



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

RAYANE FEITOSA DE CARVALHO

ATRIBUTOS ELETROQUÍMICOS E DA MATÉRIA ORGÂNICA EM
CAMBISSOLOS E LATOSSOLOS DA BACIA POTIGUAR

MOSSORÓ

2024

RAYANE FEITOSA DE CARVALHO

**ATRIBUTOS ELETROQUÍMICOS E DA MATÉRIA ORGÂNICA EM
CAMBISSOLOS E LATOSSOLOS DA BACIA POTIGUAR**

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

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo do Solo e Água
Orientadora: Prof. Dra. Carolina Malala Martins Souza.

MOSSORÓ

2024

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

c331a carvalho, rayane .
ATRIBUTOS ELETROQUÍMICOS E DA MATÉRIA ORGÂNICA
EM CAMBISSOLOS E LATOSSOLOS DA BACIA POTIGUAR /
rayane carvalho. - 2024.
59 f. : il.

Orientador: Carolina Souza.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2024.

1. Solos tropicais. 2. Propriedades físico-químicas. 3. Cargas elétricas coloidais. 4. Interação solo-mineralogia-orgânicos. I. Souza, Carolina, orient. II. Título.

RAYANE FEITOSA DE CARVALHO

**ATRIBUTOS ELETROQUÍMICOS E DA MATÉRIA ORGÂNICA EM
CAMBISSOLOS E LATOSSOLOS DA BACIA POTIGUAR**

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

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

Defendida em: 29/07/2024.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
CAROLINA MALALA MARTINS SOUZA
Data: 31/07/2024 11:30:45-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

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



Documento assinado digitalmente
LUIZ FRANCISCO DA SILVA SOUZA FILHO
Data: 04/08/2024 08:55:44-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Luiz Francisco da Silva Souza Filho, Prof. Dr. (UFRB)
Membro Examinador Externo



Documento assinado digitalmente
PRISCILA LIRA DE MEDEIROS
Data: 01/08/2024 18:17:27-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Priscila Lira de Medeiros, Prof.^a Dra. (UFERSA)
Membro Examinador Interno

Jeane Medeiros Martins de Araújo, Prof.^a Dra. (IFPB)
Membro Examinador Externo

*À minha vó, **Neci Chaves** (em memória), que sempre contribuiu para a progressão dos meus estudos.*

Este trabalho é dedicado às pessoas que sempre acreditaram que eu iria conseguir. Diante do caminho árduo, o apoio da minha mãe foi essencial. Obrigada!

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao mestre celestial, Deus, que sempre esteve comigo, colocando em minha trajetória anjos em formas de pessoas. E sempre me fornecendo saúde.

Agradeço à minha família, por acreditar nos meus planos.

Agradeço à equipe de laboratório LQM solos: Alrivan Júnior, Lunara Rêgo, Alcigério Queiroz, Helena Moraes. Aos agregados: Joaquin, Eder Rodrigues, Yara Almeida, Pamella. Cada um ajudou de uma forma inexplicável, minha eterna GRATIDÃO.

Agradeço à minha Orientadora, Carolina Malala, pela empatia e paciência. Sua metodologia aplicada ao meu trabalho foi fundamental para a elaboração.

Agradeço aos professores Luiz Francisco e Eulene Francisco, integrantes da apresentação do projeto, onde explanaram com muita sabedoria e ideias para melhoramento do meu trabalho.

Agradeço à Banca Examinadora pelas contribuições importantes para um trabalho de alta relevância.

Agradeço ao Campus do PICI UFC, ao técnico de laboratório Crisanto e à professora responsável, Dra. Maria Eugênia, que me receberam muito bem e, com toda atenção e dedicação, ajudaram nos dados do meu trabalho.

Agradeço à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA pela oportunidade concebida. Ao Laboratório de Análise de Água e Solo (LASAPSA), pela estrutura para os procedimentos da pesquisa.

Agradeço a todos que de alguma forma auxiliaram no meu desenvolvimento dentro da pós-graduação. Só tenho gratidão!

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”.

Josué 1:9

RESUMO

A Bacia Potiguar é conhecida pela sua geodiversidade e potencial de recursos naturais. Está localizada na região Nordeste do Brasil e abrange mesorregiões dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Os Latossolos e Cambissolos são as classes de solos mais comuns da região. Esses solos possuem características distintas, onde os Latossolos apresentam baixa fertilidade natural e alta porosidade, e os Cambissolos são em geral ricos quimicamente, com alto teor de argila do tipo 2:1 e pouca profundidade. Além disso, o clima semiárido, predominante na bacia, afeta negativamente as propriedades físicas, químicas, eletroquímicas e biológicas do solo. Portanto, o estudo das cargas elétricas das partículas coloidais é de fundamental importância para a compreensão de diversos fenômenos físico-químicos que ocorrem nos solos do semiárido da Bacia Potiguar. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar os atributos eletroquímicos dos Latossolos e Cambissolos situados nesta Bacia, correlacionando-os à composição mineralógica, óxidos, relações moleculares e matéria orgânica dos solos. O trabalho foi desenvolvido na mesorregião Oeste do estado do Rio Grande do Norte e mesorregião Jaguaribe do estado do Ceará, ambas inseridas na Bacia Potiguar. Foram selecionados nove perfis de solo, sendo cinco Latossolos e quatro Cambissolos. A determinação dos óxidos de ferro, alumínio e silício a identificação do Ki e Kr foi realizada por meio de espectrofotometria de absorção atômica. A caracterização da matéria orgânica do solo deu-se por determinação do carbono orgânico total, carbono lábil e fracionamento das substâncias húmicas. Os atributos eletroquímicos foram constituídos por ponto de efeito salino nulo, ponto de carga zero, delta pH, carga elétrica líquida superficial, densidade de carga superficial líquida, superfície específica, capacidade da dupla camada elétrica, potencial elétrico da superfície. Os dados mostraram predominância de cargas negativas em dois tipos de solo, influenciando diretamente sua capacidade de retenção de cátions e a dinâmica de nutrientes. Constatou-se que a matéria orgânica exerce papel crucial na modulação dessas propriedades, o que é essencial para o manejo sustentável.

Palavras-chave: Solos tropicais. Propriedades físico-químicas. Cargas elétricas coloidais. Interação solo-mineralogia-orgânicos.

ABSTRACT

Potiguar Basin is known for its geodiversity and natural resource potential. It is located in the Northeast region of Brazil and covers mesoregions of the states of Rio Grande do Norte and Ceará. Oxisols and Cambisols are the most common soil classes in the region. These soils have distinct characteristics, with Oxisols having low natural fertility and high porosity, and Cambisols being chemically rich, with a high 2:1 clay content and shallow depth. Furthermore, the semi-arid climate, predominant in the basin, negatively affects the physical, chemical, electrochemical and biological properties of the soil. Therefore, the study of the electrical charges of colloidal particles is fundamental for understanding various physicochemical phenomena in the semi-arid soils of the Potiguar Basin. Therefore, the objective of this work was to characterize the electrochemical attributes of the Oxisols and Cambisols located in this Basin, correlating them to the mineralogical composition, oxides, molecular relationships and organic matter of the soils. The work was developed in the Western mesoregion of the state of Rio Grande do Norte and the Jaguaribe mesoregion of the state of Ceará, both inserted in the Potiguar Basin. Nine soil profiles were selected, five of which were Oxisols and four of Cambisols. The determination of iron, aluminum and silicon oxides and the identification of Ki and Kr were carried out using atomic absorption spectrophotometry. The characterization of soil organic matter was carried out by determining total organic carbon, labile carbon and fractionation of humic substances. The electrochemical attributes were constituted by zero salt effect point, zero charge point, delta pH, net surface electrical charge, net surface charge density, specific surface, capacity of the electrical double layer, electrical potential of the surface. The data showed a predominance of negative charges in two types of soil, directly influencing their cation retention capacity and nutrient dynamics. It was found that organic matter is fundamental in modulating these properties, which is essential for sustainable management and

Keywords: Tropical soils. Physicochemical properties. Colloidal electric charges. Soil-mineral-organic interaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Localização dos perfis de Latossolos e Cambissolos distribuídos em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.....	26
Figura 2	–	Localização dos perfis de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.....	28
Figura 3	–	Difratometria de Raios-x da fração argila dos horizontes diagnósticos de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.....	38
Figura 4	–	Distribuição das variáveis.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Coordenadas geográficas, altitude, unidades geológicas e localização dos perfis de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.....	27
Tabela 2	– Classificação dos perfis de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.....	29
Tabela 3	– Atributos físicos de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.....	31
Tabela 4	– Atributos químicos de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.....	35
Tabela 5	– Teores de ferro, alumínio e silício e relação molecular Ki e Kr de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.....	39
Tabela 6	– Esquema de adição das soluções para determinação do ponto de efeito salino nulo.....	40
Tabela 7	– Carbono lábil, fracionamento químico da matéria orgânica do solo e sua relação com o carbono orgânico total em de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.....	45
Tabela 8	– Atributos eletroquímicos em Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.....	48
Tabela 9	– Matriz de cargas fatoriais.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
LQM	Laboratório de Química e Mineralogia do Solo
UFC	Universidade Federal do Ceará
LASAPSA	Laboratório de Análise de Solo e Água do Semiárido
LASAP	Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta do Semiárido
pH	Potencial Hidrogeniônico
MOS	Matéria Orgânica
ASE	Área Superficial Específica
H ⁺	Próton (Ácido)
OH ⁻	Hidroxila (Base)
Prof. ^a	Professora
Prof.	Professor
Dra.	Doutora
Dr.	Doutor
PENS	Ponto de Efeito Salino Nulo
CSL	Carga Superficial Líquida das Partículas
PCZ	Ponto de Carga Zero
KCl	Cloreto de Potássio
DCE	Dupla Camada Elétrica
Ki	Relação molecular entre Si e Al utilizada para estimar o grau de desenvolvimento do solo
Kr	Relação molecular entre Si e (Al + Fe) utilizada para estimar o grau de desenvolvimento do solo
Al	Alumínio
Fe	Ferro
Si	Silício
RN	Rio Grande do Norte
BSh	Clima Semiárido Quente
GPS	Global Positioning System
SIG	Sistema de Informação Geográfica
GeoInfo	Infraestrutura de Dados Espaciais da Embrapa

EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
G	Gramas
HCl	Ácido Clorídrico
ADA	Argila Dispersa em Água
CE	Condutividade Elétrica
Eq. CaCO_3	Equivalente em Carbonato de Cálcio
Na^+	Sódio
K^+	Potássio
Ca^{2+}	Cálcio
Mg^{2+}	Magnésio
H	Hidrogênio
NaOH	Hidróxido de Sódio

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔpH	Diferença entre o pH obtido em KCl e o determinado em água
Σ	Condutividade Elétrica Superficial
ψ^o	Potencial Elétrico do Solo
%	Porcentagem

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	15
REFERÊNCIAS.....	19
CAPÍTULO 1 - ATRIBUTOS ELETROQUÍMICOS E DA MATÉRIA ORGÂNICA EM CAMBISSOLOS E LATOSSOLOS DA BACIA POTIGUAR.....	21
RESUMO.....	21
ABSTRACT.....	23
1 INTRODUÇÃO.....	25
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA E SOLOS UTILIZADOS.....	26
2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	30
2.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....	34
2.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	37
2.5 DETERMINAÇÃO DO CARBONO LÁBIL E FRACIONAMENTO QUÍMICO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO.....	39
2.6 ATRIBUTOS ELETROQUÍMICOS.....	40
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
3.1 CARBONO LÁBIL E FRACIONAMENTO QUÍMICO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO.....	44
3.2 ATRIBUTOS ELETROQUÍMICOS.....	48
3.3 ESTUDO INTEGRADO DOS ATRIBUTOS AVALIADOS.....	52
4 CONCLUSÕES.....	56
REFERÊNCIAS.....	56

INTRODUÇÃO GERAL

A Bacia Potiguar, localizada na região Nordeste do Brasil e estendendo-se especificamente pelos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, é uma bacia sedimentar destacada pela sua geodiversidade e potencial de recursos naturais, notadamente petróleo e gás natural (CPRM, 2022). Na sua parte emersa, que corresponde a 13 % da área total, a estratigrafia indica camadas rochosas (estratos) de diferentes períodos, dividida em três grupos: Areia Branca, Apodi e Agulha, com suas diferentes formações (e.g. Pendência, Alagamar, Açu, Jandaíra, Ubarana e Barreiras), resultando em uma diversidade de sedimentos (Araripe; Feijó, 1994).

Em termos de ocorrência de solos na Bacia Potiguar, há um predomínio da classe dos Latossolos, mas com significativa ocorrência de outras classes como os Cambissolos, Argissolos e Neossolos (Jacomine *et al.*, 1971), resultando em um ambiente de grande diversidade de solos e, conseqüentemente, na ampla variação verificada em diversos atributos do solo, sejam os físicos, químicos e/ou mineralógicos. Como exemplo da citada variação, Rêgo (2022) apresenta valores de pH situados desde a faixa de acidez muito elevada até a faixa de elevada alcalinidade, quantidades de argila que proporcionaram a classificação dos solos quanto à textura desde a classe textural areia até a classe textural argila e uma assembleia mineralógica diversa, com ocorrência de minerais pouco intemperizados, como os de estrutura do tipo 2:1, bem como de minerais com maior grau de alteração, como os óxidos de ferro e alumínio.

