

EVIDÊNCIAS DOS EFEITOS DO AQUECIMENTO GLOBAL NA RESERVA EXTRATIVISTA MARINHA (RESEX) DO DELTA DO PARNAÍBA (PI)

Gabriela Mendes¹
David Valença Dantas²
Eduardo Gentil³

RESUMO

O aquecimento global, um dos efeitos das mudanças climáticas, provoca o aumento da temperatura média da atmosfera e dos oceanos, acidificação marinha e alterações na paisagem costeira. Diante da escassez de estudos na região nordeste do Brasil, este trabalho utilizou 30 anos (1990–2020) de imagens dos satélites Landsat 5 (TM) e Landsat 8 (OLI), radar SRTM e dados altimétricos para avaliar os possíveis impactos na Reserva Extrativista Marinha (RESEX) do Delta do Parnaíba. Os resultados indicam expansão das áreas de mangue e do espelho d'água, induzidas por fatores ambientais. A topografia local confirma a tendência de avanço do manguezal, especialmente na porção leste da RESEX. A elevação do nível médio do mar, estimada em 2,82 mm/ano, sugere crescente intrusão salina, com potenciais impactos à biodiversidade e à economia regional.

PALAVRAS-CHAVE: mudanças climáticas, sensoriamento remoto, ambiente costeiro.

EVIDENCE OF THE EFFECT OF GLOBAL WARMING ON THE MARINE EXTRACTIVE RESERVE (RESEX) OF THE PARNAÍBA DELTA (PI)

ABSTRACT

Global warming, one of the effects of climate change, causes rising average atmospheric and ocean temperatures, ocean acidification, and coastal landscape changes. Given the lack of studies in northeastern Brazil, this study used 30 years (1990–2020) of Landsat 5 (TM) and Landsat 8 (OLI) satellite images, SRTM radar, and altimetric data to assess impacts on the Marine Extractive Reserve (RESEX) of the Parnaíba Delta. Results show expansion of

¹Doutoranda em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental (UDESC), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Programa de Pós-Graduação em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental (PPGPLAN-UDESC), Grupo de Gestão, Ecologia e Tecnologia Marinha (GTMar), Laboratório de Ecologia Marinha (ECOMar), Laguna (SC), Brasil, e-mail: gabmmendes@outlook.com

²Doutor em Oceanografia (UFPE), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Programa de Pós-Graduação em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental (PPGPLAN-UDESC), Departamento de Ciências Biológicas (DCB), Grupo de Gestão, Ecologia e Tecnologia Marinha (GTMar), Laboratório de Ecologia Marinha (ECOMar), Laguna (SC), Brasil, e-mail: david.dantas@udesc.br.

³Doutor em Sensoriamento Remoto (INPE), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Programa de Pós-Graduação em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental (PPGPLAN-UDESC), Departamento de Ciências Biológicas (DCB), Grupo de Gestão, Ecologia e Tecnologia Marinha (GTMar), Laboratório de Geomática e Sistemas Marinhos (GEOMar), Laguna (SC), Brasil, e-mail: eduardo.gentil@udesc.br.

mangrove areas and water surfaces due to environmental factors. The local topography confirms the trend of mangrove growth, especially in the eastern portion of the RESEX. The mean sea level rise, estimated at 2.82 mm/year, suggests increasing saline intrusion, potentially affecting biodiversity and the regional economy.

KEYWORDS: climate change, remote sensing, coastal environment.

EVIDENCIAS DEL EFECTO DEL CALENTAMIENTO GLOBAL EN LA RESERVA EXTRACTIVA MARINA (RESEX) DEL DELTA DEL PARNAÍBA (PI)

RESUMEN

El calentamiento global, uno de los efectos del cambio climático, provoca el aumento de la temperatura media atmosférica y oceánica, la acidificación de los mares y cambios en el paisaje costero. Ante la escasez de estudios en el noreste de Brasil, este trabajo utilizó 30 años (1990–2020) de imágenes satelitales Landsat 5 (TM) y Landsat 8 (OLI), radar SRTM y datos altimétricos para evaluar impactos en la Reserva Extractiva Marina (RESEX) del Delta del Parnaíba. Los resultados indican expansión de áreas de manglar y del espejo de agua, inducida por factores ambientales. La topografía local confirma la tendencia de crecimiento del manglar, especialmente en la porción oriental de la RESEX. El aumento del nivel medio del mar, estimado en 2,82 mm/año, sugiere una intrusión salina creciente, con posibles impactos en la biodiversidad y en la economía regional.

PALABRAS-CLAVE: cambio climático, percepción remota, ambiente costero.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas referem-se a toda variação climática que vem ocorrendo durante décadas em escala global. Essas variações se manifestam na forma de fenômenos climáticos como tempestades, furacões, acidificação dos oceanos, entre outros, afetando o equilíbrio de diversos ecossistemas terrestres e aquáticos (ALAVIPANAH et al., 2022; CAEL et al., 2023). Um dos efeitos mais significativos das mudanças climáticas é o aquecimento global, que é responsável pelo aumento da temperatura média da atmosfera e dos oceanos (WATTERSON et al., 1999; FORSTER et al., 2023). O aquecimento é provocado principalmente pelas emissões de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e metano. Esses gases retêm o calor na atmosfera, levando à intensificação do efeito estufa natural, gerando mudanças nos padrões climáticos e provocando impactos substanciais em diversos ecossistemas (RENARD et al., 2021; GUAN et al., 2021). O aquecimento global pode afetar as áreas costeiras de diversas formas, incluindo elevação do nível médio do mar, anomalias

positivas da temperatura da superfície do mar e acidificação do meio aquático (BONNETT e BIRCHALL, 2020). Como resultado, regiões topograficamente mais baixas e associadas a rios (ambientes costeiros) tendem a sofrer com inundações, perda de biodiversidade, expansão das áreas de espelho d'água, além da salinização do solo e dos lençóis freáticos (SYVITSKI et al., 2009; GIOSAN et al., 2014; LV et al., 2021).

Ambientes costeiros constituídos por deltas possuem uma morfologia complexa, formada por vários canais fluviais que desembocam no mar e acumulam sedimentos de diferentes granulometrias na sua foz (ANDERSON et al., 2021; OLSON e SUSKI, 2021). Sua formação ocorre em áreas de baixa cota topográfica, onde os sedimentos criam canais e ilhas (SYVITSKI et al., 2009; FEIST et al., 2021). Esses ecossistemas dinâmicos abrigam ampla biodiversidade, uma vez que, são compostos por imensas áreas de manguezais, que oferecem habitats para diversas espécies (ADAME et al., 2021). Os manguezais são essenciais para o funcionamento dos deltas costeiros, devido à sua resistência às variações de temperatura e salinidade (SCHAEFFER-NOVELLI et al., 1990; PRIMAVERA et al., 2018). Além de protegerem o litoral contra erosão e inundações, desempenham funções ecológicas ao fornecer serviços para diversos organismos terrestres e aquáticos (MENÉNDEZ et al., 2020). Sua preservação é fundamental para manter a integridade ecológica e a resiliência dos deltas frente às mudanças climáticas e atividades humanas.

