

Caracterização geoquímica das áreas hipersalinas sob influência do alto curso estuarino do Rio Apodi-Mossoró

Geochemical characterization in the hypersaline floodplain influenced by upstream estuarine system in the Apodi-Mossoró River

Carlos Daniel Silva e Souza¹; Raquel Franco de Souza²; Diógenes Félix da Silva Costa³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Natal/RN, Brasil. Email: daniel.souza.cd@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5310-7341>

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Geologia/CCET, Natal/RN, Brasil. Email: raquel.franco@ufrn.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8818-0605>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Geografia/CCHLA & Museu Câmara Cascudo, Natal/RN, Brasil. Email: diogenes.costa@ufrn.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4210-7805>

Resumo: As planícies flúvio-marinhais são ambientes de estrita relação com os fatores continentais e oceânicos, uma vez que estão localizadas em zonas costeiras e formam solos de alta salinidade. Na área setentrional do Rio Grande do Norte (RN), em razão das condições geomorfológicas e climáticas, estas planícies são caracterizadas como ambientes hipersalinos. A planície de inundação flúvio-marinha do rio Apodi-Mossoró localiza-se na zona estuarina, possuindo áreas planas e solos impermeáveis que favorecem o represamento das águas fluviais e marinhas. Nessa pesquisa, foram investigadas as condições geoquímicas do solo no alto curso estuarino localizado no semiárido brasileiro; para isso, foram coletadas amostras de solo com profundidades diferenciadas em ambientes hipersalinos distintos. As análises laboratoriais indicaram um solo com grandes concentrações de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , apresentando classificação sódica, caráter sálico e condição moderadamente alcalina; essas características são reflexos da influência do clima semiárido e evaporação progressiva da água do mar na área de supramaré, favorecendo a precipitação de sais no alto curso estuarino. A granulometria dos sedimentos, por sua vez, indicou predominância de partículas mais finas como silte e argila na composição textural do solo.

Palavras-chave: Áreas úmidas; Salinidade; Ambiente Estuarino.

Abstract: The fluvial-marine plains are environments closely related to continental and oceanic factors, since they are located in coastal zones and form high salinity soils. In the northern area of Rio Grande do Norte (RN), due to the geomorphological and climatic conditions, these plains are characterized as hypersaline environments. The fluvial-marine floodplain of the Apodi-Mossoró River is located in the estuarine zone, with flattened areas and impermeable soils that favor the damming of river and marine waters. In this research, the geochemical conditions of the soil were investigated in the upper estuarine course located in the Brazilian semiarid region; for this, soil samples were collected with different depths in different hypersaline environments. The laboratory analyzes indicated a soil with high concentrations of Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} , presenting sodic classification, salic character and moderately alkaline condition; these characteristics reflect the influence of the semiarid climate and progressive evaporation of sea water in the supratidal area, favoring the precipitation of salts in the upper estuarine course. The granulometry of the sediments, in turn, indicated the predominance of finer particles such as silt and clay in the textural composition of the soil.

Keywords: Wet areas; Salinity; estuarine environment.

1. Introdução

A condição hipersalina, de modo geral, é o resultado da relação entre aspectos geomorfológicos e climáticos (FANG; LIU; KEARNEY, 2005; PANKOVA et al., 2018) que atuam, sobretudo, nas zonas tropicais do globo onde muitas vezes as taxas de evapotranspiração potencial superam as precipitações pluviométricas (COSTA et al., 2014a; RIDD; STIEGLITZ, 2002; FREIRE et al., 2021; PEDROTTI et al., 2015) e consequentemente, influenciam nas condições fisico-químicas dos solos.

Assim, a hipersalinização ocorre quando a salinidade supera 50 g/L⁻¹ (KJERFVE et al., 1996) e ocasiona a precipitação dos primeiros sais na superfície (OREN, 2009; COSTA et al., 2015). Essa característica específica pode afetar diversos tipos de ambientes, como: planícies de inundação flúvio-marinhais (ALBUQUERQUE et al., 2014a; ALBUQUERQUE et al., 2014b; COSTA et al., 2014a), lagoas (GORDON, 1999; KJERFVE et al., 1996), pântanos/marismas (SHEN et al., 2018; BORNMAN; ADAMS, 2009; GANJU et al., 2017), desertos (HERRERO; WINDORF; CASTANEDA, 2015), planícies marinhas com formações evaporíticas (LAST, 1989; MEES; SINGER, 2006; BROWN, 2021) e, em alguns casos, se formam através do represamento de corpos d'água de influência marinha (PINHEIRO; MORAIS, 2010).

Nas planícies flúvio-marinhais hipersalinas, a deposição de sedimentos sofre influência direta dos estuários negativos (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002), local de contato, mistura e diluição da água do mar com a água proveniente do rio (TUNDISI; TUNDISI, 2008); esse processo em conjunto com a topografia plana e drenagem deficiente (JESUS; BORGES, 2020), permite que a água das marés astronômicas com baixa força energética avance até área de supramaré e proporcione processos físicos, químicos e biológicos (SUGUIO, 2003; GUEDES; SANTOS; CESTARO, 2016).

Logo, a geoquímica em sistemas sob influência marinha, segue o padrão de sequência baseado na solubilidade e precipitação diferenciada dos elementos presentes na água do mar, dominada pelos íons Na⁺ e Cl⁻ e quantidades menores de SO₄⁻², Mg⁺², Ca⁺², K⁺¹, CO₃⁻² e HCO₃⁻¹ (SILVA; SCHREIBER; SANTOS, 2000). Nas regiões áridas e semiáridas podem suceder a cristalização de minerais de gipsita, halita, hidróxido de ferro e sais alcalinos precipitados na camada superior do solo (FANG; LIU; KEARNEY, 2005; GRIGORE; TOMA, 2017), condição essa que interfere diretamente no desenvolvimento de vegetação (UCHOA; HADLICH; CELINO, 2008; JESUS; BORGES, 2020).

Tendo em vista a crescente ocupação nos ambientes hipersalinos, é fundamental obter informações para melhor entender a dinâmica desses ecossistemas (HERRERO; WINDORF; CASTANEDA, 2015), especialmente por meio de uma abordagem pedológica. A caracterização e classificação dos solos presentes nesses sistemas é substancial para respaldar a questão da conservação e sustentabilidade em áreas ameaçadas (ALBUQUERQUE et al., 2014a). Devido a essa problemática, os ambientes afetados por sais vêm sendo tema de pesquisa em vários países, principalmente na Austrália, Bulgária, França, Grécia, Índia, Itália, Israel, México, Porto Rico, Eslovênia e Espanha (OREN, 2009).

No Brasil, as maiores planícies flúvio-marinhais hipersalinas situam-se principalmente no estado do Rio Grande do Norte, entre as zonas estuarinas do rio Apodi-Mossoró, Piranhas-Açu e Galinhos-Guamaré, que possuem potencial econômico desde o período colonial, quando já se utilizava o sal cristalizado para o consumo humano e animal (COSTA et al., 2013); atualmente as salinas solares presentes na região produzem cerca de 95% de todo sal consumido no país (ROCHA, 2005; COSTA et al., 2022).