Por se tratar de uma região com significativa importância agrícola, econômica e social para os estados do Rio Grande do Norte e do Ceará e que apresenta ampla diversidade de solos, recurso essencial à vida e que desempenha papel crucial no desenvolvimento e manutenção das civilizações, faz-se necessário conhecê-lo detalhadamente com o objetivo de manejá-los racionalmente. A caracterização dos atributos eletroquímicos dos solos da Bacia Potiguar é fundamental para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis, especialmente em uma região marcada pelo clima semiárido e pela escassez de recursos hídricos.

Muitos trabalhos foram desenvolvidos na região com o objetivo de estudar atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (Lopes *et al.*, 2022; Portela *et al.*, 2019; Sousa *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2019; Ensinas *et al.*, 2014; Ribeiro *et al.*, 2018; Arruda *et al.*, 2018; Rêgo, 2022), porém poucos dirigido à compreensão do perfil eletroquímico e influência da matéria orgânica sobre as cargas elétricas. No estudo dos solos, é fundamental compreender

os dois grupos distintos de cargas elétricas que influenciam suas propriedades eletroquímicas. O comportamento, por exemplo, de corretivos agrícolas e fertilizantes minerais e orgânicos, a dinâmica de elementos essenciais e benéficos ao crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como daqueles que são considerados como potencialmente tóxicos às plantas e ao ambiente, a interação de defensivos agrícolas, antibióticos e hormônios, processos de floculação e dispersão de argilas são em grande parte influenciados pelas cargas elétricas dos solos.

A presença de cargas elétricas no solo, sejam positivas ou negativas, está intimamente relacionada às partículas coloidais, tanto orgânicas quanto inorgânicas, principalmente à fração argila e à matéria orgânica do solo (MOS) (Alleoni, 2009). Existem basicamente dois tipos de cargas que podem se desenvolver na superfície dos minerais: as permanentes, que se desenvolvem a partir do momento em que há a cristalização dos minerais pelo resfriamento do magma ou precipitação a partir de solução supersaturadas, e as cargas variáveis ou dependentes de pH, que se desenvolvem por processos de protonação e deprotonação (dissociação) de hidroxilas (OH^-) e outros grupos funcionais (Essington, 2015).

As cargas permanentes, que ocorrem especificamente em filossilicatos, se originam a partir do processo denominado de substituição isomórfica, onde íons de silício (Si^{4+}) das lâminas tetraedrais, por exemplo, são substituídos por íons de alumínio (Al^{3+}) e/ou os Al^{3+} das lâminas octaedrais são substituídos por íons de magnésio (Mg^{2+}) (Essington, 2015). Como resultado do processo descrito, tem-se a formação de cargas negativas e sua manifestação na superfície dos minerais. Apesar de menos comuns, Essington (2015) relata que cargas positivas também podem surgir pela ocorrência de processos de substituição isomórfica na estrutura dos minerais, a exemplo da substituição de Mg^{2+} por Al^{3+} . As cargas dependentes de pH, comumente encontradas na MOS e em filossilicatos, óxidos, hidróxidos e óxi-hidróxidos metálicos como os de ferro e alumínio, muito comuns nos solos dos ambientes tropicais, se originam diretamente na superfície dos minerais e possuem forte relação com o ambiente de residência dos coloides, cuja carga superficial líquida (CSL) pode variar desde negativa, passando pela neutralidade dos coloides até a positiva (Essington, 2015).

A MOS desempenha papel crucial nos atributos eletroquímicos do solo, influenciando diretamente sua fertilidade, estrutura e capacidade de retenção de nutrientes, contribuindo significativamente para a capacidade de troca catiônica (CTC), permitindo maior retenção de elementos essenciais ao crescimento das plantas como o cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e o potássio (K), sendo que a sua decomposição libera ácidos orgânicos que influenciam o pH do

solo, afetando o ponto de carga zero (PCZ) e o equilíbrio de cargas no solo (BRADY; WEIL, 2016).

A influência da MOS nas cargas elétricas é ainda mais significativa nos solos dos ambientes tropicais em virtude da predominância de minerais como a caulinita, a gibbsita e a goethita, que naturalmente apresentam baixas quantidades de cargas elétricas. Raij (1969), estudando a capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em camadas superficiais e subsuperficiais de solos do estado de São Paulo, verificou que para alguns solos a contribuição da MOS para a sua CTC alcançou valores maiores do que 90 %.

Diversos métodos e conceitos foram propostos e vem sendo utilizados com o objetivo de estudar o comportamento eletroquímico do solo. Conforme Camargo e Alleoni (2006), o ponto de carga zero (PCZ), o ponto isoelétrico (PIE) e o ponto zero de titulação (PZT) são os três atributos mais frequentemente mencionados em trabalhos relacionados a fenômenos eletroquímicos em solos, porém com grande diversidade de termos relacionados a eles, dificultando a compreensão dos trabalhos publicados. Os autores ainda relatam que, especificamente para o PCZ, existe muita ambiguidade em torno do seu conceito quando aplicado ao sistema solo, em relação à sua aplicação em sistemas puros, como óxidos.

De acordo com Camargo e Alleoni (2006), o conceito mais amplamente utilizado para PCZ é o apresentado por Parks e Bruyn (1962), que o definem como o valor de pH no qual a carga superficial de um sistema reversível de dupla câmara é zero. Ao se referir ao PIE, Camargo e Alleoni (2006) citam que o atributo é muito citado em química coloidal e que na química do solo muitas vezes se confunde com o PCZ. Os autores apresentam diversas definições como a de Parks e Bruyn (1962), onde o PIE é o valor de pH no qual o somatório dos produtos das valências dos cátions por suas respectivas atividades na solução do solo é igual ao somatório dos produtos das valências dos ânions pelas respectivas atividades, sendo o ponto que corresponde à condição de solubilidade mínima de um sólido em equilíbrio com a solução, e a definição de Uehara e Gillman (1980), segundo a qual o PIE é o pH no qual a carga líquida no plano que separa a dupla camada difusa e a camada de Stern é zero. Para PZT, Camargo e Alleoni (2006), a partir dos trabalhos de Raij e Peech (1972), Laverdière e Weaver (1977), Parker *et al.* (1979) e Chaves e Trajano (1992), indicam que ele se refere ao pH ou faixa de valores de pH resultantes da reação de superfícies sólidas com variadas concentrações de um eletrólito indiferente, sem que sejam adicionados ácido ou base.

A distinção dos solos entre a ocorrência de carga superficial líquida (CSL) negativa, nula ou positiva pode ser obtida a partir da comparação do valor de pH do solo com o seu PCZ e também por meio do delta pH (ΔpH) obtido pela diferença entre o pH determinado em

solução salina e em água. Conforme Appel et. al. (2003), se o pH do solo for maior que a PCZ ($\text{pH} > \text{PCZ}$) a CSL será negativa, se o pH do solo for menor que o PCZ ($\text{pH} < \text{PCZ}$) a CSL será positiva e se o pH do solo for igual ao PCZ ($\text{pH} = \text{PCZ}$) a CSL será nula. Para o ΔpH , valores positivos indicam predominância de cargas positivas, valores negativos apontam predominância de cargas negativas e valor zero indica um balanço de carga nulo, ou seja, a quantidade de cargas negativas se iguala à quantidade de cargas positivas.

Outro conceito bastante utilizado para solos tropicais é o ponto de efeito salino nulo (PESN), termo proposto por Alleoni e Camargo (1993), identificando o valor de pH no qual duas ou mais curvas de titulação potenciométrica, obtidas a partir de soluções com diferentes forças iônicas, se cruzam. Apesar de haver divergências em termos conceituais entre o PCZ e o PESN (Parker *et al.*, 1979; Sposito, 1981; Sposito, 1984), Benites e Mendonça (1998) ressaltam que em solos que não apresentam argila de atividade alta, consonante ao ambiente tropical, o PESN tem seu valor próximo ao PCZ, tornando-se, portanto, um bom parâmetro eletroquímico. A vantagem na determinação do PESN existe porque a partir desse atributo diversos outros ligados ao perfil eletroquímico de determinado solo podem ser obtidos. Como exemplo, é possível obter as propriedades decorrentes da dupla camada elétrica (DCE), como também é possível determinar o valor do potencial elétrico na superfície dos colóides (ψ_0) e a densidade de carga superficial líquida (σ) (Alleoni; Camargo, 1994).

Dentre os constituintes do solo que afetam o PESN, evidenciam-se os aluminossilicatos, MOS, os materiais amorfos, os óxidos de ferro e alumínio (Raij, 1973). Os óxidos de ferro e alumínio possuem PESN mais elevados, ao passo que os aluminossilicatos e a MOS apresentam PESN mais baixos. Esses conhecimentos indicam que os solos mais intemperizados expressam maiores valores de PESN decorrentes de sua mineralogia mais oxidada (Alves, 2002), mas que podem ser atenuados pela presença da MOS.

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho caracterizar os atributos eletroquímicos, aspectos relacionados à matéria orgânica do solo e as suas relações em Latossolos e Cambissolos na Bacia Potiguar, buscando compreender a influência desses atributos na dinâmica e fertilidade dos solos da região, com implicações para o manejo e conservação ambiental.

REFERÊNCIAS

- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Ponto de efeito salino nulo: proposição de nomenclatura. **Boi. Inform. SBCS**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 5-11, 1993.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Ponto de efeito salino nulo de Latossolos ácricos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 18, p. 175-180, 1994.
- ALVES, M. C. **Solos e nutrição de plantas**. 2002. 86f. Tese (Doutorado em Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, 2002.
- APPEL, C.; MA, L. Q.; RHUE, R. D. ; KENNELLEY, E. Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. **Geoderma**, v. 113, n. 1/2, p. 77-93, 2003.
- ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 127-141, 1994.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. Pearson, 2016.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Alguns Métodos e Terminologias em Eletroquímica de Solos**. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/artigos/solos/eletroquimica/eletroquimica.htm>. Acesso em: 23 jul. 2024.
- CHAVES, L. H. G.; TRAJANO, M. D. M. Determinação do ponto de carga zero e das cargas elétricas do horizonte Ap de solos do estado da Paraíba. **Rev. bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 16, p. 415-418, 1992.
- ESSINGTON, M. E. **Soil and Water Chemistry: an integrative approach**. 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2015.
- JACOMINE, P. K. T. *et al.* **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte**. Rio de Janeiro: Divisão de Pesquisa Pedológica, 1971.
- LAVERDIÈRE, M. R.; WEAVER, R. M.. Charge Characteristics of Spodic Horizons. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 505-510, maio 1977. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100030014x>
- LOPES, T. C. S.; PORTELA, J. C.; BATISTA, R. O.; BANDEIRA, D. J. C.; LEITE, I. O.; RAMALHO, L. B.; GONDIM, J. E. F.; COSTA, J. D.; GURGEL, M. T.; SOUZA, C. M. M. Clay Fraction Mineralogy and Structural Soil Attributes of Two Soil Classes under the Semi-Arid Climate of Brazil. **Land**, [S.L.], v. 11, n. 12, p. 2192, 3 dez. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/land11122192>.
- BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 22, p. 215- 221, 1998.

PARKER, J. C.; ZELAZNY, L. W.; SAMPATH, S.; HARRIS, W. G.. A Critical Evaluation of the Extension of Zero Point of Charge (ZPC) Theory to Soil Systems. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 43, n. 4, p. 668-674, jul. 1979. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300040008x>.

PARKS, G. A.; BRUYN, P. L. The Zero Point of Charge of Oxides. **The Journal Of Physical Chemistry**, [S.L.], v. 66, n. 6, p. 967-973, jun. 1962. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/j100812a002>.

RAIJ, Bernardo van. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. **Bragantia**, Campinas, v. 28, n. 8, p. 85-112, mar. 1969.

RAIJ, Bernardo van; PEECH, Michael. Electrochemical Properties of Some Oxisols and Alfisols of the Tropics. **Soil Science Society of America Journal**, [S.L.], v. 36, n. 4, p. 587-593, jul. 1972. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1972.03615995003600040027x>.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do Solo**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1973.

RÊGO, L. G. S. **Formação de Pedons em Litossequência Cretáceo-quaternária na Bacia Potiguar**. 2022. 134f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022.

RIBEIRO, A. K. F. S. **Atributos de solos sob sistemas de uso agropecuários na mesorregião do oeste potiguar – RN**. 2016. 70f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e água) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, 2016.

SBCS, Viçosa, 2009. **Química e Mineralogia do Solo**. Parte II, 685p. (eds. Vander de Freitas Melo e Luiz Reynaldo Ferracclú Alleoni).

SPOSITO, Garrison. The Operational Definition of the Zero Point of Charge in Soils. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 292-297, mar. 1981. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500020013x>.

SPOSITO, G. **The surface chemistry of soils**. Oxford: Oxford University Press, 1984.

UEHARA, G.; GILLMAN, G. P. Charge Characteristics of Soils with Variable and Permanent Charge Minerals: i. theory. **Soil Science Society of America Journal**, [S.L.], v. 44, n. 2, p. 250-252, mar. 1980. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400020008x>.