Mundialmente os ambientes deltaicos estão sofrendo significativas diminuições e incremento das áreas de manguezais, causados por fatores como mudanças climáticas e pressão antrópica (WANG e WU, 2020). No Brasil, o Delta do Parnaíba (PI), localizado na região nordeste, merece especial destaque, dado que está entre os maiores deltas do mundo (GUIMARÃES-COSTA et al., 2019). Dotado por extensas áreas de manguezais, este ambiente desempenha a função de berçário, abrigo e zona de alimentação para diversas espécies (SZCZYGIELSKI et al., 2015), razão pela qual comunidades de pescadores artesanais se desenvolveram nas adjacências do Delta do Parnaíba. A Reserva Extrativista Marinha (RESEX) do Delta do Parnaíba, criada em 2000, garante o uso sustentável dos recursos naturais por comunidades tradicionais de pescadores (CRESPO et al., 2024). Essas áreas permitem a extração responsável de recursos, assegurando a subsistência e a preservação cultural das famílias locais. Além disso, a RESEX contribui para a conservação ambiental, protegendo a biodiversidade e mantendo os ecossistemas equilibrados (CRESPO et al., 2020).

Na RESEX do Delta do Parnaíba, o caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*) é o principal recurso pesqueiro e fonte de renda dos pescadores locais. Sua ocorrência depende dos manguezais, ecossistemas essenciais para sua sobrevivência e reprodução. No entanto, essas áreas são vulneráveis às mudanças climáticas, assim a proteção e gestão sustentável desses habitats são fundamentais para garantir a continuidade da pesca e a subsistência das comunidades tradicionais da região. Diante dos impactos do aquecimento global nos ambientes costeiros e da importância ecológica e socioeconômica do Delta do Parnaíba, este estudo tem como objetivo identificar evidências dos efeitos do aquecimento global na RESEX local, com foco na expansão dos manguezais e na possível salinização da área, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. A proposta é gerar informações sobre os impactos regionais desse fenômeno global, contribuindo para a formulação de estratégias de manejo e conservação dos recursos naturais em cenários climáticos adversos.

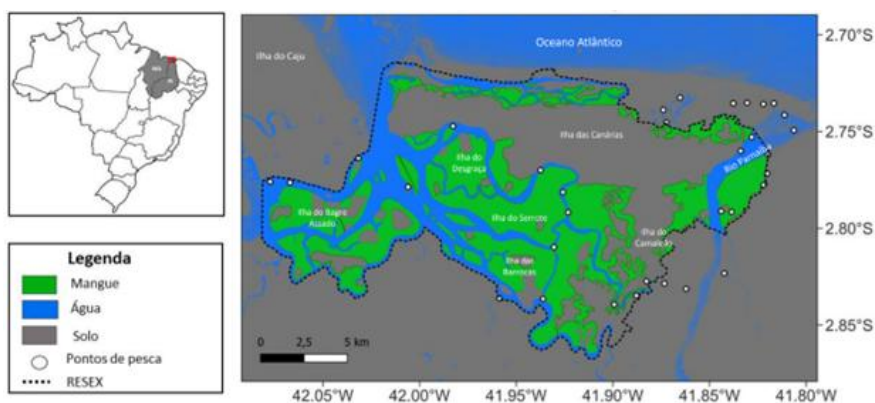
MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O Delta do Rio Parnaíba é o único ambiente geomorfológico desta natureza encontrado nas Américas, localizado na região nordeste do Brasil (Figura 1), entre os Estados do Maranhão e Piauí. Entre os elementos que compõem a paisagem do delta, estão os espelhos d'água, manguezais e dunas, além de biomas como o cerrado e caatinga (GUIMARÃES-COSTA et al., 2019). Este ambiente apresenta grande importância ecológica e econômica para a região, com destaque para a atividade pesqueira artesanal que é responsável pela manutenção das comunidades tradicionais que residem nas adjacências do delta (LUGO et al., 1974). A região sofre influências climáticas do semiárido (quente e seco) e do clima tropical (quente e úmido). Em geral, o local se caracteriza por duas estações definidas, sendo essas, a estação de seca (junho até novembro) e uma estação chuvosa (dezembro até maio). Esta localidade é diretamente influenciada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que gera grande nebulosidade sobre as áreas que estão próximas a linha do Equador (NASCIMENTO et al., 2021). As áreas de manguezais compõem a principal paisagem local e atuam na proteção da

costa por meio da minimização dos impactos dos ventos, ondas e na mitigação de processos erosivos (THAMPANYA et al., 2006; OTTONI et al., 2021). Além disso, os manguezais atuam como área de abrigo e reprodução de diversas espécies terrestres e marinhas. As comunidades tradicionais locais são fortemente dependentes da pesca do caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*), já que os manguezais são o seu principal habitat. Sabidamente, a região da RESEX apresenta os principais pontos de pesca do caranguejo-uçá (Figura 1) (FOGAÇA et al., 2018).

Figura 1. Mapa de localização do Delta do Parnaíba (PI). Círculos em branco representam as principais áreas de exploração do caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*). A linha pontilhada indica a área da RESEX. Os mangues estão representados em verde e o ecossistema aquático está representado em azul.



Dados orbitais no espectro visível

Três décadas de dados orbitais foram utilizados para avaliar possíveis evidências dos impactos do aquecimento global sobre as áreas de manguezal do Delta do Parnaíba (PI). Foram utilizados dados de satélites oriundos dos sensores de resolução espacial (30 m) TM (LANDSAT 5) e OLI (LANDSAT 8), posteriormente foram selecionadas imagens de 20% de cobertura de nuvens entre os anos de 1990 e 2020. Todas as cenas tratadas correspondem à estação de estiagem (seca) em razão da menor nebulosidade deste período, fator que pode auxiliar na identificação de possíveis mudanças espaço temporais nas áreas de manguezal e espelho d'água. Todos os produtos foram obtidos gratuitamente através do *website* do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (www.inpe.br). O banco de dados orbitais gerado foi

submetido a correção atmosférica através do *Semi- Automatic Classification Plugin* (SCP) (LUCA CONGEDO, 2021), visando corrigir os níveis de cinza/pixel e, posteriormente recortado para a área correspondente a RESEX do Delta do Parnaíba. Por fim, as cenas foram vetorizadas e ordenadas a partir de três feições básicas: espelho d'água, solo e mangue.

Análise Booleana e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

A lógica booleana consiste em uma análise de dois critérios (sim/não), os quais permitem demonstrar um cenário ou hipótese (MAHONEY, 1970). Neste estudo foram obtidos mapas booleanos a partir da subtração dos *shapes* anteriormente vetorizados que correspondem às áreas de mangue dos anos de 1990 e 2020. Deste modo, foi possível identificar áreas de redução, estabilidade e acréscimo de manguezal dentro do intervalo de 30 anos. Adicionalmente, foi calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para as áreas de manguezais visando identificar a sanidade dos bosques locais. Este índice fornece a estimativa sobre a condição da cobertura vegetal, medindo a quantidade de reflectância das folhas. O NDVI é definido pela operação matemática dada através das bandas espectrais 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo), do sensor TM, e bandas espectrais 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo), do sensor OLI. Dessa forma, Jensen (1996) descreve para o cálculo do NDVI a seguinte equação:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

Onde temos:

NDVI: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;

NIR: Infravermelho Próximo (0,76 a 0,90 μ m);

R: Vermelho (0,63 a 0,69 μ m).

O resultado do cálculo do NDVI oscila entre -1 a +1. Quanto mais próximo de 1, maior a densidade da cobertura vegetal e maior a taxa fotossintética ativa, ou seja, temos uma vegetação mais saudável. Valores entre 0,33 e 0,66 representam vegetação moderadamente sadia, e por fim, quando o cálculo apresenta mais baixos, temos uma área de vegetação sem nenhuma atividade fotossintética e/ou com pouca ou nenhuma cobertura vegetal. Deste modo, o uso do NDVI para a região da RESEX do Delta do Parnaíba surge como alternativa para

monitorar a sanidade dos manguezais eventualmente expostos ao aquecimento global, identificando áreas de degradação e ajudando na conservação da biodiversidade.

