

Article

Caracterização Espaço-Temporal de Variáveis Físico-Químicas de um Estuário do Semiárido Brasileiro

Erivaldo Laurindo Gomes¹, Aruza Rayana Moraes Pinto², Rogerio Taygra Vasconcelos Fernandes³,
Thyciana Vasconcelos Fernandes⁴, Leonardo de França Almeida⁵, Miguel Ferreira Neto⁶,
Nildo da Silva Dias⁷, Paulo Vitor Silva de Lima⁸, Luiz Fernando de Sousa Antunes⁹

¹ Mestrado em Produção Animal. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0001-9361-6928. Email: erivaldo_lgomes@hotmail.com

² Engenheira Agrônoma. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0002-2776-222X. Email: equilibrioga@hotmail.com

³ Doutorado em Ciência Animal. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0002-2901-3986. Email: rogerio.taygra@ufersa.edu.br

⁴ Doutorado em Ciência Animal. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0002-8019-1227. Email: fernandesrvtv@hotmail.com

⁵ Mestrado em Cognição, Tecnologias e Instituições. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0003-0140-9927. Email: lfaleonardo@hotmail.com

⁶ Doutor em Irrigação e Drenagem. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0002-5128-8230. Email: miguel@ufersa.edu.br

⁷ Doutor em Agronomia. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0002-1276-5444. Email: nildo@ufersa.edu.br.

⁸ Graduando em Licenciatura em Química. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). ORCID: 0009-0008-1099-4922. Email: utumno89@gmail.com

⁹ Doutor em Fitotecnia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. ORCID: 0000-0001-8315-4213. Email: fernando.ufrrj.agro@gmail.com

RESUMO

Objetivou-se avaliar a dinâmica espaço-temporal das variáveis físico-químicas de um ambiente estuarino no semiárido brasileiro. A pesquisa foi conduzida ao longo do ano de 2023, no estuário do rio Apodi-Mossoró, a partir da geração de mapas geoespaciais para representar as variações nas concentrações da salinidade, do cálcio (Ca^{2+}) e do magnésio (Mg^{2+}), abrangendo os compartimentos do alto, médio e baixo estuário. Os resultados revelaram uma sazonalidade determinante na estruturação da salinidade estuarina, com maiores diluições nos períodos chuvosos e salinização acentuada na estação seca, bem como um crescente gradiente iônico do baixo para o alto estuário com valores máximos registrados nos períodos secos, refletindo a intensificação da intrusão marinha e a retração da influência fluvial. Esses padrões evidenciam que a dinâmica da salinidade no estuário é altamente sensível às variações sazonais, reforçando a importância de um monitoramento contínuo para subsidiar estratégias de manejo e conservação em ecossistemas costeiros sob influência da hipersalinidade.

Palavras-chave: parâmetros físico-químico; hipersalinidade; avaliação geoespacial; variação sazonal; ecossistema costeiro.



Submissão: 14/10/2025



Aceite: 12/01/2026



Publicação: 18/03/2026



ABSTRACT

This study aimed to evaluate the spatiotemporal dynamics of physical and chemical variables in an estuarine environment in the Brazilian semiarid region. The study was conducted throughout 2023 in the Apodi-Mossoró River estuary. Geospatial maps were generated to represent variations in salinity, calcium (Ca^{2+}), and magnesium (Mg^{2+}) concentrations, covering the upper, middle, and lower estuary compartments. The results revealed a seasonality that determines estuarine salinity, with greater dilutions during the rainy season and accentuated salinization during the dry season. The study also demonstrated a growing ionic gradient from the lower to the upper estuary, with maximum values recorded during the dry season, reflecting the intensification of marine intrusion and the decline of river influence. These patterns demonstrate that salinity dynamics in the estuary are highly sensitive to seasonal variations, reinforcing the importance of continuous monitoring to inform management and conservation strategies in coastal ecosystems under the influence of hypersalinity.

Keywords: physicochemical parameters; hypersalinity; geospatial assessment; seasonal variation; coastal ecosystem.

Introdução

Os estuários são ecossistemas costeiros complexos que desempenham um papel fundamental na conexão entre ambientes dulcícolas e marinhos (Silva 2000; Ribeiro 2010; Reinke e Sangiogo 2023). Esses ambientes são caracterizados por parâmetros físico-químicos, cujas variações sofrem influência de fatores hidrológicos, climáticos e geomorfológicos, sobretudo da salinidade (Domingos et al. 2015). Dentro desse contexto, em regiões semiáridas, como ocorre no Nordeste brasileiro, a escassez de chuvas, associada às altas taxas de evaporação, tornam os estuários particularmente suscetíveis à hypersalinidade, afetando a dinâmica ecológica e os usos múltiplos da água (Carvalho 2022; Galvão e Fioreze 2012).

Sob essa ótica, o estuário do Rio Apodi/Mossoró, localizado na região oeste do estado do Rio Grande do Norte, é um exemplo típico de ambiente estuarino hipersalino (Rocha et al. 2011). Inserido em uma bacia hidrográfica de elevada relevância socioambiental, o estuário apresenta notável variabilidade espaço temporal, refletindo em seus parâmetros físico-químicos, especialmente em períodos de estiagem prolongada, a exemplo da salinidade que pode ultrapassar os 70 ppt em determinados trechos do estuário, em resposta à baixa descarga fluvial, intensa evaporação e intrusão marinha (Medeiros et al. 2018).

Outro fator que contribui para o aumento da salinidade é a salinicultura, que exerce forte influência sobre a dinâmica ambiental local. Essa atividade econômica destinada à produção de sal marinho por evaporação da água do mar em lagoas rasas, desenvolvida no estuário do rio Apodi-Mossoró, gera efluentes concentrados, comumente chamados de águas-mães que, quando descartados no ambiente estuarino, alteram significativamente a composição físico-química da água (Cavalcanti et al. 2005; Baraúna et al. 2015).

Embora esses efluentes sejam caracterizados por elevadas concentrações de sais, principalmente dos íons cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), além da própria salinidade, a inclusão desses íons na análise espaço-temporal se justifica por sua relevância como indicadores da intrusão salina antrópica, permitindo avaliar o grau de impacto da salinicultura nos diferentes compartimentos do estuário. A salinidade, por sua vez, está diretamente relacionada à presença de íons dissolvidos e sofre variações conforme as marés, a estação do ano e o aporte de água doce, desempenhando um papel importante na estruturação dos ecossistemas estuarinos (Lopes 2017). Dessa maneira, a análise integrada desses parâmetros é muito importante para compreender os processos que regulam o balanço hídrico e a dinâmica geoquímica local, contribuindo para o planejamento ambiental, a conservação da biodiversidade e a gestão dos recursos hídricos (Vieira et al. 2005).