Na planície de inundação do rio Apodi-Mossoró, a área é ocupada principalmente pela atividade salineira e carcinicultura (SILVA; COSTA, 2022); porém, apesar do desenvolvimento significativo total da planície, o alto curso estuarino caracteriza-se como a zona menos antropizada. A partir da hipótese que os modelados geomorfológicos de acumulação do alto curso estuarino apresentam solos com características distintas, a presente pesquisa pretende verificar e caracterizar a condição geoquímica dos solos existentes nesses ambientes.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

A área de estudo a ser pesquisada se configura na zona costeira do litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, entre os municípios de Areia Branca, Grossos e Mossoró (Figura 1). O recorte espacial da pesquisa corresponde ao alto curso estuarino da planície de inundação do rio Apodi-Mossoró.

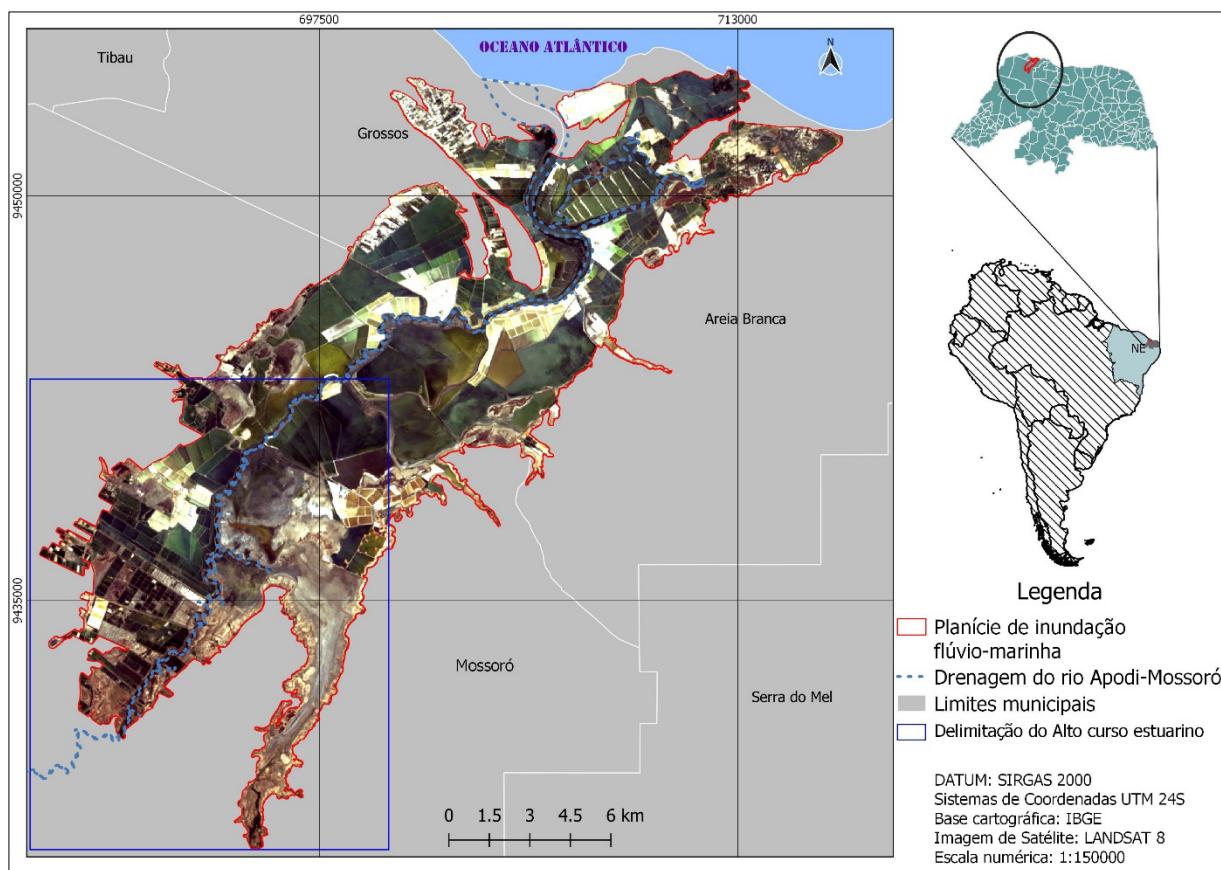


Figura 1 – Mapa de localização da planície de inundação estuarina do rio Apodi-Mossoró.

Fonte: Autores (2022).

No segundo semestre do ano, o fluxo de água doce do rio diminui consideravelmente favorecendo a permanência da água salgada na região estuarina, o que favorece a hipersalinização do estuário (COSTA; ROCHA; CESTARO, 2014), influenciando diretamente na pedogênese local, através da concentração de evaporitos oriundos da precipitação de sedimentos; além disso, suas condições específicas contribuem para o desenvolvimento da região (COSTA et al., 2014a; COSTA et al., 2022).

Com essas condições, a cobertura vegetal do entorno possui estrutura florística endêmica, de formações arbustivas e herbáceas, perfeitamente adaptada ao clima semiárido, caracterizada como vegetação caatinga “savânica” com a predominância de plantas espinhosas deciduais caducifólias (IBGE, 2012).

Nos locais próximos ao estuário, onde o nível de salinidade é crítico existe a predominância da vegetação halófita dos manguezais distribuídas em quatro espécies: *Avicennia germinans*, *Avicennia schaueriana*, *Laguncularia racemosa* e *Rhizophora mangle*; os campos salinos de salgados e apicuns correspondem a áreas ensolaradas que apresentam solo arenoso e vegetação arbustiva escassa (COSTA; ROCHA; CESTARO, 2014; GUEDES; SANTOS; CESTARO, 2016; COSTA; SOUZA; SOUZA, 2021).

2.2 Procedimentos Metodológicos

A coleta de solo envolveu três conjuntos amostrais com pontos espacializados em áreas úmidas hipersalinas distintas e ambientadas na zona do alto curso estuarino da planície de inundação flúvio-marinha do rio Apodi-Mossoró (Tabela 1): a planície fluvial (Apf), a planície flúvio-lagunar (Apflg) e a planície flúvio-marinha (Apfm); a terminologia está de acordo com os modelados geomorfológicos de acumulação propostos por Silva e Costa (2022) para a área de estudo (Figura 2). Os pontos e suas respectivas profundidades foram organizados da seguinte forma: na Apf os pontos P-234 (05-15cm), P-

235 (20-30cm) P-236 (10-20cm), P-237 (10-20cm) e P-238 (20-30cm); na Apflg, P-239 (05-15cm), P-240 (05-15cm) e P-241 (05-15cm); e na Apfm, P-317 (0-15cm), P-318 (0-15cm), P-319 (0-15cm) e P-320 (0-15cm) (Figura 3).

Tabela 1 – Caracterização dos pontos amostrais na planície de inundação flúvio-marinha do rio Apodi-Mossoró.