Dados de radar

Foram utilizados dados do radar interferométrico *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) contendo valores referentes às cotas topográficas da região e produtos contendo valores da anomalia da altura do nível médio do mar derivados de um produto de altímetro orbital obtido a partir da análise conjunta de diferentes missões espaciais TOPEX, Jason-1 e Jason-2. Ambos foram obtidos gratuitamente através dos *websites* da EMBRAPA Territorial e da NOAA *Sea Level Rise*, respetivamente. Os dados SRTM foram processados visando identificar áreas de baixo e alto relevo para a região correspondente a RESEX. Esta abordagem visa avaliar regiões mais suscetíveis a inundação em eventuais cenários de perpétuo aumento do nível médio do mar. Adicionalmente, produtos de altimetria foram empregados para avaliar se a região marinha adjacente à região do Delta do Parnaíba já está sendo afetada com o aumento do nível do mar. Para tanto, foram processados dados para aproximadamente trinta anos (1992-2020), estando estes ordenados em aumento médio do nível médio do mar em milímetro por ano.

Dados de Condutividade elétrica do solo e obtenção dos produtos de sensibilidade ao incremento das áreas de manguezal.

A estimativa de salinidade foi a partir do banco de dados orbitais, utilizando como principal dado de entrada a espectroscopia de reflectância no infravermelho próximo (NIR). O método visa caracterizar e identificar a propriedade do solo a partir da banda do NIR, uma vez que, muitos autores sugerem as bandas do infravermelho para o monitoramento de características do solo (umidade e salinidade). A condutividade elétrica do solo foi utilizada como parâmetro análogo a salinidade e a equação para sua estimativa por NGUYEN et al. (2020), para o delta do rio Mekong.

Equação 2

$$EC=30.314*e^{-13.29*NIR}$$

Onde temos:

EC: condutividade elétrica do solo (dS/m);

NIR: Infravermelho Próximo (0,76 a 0,90 μ m).

Para o cálculo da condutividade elétrica do solo foram aplicados os 30 anos de dados visando identificar as variações de salinidade que ocorreram no período. Os resultados obtidos serviram como um dos *inputs* para o modelo de sensibilidade da RESEX para a expansão dos manguezais. Para determinar o quão sensível a área de estudo está para expansão dos manguezais, foi utilizada a metodologia de soma ponderada, que neste estudo serviu como um indicador potencial. A metodologia foi aplicada para toda a área da RESEX visando estimar áreas de solo que estarão mais susceptíveis a se tornarem manguezal nos próximos anos. Os dados de entrada do modelo foram: condutividade elétrica do solo (a partir da equação 2), declividade (obtida a partir do SRTM) e a distância da água (calculada a partir da distância euclidiana de um pixel qualquer até o pixel referente ao corpo d'água mais próximo). O modelo de sensibilidade foi aplicado sobre a cena de 2020, por ser esta a mais recente de todo o banco de dados avaliado. Segue a equação que descreve a sensibilidade das áreas de solo da RESEX se tornarem manguezal:

Equação 3

$$\text{Sensibilidade}=3.5*D-EC-3.5*Dist$$

Onde temos:

Sensibilidade: Possibilidade das áreas de solo se tornarem mangue;

D: Declividade do terreno;

EC: Condutividade elétrica do solo (dS/m);

Dist: Distância de um ponto qualquer no terreno até a água.

Os coeficientes da soma foram ajustados empiricamente de modo a prever quais áreas poderão se tornar mangue após o ano de 2020 na RESEX do delta do Parnaíba. Para identificação da proporção de áreas de risco baixo, médio e alto, foi feita a normalização do

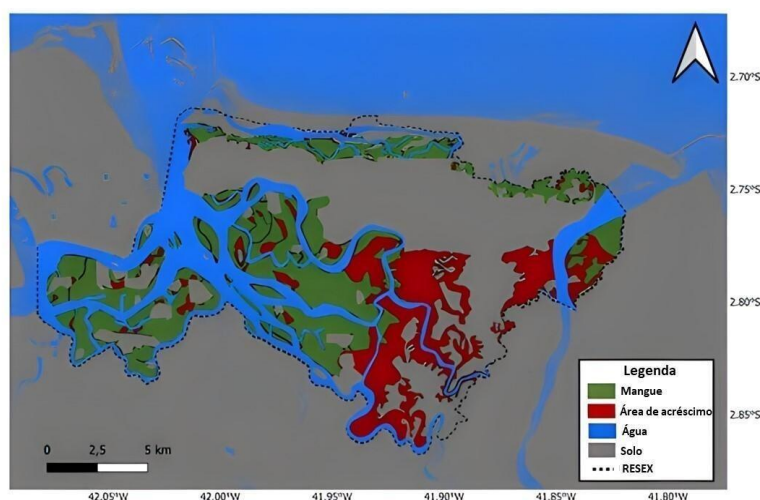
raster de sensibilidade por Z-score, de modo a tornar a distribuição dos dados de sensibilidade centrada em 0 (média = 0, desvio-padrão = 1). A classificação das áreas (chance baixa, média e alta) foi feita dividindo os valores numéricos em três partes, referentes às três classes. A normalização por Z-score facilita a interpretação dos dados, permitindo identificar com precisão as áreas mais suscetíveis à conversão em manguezais, essencial para estratégias de conservação e uso sustentável do território. Este modelo fornece uma ferramenta quantitativa para prever mudanças no ecossistema.

RESULTADOS

Dados orbitais no espectro visível

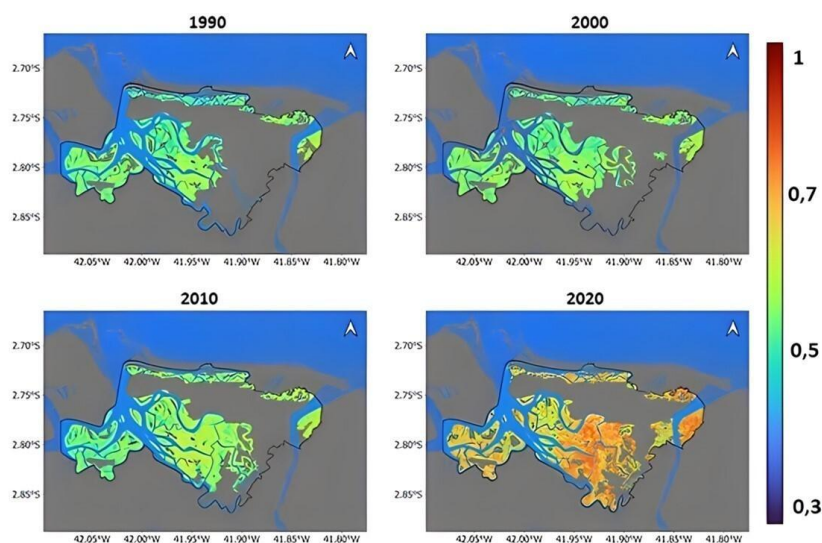
A vetorização dos manguezais em ambiente SIG a partir dos produtos orbitais tratados evidenciou um incremento das áreas de bosque de mangue, a saber: 1990 (78,7 km²), 2000 (87,7 km²), 2010 (102,3 km²) e 2020 (112 km²), sugerindo um aumento médio de área da ordem de 11 km² por década. Após a vetorização das áreas de manguezal, os produtos foram submetidos à análise booleana, tendo por critério a subtração das áreas de manguezal do ano de 2020 pela área correspondente ao ano de 1990. A Figura 2 apresenta os resultados obtidos: Observe que as áreas em verde apresentam as áreas de persistências de manguezais entre 1990 e 2020, em contrapartida, as porções em vermelho demonstram as regiões onde houve acréscimo dos manguezais na porção interna da RESEX. As áreas em azul e cinza denotam água e a terra, respectivamente, e a linha pontilhada é a delimitação da área da RESEX (Figura 2). A partir da análise booleana, verificou-se um acréscimo de 42,24% na área de manguezais entre os anos de 1990 e 2020. Percebe-se que o crescimento dessas áreas ocorreu principalmente na região sudeste da RESEX. Paralelamente ao crescimento gradual das áreas de mangue, ocorreu também um incremento relativo das áreas de espelho d'água na RESEX. Após o processamento dos dados orbitais, obtivemos as seguintes porções de espelho d'água: 1990 (52,4 km²), 2000 (56 km²), 2010 (57,3 km²) e 2020 (60,2 km²), exibindo assim, um incremento médio de 2,6 km² por década.