Diante dessa perspectiva, este estudo objetivou analisar e interpretar os padrões físico-químicos do estuário do Rio Apodi/Mossoró nos períodos seco e chuvoso, com ênfase na salinidade, cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). Ademais, buscou-se identificar padrões espaciais e temporais, bem como garantir a compreensão da dinâmica da salinidade neste ambiente hipersalino, o que representa uma etapa essencial para subsidiar ações de monitoramento, mitigação de impactos e planejamento sustentável na região.



Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido no estuário do rio Apodi-Mossoró, que constitui uma zona de transição entre os ambientes fluvial e marinho, onde águas doces deste rio interagem com as águas salinas do oceano Atlântico. Conforme Carvalho et al. (2018), esse ambiente estuarino está localizado no litoral do estado do Rio Grande do Norte, abrangendo os municípios de Mossoró, Grossos e Areia Branca (Figura 1). Para melhor detalhamento da pesquisa, a área foi dividida em oito pontos (P1 a P8), cuja a distribuição ao longo do estuário se deu da seguinte forma: P1 e P2 para indicar os pontos de coleta do alto estuário; P3 a P6 em médio estuário; P7 e P8 no baixo estuário (Tabela1).

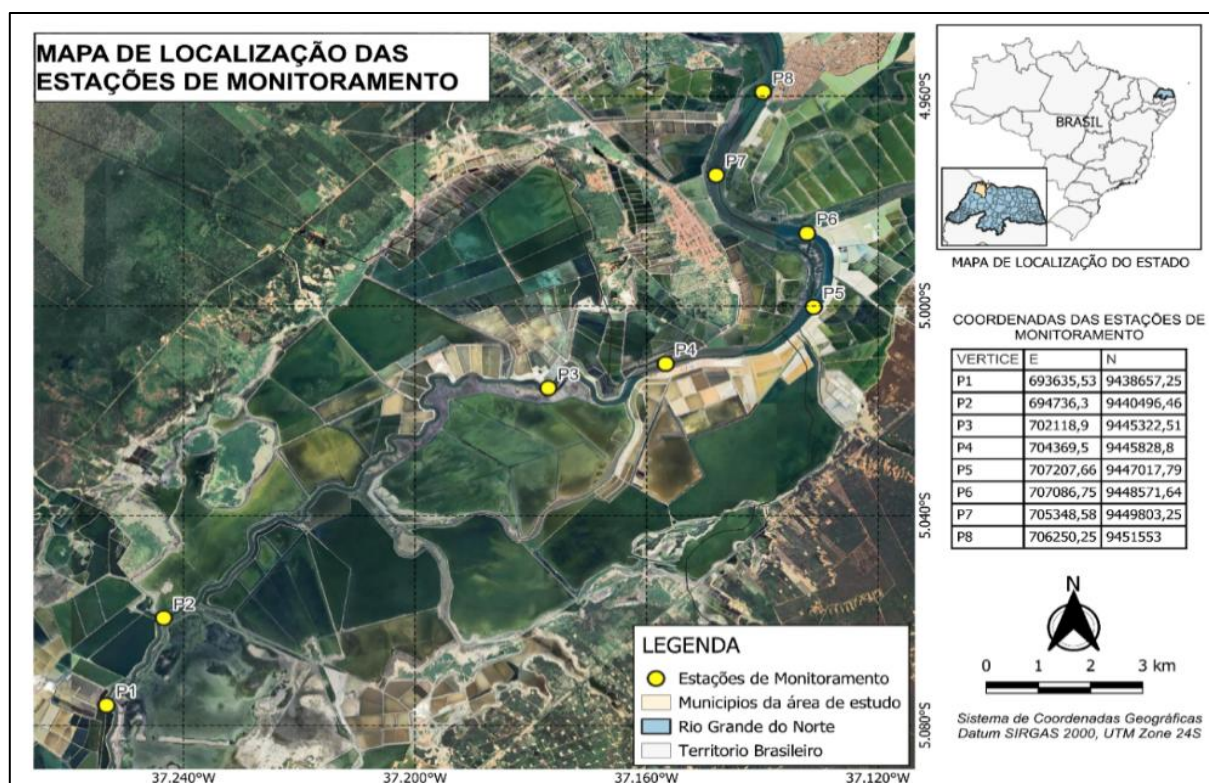


Figura 1. Planície de inundação do estuário do Rio Apodi-Mossoró. Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Tabela 1. Localização dos pontos de amostragem do Rio Apodi-Mossoró.

Estações de monitoramento	Latitude	Longitude
P1	693635,53	9438657,25
P2	694736,3	9440496,46
P3	702118,9	9445322,51
P4	704369,5	9445828,8
P5	707207,66	9447017,79
P6	707086,75	9448571,64
P7	705348,58	9449803,25
P8	706250,25	9451553

Fonte: elaborado pelos autores (2025).



Parâmetros analisados

A escolha por analisar, além da salinidade, especificamente os íons cálcio e magnésio, deve-se à sua presença nos efluentes produzidos pela salinicultura, atividade predominante na região. Esses parâmetros funcionam, portanto, como indicadores potenciais de lançamento de efluentes salinos, atuando como marcadores que permitem avaliar a contribuição antrópica sobre a intrusão salina natural do estuário.

O estudo foi realizado ao longo do ano de 2023, englobando um ciclo hidrológico completo da região. Os dados foram agrupados em quatro trimestres (de janeiro a dezembro), permitindo avaliar as variações físico-químicas em função da sazonalidade climática local. De acordo com Alvares et al. (2013), a região do estuário do rio Apodi-Mossoró está inserida em um clima semiárido BSw'h', caracterizado por dois períodos bem definidos: uma estação chuvosa, que ocorre geralmente entre fevereiro e junho, e uma estação seca, entre julho e janeiro.

A média pluviométrica anual situa-se abaixo de 750 mm, com distribuição desigual das chuvas tanto temporal quanto espacialmente. Em contraste, a evapotranspiração potencial é significativamente elevada, variando entre 1.500 e 1.600 mm por ano, o que acentua o déficit hídrico na região e limita a disponibilidade de água superficial e subterrânea.