Amostra	Coordenadas UTM	Elevação	Modelados de acumulação	Vegetação	Caracterização do ambiente
P-234	694.925mE 9.427.686mN	3m	Planície fluvial	Herbácea halófita	Campo Salino; margem do rio do Carmo (afluente do rio Apodi-Mossoró) com presença de Algaroba (<i>Prosopis juliflora</i>) e Carnaúba (<i>Copernicia prunifera</i>); terraço circundado por Caatinga.
P-235 P-236	695.211mE 9.428.213mN	4m	Planície fluvial	Herbácea halófita	Campo Salino próximo à margem do rio do Carmo com predominância de Algaroba (<i>P. juliflora</i>).
P-237 P-238	696.052mE 9.429.896mN	4m	Planície fluvial	Ausência	Terraço desértico com poucas halófitas em terrenos mais elevados na zona de inundação.
P-239	696.849mE 9.434.776mN	4m	Planície flúvio-lagunar	Ausência	Trecho com muita dinâmica eólica com silte e argila no período de seca; Ausência de vegetação herbácea e halófitas. Solo sujeito à deflação.
P-240	695.832mE 9.435.931mN	1m	Planície flúvio-lagunar	Ausência	Conexão do rio Apodi-Mossoró com rio do Carmo, frente a salina; área inundada sem herbáceas.
P-241	695.444mE 9.435.197mN	1m	Planície flúvio-lagunar	Ausência	Zona de planície hipersalina inundada frequentemente pela maré.
P-317	690.575mE 9.431.481mN	3m	Planície flúvio-marinha	Herbácea halófita	Campo salino com pouca vegetação herbácea e incidência de vegetação arbustiva nas proximidades; local próximo a tanques de carnícultura.
P-318	690.412mE 9.431.434mN	3m	Planície flúvio-marinha	Mangue	Gamboa com pequeno bosque de mangue (<i>Avicennia germinans</i>); local próximo a tanques de carnícultura.
P-319	694.600mE 9.440.462mN	2m	Planície flúvio-marinha	Mangue	Ambiente localizado entre o estuário e salinas solares, coberto predominantemente pelo mangue.
P-320	690.363mE 9.461.098mN	2m	Planície flúvio-marinha	Ausência	Campo salino apresentando saturação no solo e ausência de vegetação, nos arredores foram verificadas vegetação herbácea e arbustiva.

Fonte: Autores (2022).

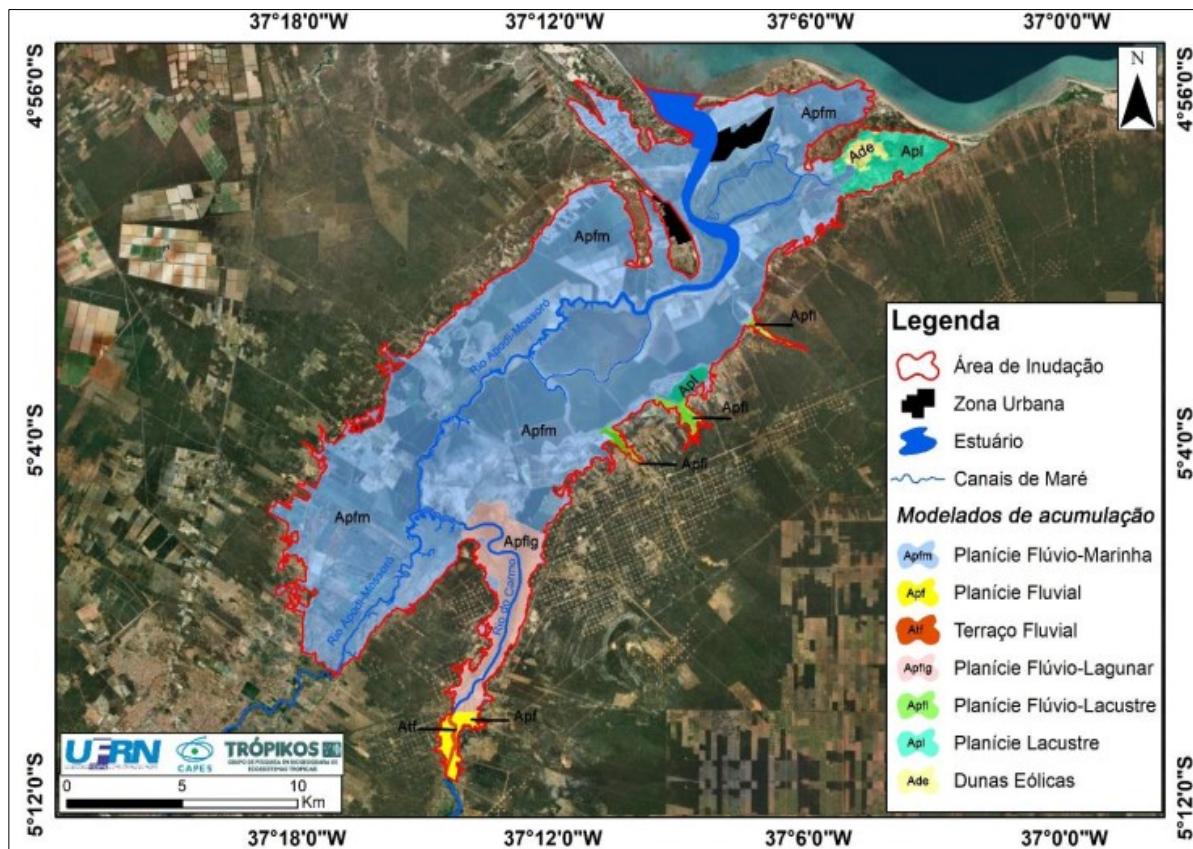


Figura 2 – Áreas de modelados de acumulação do baixo curso do rio Apodi-Mossoró.

Fonte: Silva e Costa (2022).

As coletas consistiram na extração de aproximadamente 2 kg de solo, com um trado helicoidal. Nos locais onde o solo apresentava saturação, utilizou-se uma pá de jardinagem. Após as coletas, as amostras de solo foram quarteadas em quantidades menores, em torno de 1,0 kg para serem enviadas para o laboratório de análise (LASAP-UFERSA) para determinação dos valores dos macronutrientes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e P), acidez potencial, granulometria, conteúdo da matéria orgânica (MO), capacidade de troca de cátions (CTC), soma e saturação por bases, saturação por alumínio trocável, condutividade elétrica (CE), porcentagem de sódio trocável (PST) e o potencial hidrogeniônico (pH).