Figura 2. Mapa temático da subtração da vetorização dos mangues dos anos de 1990 e 2020. Note sobreposições dos vetores, em verde temos as áreas de 1990 e 2020. Em vermelho temos o aumento dos mangues em estado atual (2020).



Os resultados do NDVI para as regiões de manguezal demonstraram que no ano de 1990 houve valores em torno de 0,5 e 0,6; sugerindo que as áreas de mangue estavam em um estado de sanidade razoável. Nos anos 2000 foi evidenciado uma persistência dos valores de NDVI em torno de 0,6. Já em 2010, ocorreu um incremento dos valores de NDVI para intervalos entre 0,6 e 0,7, sugerindo que essas áreas estavam moderadamente sadias. Em 2020 um novo incremento dos valores do NDVI (entre 0,7 e 0,8) indica que a sanidade dos bosques se aproximou de uma condição ótima de sanidade. A figura 3 permite analisar o incremento das áreas de manguezal em consonância com os valores de NDVI obtidos (Figura 3).

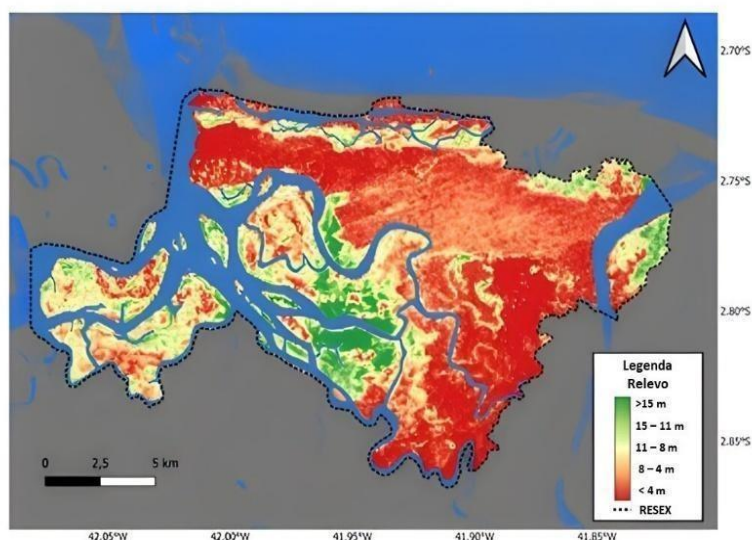
Figura 3. Valores de NDVI sobrepostos às áreas de manguezal para os anos 1990, 2000, 2010 e 2020 para a região correspondente a RESEX do Delta do Parnaíba. A escala de 1 até 0,3 aponta os valores da sanidade dos bosques e o incremento das áreas de manguezal



Dados oriundos de radar

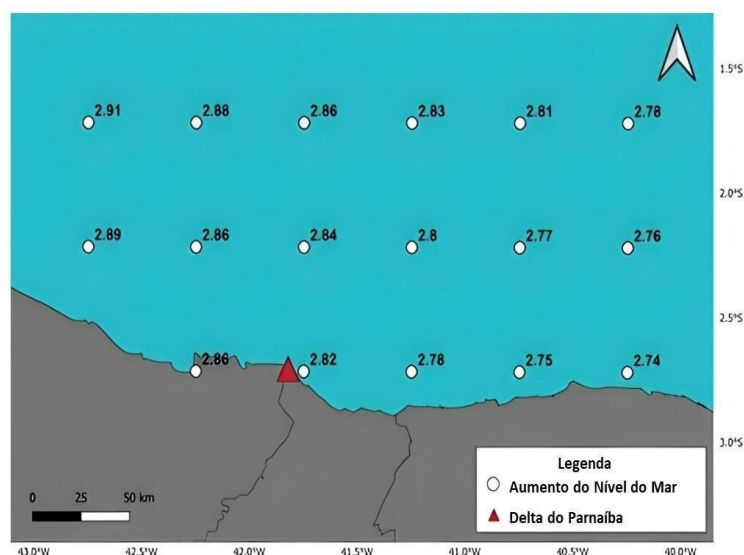
A topografia permite entender a dinâmica de ocupação dos manguezais no entorno dos corpos hídricos, dado que, esta vegetação carece de ambientes topograficamente mais baixos e, portanto, mais susceptíveis a inundação pelas marés e correntes de marés. Assim, a caracterização do relevo da região da RESEX é fundamental para avaliar potenciais correlações entre as porções preferenciais de aumento das áreas de manguezal. Na figura 5, temos em vermelho as zonas com cotas baixas (< 4 m) e em tons de verde as cotas mais altas.

Figura 5. Mapa topográfico sobre o relevo da área da RESEX. Em vermelho temos todas as áreas de cotas baixas com valores < 4 m e em verde temos as áreas de cotas altas com valores > 15 .



Os dados permitem afirmar que as cotas mais próximas da região entre as marés encontram-se na porção leste da RESEX, coincidindo com a zona de acréscimo dos manguezais locais (Figura 5). Paralelamente, o processamento dos dados altimétricos para os anos de 1992 até 2020 entre as latitudes -1.75° S até -2.75° S e longitudes de -42.75° W até -40.25° W, revelaram um aumento do nível médio do mar entre 2,74 até 2,91 mm/ano (Figura 6). Podemos evidenciar que toda a região adjacente ao delta do Parnaíba está sendo submetida ao aumento do nível médio do mar.

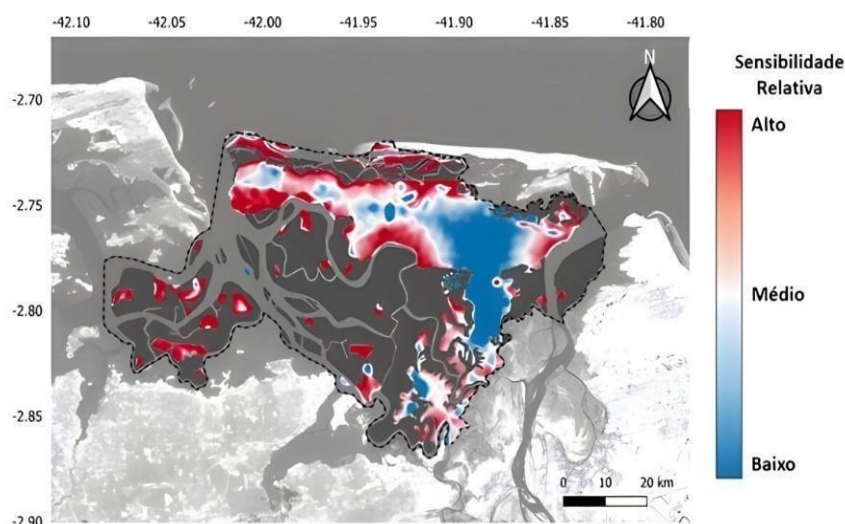
Figura 6. Mapa temático sobre o aumento do nível médio do mar entre os anos de 1992 até 2020 em mm/ano. O triângulo vermelho identifica o Delta do Parnaíba (PI).