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), o município de Mossoró registrou 704.6 mm de precipitação acumulada no período de janeiro a dezembro de 2023. Esses valores configuram-se dentro da faixa anual esperada para a bacia do rio Apodi-Mossoró (63,2 – 750 mm). Os meses de março e abril destacam-se como os mais chuvosos (150,2 – 240,4 mm), consolidando a caracterização do 2º trimestre como período de pluviometria máxima, em conjunto com dados históricos da região.

Cada trimestre do estudo reflete uma fase distinta da sazonalidade, conforme os dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET 2023). Dessa maneira: no 1º trimestre (jan.-mar.) ocorre a transição do período seco para o início da estação chuvosa; chuvas esparsas (precipitação média mensal ~30–80 mm), com vazão fluvial ainda reduzida. Já no 2º trimestre (abr.-jun.), há o período de pluviometria mais intensa, com precipitações médias mensais variando entre 100 e 180 mm, o que favorece o aumento da vazão do rio e diluição dos sais. O 3º trimestre (jul.-set.), por sua vez, é caracterizado pela transição da estação chuvosa para a seca; redução gradual das chuvas (~50 mm/mês), favorecendo o avanço da intrusão salina por fim, no 4º trimestre (out.-dez.), a estação é completamente seca, com precipitações mensais inferiores a 20 mm, elevadas taxas de evaporação e máxima influência marinha sobre o estuário.

A salinidade foi determinada *in situ* com o auxílio de um refratômetro portátil, devidamente calibrado antes de cada campanha de coleta. As concentrações de íons cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) foram analisadas em laboratório, por meio de titulação complexométrica com EDTA (ácido etilenodiaminotetracético), utilizando o indicador negro de eriocromo T. O procedimento seguiu as orientações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird et al. 2017).

Análise dos dados

Os resultados obtidos para cada parâmetro nas estações de coleta foram organizados e analisados com base na média trimestral, visando suavizar variações mensais e facilitar a interpretação sazonal. Posteriormente, os dados foram georreferenciados conforme as coordenadas das respectivas estações de coleta. A partir desses pontos, foi gerado um modelo espacial interpolado utilizando o método de interpolação IDW (Inverse Distance Weighting), no software QGIS versão 3.22.



Esse procedimento permitiu a elaboração de mapas temáticos, representando as variações espaciais da salinidade, cálcio e magnésio para cada trimestre, facilitando a análise e interpretação da distribuição espacial dos parâmetros no estuário.

Resultados

Análise dos níveis de salinidade

A dinâmica espacial da salinidade no estuário apresentou forte relação com o regime pluviométrico, evidenciando a influência das condições sazonais sobre sua estrutura longitudinal.

No primeiro trimestre, correspondente ao início do período chuvoso, o estuário manifestou características típicas de um sistema invertido, com salinidades crescentes no sentido da foz para o alto curso. Os valores variaram de $40 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ na foz até $55 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ na porção superior, um padrão característico de ambientes onde a evaporação supera o aporte fluvial, favorecendo o acúmulo de sais nas regiões mais interiores (Figura 2-A).

Durante o segundo trimestre, com o incremento da precipitação e consequente aumento do escoamento continental, verificou-se uma inversão no perfil salino, fazendo com que o sistema assumisse um comportamento positivo ou clássico. Nesse período, as concentrações mais elevadas foram registradas na foz ($35 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), enquanto, no alto estuário, os valores tornaram-se indetectáveis devido à intensa diluição promovida pela água doce (Figura 2-B).

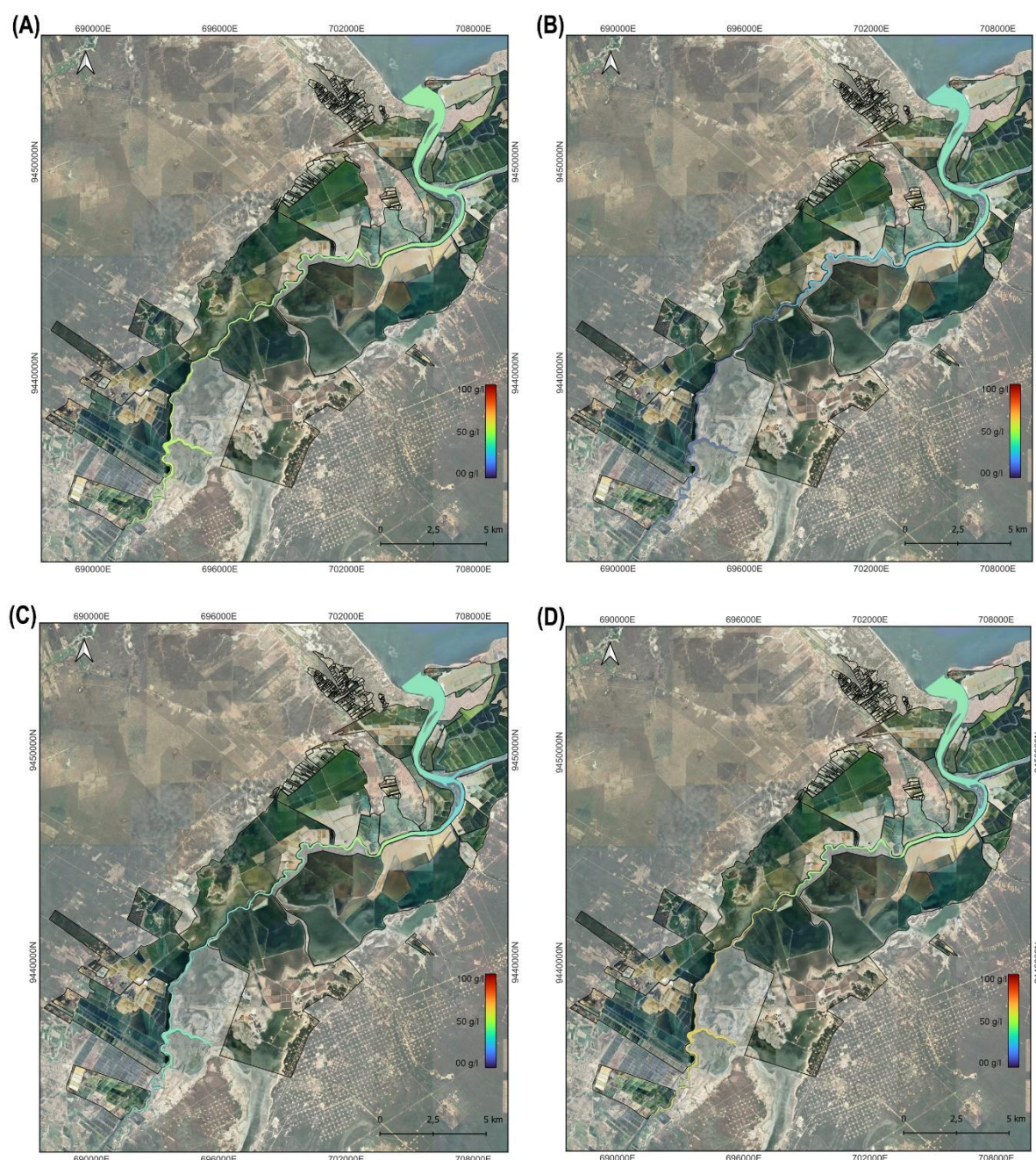


Figura 2. Representação geoespacial dos teores de salinidade no estuário do Rio Apodi-Mossoró. (A) Primeiro trimestre; (B) segundo trimestre; (C) terceiro trimestre; (D) quarto trimestre. Fonte: elaborado pelos autores (2025).

