Physical, Chemical, and Biological Properties of Soils from Different Regions Classified into Different Textural Classes**. : Research Square, 2023. Disponível em: <https://www.researchsquare.com/article/rs-3561076/v1>. Acesso em: 15 jan. 2026.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de.; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2025.

SILVA, J. F. D.; FERREIRA NETO, M.; PORTELA, J. C.; GONDIM, J. E. F.; MELO, S. B. D.; FREITAS, D. F. D.; MEDEIROS, J. F. D.; DIAS, N. D. S.; PEIXOTO, T. D. C.; SÁ, F. V. D. S. Soil Classification Based on Local and Scientific Knowledge in an Irrigated District in the Semi-Arid Region of Brazil. **Land**, v. 13, n. 10, p. 1559, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/10/1559>. Acesso em: 2 fev. 2026.

SUDENE, S. D. D. D. N. **Delimitação do Semiárido - Relatório Final**. Brasília, DF: SUDENE, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiaridorelatorionv.pdf>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solos**. : Embrapa, 2017.

TEZTESLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. : Feagri - Faculdade De Engenharia Agrícola, 2017.

TIAN, Y.; KONG, L. Characterizing SalineSodic Soils in a Semi-Arid Floodplain: Implications of Soil Texture on Salinity and Alkalinity in Tuoketuo County, Inner Mongolia. **Theoretical and Natural Science**, v. 119, n. 1, p. 148–158, 2025. Disponível em: <https://www.ewadirect.com/proceedings/tns/article/view/24579>. Acesso em: 20 jan. 2026.

TOMAZ, A.; MARTINS, I.; CATARINO, A.; MOURINHA, C.; DÔRES, J.; FABIÃO, M.; BOTETA, L.; COUTINHO, J.; PATANITA, M.; PALMA, P. Insights into the Spatial and Temporal Variability of Soil Attributes in Irrigated Farm Fields and Correlations with Management Practices: A Multivariate Statistical Approach. **Water**, v. 14, n. 20, p. 3216, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/20/3216>. Acesso em: 16 jan. 2026.

WANG, Y.; JI, Y.; MA, J.; ELENA, M.; ASSIYA, A.; DING, R.; JIA, Z.; SIDDIQUE, K. H. M.; LIU, E.; HE, J.; ZHANG, W.; ZHANG, P. Evaluate the impacts of different straw returning rates on soil quality and field environmental sustainability of film mulching or non-mulching farmland in semiarid region. **Environmental Research**, v. 285, p. 122483, 2025. Disponível em: Acesso em: 23 nov. 2025.

WANG, L.; JIAO, W.; MACBEAN, N.; RULLI, M. C.; MANZONI, S.; VICO, G.; D'ODORICO, P. Dryland productivity under a changing climate. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 11, p. 981–994, 2022. Disponível em: Acesso em: 23 nov. 2025.

3 ARTIGO II: ESTABILIDADE FÍSICA E FRAÇÕES DE CARBONO: SUAS INTER-RELAÇÕES COM A DEGRADAÇÃO ESTRUTURAL EM SOLO COM PROBLEMAS DE SALINIDADE EM PERÍMETRO IRRIGADO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

A agricultura irrigada no semiárido brasileiro enfrenta desafios de sustentabilidade devido à salinização e sodificação dos solos. Contudo os solos enfrentam um processo de degradação física, com agregados instáveis, necessitando de matéria orgânica e manejo adequado para o sistema. Este estudo objetivou investigar as inter-relações entre a estabilidade física do solo, avaliada pela distribuição dos agregados, estabilidade de agregados em água e grau de dispersão e as frações do carbono orgânico do solo em um ambiente salino-sódico localizado em um perímetro irrigado do semiárido brasileiro. Foram selecionados dois lotes com histórico de degradação: Lote 77 (área desativada) e Lote 78 (cultivo de bananeira com sinais de salinização). Amostras compostas de solo com estrutura preservada foram coletadas nas profundidades de 0 – 10 cm e 10 – 20 cm no Distrito Irrigado do Baixo Açu – DIBA localizado no Rio grande do Norte, Brasil. Analisaram-se atributos químicos (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , PST, RAS), físicos (agregados estáveis em água, DMP, DMG, ADA, GF) e biológicos (COT, CL, COP, CBM). A análise estatística incluiu Análise de Componentes Principais (ACP) e matriz de correlação de Pearson. A ACP revelou clara separação entre os lotes, mostrou que o Lote 77 está fortemente associado a indicadores de degradação (Na^+ , PST, RAS e ADA). Já o lote 78 destaca-se pela correlação positiva com as variáveis de estabilização de agregação do solo, tais como (CBM, COT, DMP e DMG). Correlações negativas foram observadas entre as variáveis (Na^+ , RAS) e indicadores de agregação (DMP, DMG) e atividade biológica (CBM). Mesmo na presença de teores expressivos de carbono orgânico, a estabilidade dos agregados foi severamente comprometida, evidenciando o efeito dispersivo dominante do Na^+ trocável. O lote 77 apresentou valores absolutos mais elevados para alguns indicadores de sodicidade, no entanto a qualidade do solo é semelhante nos respectivos lotes. A ADA apresentou diferença significativa entre os lotes, evidenciando sensibilidade desse atributo às condições do solo. A estabilidade física do solo em ambiente salino-sódico é predominantemente governada pelo teor de Na^+ trocável. Portanto, a recuperação e a manutenção da saúde do solo demandam intervenções integradas que combinem a redução do Na^+ trocável, o incremento do carbono orgânico estável e a implantação de práticas de manejo conservacionistas, utilizando de práticas tradicionais como, plantio direto, a adubação orgânica, o uso de coberturas vegetais e o manejo adequado da irrigação.

Palavras – chave: Degradação do solo. Agricultura. Matéria orgânica. Saúde do solo.

PAPER 2: PHYSICAL STABILITY AND CARBON FRACTIONS: THEIR INTERRELATIONSHIPS WITH STRUCTURAL DEGRADATION IN SALINITY-AFFECTED SOIL IN AN IRRIGATED AREA IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION

ABSTRACT

Irrigated agriculture in the Brazilian semi-arid region faces sustainability challenges due to soil salinization and sodification. However, the soils are undergoing a process of physical degradation, with unstable aggregates, requiring organic matter and proper management for the system. This study aimed to investigate the interrelationships between soil physical stability—assessed by aggregate distribution, aggregate stability in water, and degree of dispersion—and soil organic carbon fractions in a saline-sodic environment located within an irrigated perimeter in the Brazilian semi-arid region. Two plots with a history of degradation were selected: Plot 77 (deactivated area) and Plot 78 (banana cultivation with signs of salinization). Composite soil samples with preserved structure were collected at depths of 0 – 10 cm and 10 – 20 cm in the Baixo Açú Irrigated District (DIBA) located in Rio Grande do Norte, Brazil. Chemical (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , PST, RAS), physical (water-stable aggregates, DMP, DMG, ADA, GF), and biological (TOC, CL, COP, CBM) attributes were analyzed. The statistical analysis included Principal Component Analysis (PCA) and Pearson's correlation matrix. PCA revealed a clear separation between the plots, showing that Plot 77 is strongly associated with indicators of degradation (Na^+ , PST, RAS, and ADA). Plot 78, on the other hand, stands out for its positive correlation with soil aggregation stabilization variables, such as (CBM, COT, DMP, and DMG). Negative correlations were observed between the variables (Na^+ , RAS) and indicators of aggregation (DMP, DMG) and biological activity (CBM). Even in the presence of significant levels of organic carbon, aggregate stability was severely compromised, highlighting the dominant dispersive effect of exchangeable Na^+ . Plot 77 exhibited higher absolute values for some sodicity indicators; however, soil quality is similar across the respective plots. The ADA showed a significant difference among the plots, highlighting the sensitivity of this attribute to soil conditions. The physical stability of soil in a saline-sodic environment is predominantly governed by the exchangeable Na^+ content. Therefore, the recovery and maintenance of soil health require integrated interventions that combine the reduction of exchangeable Na^+ , the increase in stable organic carbon, and the implementation of conservation management practices, utilizing traditional methods such as no-till farming, organic fertilization, the use of cover crops, and proper irrigation management.

Keywords: Soil degradation. Agriculture. Organic matter. Soil health.

3.1 INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada surgiu como uma estratégia essencial frente à limitação hídrica, especialmente em regiões semiáridas, sendo fundamental para a segurança alimentar e o desenvolvimento socioeconômico. Contudo, a sustentabilidade desse modelo produtivo é frequentemente comprometida por processos de degradação do solo, com destaque para a salinização e a sodificação, sendo mais severos em ambientes de clima seco (EMBRAPA, 2018; Stavi; Thevs; Priori, 2021).

A região semiárida brasileira estende-se por onze estados, englobando todo o Nordeste, além do norte de Minas Gerais e do Espírito Santo, ocupando aproximadamente 15,3% do território nacional. Essa região caracteriza-se por um regime pluviométrico irregular, com precipitações médias anuais frequentemente inferiores a 800 mm, elevadas taxas de evaporação e ocorrência recorrente de secas periódicas (SUDENE, 2021). Em perímetros irrigados do semiárido brasileiro, a associação entre elevada evapotranspiração e a adoção inadequada de práticas de manejo do solo tem contribuído para a conversão de áreas produtivas em solos degradados.