CAPÍTULO 1: ATRIBUTOS ELETROQUÍMICOS E DA MATÉRIA ORGÂNICA EM CAMBISSOLOS E LATOSSOLOS DA BACIA POTIGUAR

RESUMO

Os Latossolos e Cambissolos são amplamente distribuídos na Bacia Potiguar, ocorrendo em diversas paisagens. Eles são essenciais para a agricultura local, com os Latossolos suportando culturas tropicais como cana-de-açúcar, milho e soja, ao passo que os Cambissolos são frequentemente utilizados para culturas de subsistência e pastagens. Este trabalho objetiva caracterizar os atributos eletroquímicos dos Latossolos e Cambissolos na Bacia Potiguar, correlacionando-os com a composição mineralógica, óxidos, relação molecular e matéria orgânica dos solos. Foram selecionados quatro perfis de solo, dois Latossolos e dois Cambissolos. A determinação dos óxidos de ferro, alumínio e silício foi realizada por meio de espectrofotometria de absorção atômica. A caracterização da matéria orgânica do solo deu-se por determinação do carbono orgânico total, carbono lábil e fracionamento das substâncias húmicas. Os atributos eletroquímicos foram constituídos por Ponto de efeito salino nulo, ponto de carga zero, delta pH, carga elétrica líquida superficial, densidade de carga superficial líquida, superfície específica, capacidade da dupla camada elétrica, potencial elétrico da superfície e relações moleculares K_i e K_r . Tanto nos Latossolos quanto nos Cambissolos, o ΔpH foi negativo; além disso, a Carga Superficial Líquida, a Capacidade de Dupla Camada Elétrica e o Potencial de Superfície também apresentaram valores negativos, refletindo uma predominância de cargas negativas nas amostras de solo. Nos Latossolos, o Ponto de Efeito Salino Nulo foi mais elevado no horizonte A em comparação ao horizonte B, evidenciando maior carga elétrica superficial nas partículas de solo do horizonte A. O Ponto de Carga Zero do horizonte B do perfil S1 foi semelhante ao do horizonte A, porém relativamente maior, sugerindo cargas elétricas comparáveis entre esses horizontes. A Densidade de Carga Superficial Líquida variou de 2,1 a 2,8 mmol_c kg⁻¹ e a Superfície Específica de 47,7 a 90,6 m² g⁻¹, com média de 67,5 m² g⁻¹, valores baixos atribuídos à composição mineralógica predominantemente de caulinita. Nos Cambissolos, os valores do Ponto de Efeito Salino Nulo e Ponto de Carga Zero foram maiores no horizonte Bi do perfil S8, sugerindo maior tendência de carga negativa no horizonte B em comparação ao horizonte A. A Carga Superficial Líquida foi mais alta no horizonte Ap do perfil S6 (-1,3), sugerindo maior capacidade de retenção de cátions. A Área Superficial Específica variou de 109,1 a 41,0 m² g⁻¹ nos horizontes superficiais, correlacionando-se ao aumento do Carbono Orgânico Total. A Dupla Camada Elétrica Difusa variou de -3,1 a -3,9 C dm⁻² V⁻¹, evidenciando capacidade de retenção de

cátions comparável entre os diferentes horizontes. A análise eletroquímica destacou a importância da matéria orgânica na modulação das cargas superficiais do solo, crucial para a disponibilidade de nutrientes e a conservação da fertilidade do solo.

Palavras-chave: Solos tropicais. Propriedades físico-químicas. Cargas elétricas coloidais. Interação solo-mineralogia-orgânicos.

CHAPTER 1: ELECTROCHEMICAL ATTRIBUTES AND ORGANIC MATTER IN CAMBISSOLOS AND LATOSSOLOS FROM THE BACIA POTIGUAR

ABSTRACT

Oxisols and Cambisols are widely distributed in the Potiguar Basin, occurring in different landscapes. They are essential to local agriculture, with Oxisols supporting tropical crops such as sugar cane, corn and soybeans, while Cambisols are often used for subsistence crops and pastures. This work aims to characterize the electrochemical attributes of Oxisols and Cambisols in the Potiguar Basin, correlating them to the mineralogical composition, oxides, molecular relationship and organic matter of the soils. Four soil profiles were selected, two Oxisols and two Cambisols. The determination of iron, aluminum and silicon oxides was carried out using atomic absorption spectrophotometry. The characterization of soil organic matter was carried out by determining total organic carbon, labile carbon and fractionation of humic substances. The electrochemical attributes were constituted by zero salt effect point, zero charge point, delta pH, net surface electrical charge, net surface charge density, specific surface, electrical double layer capacity, surface electrical potential and molecular relations K_i and K_r . In both Oxisols and Cambisols, ΔpH was negative; Furthermore, the Net Surface Charge, Electrical Double Layer Capacity and Surface Potential also presented negative values, reflecting a predominance of negative charges in the soil samples. In Oxisols, the Zero Saline Effect Point was higher in the A horizon compared to the B horizon, showing a greater surface electrical charge in the soil particles in the A horizon. The Zero Charge Point of horizon B of profile S1 was similar to that of horizon A, but relatively higher, suggesting comparable electrical charges between these horizons. The Net Surface Charge Density ranged from 2.1 to 2.8 mmolc kg⁻¹ and the Specific Surface from 47.7 to 90.6 m² g⁻¹, with an average of 67.5 m² g⁻¹, low values attributed to the mineralogical composition predominantly of kaolinite. In Cambisols, the values of the Zero Saline Effect Point and Zero Load Point were higher in the Bi horizon of profile S8, suggesting a greater tendency for negative charge in the B horizon compared to the A horizon. The Net Surface Load was higher in the Ap horizon of profile S6 (-1.3), suggesting greater cation retention capacity. The Specific Surface Area varied from 109.1 to 41.0 m² g⁻¹ in the superficial horizons, correlating with the increase in Total Organic Carbon. The Diffuse Electric Double Layer varied from -3.1 to -3.9 C dm⁻² V⁻¹, showing comparable cation retention capacity between the different horizons. The electrochemical analysis highlighted the importance of organic matter in modulating soil surface charges, crucial for nutrient availability and conservation of soil fertility.

Keywords: Tropical soils. Physicochemical properties. Colloidal electrical charges. Soil-mineralogy-organic interaction.

1 INTRODUÇÃO

A Bacia Potiguar é uma bacia sedimentar posicionada na região nordeste do Brasil, abrangendo a Chapada do Apodi, que está situada na divisa dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, região semiárida, em uma extensão motivada pela litologia carbonática da Formação Jandaíra (CPRM, 2022). Levantamentos de solos publicados apontam os Cambissolos como a classe dominante, mas existem outras classes em termos de grau de pedogênese em curtas distâncias, como, por exemplo, os Latossolos (Santos *et al.*, 2018).

Os Latossolos e Cambissolos são solos comuns e amplamente distribuídos na Bacia Potiguar, podendo ser encontrados em uma variedade de paisagens, incluindo planícies, colinas e encostas. Isso os torna acessíveis e representativos da região. Ambos os tipos de solo têm importância significativa para a agricultura local. Os Latossolos, por exemplo, são conhecidos por sua capacidade de suportar culturas tropicais, como cana-de-açúcar, milho e soja. Os Cambissolos, por sua vez, são frequentemente utilizados para culturas de subsistência e pastagens.

Além disso, o semiárido abrange regiões onde a ocorrência é baixa e irregular, o que influencia diretamente as propriedades físicas, químicas, eletroquímicas e biológicas dos solos. Devido às temperaturas elevadas e à ausência de práticas agrícolas e de manejo adequadas, esses solos apresentam características específicas que limitam a formação de argila e coloides.

Portanto, a maioria das reações eletroquímicas que influenciam na fertilidade, adsorção, dessorção de íons, dispersão e floculação de coloides ocorre na superfície dos coloides. Portanto, o estudo das cargas elétricas das partículas coloidais ou coloides é de fundamental importância para o entendimento de diversos fenômenos físico-químicos que ocorrem nos solos do semiárido. Na região semiárida, são comuns pesquisas de campo para avaliar atributos do solo (Lopes *et al.*, 2022; Portela *et al.*, 2019; Sousa *et al.*, 2018), sendo escassos, porém, os estudos sobre atributos eletroquímicos do solo, inclusive de Latossolos e Cambissolos.

Considerando que os atributos dos solos afetam diretamente as reações eletroquímicas que controlam a movimentação de íons e a disponibilidade de nutrientes, objetivou-se com o presente trabalho caracterizar os atributos eletroquímicos, aspectos relacionados à matéria orgânica do solo e as suas relações em Latossolos e Cambissolos na Bacia Potiguar.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA E SOLOS UTILIZADOS

O trabalho foi desenvolvido a partir de amostras de solos coletadas em nove perfis de solos estudados por Rêgo (2022), que estão localizados na área de abrangência da parte emersa da Bacia Potiguar em municípios da região noroeste do estado do Rio Grande do Norte e da região nordeste do estado do Ceará (Figura 1 e Tabela 1). A escolha dos perfis estudados foi determinada considerando os solos mais representativos da região, em virtude da importância agrícola, da relevância para conservação e susceptibilidade à erosão e degradação do solo.

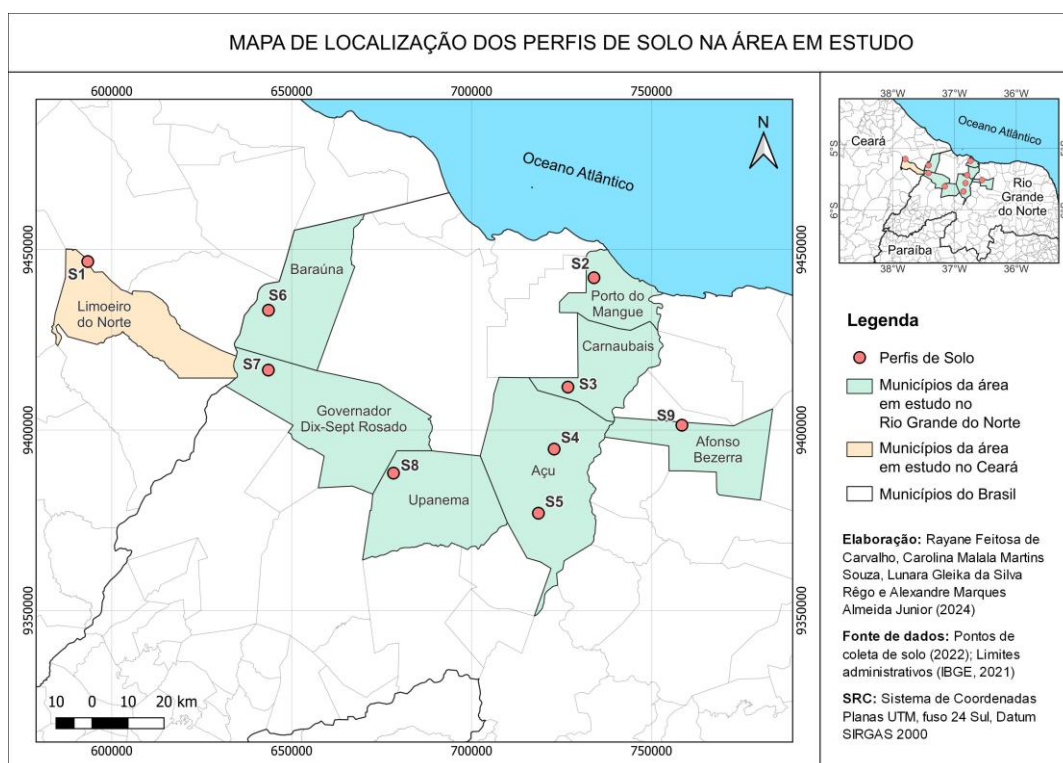


Figura 1. Localização dos perfis de Latossolos e Cambissolos distribuídos em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar. Fonte: Autor (2024).

Os nove perfis utilizados para coleta das amostras estão localizados em quatro unidades geológicas distintas: Formação Faceira (Perfil S1), Formação Barreiras (Perfil S2), Depósitos Aluvionares Antigos (Perfis S3, S4 e S5) e Formação Jandaíra (Perfis S6, S7, S8 e S9) (Tabela 1 e Figura 2). Do ponto de vista da litologia, a Formação Faceira é formada predominantemente por rochas sedimentares (arenito e o conglomerado), a Formação Barreiras por argilito arenoso e arenito conglomerático, os Depósitos Aluvionares Antigos por

cascalho, argila e areia, e a Formação Jandaíra por rochas carbonáticas sobrepostas aos arenitos da Formação Açu (Vital, 2014).

As regiões apresentadas são caracterizadas por uma paisagem adaptada ao clima semiárido. Em áreas como Faceira, em Limoeiro do Norte (CE), a vegetação é composta principalmente por arbustos e árvores de pequeno porte. Na região de Barreiras, em Porto do Mangue (RN), além da Caatinga arbustiva, há vegetação halófila em áreas salinizadas. Nos depósitos aluvianos antigos, encontrados em Carnaubais e Assú (RN), predominam espécies xerófitas típicas de solos de baixa fertilidade. Nas áreas da Formação Jandaíra, presentes em municípios como Baraúna, Governador Dix-Sept Rosado, Upanema e Afonso Bezerra (RN), a vegetação é dominada por cactáceas, arbustos espinhosos e árvores como o juazeiro e o umbuzeiro, todas adaptadas às condições áridas da Caatinga.

Tabela 1. Coordenadas geográficas, altitude, unidades geológicas e localização dos perfis de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.

Perfil	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Unidades Geológicas	Município (Estado)
S1	5° 0'19,79" S	38° 9'29,93" W	85	Faceira	Limoeiro do Norte (CE)
S2	5°02'35,4" S	36°53'20,4" W	88	Barreiras	Porto do Mangue (RN)
S3	5°19'02,4" S	36°57'12,2" W	76	Depósitos aluvionares antigos	Carnaubais (RN)
S4	5°28'21,56" S	36°59'14,82" W	73	Depósitos aluvionares antigos	Assú (RN)
S5	5°38'0,47" S	37°1'34,93" W	103	Depósitos aluvionares antigos	Assú (RN)
S6	5°7'36,36" S	37°42'17,55" W	113	Jandaíra	Baraúna (RN)
S7	5°16'36,10" S	37°42'17,55" W	114	Jandaíra	Gov. Dix-Sept Rosado (RN)
S8	5°32'02,8" S	37°23'25,2" W	93	Jandaíra	Upanema (RN)

S9

5°24'42" S

36°40' 2" W

49

Jandaíra

Afonso Bezerra
(RN)**Fonte:** Adaptada de Rêgo (2022).