Dados de Condutividade elétrica do solo e sensibilidade ao incremento das áreas de manguezal.

A condutividade elétrica do solo variou moderadamente durante as décadas estudadas. As variações médias da condutividade elétrica (dS/m) do solo corresponderam a 1.70, 1.43, 1.55 e 1.88, para 1990, 2000, 2010 e 2020, respectivamente. O mapa temático de sensibilidade relativa (condutividade elétrica do solo e declividade) para o surgimento de manguezais (Figura 8), mostra níveis altos (vermelho), médios (branco) e baixos (azul) de áreas sensíveis para expansão de bosques de manguezais. Os dados indicam que 46,92% da área está em alto índice de sensibilidade (Figura 8), sugerindo que as áreas próximas aos cursos d'água acabam se tornando mais sensíveis quando comparadas com áreas distantes dos rios, apontando que essas áreas possuem os valores de declividade, condutividade e a distância semelhantes as áreas que já possuem manguezais, e assim indicando índices de vulnerabilidade, como podemos ver na área nordeste da Figura 8.

Figura 8. Mapa temático de sensibilidade para o surgimento de manguezais. A sensibilidade é relativa aos dados de entrada (declividade e condutividade elétrica do solo) e é classificada em alto, médio e baixo índice de sensibilidade.



DISCUSSÃO

A RESEX do Delta do Parnaíba tem vivenciado uma expansão significativa das áreas de manguezal ao longo das últimas décadas, especialmente na porção leste da unidade de conservação. Essa dinâmica está possivelmente associada ao aquecimento global, sendo reforçada por dados de elevação do nível médio do mar e pelas características topográficas locais, que favorecem o avanço do mangue sobre áreas anteriormente ocupadas por outros ecossistemas, como apicuns e pântanos. Na região do Delta do Parnaíba, os resultados indicam evidências claras dessas mudanças, com um crescimento médio significativo das áreas de manguezal e um aumento do nível médio do mar, sugerindo que a área vem sendo afetada por variações climáticas, como o aquecimento global (ELLISON, 2015). O processo de incremento dos manguezais no Nordeste do Brasil é um fenômeno complexo que envolve uma interação de múltiplos fatores, dos quais o aquecimento global desempenha um papel significativo (WARD & LACERDA, 2021; FERREIRA et al., 2023). A visível expansão dos manguezais na RESEX do Delta do Parnaíba, não só altera a paisagem costeira, mas contribui para a substituição dos

ecossistemas como apicuns e pântanos, que atuam como reguladores da água, no controle de inundações (CINTRÓN-MOLERO et al., 2023) e recarga de aquíferos (ZAMBONI et al., 2022). A substituição dessas áreas, pode ocasionar em alterações ecológicas como: mudanças nos ciclos de nutrientes, afetando a fertilidade do solo e a dinâmica ecológica da região, implicando na biodiversidade local (FERREIRA et al., 2023).

Os resultados deste estudo em relação à sanidade dos bosques de manguezais são consistentes com a literatura existente, que já havia abordado anteriormente a saúde dos manguezais na costa setentrional brasileira para o período analisado (MUEHE, 2010; SCHAEFFER-NOVELLI et al., 1990). No entanto, a partir do ano 2000, com a implementação da Reserva Extrativista (RESEX), observou-se uma tendência de aumento nos valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Essa mudança pode ser interpretada como um indicativo positivo de melhoria na saúde e na cobertura vegetal dos manguezais, possivelmente devido às medidas de conservação e manejo implementadas na área protegida. É importante ressaltar que esses resultados contrastam com estudos anteriores realizados em regiões distintas, que relataram reduções nos valores de NDVI associadas a anomalias positivas mais severas do nível do mar, realidades divergentes podem ser atribuídas às diferenças nos contextos ambientais e nas pressões antropogênicas (ALATORRE et al., 2016; BULLOCK et al., 2017). Com isso, ressaltamos a importância das áreas protegidas e das políticas de conservação como ferramentas eficazes na promoção da saúde dos ecossistemas costeiros e na mitigação dos impactos antropogênicos como a urbanização, agricultura e aquicultura.

A expansão das áreas de manguezais na Reserva Extrativista (RESEX) pode ser atribuída a uma combinação de ações naturais, com ênfase na redução das chuvas anuais e no aumento do nível do mar, que afetam a disponibilidade de água doce na bacia (SOUTTER et al., 2020; FERREIRA et al., 2022). O método de reprodução das espécies de manguezais é hidrocórico, possuindo capacidade de flutuabilidade, resistência a salinidade e estabelecimento rápido, deste modo, a capacidade de dispersão das sementes através dos cursos d'água permite sejam transportadas por longas distâncias, chegando a novas localidades onde podem germinar e se estabelecer, favorecendo assim a expansão natural dos manguezais (PELAGE et al., 2019). LIU et al (2023), identificaram que o aumento da temperatura média da água do mar pode favorecer a germinação e o crescimento das sementes de mangue, podendo aprimorar os

processos metabólicos nas sementes contribuindo para uma germinação mais rápida e o incrementando dos bosques de manguezais. Com isso, mudanças nos padrões de precipitação e aumento do nível do mar, associadas ao aquecimento global, podem criar condições mais favoráveis para o desenvolvimento dos manguezais, fornecendo a quantidade adequada de água doce e nutrientes essenciais (WIJAYASINGHE et al., 2018).

O aumento do nível do mar pode criar novas áreas de inundação, influenciar na dinâmica dos sedimentos, resultando em uma maior intrusão salina (GODOY E LACERDA, 2015; LACERDA, 2018). Esses fatores podem criar condições mais favoráveis para o crescimento e desenvolvimento dos manguezais, que são adaptados a ambientes salinos (DANG et al., 2022). Um estudo realizado por HAQUE E REZA (2021) em Bangladesh identificou o efeito da intrusão salina nos manguezais, observando a substituição de espécies de água doce por espécies marinhas, que atuam como bioindicadores desse impacto ambiental. Esse padrão pode estar ocorrendo na RESEX, contribuindo para a expansão dos manguezais na área. A intrusão salina, caracterizada pela salinização da água doce nos ecossistemas costeiros devido ao avanço da água marinha em direção ao continente, é um fenômeno global documentado em estudos anteriores (FAGHERAZZI E BRYAN, 2017; NGUYEN et al., 2020). Essa salinização está intrinsecamente ligada ao aquecimento global, conforme indicado por pesquisas anteriores (BAKSHI E PANIGRAHI, 2015; BELLAFIORE et al., 2021), que destacam a relação entre o aumento das temperaturas e a salinização das áreas úmidas. Embora os resultados da equação de condutividade elétrica do solo indiquem pouca variação, estudos demonstram que mesmo pequenas mudanças nas propriedades do solo, como salinidade e nutrientes, podem influenciar significativamente a resposta dos manguezais. Na Reserva Extrativista (RESEX) do Delta do Parnaíba, durante o período de estiagem, a entrada de água marinha é mais pronunciada, aumentando o potencial de salinização do solo.