Ambientes semiáridos como o bioma caatinga exclusivamente brasileiro, em pesquisa recente de Da Costa *et al.*, (2025), trouxe informações importantes sobre a remoção de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil, a qual consta que a caatinga foi responsável por quase 50% da remoção do GEE, isso mostra a importância de compreender o ambiente em questão sobre a inter-relação da estabilidade do solo e das frações de carbono em solos salino/sódico.

O Distrito de Irrigação do Baixo Açu – DIBA, localiza-se em uma região semiárida caracterizada por baixa precipitação pluviométrica e elevados índices de evapotranspiração (Justo *et al.*, 2021). Mesmo diante desse desafio, o DIBA destaca-se como um importante centro produtivo de expressiva relevância socioeconômica, abrigando o cultivo de diferentes culturas, como banana, milho, feijão e manga, o que sustenta a geração de renda e a oferta de empregos na região (Silva *et al.*, 2024). No entanto, a deficiência sobre a adoção de práticas de manejo adequadas do solo tem contribuído para a conversão de áreas produtivas em solos degradados.

A degradação em solos salino-sódicos ocorre principalmente em função do excesso do íon sódio, que, em concentrações elevadas, promove a dispersão das argilas, um processo físico-químico que afeta diretamente a estrutura do solo (FAO, 2020; Wang *et al.*, 2025). Essa dispersão resulta na destruição dos agregados, na redução da porosidade, da infiltração de água e da condutividade hidráulica, além de aumentar a suscetibilidade à erosão e à formação de crostas superficiais e subsuperficiais (Luo *et al.*, 2024). Como consequência, a degradação

estrutural do solo provoca baixa permeabilidade, dificultando a lixiviação dos sais e, assim, agravando o processo de salinização.

A estabilidade física do solo, considerando a presença dos agregados estáveis, constitui um atributo essencial para o funcionamento do ecossistema, uma vez que regula o fluxo de água e ar, o armazenamento dos nutrientes e a atividade biológica (Nunes; Karlen; Moorman, 2020; Ponyane; Dina Ebouel; Eze, 2025). Estudos destacam que a matéria orgânica – MO exerce um papel fundamental na estabilidade estrutural, especificamente na formação e estabilização de macro e microagregados (Oades, 1984; Zhao *et al.*, 2023).

Em solos afetados por sais, a dinâmica em relação às frações de carbono orgânico e sua eficácia como agentes cimentantes podem ser profundamente alteradas. O estresse salino e a dispersão física modificam a atividade microbiana (Feng *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2024). As inter-relações específicas entre as frações físicas do carbono (lábil, particulado e carbono da biomassa) relacionando com os diferentes níveis de estabilidade de agregados em solos salino-sódicos necessitam serem mais compreendidas (Feng *et al.*, 2021; Singh, 2016).

No contexto do semiárido brasileiro, há uma lacuna de conhecimento sobre estudos referente às frações de carbono e agregação, já que o foco é em solos temperados ou tropicais não afetados por sais, não considerando as interações singulares impostas pelo alto pH e pela presença de sódio (Na^+) dispersivo. Portanto, são escassas as informações que quantificam e relacionam diretamente a distribuição das frações físicas da matéria orgânica do solo com parâmetros de estabilidade estrutural em solos salino-sódicos de perímetros irrigados (Quantin *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2023). Compreender essas inter-relações é um passo essencial para fundamentar práticas de manejo e recuperação que visem reconstruir a matéria orgânica e, consequentemente, a estrutura do solo, quebrando o ciclo da degradação.

A investigação proposta está intrinsecamente alinhada ao paradigma emergente da saúde do solo, definida como a capacidade contínua do solo de funcionar como um ecossistema vital, responsável pela sustentação dos ecossistemas. Para que um solo seja considerado saudável, é imprescindível a manutenção de uma adequada estrutura física, atividade biológica e equilíbrio químico, além do fornecimento de bases científicas que subsidiem a adoção de práticas de manejo adequadas, capazes de promover a restauração da capacidade produtiva e dos serviços ambientais (Lehmann *et al.*, 2020).

A qualidade do solo é indispensável para o funcionamento ideal do solo e garantir a produtividade agrícola e a segurança alimentar em todo o mundo. A recuperação de solos afetados por sais constitui uma das principais prioridades nos atuais planos de desenvolvimento de países em desenvolvimento, bem como de regiões áridas e semiáridas, visando atender às

crescentes demandas por alimentos, ração animal e bioenergia decorrentes do aumento populacional (Basak *et al.*, 2022).

Esta abordagem tem impacto direto no cumprimento de múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), aos quais podemos citar a ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), ODS 15 (Vida terrestre), ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), é visto que, esta pesquisa é um insumo estratégico para políticas públicas e tomadas de decisão que visem conciliar a segurança alimentar, sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento socioeconômico no semiárido brasileiro. Diante da limitada disponibilidade de estudos que investiguem de forma integrada a estabilidade física e as frações do carbono orgânico em solos salino-sódicos de perímetros irrigados do semiárido brasileiro, pesquisas como esta tornam-se fundamentais para suprir essas lacunas específicas do conhecimento.

A hipótese que norteia este estudo é que, em solos salino-sódicos, o aumento da sodicidade e do grau de dispersão das partículas promove a desagregação estrutural, reduzindo a estabilidade dos agregados e influenciando a dinâmica e a distribuição das frações do carbono orgânico do solo. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo investigar as inter-relações entre a estabilidade física do solo, avaliada pela estabilidade de agregados em água, grau de dispersão e as frações do carbono orgânico do solo em um ambiente salino-sódico localizado em um perímetro irrigado do semiárido brasileiro.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização e características do estudo

O Projeto de Irrigação Osvaldo Amorim, integrante do Distrito de Irrigação do Baixo Açu (DIBA), situa-se na região centro-oeste do estado do Rio Grande do Norte, abrangendo os municípios de Afonso Bezerra e Alto do Rodrigues (Figura 1). A dinâmica hídrica da área é diretamente influenciada pelo Rio Piranhas-Açu, que constitui seu principal eixo de drenagem com água doce sem problemas de excesso de sais. Do ponto de vista pedológico, a paisagem é caracterizada pela predominância de Cambissolos, Planossolos e Latossolos de acordo com o Sistema Brasileiro de classificação de Solos – SiBCS, já pela *Soil Taxonomy* são, Inceptisols, Oxisols e Alfisols. (DIBA, 2024; Santos *et al.*, 2025).

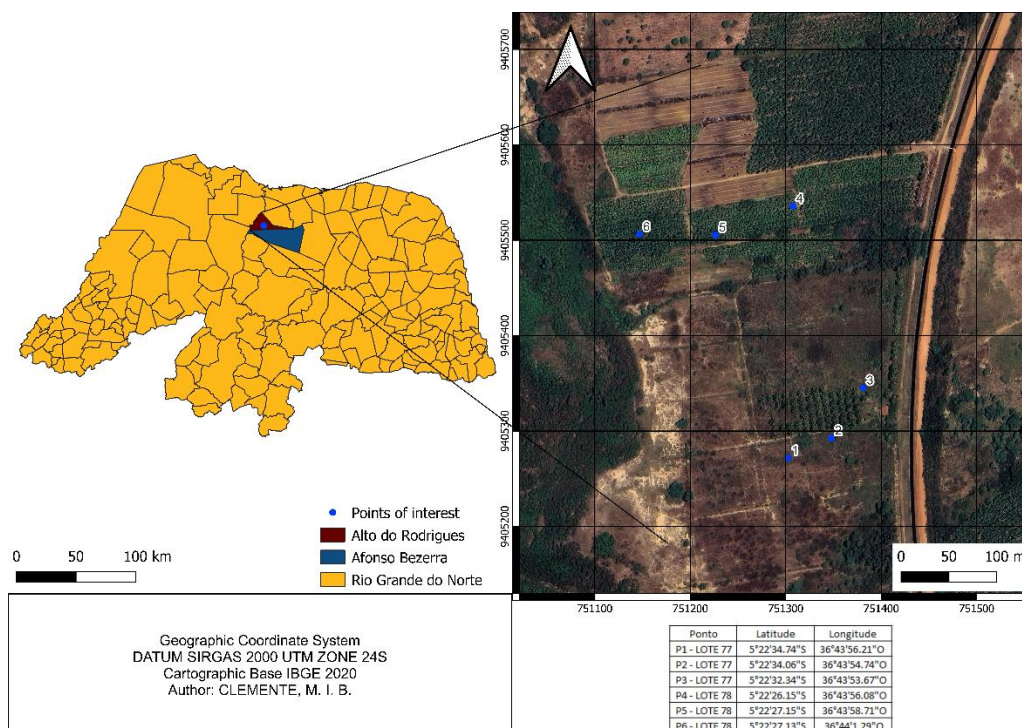


Figura 1. Localização dos Lotes 77 e 78 e as coordenadas geográficas de cada ponto no campo no Distrito Irrigado Baixo – Açú (DIBA)

A região possui clima semiárido do tipo Bsh (quente e seco) segundo Köppen, com temperatura média anual elevada (27,5 °C) e amplitudes térmicas marcadas entre as médias máxima (33,6 °C) e mínima (21,5 °C). O período chuvoso, de curta duração, tem início em janeiro e alcança sua maior intensidade entre março e abril. Este regime climático sustenta uma vegetação do tipo Caatinga Hiperxerófila, composta por espécies altamente adaptadas à aridez, onde se destacam as cactáceas. (Alvares *et al.*, 2013).