O mapa de localização (Figura 1) foi elaborado considerando o Levantamento Exploratório do RN (1971) e CE (1973), obtido a partir da Infraestrutura de Dados Espaciais da Embrapa (GeoInfo) (Embrapa, 2018). Também foi considerada a malha cartográfica dos municípios e dos estados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020). Para a elaboração do mapa geológico (Figura 2), foram utilizadas as bases cartográficas da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), para o Rio Grande do Norte (RN) e Ceará (CE), dos anos de 2006 e 2020 (SGB, 2020). Os produtos cartográficos foram elaborados a partir do Sistema de Informação Geográfica (SIG), versão 3.16, QGIS Hannover®.

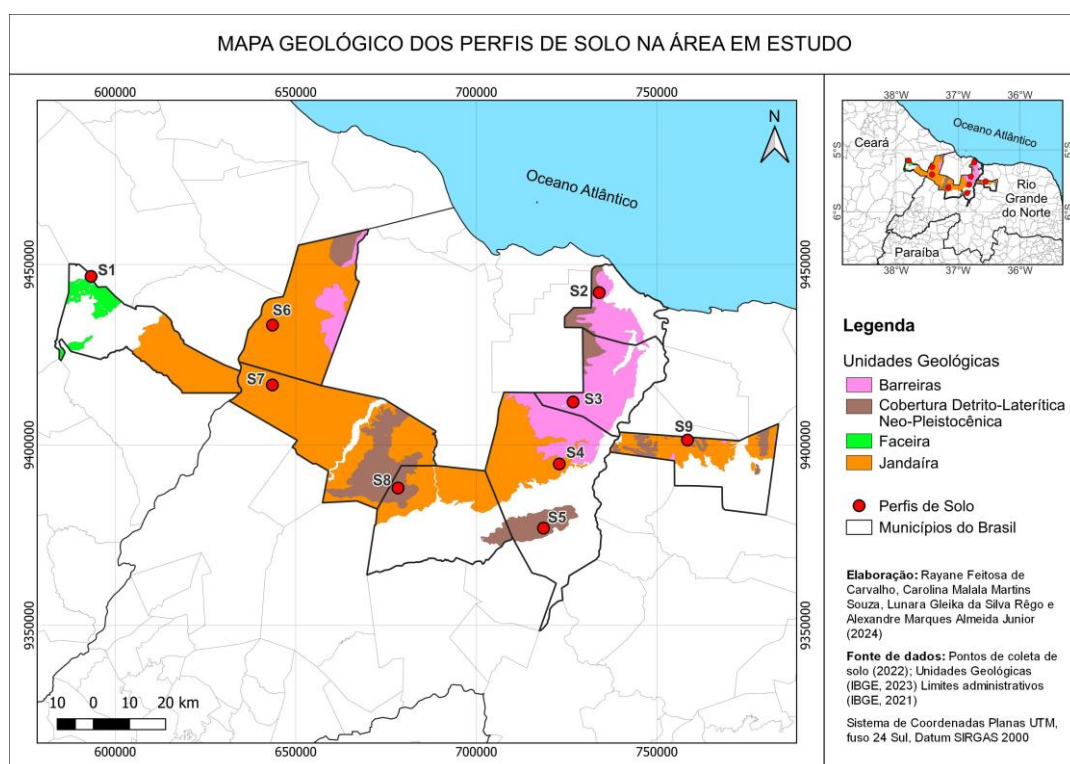


Figura 2. Localização dos perfis de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar. Fonte: Autora (2024).

Dos nove perfis de solos selecionados, cinco deles foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.* 2018) como Latossolos e quatro pertencentes à classe dos Cambissolos (Tabela 2), situados em quatro unidades geológicas distintas (Tabela 1 e Figura 2).

A classe dos Latossolos apresenta a presença de animais em seu entorno, o que contribui para o aumento do nível de matéria orgânica. A composição de resíduos orgânicos, como éter e restos de vegetação consumidos pelos animais, é fundamental para enriquecer esses solos.

Tabela 2. Classificação dos perfis de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.

Perfil	Classificação	Símbolo da classe de solo
S1	LATOSSOLO AMARELO Distrófico psamítico, A moderado, textura média-arenosa, atividade da fração argila baixa	LAd
S2	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico argissólico, textura média-arenosa, A moderado, atividade da fração argila baixa	LVd
S3	LATOSSOLO AMARELO Eutrófico argissólico, textura média-arenosa, A antrópico, atividade da fração argila baixa	LAe
S4	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico argissólico, textura média-arenosa, A moderado, atividade da fração argila alta	LVAe
S5	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico argissólico, textura média-argilosa, A antrópico, atividade da fração argila baixa	LVAe
S6	CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico lítico, textura argilosa, A antrópico	CXve
S7	CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico, textura argilosa, A moderado	CXve
S8	CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático típico, textura argilosa, A moderado, eutrófico, atividade da fração argila alta	CXk
S9	CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico lítico, textura média-argilosa, A moderado	CXve

Fonte: Adaptada de Rêgo (2022).

A caracterização física, química e mineralógica das amostras utilizadas no presente estudo foi realizada por Rêgo (2022), utilizando como base os métodos apresentados por Teixeira *et al.* (2017), exceto para o carbono orgânico total (COT), determinado a partir do método descrito por Yeomans; Bremner (1988).

2.7 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Conforme Rêgo (2022), as análises físicas foram realizadas em triplicata utilizando-se a terra fina seca ao ar (TFSA), de acordo com os métodos descritos por Teixeira *et al.* (2017). A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta com agitação mecânica lenta (tipo Wagner a 50 rotações por minuto) por 16 horas a partir de 20 g de TSFA, utilizando como dispersante químico o hexametáfosfato de sódio e água destilada. A areia (2 a 0,05 mm) foi separada por peneiramento e o silte (0,5 a 0,002 mm) e a argila (<0,002 mm) por sedimentação diferencial. Após a separação, as amostras de areia e argila foram secas em estufa a 105 °C para posterior determinação das quantidades e o silte obtido pela diferença em relação às demais frações.

Por se tratar de solos com alta propensão à ocorrência de quantidades elevadas de carbonatos e com o objetivo de eliminar seu efeito cimentante, foi efetuado o teste de efervescência utilizando-se uma solução de ácido clorídrico com concentração 1 mol L⁻¹; para as amostras que reagiram ao teste, foram feitas sucessivas lavagens com ácido clorídrico com concentração 0,274 mol L⁻¹ até cessar por completo a efervescência das amostras.

Para determinação da argila dispersa em água (ADA), empregou-se o método da pipeta, utilizando apenas água destilada para dispersão, isto é, sem o uso de qualquer dispersante químico. A densidade do solo foi obtida pelo método do torrão parafinado para os solos com formação de estrutura em bloco e com textura argilosa. Por sua vez, o método da proveta foi utilizado para amostras de solo com textura arenosa. Com base nas análises físicas, foi calculada a relação silte/argila e obtida a classificação textural do solo.

Os resultados obtidos por Rêgo (2022) estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Atributos físicos de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.

Horizonte	Argila	AG ⁽¹⁾	AF ⁽²⁾	AT ⁽³⁾	Silte	Silte/Argila	ADA ⁽⁴⁾	Classe Textural	Ds ⁽⁵⁾
	g kg ⁻¹				g kg ⁻¹		kg dm ⁻³		
Latossolos									
S1 - LAd									
A	49	622	316	938	13	0,3	45	Areia	1,49
AB	142	568	266	834	24	0,2	98	Areia franca	1,50
Bw1	167	463	315	778	55	0,3	93	Franco arenosa	1,61
Bw2	243	443	259	702	55	0,2	104	Franco argilo arenosa	1,66
S2 - LVd									
A	84	450	452	902	14	0,2	78	Areia	1,62
AB	139	432	420	852	9	0,1	106	Areia franca	1,71
Bw	174	429	375	804	22	0,1	133	Franco arenosa	1,67
S3 - LAe									
Ap	172	347	414	761	67	0,4	163	Franco arenosa	1,66
AB	146	378	419	797	57	0,4	121	Franco arenosa	1,56

BA	130	379	437	816	54	0,4	137	Franco arenosa	1,70
Bw1	301	328	308	636	63	0,2	221	Franco argilo arenosa	1,61
Bw2	330	330	272	602	68	0,2	220	Franco argilo arenosa	1,57

S4 - LVAe

A	57	363	524	887	56	0,1	43	Areia	1,73
AB	112	351	490	841	47	0,4	97	Areia franca	1,71
BA	184	308	460	768	48	0,3	146	Franco arenosa	1,53
Bw	196	320	444	764	40	0,2	165	Franco arenosa	1,62

S5 - LVAe

Ap	77	670	224	894	29	0,4	58	Areia	1,66
AB	186	631	154	785	29	0,2	174	Franco arenosa	1,67
BA	210	590	154	744	46	0,2	185	Franco argilo arenosa	1,73
Bw1	213	594	145	739	48	0,2	15	Franco argilo arenosa	1,49
Bw2	314	481	123	604	82	0,3	6	Franco argilo arenosa	1,45
Bw3	294	516	129	645	61	0,2	13	Franco argilo arenosa	1,40

Cambissolos

S6 - CXve

Ap	375	276	169	445	180	0,5	178	Franco argilosa	1,45
AB	404	211	142	353	243	0,6	315	Argila	1,42
Bi/R	366	219	153	372	262	0,7	283	Franco argilosa	1,33
S7 - CXve									
A	527	67	62	129	344	0,7	351	Argila	1,48
Bi1	577	72	65	137	286	0,5	380	Argila	1,60
Bi2	546	57	68	125	329	0,6	419	Argila	1,53
S8 - CXk									
A	313	393	193	586	101	0,3	270	Franco argilo arenosa	1,48
Bi1	399	316	155	471	130	0,3	327	Argila arenosa	1,42
Bi2	359	356	90	446	195	0,5	323	Franco argilosa	1,46
S9 - CXve									
A	232	306	385	691	77	0,3	200	Franco argilo arenosa	1,55
Ck1	238	310	396	706	56	0,2	184	Franco argilo arenosa	1,58
Bi	212	304	411	715	73	0,3	146	Franco argilo arenosa	1,65
Ck2	290	316	310	626	84	0,3	245	Franco argilo arenosa	1,67

Nota: ¹Areia Grossa; ²Areia Fina; ³Areia Total; ⁴Argila Dispersa em Água, ⁵Densidade do solo.

Fonte: Adaptada de Rêgo (2022).

2.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Conforme Rêgo (2022), as análises químicas foram realizadas conforme a metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017), sendo avaliados: pH em água e em KCl 1 mol L⁻¹ na proporção de 1:2,5 (solo:água/solução); condutividade elétrica (CE); equivalente de carbonato de cálcio (Eq. CaCO₃); cátions trocáveis sódio (Na⁺), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺), sendo Ca²⁺ e Mg²⁺ extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e mensurados por espectrofotometria de absorção atômica e o Na⁺ e K⁺ com extrator Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama; acidez potencial (H+Al) extraída com acetato de cálcio 1 mol L⁻¹ a pH 7,0 e determinada por meio de titulação volumétrica com solução de NaOH 0,025 mol L⁻¹; acidez trocável (Al³⁺) extraída com KCl 1 mol L⁻¹ a pH 7,0 e determinada por meio de titulação volumétrica com solução de NaOH 0,025 mol L⁻¹; o fósforo (P) disponível foi extraído por Mehlich-1, sendo a determinação dos teores de P por colorimetria; o carbono orgânico total (COT) foi determinado pela titulação do dicromato de potássio 0,167 mol L⁻¹ remanescente com sulfato ferroso amoniacal 0,2 mol L⁻¹ após o processo de oxidação por via úmida (Yeomans; Bremner, 1988). Posteriormente, foram obtidos os índices soma de bases (S); capacidade de troca catiônica efetiva (t); capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T); saturação por bases (V); saturação por alumínio trocável (m) e porcentagem de sódio trocável (PST). Os resultados obtidos por Rêgo (2022) estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Atributos químicos de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.