Esse fenômeno é impulsionado pelo aumento do nível do mar, que promove a intrusão de água salgada no continente, especialmente devido à topografia local inclinada, inundando áreas e espalhando água salgada pelos rios e afluentes do delta (VOGT et al., 2016). A influência sazonal da entrada de água marinha durante a estiagem é crucial para entender os padrões de salinização do solo e o processo de expansão dos manguezais na RESEX,

destacando a importância da gestão integrada e adaptativa desses ecossistemas frente às mudanças ambientais. Devido à sua sensibilidade às condições ambientais globais, os manguezais são considerados ambientes ideais para monitorar os impactos do aquecimento global (BESSET et al., 2019). O crescimento dos manguezais na Reserva Extrativista (RESEX) do Delta do Parnaíba está correlacionado com uma expansão do espelho d'água na área. Os ambientes deltaicos, como o do Delta do Parnaíba, possuem uma dinâmica própria, caracterizada por flutuações das marés, variações de salinidade e deposição de sedimentos fluviais ao longo dos canais, tornando-os altamente sensíveis a mudanças ambientais (GRASES et al., 2020). A sensibilidade dos manguezais reflete a resposta dinâmica desses ecossistemas a fatores ambientais, o que os torna indicadores valiosos para entender os efeitos do aquecimento global e outras perturbações ambientais nos ecossistemas costeiros.

A topografia da área de estudo desempenha um papel crucial na relação entre a dinâmica dos corpos hídricos e a expansão dos manguezais. O escoamento da água do mar é direcionado para as áreas de cotas mais baixas, inundando as planícies e os ambientes de várzea, o que cria condições favoráveis para o desenvolvimento dos manguezais, como observado na região sudeste (BOZI et al., 2021). Em contrapartida, na região nordeste, onde não há o estímulo direto de cursos d'água, o potencial para a expansão dos manguezais na Reserva Extrativista do Delta do Parnaíba é significativamente reduzido. Isso sugere que a topografia exerce uma influência determinante na distribuição e na sensibilidade dos manguezais a mudanças ambientais, destacando a importância de considerar esses aspectos na gestão desses ecossistemas costeiros (ARNAUD et al., 2020). De modo geral, as áreas de mangue prosperam e se expandem ao longo de linhas costeiras dinâmicas, que são influenciadas por diversas forças físicas, como rios, marés e ondas, e se adaptam conforme processos evolutivos e geomorfológicos, como o incremento de sedimentos e o aumento do nível médio do mar (GRIGGS, 2024). O impacto do aquecimento global sobre essas áreas é evidente devido ao fato de os manguezais se desenvolverem em regiões tropicais/subtropicais entre marés, que são consideradas as primeiras a serem afetadas pelos efeitos do aquecimento global na zona costeira (LOVELOCK et al., 2015). Os dados sobre o aumento do nível médio do mar indicam que a área de estudo pode estar enfrentando os efeitos do aquecimento global. Devido à topografia característica de um delta, geralmente composta por áreas de baixo relevo, a região é particularmente vulnerável à elevação do nível do mar (ELLISON, 2015). Estudos destacam que as áreas deltaicas estão cada

vez mais expostas aos riscos de inundações devido a extremos climáticos, o que representa uma ameaça significativa para as comunidades pesqueiras tradicionais que habitam essas áreas de conservação ambiental (ABDRABO E HASSAAN, 2015; FUSI et al., 2015).

O efeito do aumento do nível médio do mar sobre a área de estudo tem o potencial de influenciar significativamente a dinâmica dos manguezais locais, o que pode resultar em consequências tanto positivas quanto negativas para a biodiversidade e os habitats das espécies. Por um lado, o aumento dos manguezais pode proporcionar novos habitats e recursos alimentares para diversas espécies, incluindo aquelas de água doce, contribuindo assim para a diversidade ecológica da região (ZANDALINAS et al., 2021). No entanto, esse fenômeno também pode ter impactos negativos, como a possível perda de habitat para algumas espécies que dependem de condições específicas de manguezais para sua sobrevivência e reprodução (HO E SHIMADA, 2021; LAM et al., 2016).

Nesse contexto, o caranguejo-uçá surge como uma espécie de grande importância econômica e cultural para as comunidades tradicionais da Reserva Extrativista do Delta do Parnaíba. Sua pesca sustentável não apenas fornece subsistência para essas comunidades, mas também desempenha um papel fundamental na sua identidade e coesão social. Com isso, qualquer mudança nos padrões populacionais do caranguejo-uçá pode ter impactos significativos nessas comunidades e em sua subsistência. Adaptações ambientais tem implicações para a ecologia, economia e bem-estar das comunidades, destacando a necessidade urgente de estratégias adaptativas e de gestão sustentável para lidar com os desafios e oportunidades decorrentes das mudanças climáticas globais (WATTERSON et al., 1999; LUCENA et al., 2018; ELLWANGER et al., 2020). A correlação entre a expansão dos manguezais e a possível variação populacional do caranguejo-uçá apresenta um interesse particular para a gestão e conservação desses recursos pesqueiros. Estudos futuros que investiguem essa relação serão cruciais para informar políticas e estratégias de manejo que garantam a sustentabilidade dessa importante atividade pesqueira e a conservação dos ecossistemas costeiros da região.

CONCLUSÃO

A RESEX do Delta do Parnaíba apresenta uma expansão significativa das áreas de manguezal, possivelmente relacionada ao aquecimento global. O aumento do nível do mar, aliado à topografia local, indica que a região já sofre os efeitos das mudanças climáticas, que alteram o ambiente, favorecendo espécies típicas de mangue em detrimento da biodiversidade vegetal original. Essas transformações podem impactar na fauna local, especialmente o caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*), gerando consequências ecológicas, econômicas e sociais para as comunidades que dependem da espécie.

AGRADECIMENTOS

GM, agradecimento à Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC (NPP2015020002571), Este trabalho é parte do projeto "Clima Pesca: Impacto das mudanças climáticas sobre a pesca" (NPP2015020003338), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, CNPq Universal MCTIC/CNPq nº 28/2018 (Proc.: 406539/2018-9).

REFERENCIAS

- ABDRABO, M. A., & HASSAAN, M. A. (2015). An integrated framework for urban resilience to climate change - Case study: Sea level rise impacts on the Nile Delta coastal urban areas. *Urban Climate*, 14, 554–565. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.005>
- ADAME, M. F., REEF, R., SANTINI, N. S., NAJERA, E., TURSCHWELL, M. P., HAYES, M. A., MASQUE, P., LOVELOCK, C. E. (2021). Mangroves in arid regions: Ecology, threats, and opportunities. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 248, 106796. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106796>
- ALAVIPANAH, S.K. M. MANSOURMOGHADDAM, Z. GOMEH, E. GALEHBAN & HAMZEH S. (2022). The reciprocal effect of Global warming and climatic change (new perspective). *DESERT*, 27 (2), DOI:10.22059/jdesert.2022.90831.
- ALATORRE, L. C., SÁNCHEZ-CARRILLO, S., MIRAMONTES-BELTRÁN, S., MEDINA, R. J., TORRES-OLAVE, M. E., BRAVO, L. C., WIEBE, L. C., GRANADOS, A., ADAMS, D. K., SÁNCHEZ, E., & UC, M. (2016). Temporal changes of NDVI for qualitative