O terceiro trimestre marcou a transição para a estação seca, quando a evaporação passou a predominar sobre a precipitação. Apesar disso, ainda houve significativa retenção hídrica, especialmente do médio ao alto estuário. Observou-se, então, um aumento das concentrações no médio curso ($50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), resultado da salinização progressiva à medida que se distancia da foz, efeito parcialmente atenuado pela água residual presente nas zonas superiores (Figura 2-C).

No quarto trimestre, a intensificação do processo evaporativo, típica das regiões semiáridas, potencializou a acumulação de sais, originando um gradiente inverso acentuado. As concentrações atingiram $90 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ no alto



estuário, contrastando com os $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ observados na foz, reforçando o papel da evaporação como força motriz da hipersalinização nas porções interiores durante o período seco (Figura 2-D).

Análise dos teores de cálcio (Ca^{2+})

A variabilidade espacial dos teores de Ca^{2+} no estuário demonstrou forte influência das condições pluviométricas sazonais, evidenciando a sensibilidade desse íon à dinâmica hidrológica ao longo do gradiente longitudinal. De acordo com os resultados representados nos mapas temáticos, observa-se que a concentração de cálcio (g L^{-1}) sofre alterações ao longo dos trimestres, especialmente de janeiro a março (Figura 3). Durante o primeiro trimestre (Figura 3-A), correspondente ao início da estação chuvosa, verificaram-se concentrações mais elevadas de Ca^{2+} nas proximidades da foz, variando entre 0,6 e $0,8 \text{ g L}^{-1}$, enquanto nas porções mais internas os valores foram mais baixos ($\sim 0,4 \text{ g L}^{-1}$). Esse padrão caracteriza um comportamento clássico ou positivo, típico de ambientes estuarinos sob influência da intrusão marinha, onde a concentração de íons marinhos decresce no sentido foz ao alto estuário (P1 e P2).

No segundo trimestre (abril a junho), houve diminuição geral das concentrações de cálcio ao longo do canal estuarino, como reflexo da intensificação da precipitação, que favoreceu a diluição dos íons dissolvidos. Os teores variaram entre 0,0 e $0,4 \text{ g L}^{-1}$, com valores mais baixos predominando principalmente no alto e médio estuário (Figura 3-B), o que reforça a importância do aporte fluvial na modulação da salinidade e da carga iônica.

Com o término da estação chuvosa e o início do período seco (terceiro trimestre), os teores de Ca^{2+} voltaram a se elevar no baixo estuário, atingindo valores próximos a $0,8 \text{ g L}^{-1}$ (Figura 3-C), em função do avanço da cunha salina e maior influência marinha. No médio estuário, os valores oscilaram entre 0,4 e $0,6 \text{ g L}^{-1}$, enquanto no alto estuário se mantiveram baixos (0,0 a $0,4 \text{ g L}^{-1}$), evidenciando a persistência do gradiente positivo. Esse comportamento evidencia a natureza conservativa do cálcio em ambientes estuarinos, cuja distribuição acompanhada de forma significativa a variação da salinidade, sendo controlada por fatores como intrusão salina, maré e pluviosidade.

No quarto trimestre (Figura 3-D), os teores de Ca^{2+} se mantiveram relativamente moderados a elevados no baixo estuário ($0,6\text{--}0,8 \text{ g L}^{-1}$) e mais baixos no interior ($0,4\text{--}0,6 \text{ g L}^{-1}$). Essa tendência indica a recuperação gradual da influência marinha com a intensificação da evaporação e a retração da descarga fluvial ao final do período seco.