Horizonte	pH Kcl	pH H ₂ O	Δ pH	CE dS m ⁻¹	COT g kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	(H+Al)	V	m	PST	Eq. CaCO ₃ g kg ⁻¹
Latossolos																
S1 – Lad																
A	4,1	5,2	-1,1	0,4	3,4	5	0	0,1	0,3	0,3	0,2	1,1	39	18	0	0
AB	3,9	4,8	-0,9	0,4	3,3	4	0	0,1	0,2	0,2	0,9	1,4	24	68	0	0
Bw1	3,9	4,4	-0,5	0,4	3,4	3,6	0	0	0,1	0,1	1,2	1,6	15	81	0	0
Bw2	3,9	4,7	-0,8	0,5	2,6	3,5	0	0	0,2	0,2	1,4	1,6	21	77	0	0
S2 – LVd																
A	3,8	5,2	-1,4	0,5	6,7	5,6	0	0	0,2	0,4	0,4	1,5	30	38	0	0
AB	3,8	4,8	-1	0,4	3,7	5,7	0	0	0,2	0,4	0,9	1,8	25	61	0	0
Bw	3,8	4,6	-0,8	0,5	3,3	5,5	0	0	0,2	0,3	0,8	1,7	24	60	0	0
S3 – Lae																
Ap	6,1	6,3	-0,2	0,2	10,5	8,7	0	0,2	2,8	1,1	0	1,1	79	0	0	0
AB	5	5,8	-0,8	0,9	6,8	5,8	0	0,1	1,5	0,7	0	1,3	64	0	0	0
BA	4,7	5,6	-0,7	0,7	5,8	4,9	0	0,1	1,4	0,6	0	1,3	62	0	0	0
Bw1	5,2	5,7	-0,5	0,2	5,7	5	0	0,1	2,1	1,2	0	1,2	74	0	0	0
Bw2	5,4	6	-0,6	0,1	4,5	4,8	0	0,2	1,9	1,3	0	0,9	80	0	0	0
S4 – LVAe																
A	6,8	6,9	-0,1	0,1	7,4	6,4	0	0,2	3,4	0,7	0	0,8	85	0	0	0
AB	5,0	6,5	-1,5	0,6	4,5	5	0	0,4	2,5	1	0	1,1	79	0	0	0
BA	4,5	6,2	-1,7	0,5	3,9	5	0	0,3	3,4	1,5	0	1,3	80	0	0	0
Bw	4,3	6	-1,7	0,5	2,6	5,2	0	0,3	3,1	1,8	0	1,6	77	0	0	0
S5 – LVAe																
Ap	5,2	6	-0,8	0,1	15,9	7,6	0	0,1	1,5	0,6	0	1,4	62	0	0	0

AB	4,5	5,8	-1,3	0,5	3,3	5,6	0	0	0,5	0,6	0	1	53	0	0	0
BA	5,3	6,4	-1,1	0,5	2,3	5,6	0	0	0,7	0,6	0	0,8	61	0	0	0
Bw1	5,9	6,7	-0,8	0,5	1,9	5,9	0	0	0,8	0,5	0	0,8	61	0	0	0
Bw2	4,6	6,1	-1,5	0,6	1,4	4,8	0	0	0,7	0,8	0	1,3	55	0	0	0
Bw3	5,2	5,6	-0,4	0,5	1,7	4,7	0	0	0,5	0,8	0	1	56	0	0	0
Cambissolos																
S6 – CXve																
Ap	6,8	7,2	-0,4	0,1	21,3	6,5	0,3	0,8	11	2	0	1,8	89	0	2	21,46
AB	5,9	7	-1,1	0,1	9,7	4,4	0	0,1	9,8	2,3	0	2,2	85	0	0	14,29
Bi/R	5,6	6,3	-0,7	0,3	5,9	4,1	0,1	0,1	10,9	1,5	0	2,2	85	0	0	26,89
S7 – CXve																
A	6,2	7,1	-0,9	0,9	17,9	4,2	0,4	0,1	20,5	1,8	0	1,5	91	0	2	8,78
Bi1	6	7,2	-1,2	0,6	7,4	4,3	0,1	0,5	19,5	3,2	0	2	91	0	0	5,77
Bi2	5,6	6,9	-1,3	0,1	6,5	4,1	0,1	0,2	20,9	3	0	2,1	91	0	0	5,25
S8 – CXk																
A	5,8	6,2	-0,4	0,8	7,3	4,6	0,1	0,2	11,7	2,9	0	1,5	91	0	0	36,7
Bi1	6,9	7	-0,1	0,9	2,4	4,6	0	0,2	21,8	2,5	0	0,5	98	0	0	50,25
Bi2	7,5	6,3	1,2	1,2	1,9	3,2	0,1	0	21,6	1,8	0	0,7	97	0	1	234,4
S9 – Cxve																
A	7,4	7,9	-0,5	0,2	15,2	7,3	0,1	0,6	13,5	3,9	0	0,3	99	0	1	10,13
Ck1	7,6	8,3	-0,7	0,2	5,6	5,4	0,1	0,2	12	1,9	0	0	100	0	1	17,52
Bi	7,5	8,3	-0,8	0,9	5	4,6	0	0,2	10,1	2,3	0	0	100	0	0	30,13
Ck2	7,4	8,4	-1	1	5	6,9	0,1	0,2	13,8	3,2	0	0,1	99	0	1	45,52

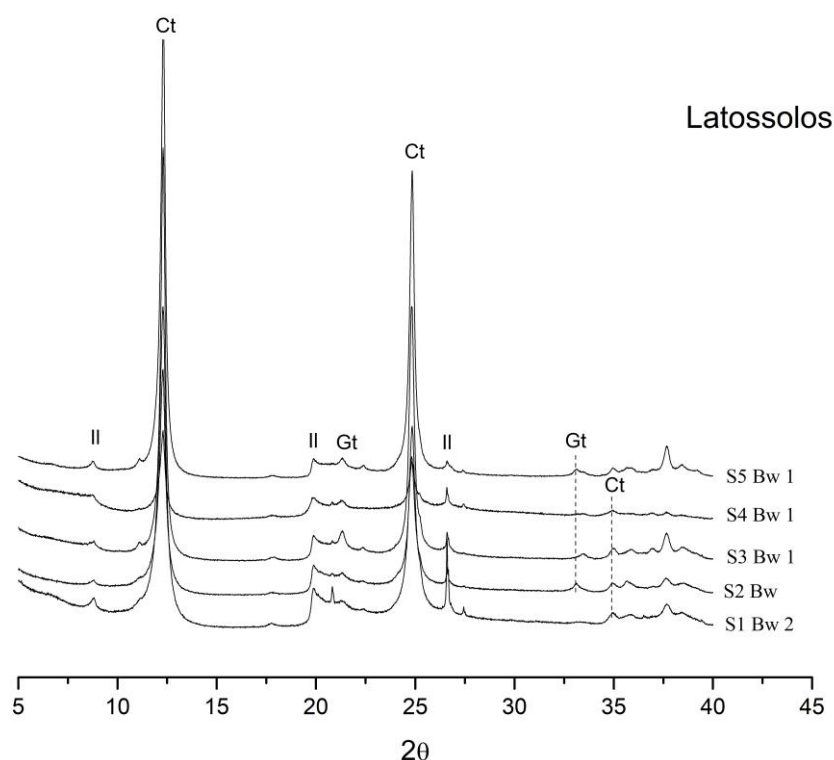
Nota: CE: condutividade elétrica; COT: carbono orgânico total; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; Eq. De CaCO₃: equivalente de carbonato de cálcio.

Fonte: Adaptada de Rêgo (2022).

2.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A caracterização mineralógica das amostras foi realizada na fração argila dos horizontes diagnósticos. Para separar a fração argila, as amostras foram submetidas ao processo de agitação mecânica em agitador tipo Wagner a 50 rotações por minuto por 16 horas utilizando como dispersante químico o hexametáfosfato de sódio. Após a separação e secagem, as argilas foram pulverizadas em almofariz de ágata e classificadas com uma peneira granulométrica de inox (212 μm e 65 mesh).

A identificação dos minerais presentes nas amostras foi realizada por meio da técnica de difratometria de raios-X (DRX), sendo utilizado difratômetro de raios-X da marca Bruker, modelo D-2 Phaser, com fenda de 0,2 mm, abertura de detector Lynxeye em $3,02^\circ$, duas tetas de $3-40^\circ$ campo de varredura, tempo de quatro segundos e incremento de $0,0141228^\circ$. Foi feita a suspensão água/argila sobre a lâmina de vidro em orientação natural de planos; secagem natural, sem esfregaço. A identificação dos picos foi realizada com o auxílio do programa Raio X v. 1.0.0.37, e os minerais foram identificados de acordo com Chen (1977). Os resultados obtidos por Rêgo (2022) estão apresentados na figura 3.



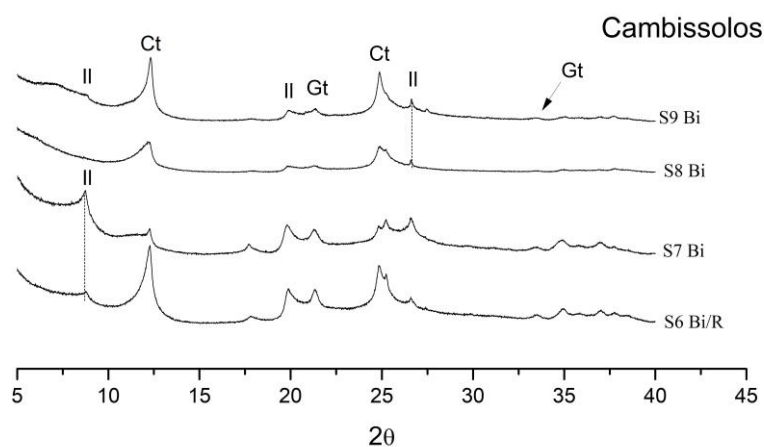


Figura 31. Difractometria de Raios-x da fração argila dos horizontes diagnósticos de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar. Fonte: Adaptada de Rêgo (2022).

a) Quantificação dos óxidos de ferro, alumínio e silício e das relações moleculares Ki e Kr

A quantificação dos óxidos de ferro (Fe), alumínio (Al) e silício (Si) presentes nos minerais secundários do solo foi obtida a partir da extração denominada de ataque sulfúrico conforme a metodologia proposta por Vettori (1969). Para a quantificação do Fe cristalino (Fed) e do amorfo (Feo), foi aplicado o método descrito por Mehra; Jackson (1960). Todas as determinações dos elementos citados foram realizadas por meio da técnica de espectrofotometria de absorção atômica, sendo que para o elemento Fe as análises foram executadas por Rêgo (2022) com extração no Laboratório de Química e Mineralogia da Ufersa e determinação no Instituto Nacional do Semiárido (INSA), ao passo que para o Al e Si as extrações foram realizadas no Laboratório de Química e Mineralogia da Ufersa e as determinações no Laboratório de Química do Solo do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará (UFC).

De posse dos resultados, procedeu-se ao cálculo para obtenção dos valores das relações moleculares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Ki), $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ (Kr), conforme metodologia adotada por Texeira *et al.* (2017).

Tabela 5. Teores de ferro, alumínio e silício e relação molecular Ki e Kr de Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.

Horizonte	Fes ^{1,4}	Fed ^{2,4}	Feo ^{3,4}	Fed/Feo ⁴	Als ¹	Sis ¹	Ki	Kr
g kg ⁻¹								
Latossolos								
S1 – Lad								
A	4,86	1,66	2,49	0,67	2,00	1,96	1,70	0,65
Bw1	25,44	22,59	1,40	16,14	4,25	4,84	1,93	0,41
S4 – LVAe								
A	9,35	8,02	1,12	7,15	2,96	2,86	1,94	0,55
Bw	21,62	17,28	4,01	4,31	4,37	5,04	1,96	0,47
Cambissolos								
S6 – Cxve								
Ap	46,22	45,75	0,77	59,36	1,39	3,14	2,84	0,17
Bi/R	51,92	51,48	0,74	69,98	2,24	6,20	2,61	0,32
S8 – CXk								
A	39,34	36,69	2,79	13,15	1,42	3,78	4,52	0,18
Bi1	52,22	51,86	1,78	29,18	2,22	6,87	5,26	0,32

Nota: ¹teor de Fe, Al e Si extraídos pelo ataque sulfúrico e expresso em termos de óxidos; ²teor de Fe extraído com solução de ditionito citrato-bicarbonato de sódio; ³teor de Fe extraído com solução de oxalato ácido de amônio; ⁴dados obtidos por Rêgo (2022). Fonte: Adaptado de Rêgo (2022).

2.5 DETERMINAÇÃO DO CARBONO LÁBIL E FRACIONAMENTO QUÍMICO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Para determinação do carbono lábil (CL), foi adotado o procedimento proposto por Blair *et al.* (1995) utilizando permanganato de potássio (KMnO₄) na concentração 0,033 mol L⁻¹, oxalato de sódio (Na₂C₂O₄) na concentração 0,05 mol L⁻¹ e padronização do KMnO₄ por titulação.

O fracionamento das substâncias húmicas (SB) foi realizado conforme a técnica da solubilidade diferencial, em meio ácido ou alcalino das frações correspondentes. Assim, foram separados os ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (HUM), de acordo com os conceitos de frações húmicas estabelecidos pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (IHSS). Para aferir o carbono (C) nas frações húmicas, foi utilizada a metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017). As determinações foram realizadas nos horizontes A e B.

2.6 ATRIBUTOS ELETROQUÍMICOS

Baseando-se nos resultados obtidos nas determinações anteriormente descritas e nas descrições e classificações dos perfis detalhadamente estudados no trabalho de Rêgo (2022), foram selecionados dois perfis de Latossolos e dois perfis de Cambissolos para prosseguir com a determinação dos atributos eletroquímicos. A escolha se deu em virtude das semelhanças entre os dados observados e a otimização de recursos e tempo. Para as análises dos atributos eletroquímicos, foram utilizados os perfis S1 (LAd) e S4 (LVa) pertencentes à classe dos Latossolos e os perfis S6 (CXve) e S8 (CXk) pertencentes à classe dos Cambissolos. As determinações foram realizadas nos horizontes A e B.

a) Ponto de efeito salino nulo (PESN)

Conforme Teixeira *et al.* (2017), foram reservados 45 béqueres contendo 4,0 g de solo em três séries contendo 15 béqueres em cada uma delas. Para uma mesma série de 15 béqueres, foi adicionada uma solução de cloreto de sódio (NaCl) com determinada concentração. Nos béqueres da primeira série, foi adicionada uma solução de NaCl na concentração de 0,2 mol L⁻¹. Para os béqueres da segunda série, foi adicionada uma solução de NaCl na concentração de 0,02 mol L⁻¹. Por fim, para os béqueres da terceira série, foi adicionada uma solução de NaCl na concentração de 0,004 mol L⁻¹. Para as três séries de 15 béqueres cada, foram adicionadas soluções de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH) conforme a tabela 6.