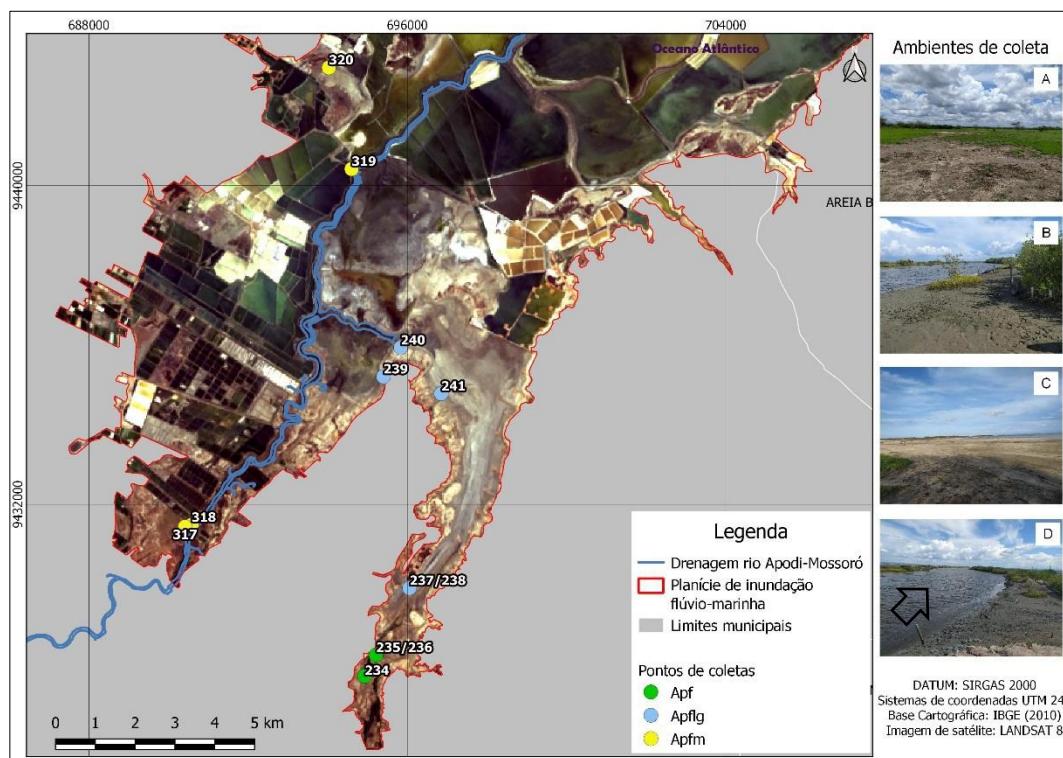


Figura 3 – Mapa da espacialização dos pontos amostrais na zona do alto curso estuarino da planície de inundação flúvio-marinha do Rio Apodi-Mossoró. As fotos à direita do mapa encontram-se na Planície Flúvio-Marinha (Apfm). A: Ambiente com vegetação herbácea halófita (verde claro no centro da foto); B: Manguezal (à direita); C: campo salino/apicum (sem ou com pouca vegetação); D: Estuário (seta indica o avanço da maré).

Fonte: Autores (2022).

2.3 Métodos laboratoriais

No laboratório, as amostras foram identificadas e armazenadas na estufa a 60°C para secagem; em seguida o solo foi destorrado, peneirado e dividido em porções menores para análises químicas e físicas. Os procedimentos laboratoriais foram baseados no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (2017).

As análises físicas identificaram a granulometria dos sedimentos das amostras por meio da quantificação de areia, silte e argila; para isso, utilizou-se o método da pipeta, que consiste na preparação de soluções contendo o solo amostrado (TFSA- Terra fina seca ao ar), hexametafosfato de sódio e água destilada. As soluções foram devidamente agitadas (50 rpm), peneiradas para separação da areia e depositadas em uma proveta de 100 mL para identificar silte e argila.

Em seguida, foram novamente agitadas e sedimentadas seguindo a Lei de Stokes; após a mistura foram coletados 50 mL do material em suspensão (5 cm da proveta) com pipeta volumétrica, que foram depositados em Beckers e armazenados na estufa até evaporar completamente para posterior pesagem das frações. Com os resultados obtidos pela pesagem e quantificação dos sedimentos, foi realizada a classificação textural com base no modelo de Lemos e Santos (1996), que determina a classe do solo em função da porcentagem de argila, silte e areia presente em cada amostra.

Nas análises químicas, foram verificados os resultados de pH, macronutrientes, CTC, CE e MO. A leitura do pH foi realizada diretamente pelo aparelho, por meio da TFSA homogeneizada em água destilada. A análise dos macronutrientes foi realizada a partir da separação de 10 cm³ de TFSA em erlenmeyer de 125 ml com adição de 100 ml da solução exigida, agitados por 5 min em 180 rpm e decantados posteriormente por 24 horas. Os resultados de Ca²⁺ e Mg²⁺ foram obtidos pelo método de titulação por meio da solução EDTA 0,0125M (sal dissódico). O P foi identificado utilizando o fotocolorímetro observando a densidade ótica do extrato da solução. O potássio (K⁺) e sódio (Na⁺), por sua vez, foram dosados no fotômetro de chama, pela leitura na escala do aparelho.

A análise da MO consistiu na pesagem, peneiramento, Trituração e aquecimento da TFSA; em seguida foi realizada a determinação baseada no método de Walkley e Black, que indica a quantidade de carbono orgânico existente no solo através da oxidação com dicromato de potássio iserido na amostra e titulado com sulfato ferroso amoniacoal 0,05M (viragem do azul para o verde). Os valores da CTC foram determinados pela soma dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Al^{3+} . Para a CE realizou-se estimativa da salinidade do solo; por meio da medição de cátions e ânions no extrato aquoso dos sais solúveis.

3. Resultados e discussão

Na exposição dos resultados por pontos individuais e parâmetros descritos na Tabela 2, as amostras não expressaram resultados para o Al^{3+} , m e H+Al, exceto o P-237, que apresentou 1,32 no parâmetro H+Al. Quanto aos valores do pH, foram caracterizados majoritariamente como moderadamente alcalino ($>7,4$ a 8,3) (EMBRAPA, 2017), à exceção do P-240 (7,30) localizado na Apflg e o P-237 (6,90) da Apfm, apontados como neutro.

A CE e o PST, por sua vez, são parâmetros fundamentais para identificar a classificação do solo e o seu nível de salinidade; assim, ao observar a relação desses parâmetros percebe-se que as amostras da Apf e Apfm seguem uma tendência de superioridade do PST em comparação à CE; porém, a Apflg demonstrou predomínio da CE nos pontos P-239 (PST: 17; CE 49,9) com baixo teor de Na^+ e P-241 (PST: 80; CE: 104).

Entretanto, a Apflg apresentou os maiores índices de CE, influenciada pela elevada quantidade de Na^+ ; apesar de estar sob influência do canal principal do rio e do efluente, a água doce eventual não impacta na redução da salinidade, pois a inundação pode diluir e transportar os sais existentes em outras regiões (BORNMAN; ADAMS, 2010; RIDD; STIEGLITZ, 2002). Costa et al. (2014b), ao caracterizarem a geoquímica ao longo do estuário do rio Apodi-Mossoró, observaram valores mais elevados da CE (Média: 111,16 dS/m) nas proximidades do curso principal, sendo o alto curso estuarino a zona com maior concentração, muito em função da influência marinha (ALBUQUERQUE et al., 2014a).