- environmental assessment of mangroves: Shrimp farming impact on the health decline of the arid mangroves in the Gulf of California (1990-2010). *Journal of Arid Environments*, 125, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.10.010>
- ANDERSON, A. M., & ALLEN, D. M. (2021). Geostatistical characterization of aquifer heterogeneity in large coastal deltas: Implications for geophysical data collection. 3101–3104. <https://doi.org/10.1190/segam2021-3594396.1>.
- ARNAUD, M., BAIRD, A. J., MORRIS, P. J., DANG, T. H., & NGUYEN, T. T. (2020). Sensitivity of mangrove soil organic matter decay to warming and sea level change. *Global Change Biology*, 26(3), 1899–1907. <https://doi.org/10.1111/gcb.14931>.
- BAKSHI, A., & PANIGRAHI, A. K. (2015). Studies on the impact of climate changes on Biodiversity of Mangrove forest of Sundarban Delta Region studies on the impact of climate changes on biodiversity of a mangrove forest: case study of sunderban delta region. *J. Environ & Sociobiol*, 12(1), 7–14.
- BELHABIB, D., LAM, V. W. Y., & CHEUNG, W. W. L. (2016). Overview of West African fisheries under climate change: Impacts, vulnerabilities and adaptive responses of the artisanal and industrial sectors. *Marine Policy*, 71, 15–28.
- BELLAFIORE, D., FERRARIN, C., MAICU, F., MANFÈ, G., LORENZETTI, G., UMGIESSER, G., ZAGGIA, L., & LEVINSON, A. V. (2021). Saltwater Intrusion in a Mediterranean Delta Under a Changing Climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(2). <https://doi.org/10.1029/2020JC016437>
- BESSET, M., ANTHONY, E. J., & BOUCHETTE, F. (2019). Multi-decadal variations in delta shorelines and their relationship to river sediment supply: An assessment and review. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 193, pp. 199–219). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.018>
- BONNETT, N., & BIRCHALL, S. J. (2020). Coastal communities in the Circumpolar North and the need for sustainable climate adaptation approaches. *Marine Policy*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104175>.
- BULLOCK, E. L., FAGHERAZZI, S., NARDIN, W., VO-LUONG, P., NGUYEN, P., & WOODCOCK, C. E. (2017). Temporal patterns in species zonation in a mangrove forest in the Mekong Delta, Vietnam, using a time series of Landsat imagery. *Continental Shelf Research*, 147, 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.07.007>

- CAEL, B. B., BISSON, K., BOSS, E., DUTKIEWICZ, S., & HENSON, S. (2023). Global climate-change trends detected in indicators of ocean ecology. *Nature*, 619, 551–554. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06321-z>
- CINTRÓN-MOLERO, G., SCHAEFFER-NOVELLI, Y., ROVAI, A. S., & MORAES DE OLIVEIRA ABUCHAHLA, G. (2023). The Mangrove-Salt Marsh Complex: A Dynamic Landscape Approach. In Y. Schaeffer-Novelli, G. M. d. O. Abuchahla, & G. Cintrón-Molero (Eds.), *Brazilian Mangroves and Salt Marshes (Brazilian Marine Biodiversity)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13486-9_18.
- DANG AN TRAN, MAKI TSUJIMURA, NAM THANG HA, VAN TAM NGUYEN, DOAN VAN BINH, THANH DUC DANG, QUANG-VAN DOAN, DIEU TIEN BUI, TRIEU ANH NGOC, LE VO PHU, PHAM THI BICH THUC, TIEN DAT PHAM (2021). Evaluating the predictive power of different machine learning algorithms for groundwater salinity prediction of multi-layer coastal aquifers in the Mekong Delta, Vietnam. *Ecological Indicators*, 127, 107790. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107790>.
- ELLISON, J. C. (2015). Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts. *Wetlands Ecology and Management*, 23(2), 115–137. <https://doi.org/10.1007/s11273-014-9397-8>
- ELLWANGER, J. H., KULMANN-LEAL, B., KAMINSKI, V. L., VALVERDE-VILLEGAS, J. M., DA VEIGA, A. B. G., SPILKI, F. R., FEARNSIDE, P. M., CAESAR, L., GIATTI, L. L., WALLAU, G. L., ALMEIDA, S. E. M., BORBA, M. R., DA HORA, V. P., & CHIES, J. A. B. (2020). Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 92(1). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020191375>
- FAGHERAZZI, S., & BRYAN, K. R. (2017). Buried Alive or Washed Away: The Challenging Life of Mangroves in the Mekong Delta. *Nardin Source: Oceanography*, 30(3), 48–59. <https://doi.org/10.2307/26201897>
- FERREIRA, A. C., FREIRE, F. A. M., RODRIGUES, J. V. M (2022). Recuperação de manguezais na costa semiárida mostra aumento de processos ecológicos de fatores bióticos e abióticos em resposta à restauração hidrológica. *Zonas Húmidas*, 42, 80. <https://doi.org/10.1007/s13157-022-01603-0>

- FERREIRA, C. S. S., KAŠANIN-GRUBIN, M., KAPOVIĆ SOLOMUN, M., SUSHKOVA, S., MINKINA, T., ZHAO, W., & KALANTARI, Z. (2023). Wetlands as nature-based solutions for water management in different environments. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 33, 100476. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100476>
- FOGAÇA, F. H. DOS S., FERNANDES-GÓES, L. C., SOUZA, L. O., SILVA, K. P. DA, GÓES, J. M. DE, PEREIRA, A. M. L., MAGALHÃES, J. A. (2018). Monitoring mangrove crab *Ucides cordatus* Linnaeus, 1763 (Crustacea: Ucididae) landing in the Parnaíba River Delta: fishing characteristics, social and economic aspects. *Nauplius*, 26. <https://doi.org/10.1590/2358-2936e2018020>
- FRIESS, D. A., YANDO, E. S., ABUCHAHLA, G. M. O., ADAMS, J. B., CANNICCI, S., CANTY, S. W. J. (2020). Mangroves give cause for conservation optimism, for now. *Current Biology*, 30(4), R153–R154. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.12.054>
- FUSI, M., GIOMI, F., BABBINI, S., DAFFONCHIO, D., MCQUAID, C. D., PORRI, F., & CANNICCI, S. (2015). Thermal specialization across large geographical scales predicts the resilience of mangrove crab populations to global warming. *Oikos*, 124(6), 784–795. <https://doi.org/10.1111/oik.01757>
- GIOSAN, L., SYVITSKI, J., CONSTANTINESCU, S., & DAY, J. (2014). Climate change: Protect the world's deltas. *Nature*, 516(729), 31–33. <https://doi.org/10.1038/516031a>
- GODOY, M. D. P., & DE LACERDA, L. D. (2015). Mangroves response to climate change: A review of recent findings on mangrove extension and distribution. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 87(2), 651–667. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520150055>
- GRIGGS, G. (2024). Can we make coastal communities resilient to sea-level rise? *Journal of Coastal Research*, 40(3), 571–576. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-23A-00015.1>
- Grases, A., Gracia, V., García-León, M., Lin-Ye, J., & Sierra, J. P. (2020). Coastal flooding and erosion under a changing climate: Implications at a low-lying coast (ebro delta). *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020346>
- GUAN, Y., LU, H., JIANG, Y., TIAN, P., QIU, L., PELLIKKA, P., & HEISKANEN, J. (2021). Changes in global climate heterogeneity under the 21st century global warming. *Ecological Indicators*, 130, 108075. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108075>
- GUIMARÃES-COSTA, A. J., MACHADO, F. S., OLIVEIRA, R. R. S., SILVA-COSTA, V., ANDRADE, M. C., GIARRIZZO, T., SAINT-PAUL, U., SAMPAIO, I., & SCHNEIDER, H.