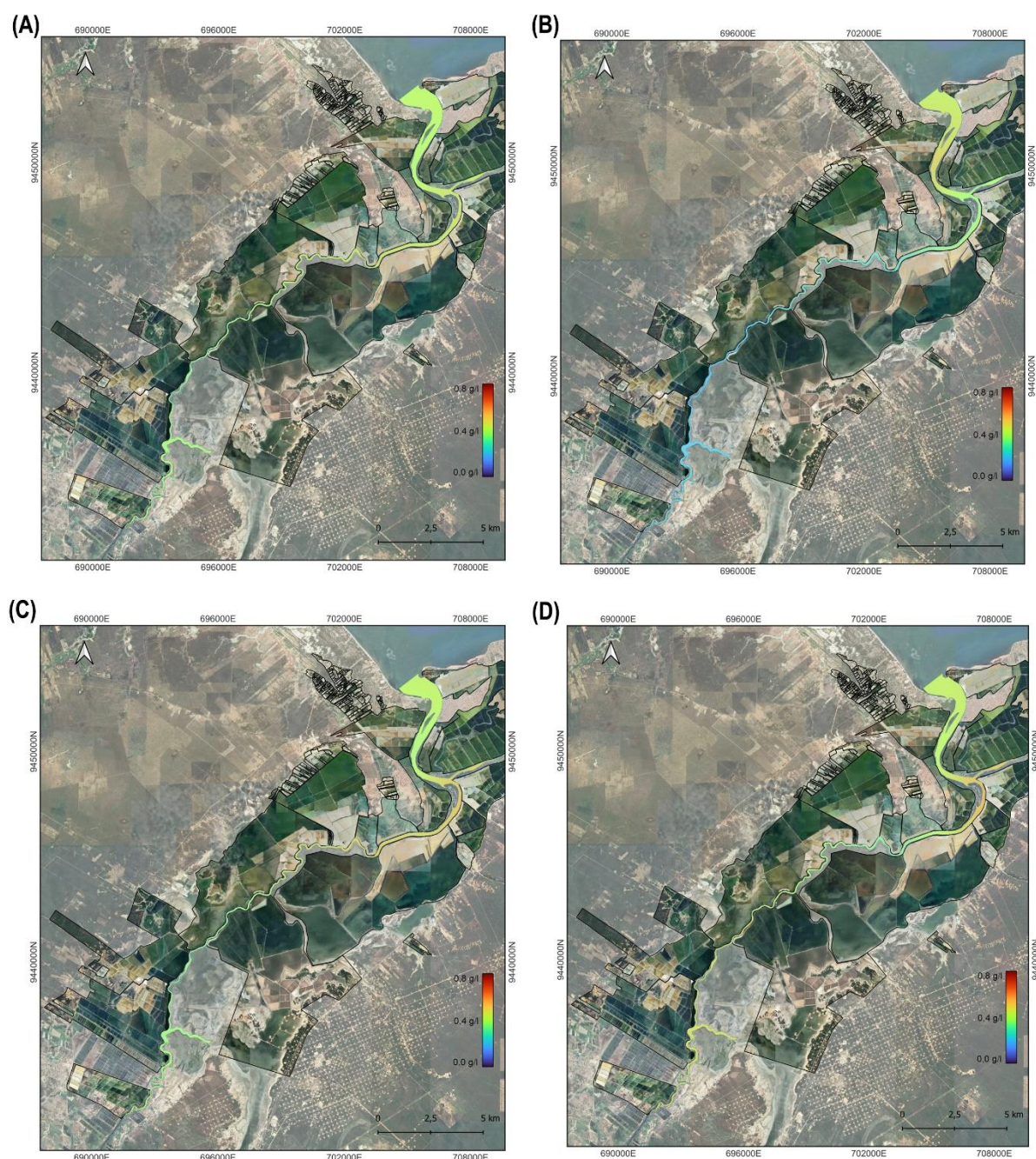


Figura 3. Representação geoespacial dos teores de cálcio (Ca^{2+}) no estuário do Rio Apodi-Mossoró. (A) Primeiro trimestre; (B) segundo trimestre; (C) terceiro trimestre; (D) quarto trimestre. Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Análise dos teores de magnésio (Mg^{2+})

A distribuição espacial dos teores de magnésio (Mg^{2+}) revelou um padrão com predomínio de valores mais elevados no alto estuário do Rio Apodi-Mossoró ao longo do ano de 2023. Essa distribuição sugere a presença de um gradiente inverso, onde as concentrações aumentam no sentido do baixo para o alto estuário, indicando o acúmulo de íons nas regiões interiores, possivelmente associado à baixa renovação hídrica, evaporação. No primeiro trimestre, os teores de Mg^{2+} apresentaram os valores mais elevados no alto estuário, alcançando até $5,9 \text{ g L}^{-1}$, enquanto as porções mais próximas da foz registraram concentrações inferiores, em torno de $2,1 \text{ g L}^{-1}$ (Figura 4-A). Esse padrão evidencia um sistema com forte influência da evaporação nas áreas interiores, além



de possível retenção de íons oriundos de efluentes concentrados (águas-mães) das salinas. A baixa vazão fluvial e o início apenas incipiente das chuvas não foram suficientes para reverter esse acúmulo.

Durante o segundo trimestre, houve uma redução geral nas concentrações de magnésio, especialmente no médio e alto estuário, com valores entre 2,6 e 3,4 g L⁻¹, enquanto o baixo estuário permaneceu com teores em torno de 1,8 a 2,5 g L⁻¹ (Figura 4-B). Essa distribuição sugere que o aumento da descarga fluvial característico da estação chuvosa contribuiu para diluir os íons nas regiões mais internas, restabelecendo temporariamente um gradiente mais típico, com concentração decrescente da foz ao interior.

No terceiro trimestre, período correspondente ao início da estação seca, a distribuição dos teores de magnésio (Mg²⁺) no estuário do Rio Apodi-Mossoró apresentou novamente um gradiente inverso, com as maiores concentrações localizadas no alto estuário, indicando o retorno de condições hipersalinas nas regiões interiores (Figura 4-C). Os valores médios de Mg²⁺ no alto estuário (P1 e P2) ultrapassaram 4,5 g L⁻¹, revelando acúmulo significativo de sais, provavelmente causado pela redução drástica da descarga fluvial, intensa evaporação e estagnação das águas, que dificultam a renovação e promovem a concentração dos íons dissolvidos.

No médio estuário (P3 a P6), os teores variaram entre 2,8 e 3,3 g L⁻¹, sugerindo uma condição de transição, com influência tanto da cunha salina vinda da foz quanto do acúmulo de sais transportados do alto estuário. Essa faixa intermediária apresentou relativa homogeneidade, possivelmente em função da menor movimentação hidrodinâmica característica do período, o que promove maior tempo de residência da água e favorece a retenção de magnésio.

Por fim, no baixo estuário (P7 e P8), os valores registrados foram os mais baixos do trimestre, situando-se entre 1,5 e 2,0 g L⁻¹. Essa condição sugere uma intrusão marinha menos pronunciada neste período, possivelmente em razão de marés menos intensas ou da permanência de águas com menor teor iônico advindas da drenagem continental durante o trimestre anterior. Assim, ao contrário do padrão clássico, no qual se espera a maior salinidade na foz, o trimestre revelou uma inversão do gradiente iônico, reafirmando o comportamento hipersalino interno do sistema e destacando o papel da evaporação e da retenção de sais como forças estruturantes da geoquímica do estuário durante a estação seca.

No quarto trimestre, observou-se a manutenção e intensificação dos altos teores de Mg²⁺ no alto estuário, com valores próximos de 6,0 g L⁻¹, os maiores registrados ao longo do ano (Figura 4-D). Esse acúmulo expressivo está diretamente relacionado à intensificação do déficit hídrico característico do final da estação seca, marcado por chuvas escassas, evaporação acentuada e vazão fluvial nula. A combinação desses fatores contribuiu para a estagnação da água e o aprisionamento de sais nas porções mais internas do estuário, impedindo a renovação dos íons e favorecendo a hipersalinidade local.

No médio estuário (P3 a P6), os teores de Mg²⁺ variaram entre 4,0 e 5,0 g L⁻¹, revelando uma zona de transição sob efeito combinado da intrusão marinha atenuada e da redistribuição de sais oriundos das regiões mais interiores. Essa faixa intermediária se apresenta como um ponto de acúmulo parcial de sais, recebendo influência tanto da maré quanto do carregamento iônico advindo do alto estuário, sendo afetada ainda pela morfologia do canal e pelo tempo de residência das águas.