O DIBA possui área total de 9.020 hectare (ha), distribuída em duas etapas implantadas. Atualmente, encontram-se ativos 7 lotes técnicos (16,32 ha cada), 150 lotes familiares (8,16 ha cada) e 22 lotes empresariais. Entre os lotes inativos, contabilizam-se 2 técnicos, 22 familiares e 24 empresariais, no momento, o distrito dispõe de uma área irrigável de 5.413,34 há, informações de arquivos documentados pelo responsável do distrito.

3.2.2 Amostras e análises de solos

A seleção das unidades amostrais foi conduzida com base no histórico de manejo e em evidências visuais de degradação. Dois lotes foram escolhidos: Lote 77, correspondente a uma área desativada devido a problemas de salinidade; e Lote 78, uma área cultivada recentemente com bananeira (*Musa spp.*) que apresentava indicativos visuais de salinização. Ambos os lotes exibiam sinais de deficiência na drenagem do solo.

Os pontos de amostragem foram definidos de acordo com o acesso às áreas e a incidência de problemas relacionados à presença de sais. Em função disso, as profundidades avaliadas foram selecionadas por concentrarem a maior parte dos nutrientes e suscetíveis aos efeitos da salinidade/sodicidade. Em cada lote, foram estabelecidos três pontos de coleta georreferenciados. Em cada ponto, amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas nas profundidades de 0 – 10 cm e 10 – 20 cm. Para cada lote e profundidade, as três amostras simples de mesma profundidade foram homogeneizadas, formando uma amostra composta.

A expansão histórica e intensiva da agricultura irrigada na região promoveu alterações abrangentes no uso e manejo do solo, o que impossibilitou a adoção de uma área de referência (vegetação nativa ou não irrigada) em condições topográficas e litológicas equivalentes para controle direto (Qiao *et al.*, 2022). Como estratégia para contornar essa limitação inerente ao estudo de ecossistemas antropizados, foi adotado um controle teórico, baseando-se em estudos regionais, com ênfase na literatura científica específica da área de estudo.

As amostras de solos coletados, foram trazidas para o Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta do Semiárido - LASAPSA do Departamento de Ciências Agronômicas e Florestais da Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, Campus, Mossoró-RN. Posteriormente, as mesmas foram submetidas ao processo de obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) por um período de cinco dias. Após a secagem, o material foi destorroado, homogeneizado, peneirado em malha de 2 mm e acondicionado em recipientes plásticos devidamente identificados. Em seguida, foram realizadas as análises químicas e físicas do solo, utilizando metodologias adaptadas de Richards (Richards, 1954; Freire; Pessoa; Gheyi, 2016; Teixeira, *et al.*, 2017).

Para preservar a umidade original e a viabilidade microbiana, o solo destinado às análises biológicas foi acondicionado imediatamente após a coleta em caixas térmicas. No laboratório, as amostras foram transferidas para potes plásticos herméticos e identificados, sendo então armazenadas em câmara fria a 4 °C até o momento das análises. Este protocolo visou minimizar alterações nos atributos biológicos do solo durante o período entre a coleta e a análise (Lopes; Fernandes, 2020). Em laboratório, foi adotado o método em que cada amostra era analisada em triplicata, para garantir maior confiabilidade aos resultados.

3.2.3 Carbono Orgânico Total (COT) e Carbono Orgânico Particulado (COP)

Determinados a partir da TFSA, em seguida uma pequena quantidade foi macerada em gral de porcelana e passadas em peneira de 60 mesh (0,210 mm) e pesado 0,2 g. A análise seguiu a metodologia adaptada de oxidação úmida por via úmida com aquecimento controlado. A quantificação foi realizada pelo método de oxidação úmida com aquecimento externo, no qual o carbono orgânico é oxidado por uma solução de dicromato de potássio, seguida de titulação do excesso de dicromato com solução de sulfato ferroso amoniacal (Yeomans; Bremner, 1988).

3.2.4 Carbono Lábil (CL)

Determinado pelo método de oxidação com permanganato de potássio, conforme descrito por (Shang; Tiessen, 1997). Para isso, 1,0 g de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA, fração de 0,210 mm) foi submetida a oxidação com 10 mL de solução de KMnO_4 $0,033 \text{ mol L}^{-1}$. Após agitação mecânica (1 h) e centrifugação, o sobrenadante foi coletado e sua absorbância foi lida em espectrofotômetro a 565 nm. A concentração de CL foi calculada a partir da diferença na absorbância da solução de KMnO_4 antes e após a reação.

3.2.5 Carbono da biomassa microbiana (CBM)

Determinado pelo método de irradiação - extração com micro-ondas adaptado de (Islam; Weil, 1998). Para cada tratamento, foram preparadas seis sub-amostras independentes de 20 g de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). Destas, três subamostras foram submetidas à irradiação em forno de micro-ondas por um tempo previamente calibrado para elevar a temperatura interna do solo. As outras três subamostras foram mantidas como controles não irradiados. Imediatamente após a irradiação, foi adicionado a solução extratora de sulfato de potássio (K_2SO_4 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$), foram adicionados a todos os frascos, tanto irradiados quanto controles, então agitados horizontalmente por 30 minutos. Após filtração, o carbono orgânico nos extratos foi quantificado. O cálculo do teor de CBM foi realizado por meio da Equação 1:

(1)

$$\text{CBM} = \frac{(\text{CI} - \text{CNI})}{K_c}$$

Em que:

CBM - Carbono da biomassa microbiana, mg g^{-1} ;

CI - Carbono da amostra irradiada, mg g^{-1} ;

CNI - Carbono da amostra não irradiada, CNI mg g^{-1} ; e

Kc - Fator para converter o carbono extraído em CBM.

O fator de correção (kc), necessário para converter o carbono extraído em equivalente de biomassa microbiana, apresenta variabilidade na literatura em função do clima e do tipo de solo. Para este estudo, considerando as características de solos do semiárido brasileiro, adotou-se o valor de $k_c = 0,33$, conforme recomendado para condições edafoclimáticas similares (Feigl *et al.*, 1995; Moreira; Siqueira, 2006).

3.2.6 Bases trocáveis, Argila dispersa em água, Grau de Flocculação e agregados

O Sódio (Na^+) foi extraído com a solução Mehlich-1 e realizado a leitura na fotometria de chama, já o Cálcio (Ca^{2+}) e Magnésio (Mg^{2+}) cloreto de potássio e determinado por titulação (Teixeira, *et al.*, 2017).

A argila dispersa em água (ADA) foi determinada a partir da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), adotando a metodologia de (Teixeira, *et al.*, 2017). O procedimento consistiu na agitação lenta da amostra em água destilada, em agitador tipo Wagner (50 rpm por 16 horas), seguida de sedimentação e coleta da suspensão de argila dispersa. Posteriormente, o grau de flocculação (GF) foi calculado com base no teor total de argila utilizando o hexametáfosfato, conforme a expressão estabelecida no referido manual (Teixeira, *et al.*, 2017). Calculado pela seguinte equação 2:

(2)

$$GF = \frac{(\text{Argila Total} - \text{Argila Dispersa em Água})}{\text{Argila Total}} \times 100$$

Em que:

GF – Grau de Flocculação, em (%);

AT – Argila Total, em g Kg^{-1} ;

ADA – Argila Dispersa em Água em g Kg^{-1} .

Os agregados foram determinados pelo método de peneiramento úmido utilizando amostras com estrutura preservada. Inicialmente, blocos indeformados de solo coletados em campo passados por um conjunto de peneiras de malhas de 4,00 e 2,00 mm para padronização do tamanho inicial do material. Os agregados retidos na peneira de 2,00 mm foram separados, identificados e armazenados para análise subsequente. Para a análise propriamente dita, uma

alíquota desses agregados foi submetida ao peneiramento úmido em oscilador vertical (42 oscilações/minuto), utilizando um conjunto de peneiras com malhas de 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm. Após a separação, o material retido em cada peneira foi transferido para recipientes individuais e secos em estufa a 105 °C.

Com a obtenção da massa seca, separou-se a fração areia dos agregados por peneiramento (malha 0,05 mm), utilizando dispersante químico hexametáfosfato de sódio e água destilada, e mecânico com agitador tipo Wagner por 2 minutos. Sua massa foi subtraída da massa seca total de cada fração, resultando na massa dos agregados estáveis por classe de tamanho. Com os dados corrigidos, foi calculado o Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e o Diâmetro Médio Geométrico (DMG), conforme a equação 3.

(3)

$$DMP = \sum_{i=1}^N X_i \cdot W_i$$

Em que:

DMP – diâmetro médio ponderado, por via úmida, em mm;

X_i – diâmetro médio de cada classe de peneira em mm; e

W_i – proporção de agregados em cada classe/peneira, em %.

3.2.7 Análises estatísticas dos dados

Utilizou-se dos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e dois testes de homogeneidade (Bartlett e Levene), foi verificado a normalidade e homogeneidade das variâncias. Foi conduzido o teste Tukey e regressão ou teste não paramétrico Kruskal Wallis e um teste de comparações múltiplas de Student a 5% com ajuste none e Bonferroni no software R com pacote agricolae. Todas as análises foram realizadas no software R utilizando os pacotes agricolae (Mendiburu, 2021), Hmisc (Harrell Jr., 2020) e factoextra (Kassambara; Mundt, 2020).