Tabela 6. Esquema de adição das soluções para determinação do ponto de efeito salino nulo

Frasco	Solução	Volume da solução	Volume de água
		mL	
1	HCl 0,01 mol L ⁻¹	3,0	7,0

2		2,5	7,5
3		2,0	8,0
4		1,5	8,5
5		1,0	9,0
6		0,5	9,5
7		0,25	9,75
8	-	-	10,0
9		0,25	9,75
10		0,5	9,5
11		1,0	9,0
12	NaOH 0,1 mol L ⁻¹	1,5	8,5
13		2,0	8,0
14		2,5	7,5
15		3,0	7,0

Fonte: A

Após adição das soluções, os béqueres foram deixados em repouso durante 24 h, agitando-os ocasionalmente para atingir o equilíbrio. Em seguida, foram deixados em equilíbrio durante 24h, agitando ocasionalmente para atingir o equilíbrio. Após esse período, foi realizada a determinação do pH do sobrenadante para cada amostra. Para o tratamento dos dados obtidos, foi utilizado o programa computacional PESN para Windows versão 1.0, de acordo com Alves *et al.* (2002).

b) Ponto de carga zero (PCZ)

O PCZ foi estimado a partir dos valores de pH em água (H₂O) e em solução de KCl 1 mol L⁻¹, conforme a equação $PCZ = 2 \text{ pH}_{KCl} - \text{pH}_{H_2O}$, proposta por Keng e Uehara (1974).

c) Delta pH (ΔpH)

O ΔpH foi calculado a partir dos valores de pH em água (H_2O) e em solução de KCl 1 mol L^{-1} , conforme a equação $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, apresentada por Keng; Uehara (1974).

d) Carga superficial líquida (CSL)

A CSL foi calculada a partir da equação $\text{CSL} = \text{PESN} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, apresentada por Appel (*et al.*, 2003).

e) Densidade de carga superficial líquida (σ)

Foi determinada aproveitando o gráfico de titulação potenciométrica gerado por ocasião da determinação do PESN na concentração de $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl (Pérez *et al.*, 1993).

f) Superfície específica do solo (SE)

A SE foi determinada gravimetricamente, pela retenção do etilenoglicol mono-etil éter (EGME), conforme o método descrito por Teixeira *et al.* (2017). No fundo de um dessecador, foram adicionadas duas placas de Petri, uma contendo 40 mL de EGME e outra contendo aproximadamente 200 g CaCl_2 . Pesou-se 1,0000 g de solo em cadinho de alumínio, com tampa e previamente tarado, e levado para a estufa a 105°C até peso constante. Após 24 h, os cadinhos tampados foram transferidos para um dessecador até seu resfriamento para posterior pesagem. Foram adicionados 3 mL de EGME na amostra de modo a formar uma “pasta”. Após a adição do EGME, os cadinhos foram levados ao dessecador para receber a aplicação do vácuo de 0,250 mmHg por 45 minutos. Após esse período, os cadinhos foram pesados e recolocados de forma imediata ao dessecador. Após o primeiro vácuo, as amostras foram pesadas novamente até obtenção de peso constante. Os cálculos foram executados utilizando-se as equações abaixo:

$$X = [N - A] - (B - A)$$

$$Y = \left[\frac{X}{(B - A)} \right]$$

$$SS = \left(\frac{Y}{3,71 * 10^{-4}} \right)$$

Em que:

X – quantidade de EGME retida na amostra, em g.

N – massa do cadinho mais amostra de solo com EGME após atingir peso constante após secagem, em g.

A – tara do cadinho, em g.

B – massa do cadinho + amostra seca a 110 °C, em g.

Y – quantidade de EGME retida em 1 g de amostra, em g.

SS – superfície específica, em m² g⁻¹.

g) Capacidade da dupla camada elétrica (CDCE)

A CDCE foi determinada a partir da razão entre a densidade de carga superficial líquida (σ) e a superfície específica (SE) do solo (Barreto, 1986), conforme a equação CDCE = $(\sigma(\text{PESN} + 1) / \text{SE}) \cdot 163,56$.

h) Potencial elétrico de superfície (ψ^o)

Foi calculado utilizando-se a equação de Nernst simplificada e proposta por Raij; Peech (1972):

$$\psi^o = 59,1 (\text{PENS} - \text{pH}).$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARBONO LÁBIL E FRACIONAMENTO QUÍMICO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Os resultados de CL estão apresentados na tabela 7. Dentre os perfis de Latossolos estudados, o CL variou de $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$, observado no horizonte Bw do perfil S5-LVAe, a $5,6 \text{ mg kg}^{-1}$ no horizonte Ap do mesmo solo. Para os perfis de Latossolos estudados, o CL foi em torno de 2,8 vezes superior nos horizontes superficiais (A e Ap) quando comparados com os horizontes subsuperficiais (Bw e Bw1), sendo que a maior diferença ocorreu no perfil S5-LVAe (28 vezes) e a menor diferença ocorreu no perfil S1-LAd (1,22 vezes). Ao comparar os horizontes superficiais dos Latossolos, verificou-se que o CL variou de $1,1 \text{ mg kg}^{-1}$, observado no horizonte A do perfil S1-LAd, a $5,6 \text{ mg kg}^{-1}$ no horizonte Ap do S5-LVAe. Dos cinco Latossolos avaliados, dois deles (S3-LAe e S5-LVAe) apresentam horizontes superficiais do tipo Ap e os demais horizontes superficiais (S1-LAd, S2-LVd e S4-LVAe) do tipo A, com os horizontes Ap apresentando teores de CL superiores aos verificados nos horizontes A. Para os horizontes subsuperficiais, os teores de CL variaram de $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$, encontrado no horizonte Bw do perfil S5-LVAe, a $1,6 \text{ mg kg}^{-1}$ no horizonte Bw1 do perfil S3-LAe.

Para os perfis de Cambissolos avaliados, o CL variou de $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$, observado no horizonte Bi2 do perfil S8-CXk, a $6,4 \text{ mg kg}^{-1}$ no horizonte A do perfil S7-CXve. Assim como observado para os Latossolos, os teores de CL nos Cambissolos foram superiores nos horizontes superficiais (A e Ap) quando comparados aos horizontes subsuperficiais (Bi/R, Bi1, Bi2 e Bi). Para os Cambissolos, essa diferença entre os horizontes foi maior do que a verificada para os Latossolos, em torno de 4,17 vezes, sendo que a maior diferença ocorreu no perfil S8-CXk (4,4 vezes) e a menor diferença ocorreu no perfil S7-CXve (4,00 vezes). Comparando os horizontes superficiais dos Cambissolos, verificou-se que o CL variou de $2,2 \text{ mg kg}^{-1}$, observado no horizonte A do perfil S8-CXk, a $6,4 \text{ mg kg}^{-1}$ no horizonte A do S7-CXve. Para os horizontes subsuperficiais, os teores de CL variaram de $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$, encontrado no horizonte Bi2 do perfil S8-CXk, a $1,6 \text{ mg kg}^{-1}$ no horizonte Bi1 do perfil S7-CXve.

Os resultados que mostram o aumento do carbono lábil (CL) nos horizontes superficiais são particularmente relevantes para o manejo sustentável dos solos em ambientes semiáridos. CL, sendo a fração mais ativa da matéria orgânica, desempenha papel fundamental na fertilidade do solo e na ciclagem de nutrientes, essenciais para práticas

A	2,4	1,7 (30 %)	1,8 (32 %)	2,1 (38 %)	5,6	7,4	75,7
Bw	1,4	0,4 (21 %)	0,6 (32 %)	0,9 (47 %)	1,9	2,6	73,1
S5 - LVAe							
Ap	5,6	3,2 (28 %)	3,3 (29 %)	4,9 (43 %)	11,4	15,9	71,7
Bw1	0,2	0,5 (36 %)	0,6 (43 %)	0,3 (21 %)	1,4	1,9	73,7
Cambissolos							
S6 - CXve							
Ap	6,1	4,3 (27 %)	4,7 (29 %)	7,1 (44 %)	16,1	21,3	75,6
Bi/R	1,4	1,3 (30 %)	1,2 (27 %)	1,9 (43 %)	4,4	5,9	74,6
S7 - CXve							
A	6,4	4,3 (30 %)	4,8 (34 %)	5,1 (36 %)	14,2	17,9	79,3
Bi1	1,6	1,8 (32 %)	1,7 (30 %)	2,2 (38 %)	5,7	7,4	79,3
S8 - CXk							
A	2,2	1,8 (32 %)	1,6 (29 %)	2,2 (39 %)	5,6	7,2	77,8
Bi2	0,5	0,6 (43 %)	0,3 (21 %)	0,5 (36 %)	1,4	2,4	58,3
S9 - CXve							
A	5,3	3,1 (29 %)	3,3 (31 %)	4,3 (40 %)	10,7	15,2	70,4
Bi	1,3	1,0 (28 %)	0,9 (25 %)	1,7 (47 %)	3,6	5,2	69,2

Nota: Carbono Lábil (CL); Carbono orgânico da fração ácido fúlvico (CAF); Carbono orgânico da fração ácido húmico (CAH); Carbono orgânico da fração humina (CHU); Carbono orgânico das substâncias húmicas (CSH) que corresponde ao somatório do CAF + CAH + CHU; Carbono orgânico total (COT); Contribuição relativa do CSH para o COT (CSH/COT). ¹Dados obtidos por Rêgo (2022). ²Contribuição relativa do CAF, CAH e CHU para o CSH. Fonte: Adaptado de Rêgo (2022).

Para os Latossolos, o teor de CAF variou de 0,4 g kg⁻¹, encontrado no horizonte Bw1 do perfil S4-LVAe, a 1,8 g kg⁻¹ no horizonte Ap do perfil S3-LAe, o de CAH de 0,6 g kg⁻¹ nos horizontes Bw1 e Bw nos perfis S4-LVAe e S5-LVAe, respectivamente, a 3,3 g kg⁻¹ no horizonte Ap do perfil S5-LVAe, e para o CHU a variação foi de 0,3 a 4,9 g kg⁻¹, valores encontrados no perfil S5-LVAe. A partir da soma dos teores de CAF, CAH e CHU, foi calculado o teor de carbono orgânico total das substâncias húmicas (CSH) para os Latossolos, conforme tabela 7. Como apresentado, o CSH variou de 1,4 a 11,4 g kg⁻¹, sendo que os dois

valores foram encontrados no perfil S5-LVAe. Semelhantemente ao observado para os teores de CAF, CAH e CHU, os horizontes superficiais dos Latossolos apresentaram teores mais elevados de CSH quando comparados aos teores observados nos horizontes subsuperficiais.

Em relação aos teores de CAF nos Cambissolos, verificou-se que os teores variaram de $0,6 \text{ g kg}^{-1}$, encontrado no horizonte Bi2 do perfil S8-CXk, a $4,3 \text{ g kg}^{-1}$ nos horizontes Ap do perfil S3-LAe e A do perfil S7-CXve. Para os teores de CAH, a variação observada foi de $0,6 \text{ g kg}^{-1}$ no horizonte Bi2 do perfil S8-CXk a $4,8 \text{ g kg}^{-1}$ no horizonte A do perfil S7-CXve. Para CHU, os teores variaram entre $0,5 \text{ g kg}^{-1}$, no horizonte Bi2 do perfil S8-CXk, e $7,1 \text{ g kg}^{-1}$ no horizonte Ap do perfil S6-CXve. Assim como feito para o Latossolos, o teor de CSH dos Cambissolos foi calculado a partir da soma dos teores de CAF, CAH e CHU, que também estão apresentados na tabela 7. Para os Cambissolos, o CSH variou de 1,4 a $16,1 \text{ g kg}^{-1}$, sendo que o valor mais baixo foi encontrado no horizonte Bi2 do perfil S8-CXk e o mais alto no horizonte Ap do perfil S6-CXve. Semelhantemente ao observado para os teores de CAF, CAH e CHU, como ocorreu também para os Latossolos, os horizontes superficiais dos Cambissolos apresentaram teores mais elevados de CSH quando comparados aos teores observados nos horizontes subsuperficiais.

Em termos de contribuição relativa de cada uma das frações para o CHS nos Latossolos, o CHU apresentou o maior nível de contribuição, em torno de 43,3 %, seguido do CAH com 30,5 % e, por fim, o CAF, com uma contribuição de 26,2 %. Para os Cambissolos, por sua vez, houve mudança na ordem de contribuição das frações para o CSH. Apesar do CHU apresentar a maior contribuição para o CSH com 41 %, assim como ocorreu para os Latossolos, o CAF apresentou a maior segunda contribuição para o CSH, com 31 %, seguido do CAH com 28 %.

De acordo com o observado na tabela 7, o CSH contribuiu com mais de 70 % em relação ao teor de COT em todos os horizontes analisados na classe dos Latossolos e em oito dos dez horizontes avaliados nos Cambissolos. Para os Latossolos, essa contribuição variou de 71,7 a 78,8 %, respectivamente, nos horizontes Ap do perfil S5-LVAe e Bw1 do perfil S2-LVd. Nos Cambissolos, por sua vez, a variação observada foi de 58,3 %, no horizonte Bi2 do perfil S8-CXk, a 79,3 % nos dois horizontes (A e Bi1) do perfil S7-CXve.