No baixo estuário (P7 e P8), os valores de magnésio foram ligeiramente menores, situando-se entre 2,8 e 3,75 g L⁻¹, o que contrasta com o padrão clássico de estuários dominados por intrusão marinha. Essa redução pode estar associada à maior taxa de diluição provocada pela água do mar, o que compensa os efeitos da evaporação.

A persistência desse gradiente inverso, com valores crescentes no sentido da foz para o interior, reforça a importância da hipersalinidade continental no sistema, impulsionada pelos fatores climáticos, como evaporação



e escassez de chuvas, além da possível contribuição da ação antrópica, especialmente o lançamento de efluentes da salinicultura (águas-mães), ricos em Mg^{2+} . Esse comportamento destaca a necessidade de uma avaliação crítica da origem dos íons e da compartimentalização hidroquímica do estuário para o planejamento de estratégias de conservação e mitigação de impactos.

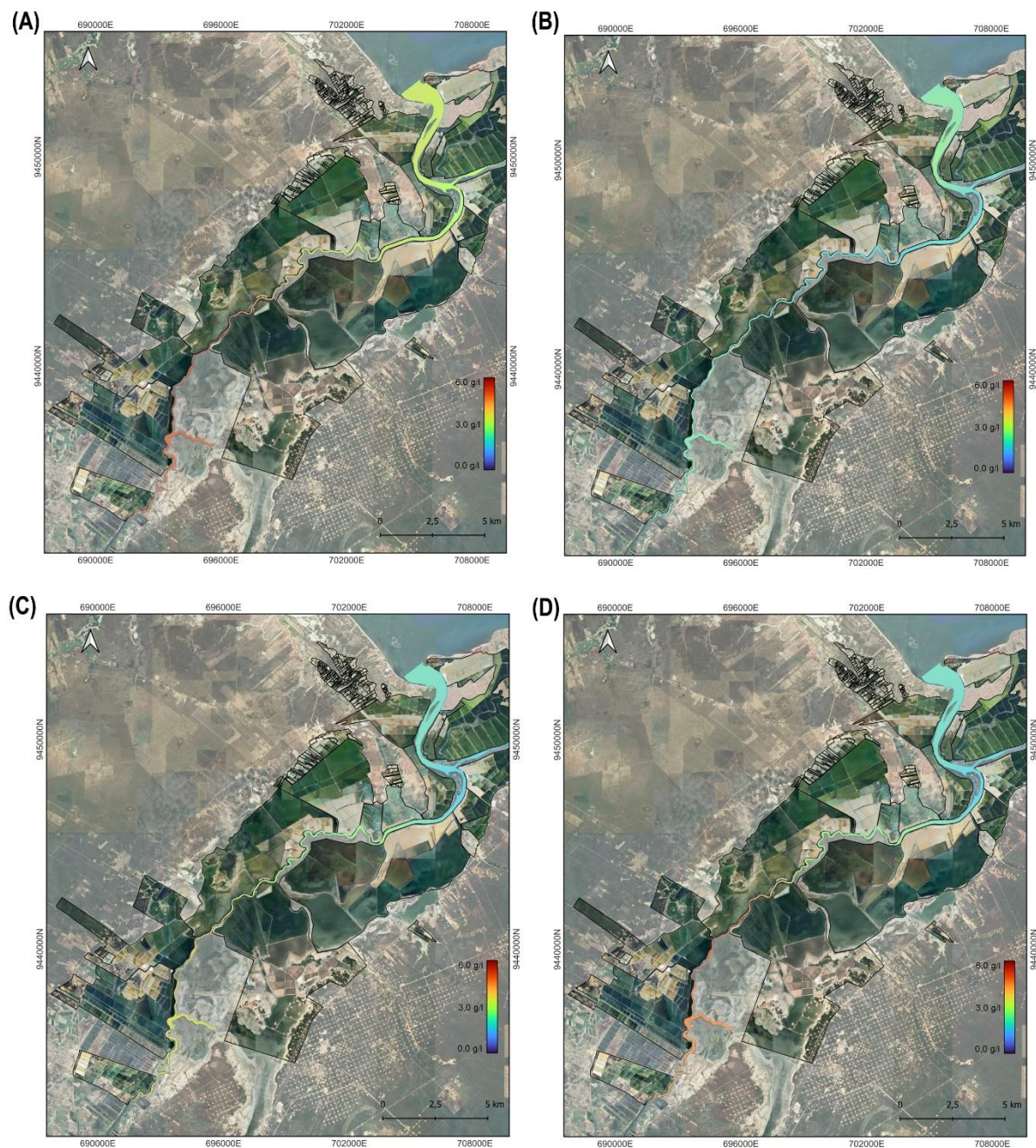


Figura 4. Representação geoespacial dos teores de magnésio (Mg^{2+}) no estuário do Rio Apodi-Mossoró. (A) Primeiro trimestre; (B) segundo trimestre; (C) terceiro trimestre; (D) quarto trimestre. Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Os resultados indicam que, diferentemente do padrão clássico observado em muitos estuários, o Mg^{2+} tende a se acumular preferencialmente nas porções superiores do estuário do Apodi-Mossoró, especialmente durante a estação seca. Isso evidencia a importância de se considerar a influência local de fatores como a intensa evaporação e a reduzida descarga fluvial, combinada a salinicultura, os quais atuam de forma sinérgica na



modulação da qualidade da água. Assim, o magnésio se consolida como um marcador geoquímico eficaz da hipersalinidade continental em ecossistemas estuarinos do semiárido brasileiro.

Discussão

Com base nos dados de precipitação obtidos, o acumulado anual foi de 829,7 mm, valor que se insere na faixa histórica da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró. A distribuição das chuvas foi altamente desigual entre os trimestres, refletindo a forte sazonalidade do clima semiárido local. O 1º trimestre (janeiro a março) totalizou 356 mm, marcando a transição da estação seca para o início da chuvosa, com chuvas ainda intermitentes. O 2º trimestre (abril a junho) apresentou o maior volume de precipitação do ano, com 375,3 mm, caracterizando o período de pico da estação chuvosa, responsável pelo aumento da vazão fluvial e diluição dos sais dissolvidos. Já o 3º trimestre (julho a setembro) registrou apenas 54,8 mm, enquanto o 4º trimestre (outubro a dezembro) teve 43,6 mm, evidenciando a prolongada estiagem no segundo semestre, com fortes efeitos na salinização do estuário.