Por outro lado, a amostra mais próxima ao canal principal do rio na Apfm obteve a maior concentração de MO (P-319: 42,19 g/kg) possivelmente pela quantidade de biomassa dos mangues; já a menor concentração foi identificada na Apf, o P-234 (4,10 g/kg), campo salino com 3m de elevação.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros da análise de solos do alto curso estuarino do Rio Apodi-Mossoró. pH (solo:água 1,25); CE= Condutividade elétrica (extrato do solo:água); MO= Matéria Orgânica; P = Fósforo; K^+ = Potássio; Na^+ = Sódio; Ca^{2+} = Cálcio; Mg^{2+} = Magnésio; Al^{3+} = Alumínio trocável; H+Al = Acidez potencial; SB = Soma de bases. t = CTC efetiva. CTC = Capacidade de Troca de Cátions; V = Saturação por bases. m = Saturação por alumínio trocável. PST = Percentagem de sódio trocável.

Amostr a	pH	CE	MO	P	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H+A ₁	SB	t	CTC	V	m	P S T	
	Águ a	dS/m	g/kg	cmolc/dm ³										%			
Planície fluvial (Apf); n = 5																	
P-234 (05-15 cm)	7,50	18,20	4,10	0,32	1,38	73,48	15,60	9,90	0,0	0,0	100,39	100,39	100,40	100	0	73	
P-235 (20-30 cm)	7,70	12,00	6,14	0,25	1,23	70,39	16,50	7,40	0,0	0,0	95,54	95,54	95,54	100	0	74	
P-236 (10-20 cm)	7,80	11,60	4,51	0,32	1,20	46,50	12,50	8,60	0,0	0,0	68,83	68,83	68,83	100	0	68	
P-237 (10-20 cm)	8,00	11,40	5,33	0,18	2,17	59,33	14,20	16,20	0,0	0,0	91,92	91,92	91,92	100	0	65	
P-238 (20-30 cm)	8,10	12,50	7,78	0,21	2,24	54,47	17,70	14,10	0,0	0,0	88,53	88,53	88,53	100	0	62	
Planície flúvio-lagunar (Apfl); n = 3																	
P-239 (05-15 cm)	7,60	49,9	4,51	0,23	3,74	13,33	7,20	53,4	0,0	0,0	77,69	77,69	77,69	100	0	17	

P-240 (05-15 cm)	7,30	45,7	14,4 6	0,3 0	8,7 4	234,9 0	10,2 0	42,2	0 , 0	0,0	296,2 7	296,2 7	296,3	100	0	79
P-241 (05-15 cm)	7,40	104	15,2 6	0,2 0	7,2 1	239,4 4	8,40	44,8	0 , 0	0,0	299,9 5	299,9 5	300,0	100	0	80
Planície flúvio-marinha (Apfm); n = 4																
P-317 (0-15cm)	6,90	14,0 6	7,30	0,4 2	0,8 5	28,56	11,1 0	11,64	0 , 0	1,32	52,16	52,16	53,48	98	0	53
P-318 (0-15cm)	8,10	3,76	17,0 4	0,5 8	1,5 6	10,08	4,70	6,94	0 , 0	0,0	23,29	23,29	23,29	100	0	43
P-319 (0-15cm)	7,80	24,0 0	42,1 9	0,1 0	3,9 2	80,48	8,10	14,73	0 , 0	0,0	107,2 7	107,2 7	107,2 7	100	0	75
P-320 (0-15cm)	8,00	12,0 0	5,68	0,3 3	0,9 8	29,88	22,6 0	15,24	0 , 0	0,0	68,71	68,71	98,71	100	0	44

Fonte: Autores (2022).

Dentre os grupos amostrais, a maior e menor concentração de P foram encontradas nas amostras da Apfm, entre o P-318 (0,58) e o P-319 (0,10), respectivamente, ambos localizados em bosques de mangue, sendo o P-318 próximo a atividade de carcinicultura e o P-319 atividade salineira (Tabela 1). A presença de K⁺ foi mais acentuado na Apflg entre os pontos P-240 e P-241, com 8,74 cmolc/dm³ e 7,21 cmolc/dm³.

A estatística descritiva dos resultados na Tabela 3 é apresentada para Apf, Apflg e Apfm, revelando que existem variações significativas entre os resultados, de modo que os parâmetros Na⁺ e CTC têm as maiores variâncias em todos os grupos amostrais. Assim, as amostras da Apf apresentaram as menores variâncias para CTC (177,97) o Na⁺ (99,88), diferentemente dos valores da Apflg onde o Na⁺ (11137,00) e CTC (10798,92), que obtiveram a maior variância entre as amostras. A Apfm, por sua vez, as variâncias se revelaram intermediárias, em comparação com os outros ambientes. O micronutriente caracterizado como menos variante foi o P, cenário comum entre todos os grupos amostrais.

Tabela 3 – Estatística descritiva dos resultados de análises de solos do alto curso estuarino do Rio Apodi-Mossoró. pH (solo:água 1,25); CE= Condutividade elétrica (extrato do solo:água); MO= Matéria Orgânica; P= Fósforo; K⁺= Potássio; Na⁺= Sódio; Ca²⁺= Cálcio; Mg²⁺ = Magnésio; Al³⁺= Alumínio trocável; H+Al= Acidez potencial; SB= Soma de bases. t= CTC efetiva. CTC= Capacidade de Troca de Cátons; V= Saturação por bases. m= Saturação por alumínio trocável. PST = Percentagem de sódio trocável.

Valor Mínimo	Valor Máximo	Média	Desvio padrão	Variância	Coef. de Variação
Amostras planície fluvial (Apf); n = 5					
pH	7,50	8,10	7,82	0,21	0,05
CE	11,40	18,20	13,14	2,56	6,54
MO	4,10	7,78	5,57	1,31	0,23
P	0,18	0,32	0,26	0,06	0,23
K ⁺	1,20	2,24	1,64	0,46	0,21
Na ⁺	46,50	73,48	60,83	9,99	99,88
Ca ²⁺	12,50	17,70	15,30	1,81	3,27
Mg ²⁺	7,40	16,20	11,24	3,36	11,26
Al ³⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H+Al	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SB	68,83	100,40	89,04	10,85	177,66
t	68,83	100,40	89,04	10,85	177,66
CTC	68,83	100,40	89,04	10,85	177,66
V	100	100	100	0,00	0,00
m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PST	62,00	74,00	68,40	4,59	21,04

Amostras planície flúvio-lagunar (Apflg); n = 3						
pH	7,30	7,60	7,43	0,12	0,02	0,02
CE	45,70	104,00	66,53	26,55	704,82	0,40
MO	4,51	15,26	11,41	4,89	23,91	0,43
P	0,20	0,30	0,24	0,04	0,00	0,17
K ⁺	3,74	8,74	6,57	2,09	4,37	0,32
Na ⁺	13,33	239,44	162,56	105,53	11137,00	0,65
Ca ²⁺	7,20	10,20	8,60	1,23	1,52	0,14
Mg ²⁺	42,20	53,40	46,80	4,79	22,91	0,10
Al ³⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H+Al	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SB	77,69	299,95	224,64	103,92	10798,92	0,46
t	77,69	299,95	224,64	103,92	10798,92	0,46
CTC	77,69	300,00	224,66	103,92	10798,92	0,46
V	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PST	17,00	80,00	58,67	29,47	868,22	0,50