A presença de ruminantes nas pastagens dos Latossolos resultou em um incremento significativo na quantidade de SH, representando aproximadamente 75% do COT. Embora os Latossolos sejam geralmente reconhecidos por sua baixa fertilidade, a introdução de resíduos vegetais e animais contribuiu para esse aumento, como confirmado por Solto *et al.* (2005). Segundo Chan *et al.* (2001), o CL contribui com cerca de 29 a 39% do COT, ao passo que as

SH representam aproximadamente 80% do COT, exercendo influência substancial sobre as propriedades físicas e químicas do solo e, conseqüentemente, sobre sua fertilidade (Silva *et al.*, 2011).

O fracionamento químico da matéria orgânica revelou que a maior presença de ácidos húmicos e fúlvicos nos solos da Bacia Potiguar desempenha papel crucial na retenção de nutrientes e na melhoria da estrutura do solo. Os ácidos húmicos, com sua alta capacidade de troca catiônica, contribuem significativamente para o manejo sustentável, permitindo a retenção e liberação gradual de nutrientes essenciais como cálcio, magnésio e potássio, reduzindo, dessa forma, a necessidade de adubação química constante. Por outro lado, os ácidos fúlvicos, altamente solúveis, aumentam a mobilidade dos nutrientes e facilitam sua absorção pelas plantas, promovendo maior eficiência no uso de fertilizantes. Além disso, a presença de humina, com sua capacidade de estabilizar o carbono no solo, sugere potencial para práticas de sequestro de carbono, essenciais para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Assim, o fracionamento químico da matéria orgânica não só melhora a fertilidade e a resiliência dos solos, como também contribui diretamente para a sustentabilidade agrícola na região.

3.2 ATRIBUTOS ELETROQUÍMICOS

Os resultados das avaliações dos atributos eletroquímicos dos Latossolos e Cambissolos estudados estão apresentados na tabela 8. Tanto nos horizontes superficiais quanto nos subsuperficiais dos Latossolos e Cambissolos estudados, os valores de pH em KCl foram superiores aos valores de pH determinados em água, resultando, assim, em valores de ΔpH negativos que variaram de -0,1 nos horizontes A do perfil S4-LVAe e Bi1 do perfil S8-CXk a -1,7 no horizonte Bw do perfil S4-LVAe.

Tabela 8. Atributos eletroquímicos em Latossolos e Cambissolos distribuídos em quatro unidades geológicas distintas em municípios dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará abrangidos pela Bacia Potiguar.

Horizonte	ΔpH^1	PESN^2	PCZ^3	CSL^4	σ^5 $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$	ASE^6 $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$	CDCE^7 $\text{C dm}^{-2} \text{ V}^{-1}$	ψ^{o8} mV
Latossolos								
S1 - LAd								
A	-1,1	4,1	3	-1,1	-2,6	48,8	3,7	-65,1

Bw1	-0,5	3,9	3,2	-0,5	-2,4	47,7	1,7	-29,6
S4 - LVAe								
A	-0,1	5,5	6,7	-1,4	-2,8	90,6	4,9	-82,7
Bw	-1,7	4,8	2,6	-1,2	-2,1	82,7	0,8	-70,9
Cambissolos								
S6 - CXve								
Ap	-0,4	5,9	6,4	-1,3	-3,4	109,1	9,8	-76,8
Bi/R	-0,7	5,5	4,9	-0,8	-4,3	52,2	3,9	-47,3
S8 - CXk								
A	-0,4	5,6	5,4	-0,6	-4,3	94,8	4,5	-35,5
Bi1	-0,1	6,7	6,8	-0,3	-5,6	41,0	1,3	-17,7

Nota: ⁽¹⁾ pH KCl – pH H₂O; ⁽²⁾ Ponto de efeito salino nulo; ⁽³⁾ Ponto de carga zero; ⁽⁴⁾ Carga superficial líquida; ⁽⁵⁾ Densidade de carga superficial; ⁽⁶⁾ Área superficial específica; ⁽⁷⁾ Capacidade da dupla camada elétrica; ⁽⁸⁾ Potencial elétrico de superfície. Fonte: A autora (2024).

Considerando todos os horizontes dos Latossolos e Cambissolos avaliados, os valores do PESN variaram de 3,9 no horizonte Bw1 do perfil S1-LAd a 6,7 no horizonte Bi1 do perfil S8-CXk. Para os Latossolos, essa variação foi de 3,9 no horizonte Bw1 do perfil S1-LAd a 5,5 no horizonte A do perfil S4-LVAe, sendo que para os dois perfis os valores do PESN foram superiores nos horizontes superficiais quando comparado aos horizontes subsuperficiais, 4,1 e 3,9 para os horizontes A e Bw1 do perfil S1-LAd e 5,5 e 4,8 para os horizontes A e Bw do perfil S4-LVAe. Nos Cambissolos, a variação do PESN foi de 5,5 a 6,7, observados nos horizontes Bi/R do perfil S6-CXve e Bi1 do perfil S8-CXk, respectivamente. Diferentemente do observado para os Latossolos, um dos perfis de Cambissolo apresentou um PESN maior no horizonte subsuperficial. No perfil S6-CXve, o PESN no horizonte superficial Ap (5,9) foi maior do que o valor obtido no horizonte subsuperficial Bi/R (5,5), semelhante ao obtido para os Latossolos. Para o perfil S8-CXk, o horizonte superficial A apresentou menor valor de PESN (5,6) do que o encontrado para o horizonte Bi1 (6,7). Os maiores valores de PENS e PCZ no horizonte Bi do perfil S8-CXk indicam que a superfície das partículas do citado horizonte apresentam maior tendência a ser carregadas negativamente em comparação com o horizonte A. A relação entre os valores de PENS e a composição mineralógica da

fração argila em horizontes subsuperficiais tem sido observada em vários estudos. A adição de diferentes concentrações de NaCl permite simular diferentes forças iônicas no solo, o que afeta as propriedades de adsorção e a carga superficial das partículas de solo.

Em solos mais oxídicos, como observado por Maeda *et al.* (2015), o valor de PENS tende a se aproximar do PCZ do mineral predominante na fração argila. No presente estudo, observou-se uma relação análoga entre PCZ e PENS nos Latossolos, embora de maneira inversa ao trabalho de Dixon; Weed (1989), que destacaram o mineral caulinita com PCZ de 6,0. Essa observação está alinhada com Santos (2013), que indicou que a presença de caulinita pode diminuir o PCZ, exercendo efeito depressor sobre esse atributo eletroquímico.

Nos Cambissolos, a presença de MOS, devido à sua alta densidade de cargas negativas, tende a reduzir o PESN do solo, estabelecendo relação inversa com este atributo eletroquímico (Alves, 2002). Ambas as classes de solos mostraram quantidades elevadas de óxidos de ferro, cujos PCZs, segundo Schwertmann; Taylor (1989), variam entre sete e nove. No entanto, devido à presença do mineral caulinita e MOS, seus PCZs foram reduzidos, conforme destacado por Cruz (2006), que afirmou que em solos tropicais muito intemperizados a MOS tende a diminuir o PCZ devido à dissociação de seus grupos carboxílicos em pHs mais baixos do que os óxidos de ferro e alumínio. A pesquisa de Pérez *et al.* (1993) com Latossolos Vermelho-Amarelos encontrou um valor de PCZ de 3,4 para amostras do horizonte A. Os óxidos de ferro, com PESN variando de 6,7 a 9,0 (WHITE e ZELAZNY, 1986), indicam que quanto maior for a quantidade desses óxidos no solo maior será o resultado do PESN. Contudo, a presença de MOS e do mineral caulinita leva a uma relação inversa, conforme observado neste estudo, no qual o PENS variou de 3,9 a 6,7, refletindo o equilíbrio entre cargas positivas e negativas no solo.

Reforçando o caráter eletronegativo em todos os horizontes e solos estudados, já apontado pelo ΔpH , a CSL variou de -0,3 no horizonte Bi1 do perfil S8 – CXk a -1,4 no horizonte A do perfil S4-LVAe. Para a CDCE, que equivale ao poder tampão dos solos, os valores variaram de 08 a 9,8 $C\ dm^{-2}\ V^{-1}$ observados nos horizontes Bw do perfil S4-LVAe e Ap do perfil S6-CXve, respectivamente. Essa condição pode influenciar significativamente a retenção de nutrientes e a capacidade de troca de íons do solo. Observou-se que em alguns horizontes houve redução do pH em comparação a outros, o que pode sugerir processos como decomposição da matéria orgânica ou lixiviação de bases, contribuindo para a acidificação em profundidades específicas do solo. Segundo Coscione *et al.* (2005), a CDCE é um parâmetro eletroquímico crucial na diferenciação de classes de Latossolos, destacando-se pela sua capacidade discriminatória superior em relação a outros atributos do solo, como PCZ, Ki e Kr.

A diminuição da CDCE sugere menor grau de intemperismo do solo. A presença de MOS é considerada o principal fator contribuinte para o aumento da CDCE nos horizontes superficiais dos solos, um fenômeno observado de forma consistente por Pérez (1990), corroborando o considerável efeito tampão da matéria orgânica nos solos.

Assim como observado para o ΔpH e a CSL, o ψ^o apresentou valores negativos que variaram de -17,7 mV, no horizonte Bi1 do S8-CXk, a -82,7 mV no horizonte A do perfil S4 – LVAe. Ainda guardando estreita relação com o comportamento ΔpH e a CSL, os valores de ψ^o se tornam cada vez menos, sugerindo comportamento que tende a valores de carga líquida próximos de zero. O ψ^o na superfície tende a ser mais elevado do que nas camadas mais profundas, por influência do teor de MOS, que intervém no pH do solo, distanciando-o dos valores de PESN. Os valores singulares de PESN observados tanto na superfície quanto na subsuperfície se aproximam do pH natural dos solos, conforme Alleoni (1994).

Um comportamento que se repete para a maioria dos atributos avaliados é a proximidade dos valores apresentados entre os horizontes A e Bw1 do perfil S1-LAd quando comparado ao outro perfil de Latossolo (S4-LVAe) e até mesmo quando observados os resultados dos Cambissolos S6-CXve e S8-CXk. Esse comportamento é um indicativo de um perfil de solo mais homogêneo e que pode ser confirmado ao se observar os dados relacionados aos atributos físicos e químicos e mineralógicos.

A SE variou de 47,7 a 90,6 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$, com média de 67,5 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ para os Latossolos e de 41,0 a 109,1 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ nos Cambissolos, sendo que para estes solos a média foi de 74,3 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$, superior aos Latossolos. A SE, um importante parâmetro quantitativo, é predominantemente influenciada pela presença de caulinita na fração argila em muitos solos tropicais, variando de 5 a 100 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ e correlacionando-se positivamente com sua CTC (Dixon, 2023). Isso justifica a variação da SE observada nos Latossolos do presente estudo, variando de 48 a 90 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$. Resultados semelhantes foram observados nos Cambissolos, como verificado por Moberg *et al.* (2023), para quem o mineral illita contribuiu para uma variação de 48,1 a 138,9 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$.

Os resultados eletroquímicos observados, como o PESN e PCZ, têm implicações diretas no manejo agrícola sustentável na Bacia Potiguar. Solos com PCZ abaixo do pH natural, que evidencia predominância de cargas negativas, podem favorecer a retenção de cátions essenciais para as plantas, como K^+ e Ca^{2+} . Isso sugere que práticas de manejo visando à correção do pH, como a calagem, são essenciais para maximizar a disponibilidade de nutrientes e reduzir a lixiviação. Além disso, a baixa CTC observada em alguns perfis de Latossolos reforça a necessidade de aumentar o aporte de matéria orgânica, a fim de melhorar a retenção de nutrientes e a eficiência do uso de fertilizantes. A manutenção de uma superfície

específica elevada e DCE também pode ser promovida por meio de técnicas como o uso de compostos orgânicos e coberturas vegetais, que favorecem a resiliência do solo em condições semiáridas.

Os Latossolos, amplamente intemperizados, apresentaram predominância de cargas negativas em suas partículas, com baixa CTC, conforme observado nas análises de PENS. Esses solos, tipicamente pobres em nutrientes, são caracterizados pela presença de minerais como a caulinita e óxidos de ferro e alumínio, que contribuem para a baixa retenção de nutrientes essenciais, como cálcio, magnésio e potássio. Os resultados mostram que, devido à sua baixa fertilidade natural, os Latossolos demandam intervenções agrícolas mais intensivas, incluindo a adição de fertilizantes e corretivos, como calcário, para manter a produtividade. Esses fatores corroboram estudos anteriores que destacam a necessidade de manejo intensivo para culturas em Latossolos, principalmente em regiões semiáridas, como apontado por Portela *et al.* (2019).

Por outro lado, os Cambissolos, menos intemperizados e com maior presença de minerais primários, como os feldspatos, apresentaram PENS e CTC significativamente maiores do que os Latossolos, o que sugere maior capacidade de retenção de cátions e, portanto, fertilidade intrínseca mais elevada. Isso se reflete na maior superfície específica e na capacidade de manter maior quantidade de matéria orgânica, o que é evidenciado pelos resultados de Carbono Orgânico Total (COT) e pela maior retenção de nutrientes nas camadas superficiais dos Cambissolos. Esses solos são, portanto, mais adequados para culturas de subsistência e pastagens, conforme verificado no perfil S6, que apresentou alta retenção de cátions nos horizontes superficiais. Esses resultados confirmam o potencial agrícola dos Cambissolos para sustentar cultivos com menor necessidade de insumos externos, como adubos químicos, em consonância com o estudo de Rêgo (2022).