Esses dados climáticos ajudam a explicar a variação nos teores de salinidade e íons dissolvidos ao longo do ano. Durante o 2º trimestre, o aumento expressivo da vazão fluvial, induzido pelas chuvas, resultou na diluição significativa da salinidade e dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , especialmente no alto e médio estuário, como verificado nos mapas temáticos. Em contrapartida, nos 3º e 4º trimestres, os baixos volumes de chuva e a evaporação intensa favoreceram a acumulação de sais nas regiões interiores, invertendo o gradiente iônico esperado para estuários clássicos e consolidando um padrão de hipersalinidade continental.

Segundo estudos realizados por Silva (2000) e Ribeiro (2010), esse gradiente é característico de ambientes estuarinos, nos quais ocorre a mistura entre águas continentais e marinhas. Ademais, a presença marcante desses íons nos trechos mais distantes da foz confirma a forte intrusão salina, um fenômeno amplificado pelas condições semiáridas do Rio Grande do Norte, onde a baixa pluviosidade e a elevada taxa de evaporação favorecem a hipersalinidade, conforme as pesquisas realizadas por Rocha et al. (2011) e Carvalho et al. (2018).

Nesse estudo, a salinidade torna-se fortemente presente em função das águas oceânicas que de forma intrusiva adentram os estuários, principalmente nos períodos de seca. De maneira similar, Silva (2010), quando estudou as concentrações de metais-traço em estuários de Recife, demonstrou variação de salinidade, registrando a influência da sazonalidade e da diluição da água salgada no estuário.

Já Cunha (2018), quando realizou estudos sobre a capacidade de diluição do Rio Apodi/Mossoró, relatou média igual a 282,24 g L⁻¹ (DP = 4,34; CV=1,54%), mais de 8 vezes superior à salinidade da água do mar, e variou entre o máximo de 290 g L⁻¹ e o mínimo de 275 g L⁻¹, sendo o parâmetro com maior potencial poluidor dentre os analisados para os efluentes da indústria salineira. Essa foi considerada como elemento base para determinação da capacidade de diluição do estuário e, conseqüentemente, da vazão máxima de lançamento de efluentes.

D'Aquino et al. (2011), por sua vez, consideram a distribuição espacial de salinidade como um indicador da interação dinâmica entre as forças produzidas pela descarga fluvial, estuário afora, e pela maré, tanto para fora quanto para dentro, produzindo o gradiente horizontal da densidade dito baroclínico.

Contudo, durante o período seco, observa-se um avanço do domínio marinho para o interior do estuário, intensificando os valores de salinidade e elevando as concentrações dos íons Ca^{2+} e Mg^{2+} . Sob essa ótica, no estuário do Rio Apodi-Mossoró, deve-se considerar a contribuição potencial da salinicultura para os teores elevados de Ca^{2+} e Mg^{2+} , sobretudo nas áreas próximas às salinas, na medida em que os efluentes ricos nesses íons podem interferir na interpretação dos gradientes naturais, sendo necessário diferenciar entre intrusão marinha e fontes antrópicas, principalmente em períodos de baixa renovação hídrica. Desse modo, esse tipo de



resposta indica que não há processos relevantes de remoção ou adição local desses elementos, como precipitação de sais ou influência antrópica direta (Schaeffer-Novelli et al. 1990).

O estudo realizado por Monteiro et al. (2015) apontam que no estuário do rio Curuçá, no nordeste paraense, durante a maré enchente, ocorre o deslocamento das águas costeiras para o estuário, aumentando a salinidade (Silva et al. 2008). Esse aumento de salinidade está associado à intrusão de água marinha, que é rica em íons como cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). Por outro lado, na maré vazante, há uma maior influência da água doce, reduzindo a salinidade e, consequentemente, as concentrações desses íons.

Durante a estação chuvosa (janeiro a junho), observou-se uma tendência de diluição dos teores iônicos, principalmente no segundo trimestre. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da descarga fluvial, o qual reduz a influência da água marinha e promove maior renovação da água no estuário (Domingos et al. 2015). No entanto, mesmo nessa estação, o Baixo Estuário continua apresentando elevados teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , demonstrando a persistente influência oceânica nessa porção do sistema.

Além disso, a heterogeneidade espacial observada reforça a necessidade de zonamento ambiental para o estuário, considerando que cada compartimento (Alto, Médio e Baixo) apresenta características hidroquímicas distintas. Essa diferenciação é importante para estratégias de monitoramento e gestão, especialmente diante das mudanças climáticas que podem intensificar os efeitos da seca prolongada e da intrusão salina (Santos et al. 2023).

Os resultados obtidos estão em consonância com a literatura especializada sobre estuários em regiões semiáridas, como nos trabalhos realizados por Batista et al. (2020), que destacam a importância do controle climático e hidrológico na composição iônica da água. A análise integrada entre salinidade, cálcio e magnésio também demonstra ser uma ferramenta eficaz para avaliar a influência marinha e os processos de mistura no estuário, contribuindo para a compreensão da sua dinâmica geoquímica.

Considerações Finais

A análise dos teores de salinidade, cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) no estuário do Rio Apodi/Mossoró revelou padrões espaciais e temporais fortemente associados à dinâmica hidrológica sazonal, ao regime pluviométrico e à influência marinha. A distribuição dos íons acompanhou, de maneira geral, as variações do volume de chuvas, o avanço da intrusão salina e os efeitos da evaporação, sendo possivelmente intensificada por pressões antrópicas como o lançamento de efluentes provenientes da salinicultura.

Recomenda-se, para estudos futuros, o uso de modelagens hidrodinâmicas e geoquímicas para melhor compreensão dos fluxos de água e solutos, além da inclusão de outros parâmetros físico-químicos e biológicos que contribuam para uma avaliação mais integrada da qualidade ambiental do estuário.

Referências Bibliográficas

Alvares, Clayton Alcarde, José Luiz Stape, Paulo Cesar Sentelhas, José Leonardo de Moraes Gonçalves, e Gerd Sparovek. 2013. "Köppen's Climate Classification Map for Brazil". *Meteorologische Zeitschrift* 22 (6): 711–28. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Baird, R. B., A. D. Eaton, e E. W. Rice. 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Water Works Association.



Baraúna, J. B. F. O., J. O. Vitoriano, e C. Alves Junior. 2015. “Obtenção e caracterização de precipitados a partir de águas residuais das salinas (águas mães)”. Trabalho em evento presented em 55º Congresso Brasileiro de Química, Goiânia-Go. *Anais*. <https://www.abq.org.br/cbq/2015/trabalhos/8/8529-21690.html>.