Amostras planície flúvio-marinha (Apfm); n = 4						
pH	6,90	8,10	7,70	0,47	0,23	0,06
CE	3,76	24,00	13,45	7,21	51,94	0,54
MO	5,68	42,19	18,05	14,60	213,08	0,81
P	0,10	0,58	0,36	0,17	0,03	0,49
K ⁺	0,85	3,92	1,83	1,24	1,53	0,68
Na ⁺	10,08	80,48	37,25	26,16	684,33	0,70
Ca ²⁺	4,70	22,60	11,63	6,73	45,28	0,58
Mg ²⁺	6,94	15,24	12,14	3,30	10,90	0,27
Al ³⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H+Al	0,00	1,32	0,33	0,57	0,33	1,73
SB	23,29	107,27	62,86	30,36	921,69	0,48
t	23,29	107,27	62,86	30,36	921,69	0,48
CTC	23,29	107,27	62,86	30,36	921,69	0,48
V	98,00	100,00	99,50	0,87	0,75	0,01
m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PST	43,00	75,00	53,75	12,87	165,69	0,24

Fonte: Autores (2022).

Além disso, os resultados do desvio padrão demonstram heterogeneidade nos pontos amostrais, sendo que nas amostras da Apf e Apflg o Na⁺ e o CTC apresentaram o maior grau de dispersão; por outro lado, os parâmetros P, pH, K⁺, Ca²⁺ e MO, se revelam mais homogêneos, em geral com valores abaixo de 5; nas amostras da Apfm a condição mais homogênea se restringe ao P, pH, K⁺. Assim, ao comparar todos os dados descritos na Tabela 3, infere-se que a CTC foi o resultado mais disperso e o P apresentou a menor dispersão. A zona que exibiu maior variabilidade foi a Apflg, influenciada pelas drenagens do rio e avanço das marés, para qual o desvio padrão variou de 105,53 para Na⁺ e 103,94 para o CTC.

A análise através da média estabelecida entre os parâmetros, aponta alternâncias entre as frações de CE, com 13,14 dS/m na Apf, 66,53 dS/m na Apflg e 13,45 dS/m na Apfm. Assim, os resultados se mostraram superiores aos valores identificados em áreas úmidas hipersalinas localizadas no deserto de Monegros, Espanha, que apresentou média 6,58 dS/m, com variações de 0,33 dS/m a 16,30 dS/m (HERRERO; WINDORF; CASTANEDA, 2015). Vale ressaltar que, a Embrapa (2017) caracteriza os solos com saturação maior que 7 dS/m como “sálico” e tóxico à maioria das culturas.

Quanto à MO (g/kg) a Apf resultou em 5,57, a Apflg em 11,41, a Apfm por sua vez, superou o valor dos demais grupos, com 18,05. A respeito do P, a maior média foi identificada na Apfm, com 0,55 cmolc/dm³; no que tange ao potássio (K⁺) o ambiente com mais abundância foi a Apflg com 6,57 cmolc/dm³. Os valores de PST indicam classificação sódica (≥ 15) para todas as amostras (Apf: 68,40 / Apflg: 58,67 / Apfm: 53,75).

Na análise comparativa entre os cátions Na⁺, Mg²⁺ e Ca²⁺ (Figura 4), percebe-se elevadas concentrações desses íons, de forma que os maiores índices estão na Apflg, precisamente nas amostras P-240, P-241. De modo geral, a relação entre os cátions revelaram a seguinte ordem: Na⁺>Mg²⁺>Ca²⁺, indicando o Na⁺ como cátion mais abundante, padrão catiônico

este que também foi constatado nos evaporitos da planícies do Canadá (LAST, 1989). Essa alta concentração ocorre, principalmente, em ambientes de drenagem restrita com represamento da água do mar e altas taxas de evaporação, provocando a precipitação dos sais solúveis na superfície do solo (SILVA; SCHREIBER; SANTOS, 2000; FANG; LIU; KEARNEY, 2005; ALBUQUERQUE et al., 2014b; PEDROTTI et al., 2015; FREIRE et al., 2021.). Pode ocorrer também através da ascensão capilar da água subterrânea rica em sais, ocasionada em função do baixo desenvolvimento pedológico com baixa profundidade e predominância de minerais primários (ATTIA, 2013; JESUS; BORGES, 2020; FREIRE et al., 2021).

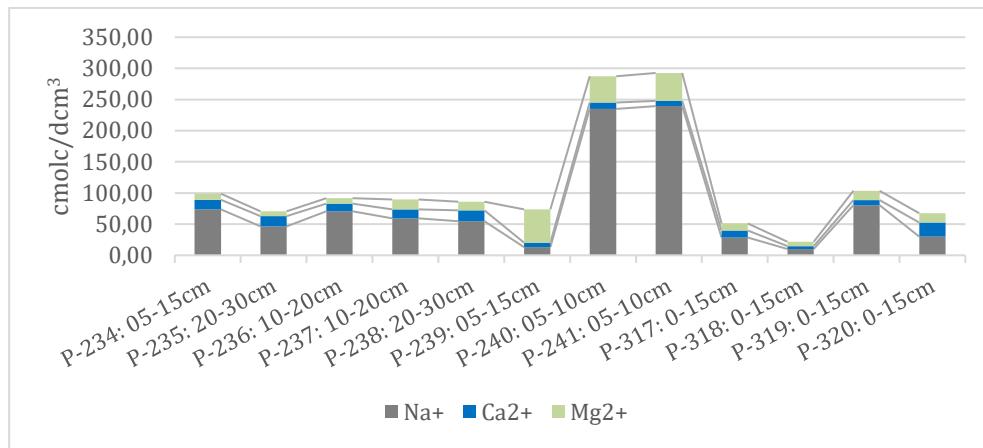


Figura 4 – Análise comparativa entre os cátions Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Fonte: Autores (2022).

Já a menor concentração de Na^+ foi encontrada na Apfm (P-318) com 10,08 cmolc/dm³, e o P-239 é o único que apresenta superioridade do Mg^{2+} . O Ca^{2+} , por sua vez, teve maior concentração na amostra P-320 com total de 22,60 cmolc/dm³. Semelhantemente, Costa et al. (2015) observou que uma mesma unidade hipersalina pode apresentar variações no padrão de acumulação de nutrientes em setores com características distintas.

Assim, percebe-se que a Apflg é o setor que apresenta maior escassez de cobertura vegetal (Tabela 1) em função, principalmente, da elevada concentração de sais que inviabiliza o desenvolvimento das plantas, até mesmo as mais tolerantes (UCHOA; HADLICH; CELINO, 2008); por outro lado, nos ambientes dos demais pontos ocorre a presença de vegetação halófita, demonstrando então, zonas específicas seguindo os parâmetros da salinidade, evidenciando a ideia de que as condições de hipersalinidade apresentam um padrão de vegetação irregular (ALBUQUERQUE et al., 2014b).