Além disso, a menor suscetibilidade à degradação dos Cambissolos, em comparação aos Latossolos, pode ser atribuída à maior presença de minerais intemperizados e à capacidade de armazenar maior quantidade de matéria orgânica. No entanto, os resultados indicam que em áreas onde há remoção da vegetação nativa e práticas agrícolas inadequadas os Cambissolos podem sofrer compactação e perda de matéria orgânica, o que impacta negativamente sua estrutura e fertilidade.

3.3 ESTUDO INTEGRADO DOS ATRIBUTOS AVALIADOS

A Análise de Componentes Principais (ACP) permite identificar os principais atributos, reduzir a dimensionalidade dos dados e obter uma visualização mais clara e simplificada das relações entre as variáveis (Filho *et al.*, 2023). Os diagramas de projeções de vetores indicaram que os fatores 1, 2, 3 e 4 exerceram maior influência na distinção dos ambientes estudados, conforme mostrado na Figura 4 (A e B), com variância total acumulada de 91,20 %.

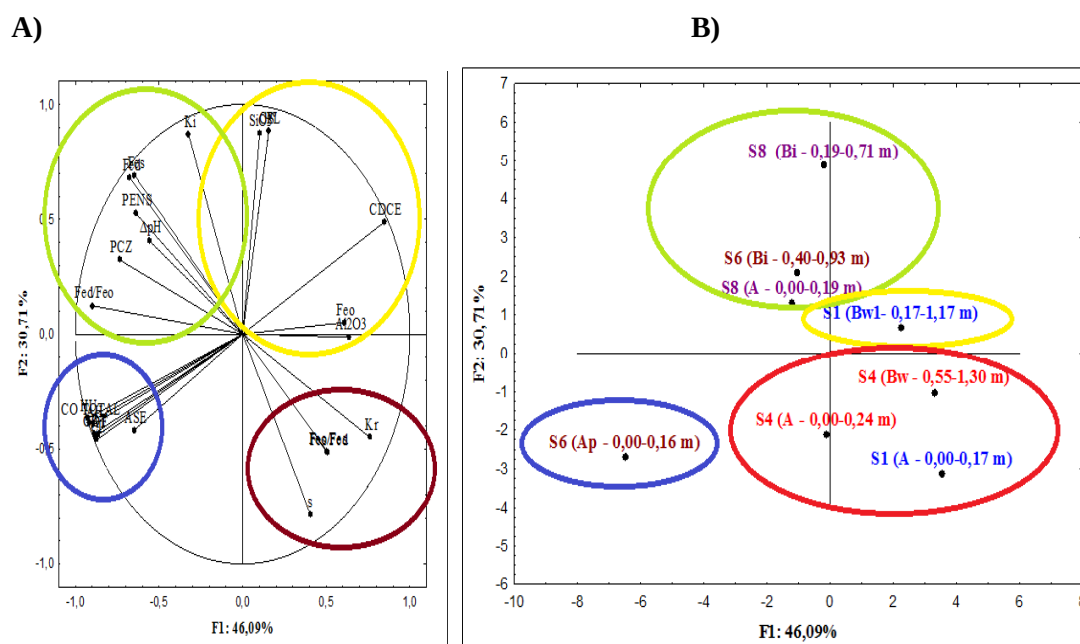


Figura 42. Distribuição das variáveis.

Nota: Círculo A (correlação) e Círculo B (distribuição da nuvem de pontos representando a relação entre os fatores 1, 2 e 3). Fonte: A autora (2024).

O círculo verde representa as variáveis similares dos perfis S8 (horizonte A e Bi) e S6 (horizonte Bi), incluindo Ki, PENS, PCZ ΔpH , Fe_s , Fed/Feo, e Fed. O círculo amarelo destaca o perfil S1 (horizonte Bw1), sendo as variáveis análogas SiO_3 , Al_2O_3 , CSL, CDCE, Feo, Al_2O_3 .

O círculo vermelho apresenta as variáveis singulares como Fe_2O_3 /Fed, Kr e σ dos horizontes superficiais e subsuperficiais do perfil S4 e do horizonte A do perfil S1. O círculo azul corresponde ao horizonte superficial do perfil S6 (Cambissolos) com expressividade nas variáveis COT, CL, CSH (carbono orgânico das SH), ASE e ψ° .

A análise fatorial (AF) é uma técnica utilizada para identificar um pequeno número de fatores que representem o comportamento de um conjunto de variáveis originais (Hongyu, 2018), corroborando com a visualização dos atributos mais importantes sendo apresentados na tabela 9.

Os fatores 1, 2, 3 e 4 foram selecionados pelo critério de autovalores acima de 1, responsáveis por explicar uma Variância Total Acumulada dos dados de 85,71 %.

O fator 1 é o mais influente na diferenciação dos perfis, explicando 46,09 % da Variância Total e é composto pelas variáveis Fed/Feo, ASE, CDCE, ψ° , CL, AF, AH, HU, CSH, e COT. O fator 2, representando 30,70 % da Variância Total, é representado pelas variáveis Fes, Fed, SiO_3 , Ki, Kr, PENS, CSL, ψ° , Σ . O fator 3, responsável por 8,91 % da Variância Total, corresponde às variáveis Al_2O_3 , SiO_3 , Ki, ASE e PCZ. O fator 4, explicando 6,18 % Variância Total, corresponde às variáveis Feo, ΔpH e PCZ (Tabela 9)1.

O carbono lábil e os compostos húmicos (exibidos no fator 1) têm forte relação com a fertilidade do solo porque esses elementos alteram a capacidade do solo de reter nutrientes e melhorar sua estrutura física, o que tem impacto direto na sustentabilidade agrícola.

De forma semelhante, a existência de variáveis como Fed/Feo e ASE indica o grau de intemperismo do solo, o que afeta sua estrutura e, portanto, sua gestão. A retenção de nutrientes pode ser menor em solos mais intemperizados, onde há mais ferro cristalino. Nesses casos, é necessário usar métodos de manejo mais intensivos, como adicionar matéria orgânica. Além disso, os resultados mostram que o PCZ e o PENS (no fator 3 e no fator 2, respectivamente) estão ligados à capacidade de troca de íons do solo. Isso produz impacto direto na eficiência do uso de fertilizantes e na retenção de nutrientes: solos com alto PCZ e PENS podem reter menos nutrientes, o que pode exigir correções de pH e manejo adequado para evitar a perda de nutrientes vitais.

Tabela 9. Matriz de cargas fatoriais.

Variáveis	F1	F2	F3	F4
Fes	0,26	0,90	0,31	0,06
Fed	0,27	0,89	0,30	0,11
Feo	-0,37	0,01	-0,07	-0,84
Fed/Feo	0,71	0,76	0,21	0,23
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fed}$	-0,17	-0,39	-0,87	-0,20
Al_2O_3	-0,52	-0,51	0,58	-0,28
SiO_3	-0,49	0,73	0,55	-0,07
Ki	-0,15	0,93	0,60	0,16
Kr	-0,49	-0,75	-0,35	0,01

ΔpH	0,10	0,37	0,10	0,90
PENS	0,25	0,68	0,78	0,38
PCZ	0,34	0,43	0,92	0,74
CSL	-0,57	0,71	0,06	0,07
Σ	0,08	-0,90	0,09	-0,36
ASE	0,81	-0,10	-0,77	-0,08
CDCE	-0,94	0,01	0,17	-0,29
ψ^0	-0,70	0,71	0,06	0,07
CL	0,99	0,00	0,10	0,10
AF	0,96	0,03	-0,02	0,16
AH	0,96	0,07	0,03	0,16
HU	0,97	0,09	0,05	0,23
CSH	0,97	0,08	0,03	0,21
COT	0,98	0,05	-0,02	0,17
Autovalores	11,06	7,36	2,13	1,48
Variância total (%)	46,09	30,70	8,91	6,18
Variância total acumulada (%)	46,09	76,79	85,71	91,90

Nota: Para fins de interpretação foram consideradas significantes cargas fatoriais $\geq 0,55$.
 Nota: Fes: ferro cristalino; Fed: ferro amorfo; Feo: ferro amorfo; Fed/Feo: relação de ferro cristalino por ferro amorfo; Al_2O_3 : óxido de alumínio; SiO_2 : óxido de silício; Ki e Kr: relação molecular; ΔpH : $\text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; PENS: ponto de efeito salino nulo; PCZ: ponto de carga zero; CSL: carga superficial líquida; Σ : densidade superficial líquida; SE: área superficial específica; CDCE: dupla camada elétrica do solo; ψ^0 : potencial elétrico; CL: carbono lábil; AF: ácido fúlvico; AH: ácido húmico; HU: humina; CSH: carbono das substâncias húmicas; COT: carbono orgânico total. Fonte: A autora (2024).

4 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que tanto nos Latossolos quanto nos Cambissolos houve predominância de cargas negativas, especialmente em horizontes superficiais. A predominância de cargas negativas nos solos sugere alto potencial de retenção de nutrientes catiônicos, reforçando a necessidade de ajustar o manejo de fertilizantes e corretivos, especialmente em solos com baixa capacidade de troca catiônica. Os valores de PCZ e PENS obtidos indicam que os solos estudados apresentam diferentes capacidades de troca de nutrientes e exigem ajustes no pH para maximizar sua fertilidade.

A carga superficial é controlada principalmente pela matéria orgânica, especialmente em solos com mineralogia oxídica predominante, como os latossolos. A adição de matéria orgânica possibilitou o aumento da CTC, contribuindo para a melhoria da estrutura do solo. Isso ajuda a reter água e ser mais resistente a períodos de seca, o que é importante para a agricultura na Bacia Potiguar.

O CL se mostrou um indicador importante da qualidade do solo, sendo mais elevado em horizontes superficiais, o que reforça a necessidade de práticas de manejo que preservem ou aumentem os níveis de matéria orgânica, como o plantio direto e a rotação de culturas.

Para maximizar a fertilidade desses solos, práticas de manejo como calagem (para corrigir a acidez) e adubação orgânica são necessárias com base nas propriedades eletroquímicas e níveis de matéria orgânica observados. Além disso, é aconselhável usar adubos verdes, rotação de cultura e proteger o solo com cobertura vegetal, pois ajudam a manter ou aumentar o conteúdo de carbono lábil e substâncias húmicas, essenciais para o bom funcionamento dos solos estudados.

REFERÊNCIAS

- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Potencial elétrico superficial e carga elétrica líquida de Latossolos ácidos. **R. Bras. Ci. Solo**, 18:181-185, 1994.
- BARRETO, W. O. **Eletroquímica de solos tropicais de carga variável**: capacidade da dupla camada elétrica. 1986. 184 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – UFRRJ, Rio de Janeiro, 1986.
- BORTOLUZZI, C. E.; PÉREZ, C. A. S.; ARDISSON, J. D.; TIECHER, T.; CANER, L. Ocorrência de sesquióxidos de ferro e alumínio e suas implicações para a sorção de P em solos subtropicais. **Apl. Clay Ciência**, v. 104, p. 196–204, 2015.

COSCIONE, A. R.; MONIZ, A. C.; PÉREZ, D. V.; FERREIRA, M. M. C.; CAMARGO, O. A. Chemical and electrochemical properties of an Oxisol- Ultisol transition in the state of São Paulo, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 126, n. 3-4, p. 375-388, jun. 2005.

COSTA, L. M.; MORAIS, E. J.; RIBEIRO, A. C.; FONSECA, S. Cargas elétricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo com diferentes coberturas florestais. **R. Ceres**, v. 177, p. 351-359, 2004.

CRUZ, C. D. **Análise multivariada e simulação**. Viçosa, Editora UFV, 2006.

DEVECHIO, F. S. S. **Apostila de solos**: Zootecnia. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP). 145p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. Brasília, DF, 2018.

JACOMINE, P. K. T.; SILVA, F. B. R.; FORMIGA, R. A.; ALMEIDA, J. C.; BELTRÃO, V. de A.; PESSOA, S. C. P. & FERREIRA, R. C. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte**. Rio de Janeiro: Divisão de Pesquisa Pedológica, Boletim técnico, 21, DRN-SUDENE. Série Pedologia, 9). 1971.

PEREZ, D. V. **Propriedades eletroquímicas em solos com B textural e argila de atividade baixa**. Dissertação (Mestrado em Ciências). 1990. 144 f – UFRRJ, Itaguaí, Rio de Janeiro, 1990.

PÉREZ, D. V.; RAMOS, D. P.; NASCIMENTO, R. A. M.; BARRETO, W. O. Propriedades eletroquímicas de horizontes B texturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, p. 157-164, 1993.

RÊGO, L. G. S. **Formação de pedons em litossequência cretáceo-quaternária na bacia potiguar**. 2022. 134f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2022.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, H. G. **Sistema Brasileiro de classificação dos solos**. Brasília: Embrapa, 2013.

SILVA, M. S. N. **Ponto de efeito salino nulo e cargas elétricas em um latossolo vermelho-amarelo**. 2011. 31f. Monografia (Bacharelado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia, Universidade de Cuiabá, Cuiabá. 2011.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron Oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (org.). **Minerals in Soil Environments**. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.

SIQUEIRA, C.; LEAL, J. R.; VELLOSO, A. C. X.; SANTOS, G. A. Eletroquímica de solos tropicais de carga variável: II. Quantificação do efeito da matéria orgânica sobre o ponto de carga zero. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, n. 1, p. 13–17, 1990.

SOLTO, P.C. *et al.* Decomposição de esterco dispostos em diferentes profundidades em área degradada no semiárido da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 125-130, 2005.

WHITE, G. N.; ZELAZNY, L. W. Charge properties of soil colloids. In: SPARKS, D. L. (org.). **Soil physical chemistry**. Boca Raton: CRC Press, 1986. p. 39-81.