3.3 RESULTADOS

Os dados apresentados nos boxplots, cuja significância foi avaliada pelo teste F a 5% de probabilidade para a camada de 0 – 10 cm e 10 – 20 cm, permitiram comparar as propriedades químicas, físicas e biológicas entre os lotes 77 e 78. No entanto, observou-se diferença estatisticamente significativa apenas para uma das variáveis analisadas, enquanto as

demais não apresentaram diferenças significativas entre os lotes, indicando comportamento semelhante na maioria dos atributos avaliados, conforme ilustrado na Figura 2.

Os atributos químicos avaliados evidenciaram maiores teores no lote 77 quando comparado ao lote 78. O Na^+ trocável, o lote 77 apresentou mediana de $9,85 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e valor máximo de $17,84 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, ao passo que o lote 78 registrou valor máximo inferior, de $6,87 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 2 A). No lote 77, os valores máximos de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram de $17,53$ e $1,31 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, enquanto no lote 78 os valores máximos observados foram de $13,13 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para Ca^{2+} e $0,89 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para Mg^{2+} (Figura 2 B e C). A PST no lote 77 variou entre $14,27$ e $28,81\%$ (Figura 2 L). De forma semelhante, a RAS foi mais elevada no lote 77, com valor de $111,88 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, em comparação ao lote 78, que apresentou $60,78 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 2 M).

A variável ADA (Figura 2 D) foi a única que apresentou diferença estatística entre os lotes 77 e 78 com valores de $(0,26$ e $0,15 \text{ g kg}^{-1})$. Os parâmetros referentes a estabilidade dos agregados nos lotes 77 e 78 foram equivalentes a DMP de $(0,71$ e $1,04 \text{ mm})$ e DMG de $(0,83$ e $0,91 \text{ mm})$, mostrando que o lote 78 apresenta maiores valores (Figura 2 F e G). As frações orgânicas COT, COP, CL e CBM mostram uma progressão crescente tanto no lote 77 e 78, não apresentando diferença significativa entre as áreas estudadas (Figura 2 H, I, J e K).

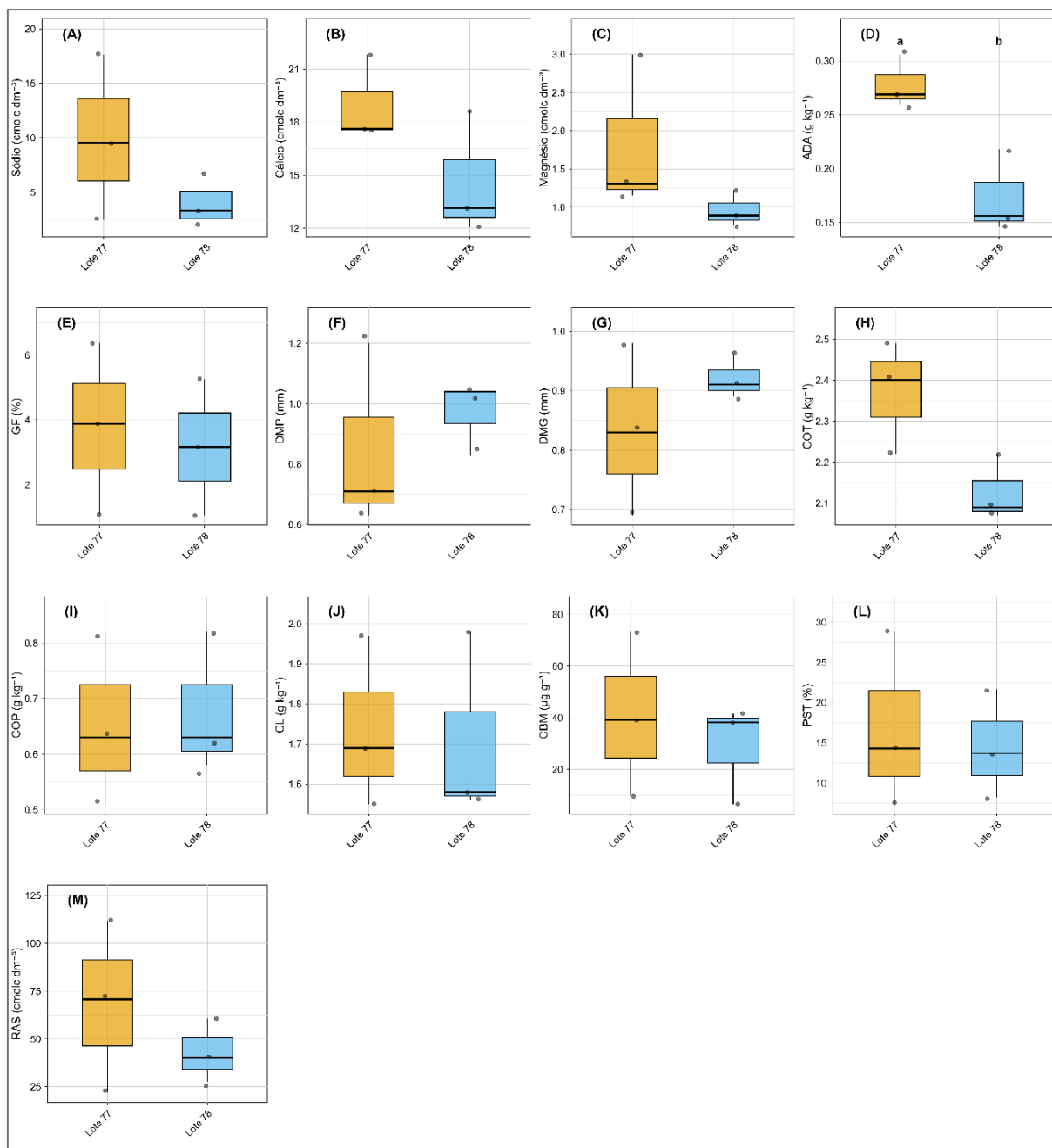


Figura 2. Boxplots dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo na profundidade de (0 – 10 cm) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo-Açu (DIBA), Rio Grande do Norte, Brasil. As variáveis analisadas foram: (A) sódio (Na^+), (B) cálcio (Ca^{2+}), (C) magnésio (Mg^{2+}), (D) argila dispersa em água (ADA), (E) grau de floculação (GF), (F) diâmetro médio ponderado (DMP), (G) diâmetro médio geométrico (DMG), (H) carbono orgânico total (COT), (I) carbono orgânico particulado (COP), (J) carbono lábil (CL), (K) carbono da biomassa microbiana (CBM), (L) porcentagem de sódio trocável (PST), (M) razão de adsorção de sódio (RAS).

Na profundidade de 10 – 20 cm, o lote 77 apresentou maior intensidade de sodicidade, com teores médios referente ao Na^+ de $23,77 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, PST de 26,25 % e RAS de $66,90 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, superiores ao lote 78 ($\text{Na}^+ = 7,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; PST = 22,38 %; RAS = $57,26 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Figura 3 A, L e M). Para Ca^{2+} , os valores médios foram de 21,18 e $14,86 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no lote 77 e 78. Já o Ca^{2+} também foi mais elevado no lote 77 ($21,18 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), enquanto o Mg^{2+} foi maior no lote 78 ($1,90 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), mesmo com valores mais elevados no lote 77, não obteve diferença estatística, respectivamente. Em relação aos atributos físicos no lote 78, mostrou maiores valores de DMP (1,16 mm), DMG (0,99 mm) e CBM ($24,86 \mu\text{g g}^{-1}$) (Figura 3 F, G e K). O lote 77 apresentou maior ADA (0,31 g/kg) (Figura D), no entanto, os valores de COT foi semelhante entre os lotes (1,87 e $1,73 \text{ g kg}^{-1}$).