- (2019). Fish diversity of the largest deltaic formation in the Americas - a description of the fish fauna of the Parnaíba Delta using DNA Barcoding. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43930-z>
- HAQUE, M. Z., & REZA, M. I. H. (2017). Salinity intrusion affecting the ecological integrity of Sundarbans mangrove forests, Bangladesh. *Environmental Challenges*, 8, 131-144.
- HO, T. T., & SHIMADA, K. (2021). The effects of multiple climate change responses on economic performance of rice farms: Evidence from the Mekong Delta of Vietnam. *Journal of Cleaner Production*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128129>
- LAM, V. W. Y., CHEUNG, W. W. L., Reygondeau, G., & Rashid Sumaila, U. (2016). Projected change in global fisheries revenues under climate change. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.03.040>
- LIU, J., ZHANG, Y., WANG, H., & DU, Y. (2018b). Study on the prediction of soil heavy metal elements content based on visible near-infrared spectroscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 199, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.03.040>
- LOVELOCK, C. E., CAHOON, D. R., FRIESS, D. A., GUNTENSPERGEN, G. R., KRAUSS, K. W., REEF, R., ROGERS, K., SAUNDERS, M. L., SIDIK, F., SWALES, A., SAINTILAN, N., THUYEN, L. X., & TRIET, T. (2015). The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise. *Nature*, 526(7574), 559–563. <https://doi.org/10.1038/nature15538>
- LUGO, A. E., TIERRA, D., RICO, P., & SNEDAKER, S. C. (1974). The Ecology Of Mangroves. *AnnualReviews*. <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.es.05.110174.000413>
- LUCENA, A. F. P., HEJAZI, M., VASQUEZ-ARROYO, E., TURNER, S., KÖBERLE, A. C., DAENZER, K., ROCHEDO, P. R. R., KOBER, T., CAI, Y., BEACH, R. H., GERNAAT, D., VAN VUUREN, D. P., & VAN DER ZWAAN, B. (2018). Interactions between climate change mitigation and adaptation: The case of hydropower in Brazil. *Energy*, 164, 1161–1177. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.005>
- LV, Y., LI, W., WEN, J., XU, H., & DU, S. (2021). Population pattern and exposure under sea level rise: Low elevation coastal zone in the Yangtze River Delta, 1990–2100. *Climate Risk*

- Management of mangrove ecosystem—a review. *Complex Intelligent Systems*, 7, 2797-2818. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00457-z>
- MENÉNDEZ, P., LOSADA, I. J., TORRES-ORTEGA, S., NARAYAN, S., BECK, M. W. (2020). The global flood protection benefits of mangroves. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61136-6>
- MONDAL, B., SAHA, A. K., & ROY, A. (2021). Spatio-temporal pattern of change in mangrove populations along the coastal West Bengal, India. *Environmental Challenges*, 5, 100306. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100306>.
- NASCIMENTO, M. G. P., MAYO, S. J., & DE ANDRADE, I. M. (2021). Distinguishing the Brazilian mangrove species *Avicennia germinans* and *A. schaueriana* (Acanthaceae) by elliptic Fourier analysis of leaf shape. *Feddes Repertorium*, 132(2), 77–107. <https://doi.org/10.1002/fedr.202000025>
- NGUYEN, K. A., LIOU, Y. A., TRAN, H. P., HOANG, P. P., & NGUYEN, T. H. (2020). Soil salinity assessment by using near-infrared channel and Vegetation Soil Salinity Index derived from Landsat 8 OLI data: a case study in the Tra Vinh Province, Mekong Delta, Vietnam. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0311-0>
- OLSON, K. R., & SUSKI, C. D. (2021). Mississippi River Delta: Land subsidence and coastal erosion. *Open Journal of Soil Science*, 11(03), 139–163. <https://doi.org/10.4236/ojss.2021.113008>
- OTTONI, F. P., HUGHES, R. M., KATZ, A. M., RANGEL-PEREIRA, F. DA S., DE BRAGANÇA, P. H. N., FERNANDES, R., ... RODRIGUES-FILHO, J. L. (2021). Brazilian mangroves at risk. *Biota Neotropica*, 21(2). <https://doi.org/10.1590/1676-0611-bn-2020-1172>
- PRIMAVERA, J. H., FRIESS, D. A., VAN LAVIEREN, H., LEE, S. Y. (2018). The mangrove ecosystem. In J. Sheppard (Ed.), *World Seas: An Environmental Evaluation Volume III: Ecological Issues and Environmental Impacts* (pp. 1–34). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00001-2>
- RENARD, S., CORBETT, B., & SWEI, O. (2021). Minimizing the global warming impact of pavement infrastructure through reinforcement learning. *Resources, Conservation and Recycling*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105240>

- SOUTTER, A. R. B., & MÖTTUS, R. (2020). “Global warming” versus “climate change”: A replication on the association between political self-identification, question wording, and environmental beliefs. *Journal of Environmental Psychology*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2020.101413>
- SYVITSKI, J. P. M., KETTNER, A. J., OVEREEM, I., HUTTON, E. W. H., HANNON, M. T., BRAKENRIDGE, G. R., DAY, J., VÖRÖSMARTY, C., SAITO, Y., GIOSAN, L., & NICHOLLS, R. J. (2009). Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, 2(10), 681–686. <https://doi.org/10.1038/ngeo629>
- SZCZYGIELSKI, A., STATTEGGER, K., SCHWARZER, K., DA SILVA, A. G. A., VITAL, H., & KOENIG, J. (2015). Evolution of the Parnaíba Delta (NE Brazil) during the late Holocene. *Geo-Marine Letters*, 35(2), 105–117. <https://doi.org/10.1007/s00367-014-0395-x>
- THAMPANYA, U., VERMAAT, J. E., SINSAKUL, S., & PANAPITUKKUL, N. (2006). Coastal erosion and mangrove progradation of Southern Thailand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(1), 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.01.011>
- VOGT, N., PINEDO-VASQUEZ, M., BRONDÍZIO, E. S., RABELO, F. G., FERNANDES, K., ALMEIDA, O., RIVEIRO, S., DEADMAN, P. J., & DOU, Y. (2016). Local ecological knowledge and incremental adaptation to changing flood patterns in the Amazon delta. *Sustainability Science*, 11(4), 611–623. <https://doi.org/10.1007/s11625-015-0352-2>
- WANG, J., XU, Y., & WU, G. (2020). The integration of species information and soil properties for hyperspectral estimation of leaf biochemical parameters in mangrove forest. *Ecological Indicators*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106467>
- WARD, R. D., & DRUDE DE LACERDA, L. (2021). Chapter 10 - Responses of mangrove ecosystems to sea level change. In Y. Schaeffer-Novelli, G. M. d. O. Abuchahla, & G. Cintrón-Molero (Eds.), *Dynamic Sedimentary Environments of Mangrove Coasts* (pp. 235-253). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816437-2.00002-1>
- WATTERSON, I. G., DIX, M. R., & COLMAN, R. A. (1999). A comparison of present and doubled CO2 climates and feedbacks simulated by three general circulation models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D2), 1943–1956. <https://doi.org/10.1029/1998JD200049>
- WIJAYASINGHE, M. M., JAYASURIYA, K. M. G., GUNATILLEKE, C. V. S., GUNATILLEKE, I. A. U. N., & WALCK, J. L. (2019). Effect of salinity on seed germination

of five mangroves from Sri Lanka: Use of hydrotime modelling for mangrove germination. Seed Science Research, 29(1), 55-63. <https://doi.org/10.1017/S0960258518000405>

ZAMBONI, N. S., PRUDÊNCIO, M. D. C., AMARO, V. E., MATOS, M. D. F. A. D., VERUTES, G. M., CARVALHO, A. R., ET AL. (2022). The protective role of mangroves in safeguarding coastal populations through hazard risk reduction: A case study in northeast Brazil. Ocean & Coastal Management, 229, 106353. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106353>

ZANDALINAS, S. I., FRITSCHI, F. B., & MITTLER, R. (2021). Global warming, climate change, and environmental pollution: Recipe for a multifactorial stress combination disaster. Trends in Plant Science, 26(6), 588–599. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.011>