Batista, Ana Carolina de Oliveira Nobre, Stephanie de Oliveira Souza, Maria Patrícia Sales Castro, e Fernando José Araújo da Silva. 2020. “Estiagem prolongada e conteúdo iônico das águas de dois reservatórios do semiárido brasileiro”. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica* 13 (2): 367–81. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.67298>.

Carvalho, R. G., M. S. F. Kelting, e E. Silva. 2018. “Geomorfologia aplicada ao planejamento ambiental da bacia hidrográfica do rio Apodi – Mossoró – RN”. Trabalho em evento presented em XII SINAGEO, Natal-RN. *Anais*. <https://www.sinageo.org.br/2018/trabalhos/10/10-176-1933.html>.

Carvalho, Rodrigo Guimarães de, org. 2022. *Rio Apodi-Mossoró: meio ambiente e planejamento*. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - Edições UERN.

Cavalcanti, Mário L. F., Pedro D. Fernandes, Hans R. Gheyi, Genival Barros Júnior, Frederico A. L. Soares, e Eliezer da C. Siqueira. 2005. “Índices ecofisiológicos da mamoneira sob estresse salino”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 9 (1): 66–70. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v9nsupp66-70>.

Cunha, Gabriela Nogueira. 2018. “Determinação da capacidade de diluição do estuário do rio Apodi/Mossoró para efluentes da indústria salineira”. Monografia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido. <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/ed213e85-dde8-40c3-a9e5-37b5a16ab3e7>.

D'Aquino, Carla de Abreu, João Silva de Andrade Neto, Guilherme Algemiro Manique Barreto, e Carlos Augusto França Schettini. 2011. “Caracterização oceanográfica e do transporte de sedimentos em suspensão no estuário do Rio Mampituba, SC”. *Revista Brasileira de Geofísica* 29 (2): 217–30. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2011000200001>.

Domingos, Leonardo Adriano, Wallas Douglas De Macedo Souza, Thaís Bezerril Brandão De Lima, Mônica Libânia Mendonça Firmino, Luiz Di Souza, e Lázaro Tavares De Farias. 2015. “Influência antrópica na qualidade da água e sedimentos do rio Apodi-Mossoró no município de Governador Dix-Sept Rosado, RN”. *Anais do 5º Encontro Regional de Química & 4º Encontro Nacional de Química*, novembro, 701–11. <https://doi.org/10.5151/chenpro-5erq-am12>.

Galvão, Antonio Carlos F., e Ana Paula Fioreze, org. 2012. *A questão da água no Nordeste*. Agência Nacional de Águas, Ministério do Meio Ambiente : Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

INMET. 2023. “Instituto Nacional de Meteorologia - INMET”. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). <https://portal.inmet.gov.br/>.

Lopes, Vanessa Martins. 2017. “Etnogeomorfologia costeira e estuarina em comunidades de pescadores artesanais no litoral de Goiana, Pernambuco”. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Pernambuco.



Medeiros, David Hélio Miranda, Andrea Almeida Cavalcante, e Lidriana De Souza Pinheiro. 2018. “Respostas dos padrões de sedimentação e hipersalinidade na cobertura vegetal de planície estuarina sob influência da semiaridez”. *Geosul* 33 (66): 70–84. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2018v33n66p70>.

Monteiro, Sury de Moura, Maâmar El-Robrini, e Igor Charles Castor Alves. 2015. “Dinâmica sazonal de nutrientes em estuário amazônico”. *Mercator (Fortaleza)* 14 (1): 151–62. <https://doi.org/10.4215/RM2015.1401.0010>.

Reinke, Ana Rutz Devantier, e Fábio André Sangiogo. 2023. “Situação De Estudo Água E O Estuário Laguna Dos Patos: A Elaboração De Conceitos Da Ciência Química Em Aulas Do Ensino Fundamental”. *Humanidades & Inovação* 10 (19): 98–114. <https://revista.unitins.br/index.php/humanidadeseinovacao/article/view/9260>.

Ribeiro, A. S. 2010. *Ecologia I.indd*. Universidade Federal de Sergipe. https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/08413418082016Ecologia_I_aula_1.pdf.

Rocha, A. B., V. C. Sales-Claudino, e M. C. L. Sales. 2011. “Geoambientes, uso e ocupação do espaço no estuário do rio Apodi-Mossoró, Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil”. *Revista Eletrônica do Prodepa* 7 (2): 60–75.

Santos, Rosinette Machado, Pedro Henrique Campos Sousa, Andrew Wallace Palheta Varela, Fábio Campos Pamplona, e Maria de Lourdes Souza Santos. 2023. “Variação espaçotemporal de nutrientes inorgânicos dissolvidos e clorofila a em um estuário amazônico tropical no norte do Brasil”. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 28: e20200408. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200408>.

Schaeffer-Novelli, Yara, Gilberto Cintrón-Molero, Raquel Rothleder Adaime, e Tânia Maria de Camargo. 1990. “Variability of Mangrove Ecosystems along the Brazilian Coast”. *Estuaries* 13 (2): 204–18. <https://doi.org/10.2307/1351590>.

Silva, H. K. P. D. 2010. “Avaliação das concentrações de metais-traço e suas interações nos sedimentos e biota do parque dos manguezais, região metropolitana do Recife (RMR), Pernambuco, Brasil”. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/8337>.

Silva, L. M., L. A. Morais, A. G. Silva, P. R. F. Morais, T. C. M. Dantas, e L. D. Souza. 2008. “Correlação Entre Sazonalidade E Concentrações De Salinidade De Cloretos Nas Águas Da Bacia Hidrográfica Do Rio Apodi/Mossoró”. Trabalho em evento presented em 48º Congresso Brasileiro de Química, Rio de Janeiro - RJ. *Anais*. <https://www.abq.org.br/cbq/2008/trabalhos/13/13-406-2983.htm>.

Silva, Margarida. 2000. “Estuários - Critérios Para Uma Classificação Ambiental.” *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 5 (1): 23–35. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v5n1.p23-35>.

Vieira, M. S., M. a. M. Moura, e J. R. Ferreira. 2005. “Estudo Das Variações Sazonais E Espaciais Dos Íons Dominantes Na Água E No Sedimento Da Represa De Ibitinga (São Paulo, Brasil 21°45's E 48°50'w)”. *Arquivos do Instituto Biológico* 72 (4): 523–34. <https://doi.org/10.1590/1808-1657v72p5232005>.