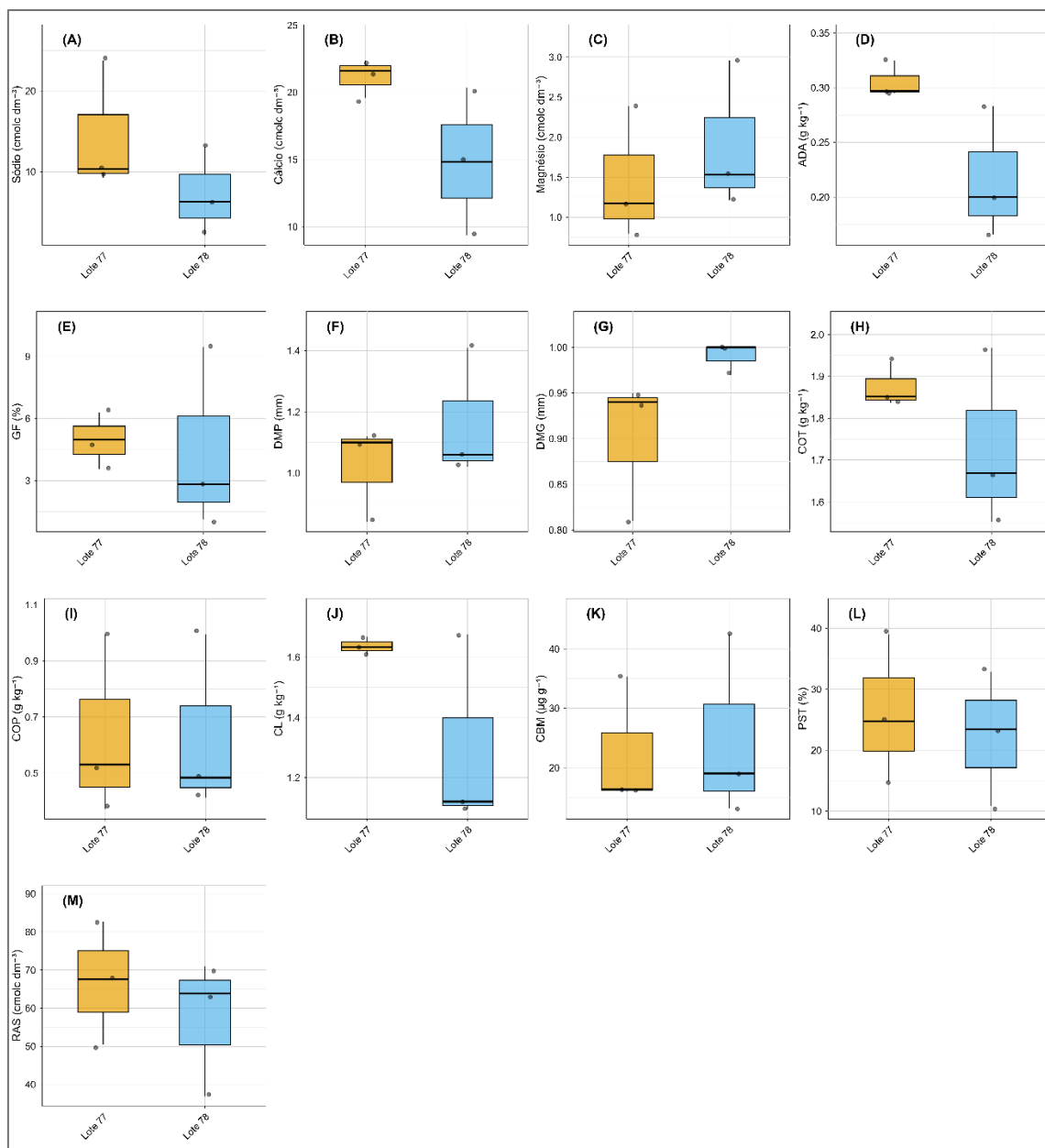


Figura 3. Boxplots dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo na profundidade de (10 – 20 cm) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo-Açu (DIBA), Rio Grande do Norte, Brasil. As variáveis analisadas foram: (A) sódio (Na^+), (B) cálcio (Ca^{2+}), (C) magnésio (Mg^{2+}), (D) argila dispersa em água (ADA), (E) grau de floculação (GF), (F) diâmetro médio ponderado (DMP), (G) diâmetro médio geométrico (DMG), (H) carbono orgânico total (COT), (I) carbono orgânico particulado (COP), (J) carbono lábil (CL), (K) carbono da biomassa microbiana (CBM), (L) porcentagem de sódio trocável (PST), (M) razão de adsorção de sódio (RAS).

A matriz de correlação conforme apresentada na Figura 4, confirma que na profundidade de (0 – 10 cm) (Figura 4 A), as variáveis (Na^+ – Mg^{2+} – PST – RAS), formam um grupo fortemente correlacionado, caracterizando ao gradiente de sodicidade/salinidade no solo,

todavia, esse gradiente está negativamente ligado à estabilidade de agregados (DMP, DMG e CBM), indicando que, à medida que aumenta a sodicidade, a estrutura física e a qualidade biológica do solo tendem a piorar.

Não sendo muito diferente a matriz que trata da profundidade de (10 – 20 cm) visto na Figura 4 B, a qual também apresentou um grupo químico correlacionado positivamente e mostrando que mesmo em diferentes profundidades a sodicidade aumenta, sendo essas variáveis com inter-relação ($\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{PST} - \text{RAS} - \text{ADA}$), elementos que propiciam o aumento ao risco de dispersão de argila e problemas estruturais. As variáveis relacionadas a estabilidade de agregados (DMP, DMG e GF) se correlacionam positivamente entre si e negativamente com RAS e Na^+ mostrando que o aumento da sodicidade está associado à perda da estrutura do solo.

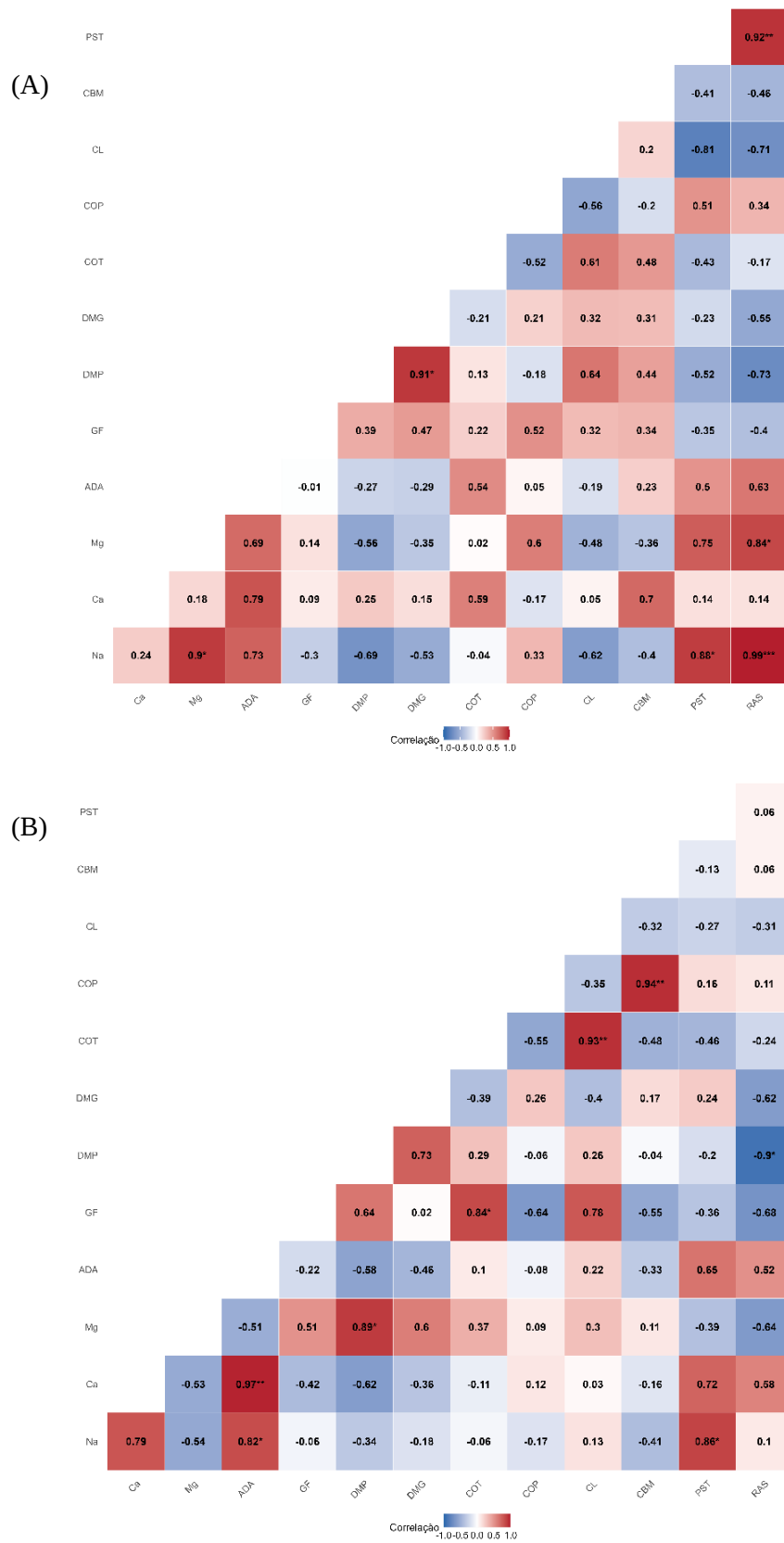


Figura 4. Matriz de correlação de Pearson dos atributos físicos, químicos e biológicos, na profundidade de 0 – 10 cm (A) e 10 – 20 cm (B) nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo-Açu – DIBA no Rio Grande do Norte, Brasil, das variáveis, Na⁺ – Sódio; Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ -

Magnésio; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS - Razão de Adsorção de Sódio, ADA – Argila Dispersa em Água; GF – Grau de Floculação; DMP – Diâmetro Médio Ponderado; DMG – Diâmetro Médio Geométrico; COT – Carbono Orgânico Total; CL – Carbono Labil; COP – Carbono Orgânico Particulado e CBM – Carbono da Biomassa Microbiana.

A Análise de Componente Principal (ACP) como mostra na Figura 2, a (CP1 e CP2) explicaram, juntos, 68,4% considerada boa variabilidade, sendo 45,7% atribuídos ao CP1 e 22,7% ao CP2, o que indica representação adequada da estrutura multivariada dos atributos analisados na Figura 5.

Os resultados da ACP para a profundidade de 0 – 10 cm evidenciaram uma clara separação espacial entre os lotes avaliados, refletindo diferentes estados de degradação e de manejo. Os pontos correspondentes ao lote 77 (P1, P2 e P3) mostraram maior associação com atributos indicativos de degradação estrutural, apresentando forte relação positiva com a CP1, especialmente com as variáveis ADA, PST, Na^+ e RAS. Observou-se que altas concentrações de sódio trocável nesses pontos corroboram o cenário de degradação no lote 77.