Vale ressaltar ainda que, a planície do Apodi-Mossoró, influenciada pelo estuário hipersalino, está entre os ambientes com maiores concentração de sais em áreas naturais (Tabela 4); ainda é possível destacar a ampla heterogeneidade das suas características químicas ao longo dos anos, influenciada principalmente pela evaporação solar da água do mar, o que favorece a grande produção de cloreto de sódio de modo sustentável, uma vez que as salinas se formam de modo natural, independentemente das ações antrópicas (COSTA et al., 2013).

Tabela 4 – Relação de ambientes salinos com diferentes níveis de salinidade em valores médios.

Localização	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	CE dS/m	Fonte
	cmolc/dm ³	cmolc/dm ³	cmolc/dm ³		
Golfo de Aqaba, Egito	145,12	13,64	26,19	93,00	Attia (2013)
Deserto de Monegros, Espanha	-	-	-	6,58	Herrero; Windorf; Castaneda (2015)
Grandes Planícies, Canadá	66,16	0,94	10,23	-	Last (1989)
Estuário Apodi-Mossoró, Brasil	81,35	21,98	31,52	111,16	Costa et al. (2014)
Estuário Apodi-Mossoró, Brasil	96,49	22,49	23,58	58,66	Costa (2018)
Estuário Apodi-Mossoró, Brasil	133,55	21,84	43,92	48,71	Medeiros (2020)
Presente pesquisa	78,40	12,40	20,43	26,59	

Fonte: Autores (2022).

Na classificação textural do solo, verificou-se a granulometria dos sedimentos por meio da relação entre areia, silte e argila (Figura 5). Assim, percebeu-se que o silte é a fração granulométrica predominante nas amostras. A areia, por sua vez, é a fração menos abundante e suas maiores concentrações foram identificadas na Apfm; já o maior percentual de argila foi demonstrado na Apflg. Percebe-se que a granulometria do Apf e Apflg apresentam homogeneidade com poucas variações entre as classes texturais, sendo a Franco Siltosa (P-235, P-240 e P-241) e a Silte (P-234, 236, 237, 238 e 239). Em contrapartida, a Apfm apresentou quatro tipos de classes, sendo o P-317 Franco Argilo Siltosa, o P-318 Franca, o P-319 Franco Siltosa, e o P-320 Silte. De modo geral, as amostras apresentaram baixo teor de areia e maior percentual de grãos finos, semelhante aos sedimentos da bacia do Mar de Aral no Uzbequistão que, além disso, apresentou fina camada de halita entre os poros (MEES; SINGER, 2006).

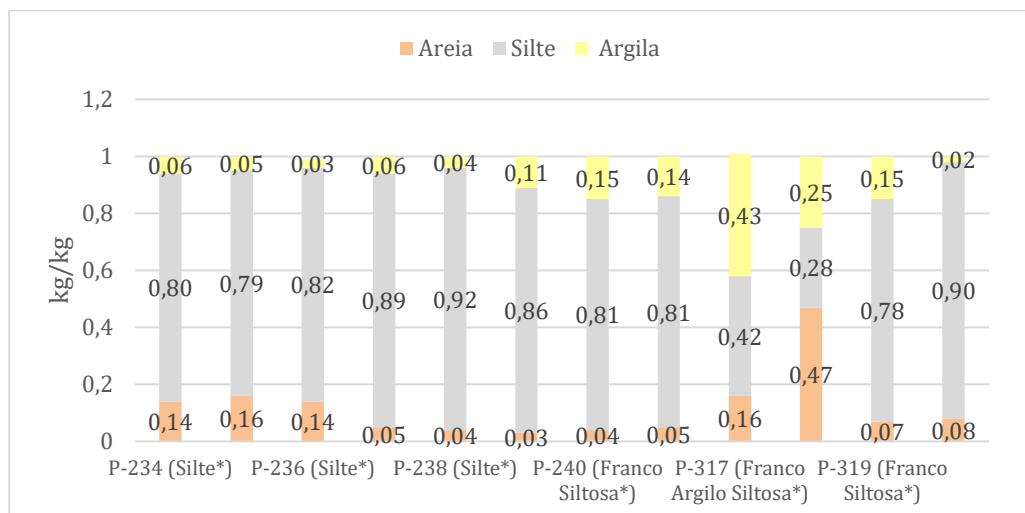


Figura 5 – Resultados granulométricos dos sedimentos.

*Classificação Textural.

Fonte: Autores (2022).

4. Considerações finais

O solo sob influência hipersalina apresentou características heterogêneas entre os parâmetros analisados, mesmo estando os pontos amostrados no mesmo ambiente; porém, em toda área do alto curso estuarino foram encontrados elevados níveis de sais, sendo o Na^+ o cátion mais abundante, seguido do Mg^{2+} e Ca^{2+} , os quais influenciaram diretamente nas oscilações do CTC, PST e CE.

Além disso, mediante a análise dos parâmetros PST, CE e pH constatou-se respectivamente que o solo presente em todos os ambientes possui classificação sódica, caráter sálico e condição moderadamente alcalina, reflexo da influência do clima semiárido e evaporação progressiva da água do mar na área de supramaré.

As elevadas taxas de salinidade atuam em detrimento à cobertura vegetal, proporcionando ambientes com condições extremas e tóxicas às plantas. A granulometria dos sedimentos, por sua vez, indicou predominância de partículas mais finas como silte e argila, tornando o solo com maior capacidade de retenção de água; essa característica atrelada aos constantes alagamentos da planície, contribuem para o processo de gleização. Além disso, constatou-se a zona de Apfm como a área mais diversa em relação à textura do solo.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, UFRN/PROPESEQ (EDITAL N° 01/2024) pelo apoio de financiamento e ao Laboratório de Solo, Água e Planta – LASAP (UFERSA) pelo apoio nas análises físicas e químicas.