Entretanto, os pontos do lote 78 (P4, P5 e P6) exibiram relação negativa com a CP1, sugerindo uma condição estrutural menos degradada. Esses pontos destacaram-se pelas variáveis CBM, COT, DMP e DMG, indicando maior inter-relação com atributos de estabilidade de agregados.

Observou-se correlação positiva entre as variáveis relacionadas à estabilidade de agregados do solo; contudo, apesar dessa condição aparentemente favorável, verificaram-se, em campo, problemas visuais de compactação no lote 78. Essa característica pode estar associada, ao manuseio de maquinários. Ainda com esses resultados, é nítido que mesmo uma inter-relação positiva com as variáveis que auxiliam na estabilidade dos agregados, é necessário a adoção de práticas de manejo adequadas para evitar que aconteça uma maior compressão sobre os agregados.

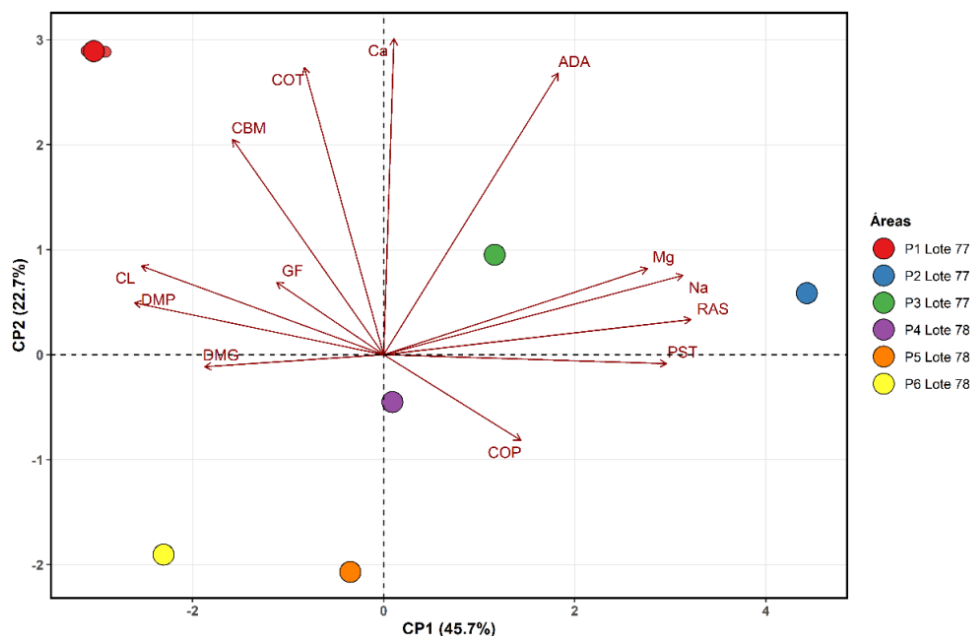


Figura 5. Análise de Componente Principal (ACP) dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, Na^+ – Sódio; Ca^{2+} - Cálcio; Mg^{2+} - Magnésio; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS - Razão de Adsorção de Sódio, ADA – Argila Dispersa em Água; GF – Grau de Floculação; DMP – Diâmetro Médio Ponderado; DMG – Diâmetro Médio Geométrico; COT – Carbono Orgânico Total; CL – Carbono Lável; COP – Carbono Orgânico Particulado e CBM – Carbono da Biomassa Microbiana, na profundidades de 0 – 10 cm, nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo Açu – DIBA, no Rio Grande do Norte, Brasil.

Com relação à ACP na profundidade de 10–20 cm, os dados atribuíram à CP1 39% e à CP2 29,4% da variância (Figura 6). A CP1 destacou a forte influência positiva do Na^+ , PST, RAS e Ca^{2+} , e uma influência negativa do Mg^{2+} e DMP. Por sua vez, a CP2 mostrou maior relação com o COT, a CL e a GF.

Constatou-se que nos pontos P2 e P3 do lote 77 estão associados a altos teores de Na^+ , PST, Ca^{2+} e ADA, mostrando que é um solo mais sodificado e que apresenta maior concentração de argila dispersa, a qual pode prejudicar a estrutura e infiltração. O ponto P5 do lote 78 apresentou associação com a RAS, indicando condição de sodicidade moderada. Vale salientar que em campo observou-se que essa área mesmo em uso, apresentava visualmente alterações relacionadas a compactação na subsuperfície. Nos pontos P1 e P4 observou-se interação significativa com as variáveis CBM e COP e o ponto P6 associado com DMP e Mg^{2+} , indicam a presença de atividade microbiana.

Os resultados demonstram que, mesmo na presença de teores expressivos de carbono orgânico, a estabilidade dos agregados em solos salino-sódicos em região semiárida é fortemente comprometida, já que a sodicidade interfere na estabilidade da estrutura do solo.

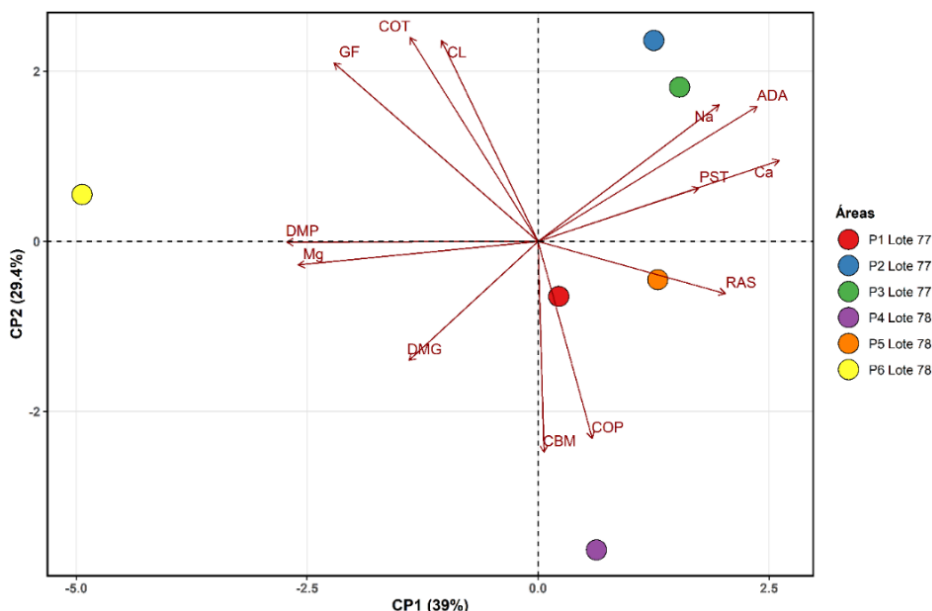


Figura 6. Análise de Componente Principal (ACP) dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, Na^+ – Sódio; Ca^{2+} - Cálcio; Mg^{2+} - Magnésio; PST – Porcentagem de sódio trocável; RAS - Razão de Adsorção de Sódio, ADA – Argila Dispersa em Água; GF – Grau de Floculação; DMP – Diâmetro Médio Ponderado; DMG – Diâmetro Médio Geométrico; COT – Carbono Orgânico Total; CL – Carbono Lável; COP – Carbono Orgânico Particulado e CBM – Carbono da Biomassa Microbiana, na profundidades de 10 – 20 cm, nos lotes 77 e 78 do Distrito Irrigado do Baixo Açu – DIBA, no Rio Grande do Norte, Brasil.

3.4 DISCUSSÃO

Os dados apresentados nesse trabalho, mostram a necessidade de desenvolver pesquisas mais abrangentes sobre a região semiárida, a fim de compreender a estrutura do solo e promover uma agricultura sustentável. Nesse sentido, Lopes e Fernandes (2020) confirmam que é fundamental avançar nos estudos sobre o ambiente semiárido, principalmente por ser composto por uma vegetação xerófila e solos rasos. Com isso, contribuir para o desenvolvimento de sistemas agrícolas baseados em práticas sustentáveis que assegurem a segurança alimentar.

A pesquisa evidencia que o lote 77 apresenta efeitos mais expressivos relacionados à salinidade e à sodicidade. No entanto, no lote 78, embora também se verifique a presença de sais, a incorporação de palhada pode estar contribuindo para uma interação positiva com a

estabilidade dos agregados. Em solo salino-sódicos, a adição de matéria orgânica (MO) como esterco, palhada, compostos orgânicos, vermicomposto, vinhaça e biochar, especialmente quando associada à aplicação de gesso agrícola e à lixiviação adequadamente manejada, constitui uma estratégia eficaz e sustentável para mitigar os efeitos deletérios sobre a estrutura do solo, a salinidade/sodicidade e a produtividade agrícola (Laghari *et al.*, 2025; Santos *et al.*, 2019).

Portanto, a análise nos permitiu compreender que em solo salino-sódico a manutenção com a matéria orgânica proporciona a atenuação da degradação estrutural, favorecendo a estabilidade dos agregados, ou seja, a degradação física do solo não está apenas ligada ao processo de salinização/sodicidade, mas também a dinâmica das práticas de manejo e a manutenção da matéria orgânica.

Pesquisa desenvolvida na mesma área, confirma que a salinização observada pode estar associada ao material de origem, especialmente ao Calcário Jandaíra, bem como ao manejo inadequado da irrigação e à ineficiência dos sistemas de drenagem (Silva *et al.*, 2024). A quantificação e a identificação de pontos críticos de salinidade e sodicidade, representam relevância em regiões semiáridas e áridas, as quais apresentam maior risco de salinização e sodificação dos solos, em função de sua natureza associada à composição química do material de origem (Hassani; Azapagic; Shokri, 2020; Mohanavelu; Naganna; Al-Ansari, 2021).

O excesso de Na^+ em fase trocável, em solo salino-sódico favorece a dispersão de argilas, com isso, diminuindo a proporção de agregados estáveis em água e favorecendo o aumento da argila dispersa, resultando em perda de estabilidade estrutural e maior suscetibilidade à erosão (Singh *et al.*, 2023). Corroborando com os resultados desta pesquisa, de forma semelhante outros estudos relatam que a salinidade/sodicidade associada ao Na^+ trocável causam dispersão e selamento superficial, favorecendo a degradação do solo (Singh *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2026).

As reduções dos teores de matéria orgânica e da atividade microbiana desempenham papel central no comprometimento da qualidade física e biológica de solos afetados por sais, atuando como um dos principais mecanismos associados à degradação estrutural e funcional desses ambientes (Li *et al.*, 2024). É nítido a necessidade de compreender como se comporta a estrutura de solos sódicos no semiárido, diante disso, na Índia pesquisadores observaram que a alta concentração de PST, provoca a dispersão de argilas, desestabiliza agregados, expõem o C a decomposição, enfraquecendo os agentes cimentantes (Kumar; Kumar, 2025).

Contudo, a salinidade e a sodicidade afetam de forma significativa a distribuição do carbono entre agregados de diferentes classes de tamanho, alterando a dinâmica de estabilização

da matéria orgânica no solo (Li *et al.*, 2024), contudo a salinidade influencia negativamente os processos químicos, físicos e biológicos, interferindo significativamente a estabilidade dos agregados (El-Ramady *et al.*, 2024).

Os resultados na matriz de correlação consideram COT, CBM, CL e COP responsáveis pela estruturação do solo, mantendo a correlação positiva com DMP. É nítido que mesmo uma inter-relação positiva com as variáveis que auxiliam na estabilidade dos agregados, é necessário a adoção de práticas de manejo adequadas para evitar que aconteça uma maior compressão sobre os agregados, já que é um ambiente salino-sódico. Diante desse cenário, autores como Das *et al.*, (2023), Kumar e Kumar (2025), Li *et al.*, (2024), explanam que é essencial a manutenção da matéria orgânica lábil, para auxiliar no processo da agregação do solo, a aeração, a retenção de umidade e a produtividade geral, o carbono orgânico contribui para a agregação de partículas primárias por meio dos agentes cimentantes.

Nessa perspectiva, ao contemplar as dimensões ambiental, social e de governança (ASG), os resultados reforçam a importância da adoção de práticas de agricultura regenerativa como estratégia para promover a sustentabilidade dos perímetros irrigados no semiárido (McLennon *et al.*, 2021), e promover um impacto positivo no processo de sequestro de carbono no solo, desempenhando um papel importante na promoção da resiliência dos agroecossistemas (Sykes *et al.*, 2020).

Nesse cenário, o manejo sustentável do solo contribui para a conservação da estrutura edáfica e dos serviços ecossistêmicos, promovendo maior diversidade vegetal, incremento da atividade microbiana e aumento da produção da biomassa (Lopes *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2024). Dessa forma, a integração entre o manejo do solo e os princípios ASG apresenta-se como um caminho promissor para fortalecer a resiliência produtiva e ambiental em áreas irrigadas sujeitas à degradação salino-sódica.

3.5 CONCLUSÃO

O lote 77 apresentou valores absolutos mais elevados para alguns indicadores de sodicidade, no entanto a qualidade do solo é semelhante nos respectivos lotes. A ADA apresentou diferença significativa entre os lotes, evidenciando sensibilidade desse atributo às condições do solo.

A estabilidade física do solo em ambiente salino-sódico é predominantemente governada pelo teor de Na^+ trocável, que atua como principal agente dispersivo, com mais expressividade no lote 77, comprometendo a agregação e a saúde estrutural do solo.

As frações de carbono orgânico (COT, CL, COP e CBM) no lote 78 exercem influência positiva na formação e estabilização de agregados.

Em síntese, os achados do estudo indicam a importância de investigações complementares que contemplem a qualidade da água de irrigação, a mineralogia do solo e a dinâmica do lençol freático, uma vez que esses fatores podem atuar de forma determinante na suscetibilidade a problemas de drenagem e na elevação de sais no perfil do solo, especialmente em ambientes salino-sódicos do semiárido.

Portanto, a recuperação e a manutenção da saúde do solo demandam intervenções integradas que combinem a redução do Na⁺ trocável, o incremento do carbono orgânico estável e a implantação de práticas de manejo conservacionistas, utilizando de práticas tradicionais como, plantio direto, a adubação orgânica, o uso de coberturas vegetais, manejo adequado da irrigação, drenagem e utilização de cultura adaptada as condições ambientais locais (espécies fitorremediadoras).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078>. Acesso em: 14 maio 2025.

BASAK, N.; RAI, A. K.; SUNDHA, P.; MEENA, R. L.; BEDWAL, S.; YADAV, R. K.; SHARMA, P. C. Assessing soil quality for rehabilitation of salt-affected agroecosystem: A comprehensive review. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 935785, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.935785/full>. Acesso em: 1 fev. 2026.

DA COSTA, L. M.; DAVITT, A.; VOLPATO, G.; DE MENDONÇA, G. C.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA, N. A comparative analysis of GHG inventories and ecosystems carbon absorption in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 958, p. 177932, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969724080896>. Acesso em: 22 fev. 2026.

DAS, S.; DEB, S.; SAHOO, S. S.; SAHOO, U. K. Soil microbial biomass carbon stock and its relation with climatic and other environmental factors in forest ecosystems: A review. **Acta Ecologica Sinica**, v. 43, n. 6, p. 933–945, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1872203222001020>. Acesso em: 2 fev. 2026.

DIBA. DIBA – Distrito de Irrigação do Baixo Açu. In: 2024. Disponível em: <https://diba.org.br/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

EL-RAMADY, H.; PROKISCH, J.; MANSOUR, H.; BAYOUMI, Y. A.; SHALABY, T. A.; VERES, S.; BREVIK, E. C. Review of Crop Response to Soil Salinity Stress: Possible

Approaches from Leaching to Nano-Management. **Soil Systems**, v. 8, n. 1, p. 11, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-8789/8/1/11>. Acesso em: 1 fev. 2026.

EMBRAPA. **Visão: o futuro da agricultura brasileira**. : Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao/o-futuro-da-agricultura-brasileira>. Acesso em: 23 nov. 2025.

FAO. **Mapping of salt-affected soils – Technical manual**. : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/ca9215en>. Acesso em: 23 nov. 2025.

FEIGL, B. J.; SPARLING, G. P.; ROSS, D. J.; CERRI, C. C. Soil microbial biomass in Amazonian soils: Evaluation of methods and estimates of pool sizes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 27, n. 11, p. 1467–1472, 1995. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/003807179500063K>. Acesso em: 27 jan. 2026.

FENG, H.; WANG, S.; GAO, Z.; PAN, H.; ZHUGE, Y.; REN, X.; HU, S.; LI, C. Aggregate stability and organic carbon stock under different land uses integrally regulated by binding agents and chemical properties in saline-sodic soils. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 15, p. 4151–4161, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ldr.4019>. Acesso em: 26 jan. 2026.

FREIRE, M. B. G. S.; PESSOA, L. G. M.; GHEYI, H. R. Métodos de análises químicas para solos afetados por sais. In: MANEJO DA SALINIDADE NA AGRICULTURA: ESTUDOS BÁSICOS E APLICADOS. : Expressão Gráfica, 2016. p. 123–148.

HARRELL JR., F. E. **Hmisc: Harrell Diversos**. , 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/Hmisc/index.html>. Acesso em: 9 jul. 2025.

HASSANI, A.; AZAPAGIC, A.; SHOKRI, N. Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 52, p. 33017–33027, 2020. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2013771117>. Acesso em: 31 jan. 2026.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. A rapid microwave digestion method for colorimetric measurement of soil organic carbon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 29, n. 15–16, p. 2269–2284, 1998. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00103629809370110>. Acesso em: 27 jan. 2026.

JUSTO, J. F. A.; BARRETO, A. C.; SILVA, J. F. D.; FERREIRA NETO, M.; SÁ, F. V. D. S.; OLIVEIRA, R. P. D. Identification and diagnosis of salt-affected soils in the Baixo-Açu irrigated perimeter, RN, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 7, p. 480–484, 2021. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662021000700480&tlng=en. Acesso em: 5 fev. 2026.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. : CRAN: Contributed Packages.The R Foundation, , 2020. Disponível em: <https://cloud.r-project.org/web/packages/factoextra/factoextra.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2025.

KUMAR, R.; KUMAR, S. Role of Aggregates and Clay Minerals in Carbon Mitigation of Sodic Soil. **International Journal on Science and Technology**, v. 16, n. 3, p. 8309, 2025. Disponível em: <https://www.ijst.org/research-paper.php?id=8309>. Acesso em: 1 fev. 2026.

LAGHARI, A. A.; ABRO, Q.; LEGHARI, A.; KUMAR, A.; KUMARI, L.; NINDWANI, B. A.; GULL, S. Soil organic matter and soil structure changes with tillage practices and straw incorporation in a saline-sodic soil. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1681651, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2025.1681651/full>. Acesso em: 22 fev. 2026.