Referências

- ALBUQUERQUE, A. G. B. M. et al. Hypersaline tidal flats (apicum ecosystems): the weak link in the tropical wetlands chain. *Environmental Reviews*, v. 22, n. 2, p. 99-109, 2014a.
- ALBUQUERQUE, A. G. B. M. et al. Soil genesis on hypersaline tidal flats (apicum ecosystem) in a tropical semi-arid estuary (Ceará, Brazil). *Soil Research*, v. 52, n. 2, p. 140-154, 2014b.
- ATTIA, O. E. A. Sedimentological characteristics and geochemical evolution of Nabq sabkha, Gulf of Aqaba, Sinai, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 6, n. 6, p. 2045-2059, 2013.
- BORNMAN, T. G.; ADAMS, J. B. Response of a hypersaline salt marsh to a large flood and rainfall event along the west coast of southern Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 87, n. 3, p. 378-386, 2010.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Institui o novo código florestal brasileiro.
- BROWN, D. R. et al. Hypersaline tidal flats as important “blue carbon” systems: a case study from three ecosystems. *Biogeosciences*, v. 18, n. 8, p. 2527-2538, 2021.
- COSTA, D. F. S et al. Caracterização geoquímica dos sedimentos em um ambiente hipersalino artificial. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 1, n. 1, p. 76-87, 2015.
- COSTA, D. F. S. et al. Breve revisão sobre a evolução histórica da atividade salineira no estado do Rio Grande do Norte (Brasil). *Sociedade & Natureza*, v. 25, n. 1, p. 21–34, 2013.
- COSTA, D. F. S. et al. Influência de macroaspectos ambientais na produção de sal marinho no litoral semiárido do Brasil. *Revista de Geografia (Recife)*, v. 31, n. 3, p. 28–42, 2014a.
- COSTA, D. F. S. et al. Multifactorial analysis of the geochemical characterization in a Brazilian hypersaline floodplain. *Brazilian Journal of Aquatic Science Technology*, v. 18, p. 81-90, 2014b
- COSTA, D. F. S.; ROCHA, R. M.; CESTARO, L. A. Análise fitoecológica e zonação de manguezal em estuário hipersalino. *Mercator*, v. 13, p. 119–126, 2014.
- COSTA, D. F. S; SOUZA, Y. G; SOUZA, A. C. D. Fitogeografia e serviços ambientais prestados pelo manguezal do estuário do rio Apodi-Mossoró (RN). In: SOUZA, R. M; CHAVES, A. M. S; NASCIMENTO, S. P. G. (Eds.). *Geoecologia e Paisagem*. Aracajú, SE: Editora Criação, 2021.
- COSTA, D. F. S; MOREIRA DA SILVA, D.E.; MEDEIROS, D. H. M.; FERNANDES, R. T. V.; DE MEDEIROS ROCHA, R. Aspectos naturais da zona estuarina do Rio Apodi-Mossoró (RN). In: CARVALHO, R. G. (Org.). *Rio Apodi-Mossoró: meio ambiente e planejamento*. Mossoró/RN: Edições UERN, 2022, p. 116 – 132.
- COSTA, L. R. Atributos químicos e físicos do solo da planície hipersalina do estuário do Rio Apodi – Mossoró. 2018. 196 fl. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Mossoró/RN, 2018.
- EMBRAPA. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.
- FANG, H.; LIU, G.; KEARNEY, M. Georelational analysis of soil type, soil salt content, landform, and land use in the Yellow River Delta, China. *Environmental Management*, v. 35, p. 72–83, 2005.
- FREIRE, M. B. G. S. et al. Salinidade de solos: Problemas e soluções. In: FERNANDES, J. G.; CARVALHO, E. X. (Eds.) *Solos: Estudos potencialidades e uso*. Recife, PE: Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA, 2021.
- GANJU, N. K. et al. Spatially integrative metrics reveal hidden vulnerability of microtidal salt marshes. *Nature Communications*, v. 8, n. 1, p. 1-7, 2017.

- GORDON, C. Hypersaline lagoons as conservation habitats: macro-invertebrates at Muni Lagoon, Ghana. *Biodiversity & Conservation*, v. 9, n. 4, p. 465-478, 2000.
- GRIGORE, M. N.; TOMA, C. Saline environments. *Anatomical Adaptations of Halophytes*. Springer International Publishing, p. 29-37, 2017.
- GUEDES, D. R. C.; SANTOS, N. M.; CESTARO, L. A. Planície flúvio-marinha do Rio Grande do Norte: uma abordagem geossistêmica. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 2, Número Especial, p. 821–831, 2016.
- HERRERO, J.; WEINDORF, D. C.; CASTANEDA, C. Two fixed ratio dilutions for soil salinity monitoring in hypersaline wetlands. *PloS one*, v. 10, n. 5, 2015.
- IBGE. Manual técnico da vegetação brasileira. Rio de Janeiro: IBGE (Manuais técnicos de geociências, n. 1) ed. 2. 2012.
- JESUS, J; BORGES, M. T. Salinização de solos em Portugal. *Revista de Ciência Elementar*, v. 8, n. 3, p. 1-5, 2020.
- KJERFVE, B. et al. Hydrology and salt balance in a large, hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf science*, v. 42, n. 6, p. 701-725, 1996.
- LAST, W. M. Continental brines and evaporites of the northern Great Plains of Canada. *Sedimentary Geology*, v. 64, n. 4, p. 207-221, 1989.
- LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 3 ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996.
- MEDEIROS, D. H. M. Influência da salinidade na heterogeneidade de paisagens estuarinas do domínio morfoclimático do semiárido brasileiro. 2020. 237 fl. Tese (Doutorado em Ciências Marinhais Tropicais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhais Tropicais, Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.
- MEES, F; SINGER, A. Surface crusts on soils/sediments of the southern Aral Sea basin, Uzbekistan. *Geoderma*, v. 136, n. 1-2, p. 152-159, 2006.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. *Princípios de oceanografia física de estuários*. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002, 424 p.
- OREN, A. Saltern evaporation ponds as model systems for the study of primary production processes under hypersaline conditions. *Aquatic Microbial Ecology*, v. 56, n. 2-3, p. 193-204, 2009.
- PANKOVA, E. I. Salt-affected soils of the Eurasian Region: diagnostics, criteria and distribution. In: (Orgs) VARGAS, R. et al. *Handbook for saline soil management*. Roma: FAO/LMSU, 2018.
- PEDROTTI, A. et al. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 1308-1324, 2015.
- PINHEIRO, L. S.; MORAIS, J. O. Interferências de barramentos no regime hidrológico do Estuário do Rio Catú-Ceará-Nordeste do Brasil. *Sociedade & Natureza*, v. 22, n. 2, p. 237-250, 2010.
- RIDD, P. V.; STIEGLITZ, T. Dry season salinity changes in arid estuaries fringed by mangroves and saltflats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 54, n. 6, p. 1039-1049, 2002.
- ROCHA, A. P. B. *Expansão urbana de Mossoró/RN (período de 1980 a 2004): geografia, dinâmica e reestruturação do território*. Mossoró/RN: Coleção O Mossoroense, 2005.
- SHEN, C. et al. Salt dynamics in coastal marshes: Formation of hypersaline zones. *Water Resources Research*, v. 54, n. 5, p. 3259-3276, 2018.

-
- SILVA, D. E. M; COSTA, D. F S. Classificação das áreas úmidas e seus macrohabitats na planície flúvio-marinha do rio Apodi-Mossoró/RN (litoral semiárido do Brasil). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 01, p. 602-617, 2022.
- SILVA, M. A. M.; SCHREIBER, B. C.; SANTOS, C. L. Evaporites as mineral resources. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 18, p. 338-350, 2000.
- SUGUIO, K. *Geologia Sedimentar*. São Paulo: Editora Blucher. 2003.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- UCHOA, J. M.; HADLICH, G. M.; CELINO, J. J. Apicum: transição entre solos de encostas e de manguezais. *Revista Educação, Tecnologia e Cultura*, p.58-63, 2008.