LEHMANN, J.; BOSSIO, D. A.; KÖGEL-KNABNER, I.; RILLIG, M. C. The concept and future prospects of soil health. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 10, p. 544–553, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43017-020-0080-8>. Acesso em: 26 jan. 2026.

LI, W.; YANG, J.; YAO, R.; WANG, X.; XIE, W.; XIAO, P. Interactive effects of salinity and straw on the soil aggregate stability and organic carbon sequestration in saline soils in the Hetao area, China. **Land Degradation & Development**, v. 35, n. 5, p. 1685–1698, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ldr.5014>. Acesso em: 26 jan. 2026.

LOPES, L. D.; FERNANDES, M. F. Changes in microbial community structure and physiological profile in a kaolinitic tropical soil under different conservation agricultural practices. **Applied Soil Ecology**, v. 152, p. 103545, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0929139319315197>. Acesso em: 27 jan. 2026.

LOPES, T. C. de S.; PORTELA, J. C.; BATISTA, R. O.; BANDEIRA, D. J. da C.; LEITE, I. de O.; RAMALHO, L. B.; GONDIM, J. E. F.; COSTA, J. D. da; GURGEL, M. T.; SOUZA, C. M. M.; SILVA, E. F. da; SOUZA, E. R. de; OLIVEIRA, F. H. T. de; MIRANDA, N. de O.; SÁ, F. V. da S. Clay Fraction Mineralogy and Structural Soil Attributes of Two Soil Classes under the Semi-Arid Climate of Brazil. **Land**, v. 11, n. 12, p. 2192, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/12/2192>. Acesso em: 16 jan. 2026.

LUO, X. J.; ZHANG, X.; ZHANG, L.; GUO, L. L.; NIE, Z. Y.; ZHOU, J.; WANG, R. Z.; ZHANG, T. Y.; MIAO, Y.; MA, L.; WANG, Z. C.; YANG, F. Characteristics of clay dispersion and its influencing factors in saline-sodic soils of Songnen Plain, China. **Agricultural Water Management**, v. 303, p. 109033, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377424003688>. Acesso em: 26 jan. 2026.

MCLENNON, E.; DARI, B.; JHA, G.; SIHI, D.; KANKARLA, V. Regenerative agriculture and integrative permaculture for sustainable and technology driven global food production and security. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 6, p. 4541–4559, 2021. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/agj2.20814>. Acesso em: 23 fev. 2026.

MENDIBURU, F. de. **Agricolae: Procedimentos Estatísticos para Pesquisa Agrícola**. , 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/index.html>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MOHANAVELU, A.; NAGANNA, S. R.; AL-ANSARI, N. Irrigation Induced Salinity and Sodicty Hazards on Soil and Groundwater: An Overview of Its Causes, Impacts and Mitigation Strategies. **Agriculture**, v. 11, n. 10, p. 983, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/11/10/983>. Acesso em: 31 jan. 2026.

MOREIRA, F. M. de S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2. ed. Lavras/MG: [s. n.], 2006.

NUNES, M. R.; KARLEN, D. L.; MOORMAN, T. B. Tillage Intensity Effects on Soil Structure Indicators—A US Meta-Analysis. **Sustainability**, v. 12, n. 5, p. 2071, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/2071>. Acesso em: 26 jan. 2026.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, v. 76, n. 1, p. 319–337, 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02205590>. Acesso em: 26 jan. 2026.

PONYANE, P.; DINA EBOUEL, F. J.; EZE, P. N. Formation pathways, ecosystem functions, and the impacts of land use and environmental stressors on soil aggregates. **Frontiers in Environmental Science**, v. 13, p. 1628746, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2025.1628746/full>. Acesso em: 26 jan. 2026.

QIAO, L.; WANG, X.; SMITH, P.; FAN, J.; LU, Y.; EMMETT, B.; LI, R.; DORLING, S.; CHEN, H.; LIU, S.; BENTON, T. G.; WANG, Y.; MA, Y.; JIANG, R.; ZHANG, F.; PIAO, S.; MÝLLER, C.; YANG, H.; HAO, Y.; LI, W.; FAN, M. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 6, p. 574–580, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01376-8>. Acesso em: 20 nov. 2025.

QUANTIN, C.; GRUNBERGER, O.; SUVANNANG, N.; BOURDON, E. Land Management Effects on Biogeochemical Functioning of Salt-Affected Paddy Soils. **Pedosphere**, v. 18, n. 2, p. 183–194, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1002016008600065>. Acesso em: 26 jan. 2026.

RICHARDS, L. A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. **Soil Science**, v. 78, n. 2, p. 154, 1954. Disponível em: Acesso em: 8 jul. 2025.

SANTOS, P. D. D.; CAVALCANTE, L. F.; GHEYI, H. R.; LIMA, G. S. D.; GOMES, E. M.; BEZERRA, F. T. C. Saline-sodic soil treated with gypsum, organic sources and leaching for successive cultivation of sunflower and rice. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 12, p. 891–898, 2019. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662019001200891&tlng=en. Acesso em: 22 fev. 2026.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2025.

SHANG, C.; TIESSEN, H. ORGANIC MATTER LABILITY IN A TROPICAL OXISOL: EVIDENCE FROM SHIFTING CULTIVATION, CHEMICAL OXIDATION, PARTICLE SIZE, DENSITY, AND MAGNETIC FRACTIONATIONS:. **Soil Science**, v. 162, n. 11, p. 795–807, 1997. Disponível em: <http://journals.lww.com/00010694-199711000-00004>. Acesso em: 27 jan. 2026.

SILVA, J. F. D.; FERREIRA NETO, M.; PORTELA, J. C.; GONDIM, J. E. F.; MELO, S. B. D.; FREITAS, D. F. D.; MEDEIROS, J. F. D.; DIAS, N. D. S.; PEIXOTO, T. D. C.; SÁ, F. V. D. S. Soil Classification Based on Local and Scientific Knowledge in an Irrigated District in

the Semi-Arid Region of Brazil. **Land**, v. 13, n. 10, p. 1559, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/10/1559>. Acesso em: 2 fev. 2026.

SINGH, K. Microbial and Enzyme Activities of Saline and Sodic Soils. **Land Degradation & Development**, v. 27, n. 3, p. 706–718, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ldr.2385>. Acesso em: 26 jan. 2026.

SINGH, P.; SHARMA, S.; NISAR, S.; CHOUDHARY, O. P. Structural Stability and Organic Matter Stabilization in Soils: Differential Impacts of Soil Salinity and Sodicty. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 2, p. 1751–1773, 2023a. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s42729-023-01136-3>. Acesso em: 26 jan. 2026.

SINGH, P.; SHARMA, S.; NISAR, S.; CHOUDHARY, O. P. Structural Stability and Organic Matter Stabilization in Soils: Differential Impacts of Soil Salinity and Sodicty. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 2, p. 1751–1773, 2023b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01136-3>. Acesso em: 31 jan. 2026.

STAVI, I.; THEVS, N.; PRIORI, S. Soil Salinity and Sodicty in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring, and Restoration Measures. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 712831, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.712831/full>. Acesso em: 26 jan. 2026.

SUDENE, S. D. D. N. **Delimitação do Semiárido - Relatório Final**. Brasília, DF: SUDENE, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiaridorelatorionv.pdf>. .

SYKES, A. J.; MACLEOD, M.; EORY, V.; REES, R. M.; PAYEN, F.; MYRGIOTIS, V.; WILLIAMS, M.; SOHI, S.; HILLIER, J.; MORAN, D.; MANNING, D. A. C.; GOGLIO, P.; SEGHETTA, M.; WILLIAMS, A.; HARRIS, J.; DONDINI, M.; WALTON, J.; HOUSE, J.; SMITH, P. Characterising the biophysical, economic and social impacts of soil carbon sequestration as a greenhouse gas removal technology. **Global Change Biology**, v. 26, n. 3, p. 1085–1108, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.14844>. Acesso em: 23 fev. 2026.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solos**. : Embrapa, 2017.

WANG, Y.; JI, Y.; MA, J.; ELENA, M.; ASSIYA, A.; DING, R.; JIA, Z.; SIDDIQUE, K. H. M.; LIU, E.; HE, J.; ZHANG, W.; ZHANG, P. Evaluate the impacts of different straw returning rates on soil quality and field environmental sustainability of film mulching or non-mulching farmland in semiarid region. **Environmental Research**, v. 285, p. 122483, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013935125017359>. Acesso em: 23 nov. 2025.

WANG, R.-Z.; ZHANG, X.; ZHANG, L.; LUO, X.-J.; NIE, Z.-Y.; ZHANG, T.-Y.; ZHOU, J.; MA, L.; YANG, F.; WANG, Z.-C. How Do Soil Properties Affect Soil Saturated Hydraulic Conductivity? Assessment and Prediction Based on Soils With Different Salinity and Sodicty in the Semi-Arid Region of Northeast China. **Land Degradation & Development**, v. 37, n. 1, p. 67–80, 2026. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.70096>. Acesso em: 1 fev. 2026.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467–1476, 1988. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00103628809368027>. Acesso em: 27 jan. 2026.

ZHAO, Z.; MAO, Y.; GAO, S.; LU, C.; PAN, C.; LI, X. Organic carbon accumulation and aggregate formation in soils under organic and inorganic fertilizer management practices in a rice–wheat cropping system. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 3665, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-30541-y>. Acesso em: 26 jan. 2026.