



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E LIMNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO
AMBIENTE

CADMO FERNANDO DIAS SOUSA

IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR EM FUNÇÃO DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS EM MANGUEZAIS NO PARQUE NACIONAL DE SUNDARBANS,
ÍNDIA.

São Luís - MA

2026

CADMO FERNANDO DIAS SOUSA

**IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR EM FUNÇÃO DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS EM MANGUEZAIS NO PARQUE NACIONAL DE SUNDARBANS,
ÍNDIA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal do Maranhão como requisito para obtenção do grau de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Orientador(a): Prof.(a) Dr.(a) Denilson Da Silva Bezerra

São Luís - MA

2026

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Dias Sousa, Cadmo Fernando Dias Sousa.

Impactos da Elevação do Nível do Mar em Função das
Mudanças Climáticas em Manguezais no Parque Nacional de
Sundarbans, Índia / Cadmo Fernando Dias Sousa Dias Sousa.
- 2026.

71 f.

Orientador(a): Denilson da Silva Bezerra Silva Bezerra.
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do
Maranhão, Universidade Federal do Maranhão, 2026.

1. Elevação do Nível do Mar. 2. Mudanças Climáticas.
3. Vulnerabilidade Ambiental. I. Silva Bezerra, Denilson
da Silva Bezerra. II. Título.

CADMO FERNANDO DIAS SOUSA

**IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR EM FUNÇÃO DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS EM MANGUEZAIS NO PARQUE NACIONAL DE SUNDARBANS,
ÍNDIA.**

Aprovado (a) em: 09/07/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Denilson da Silva Bezerra – Orientador
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Jose Aquino Junior
Universidade Federal do Maranhão

Profa. Dra. Flavia Rebelo Mochel
Universidade Federal do Maranhão

Aos meus pais, Analice Santana e Altrudes Martins, pela educação, resiliência e acima de tudo o amor imensurável. Obrigado por sempre acreditarem em mim. Essa conquista é nossa, para sempre.

AGRADECIMENTOS

Sou grato, em primeiro lugar, a Deus, por ter sido meu refúgio, meu sustento e minha luz durante toda esta caminhada, especialmente nos momentos em que pensei não ser capaz de concluir esta dissertação.

À minha família, base da minha vida, expresso minha mais profunda gratidão. Em especial, à minha mãe, Analice Santana Dias, e ao meu pai, Altrudes Martins Sousa, por me ensinarem, pelo exemplo, os valores que me trouxeram até aqui. Esta conquista também pertence a vocês, pois foi construída sobre o amor, os ensinamentos e os inúmeros sacrifícios que fizeram para que eu pudesse sonhar mais alto.

Aos meus irmãos, Marlon Fernando Dias Sousa, Blenda Fernanda Dias Sousa e Laila Fernanda Dias Sousa, agradeço por fazerem parte da minha história. Marlon, pelos exemplos, Blenda, pelos conselhos e pela sabedoria e Laila, pela empatia e pela capacidade de compreender minha essência como poucas pessoas conseguem. Ter vocês ao meu lado é um privilégio.

Aos meus melhores amigos, Luis Henrique, Daniel Richard e Rhuan Pablo, obrigado por transformarem a amizade em verdadeira irmandade. Vocês foram meu equilíbrio nos dias mais difíceis e dividiram comigo não apenas esta caminhada, mas também incontáveis momentos que levarei para a vida.

Ao meu eterno amigo Luis Henrique (Chronos), que permanece vivo em minhas lembranças e em meu coração. Sua amizade foi um dos maiores presentes que a vida me deu, e sua confiança em mim jamais será esquecida. Esta conquista também é sua.

A todos os meus amigos, especialmente ao "Uurgh" e ao "Loor!", meu sincero agradecimento por tornarem esta jornada mais leve, repleta de risadas, companheirismo e memórias que levarei comigo para sempre.

À minha querida amiga Luana, obrigado por compartilhar esta trajetória desde o primeiro dia. Caminhar ao lado de alguém tão presente tornou os desafios mais leves e fez desta conquista uma alegria ainda maior.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa. Em especial a Capes, CNPq e Fapema. Minha sincera gratidão.

EPÍGRAFE

“Quando você é criança e ganha sua primeira bicicleta, quer ir em algum lugar que nunca esteve antes. É como Pokémon.”

- Satoshi Tajiri

APRESENTAÇÃO

Esta dissertação resulta de uma investigação voltada à compreensão dos efeitos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas costeiros, com ênfase nos impactos associados à elevação do nível do mar em áreas de manguezal. O estudo foi desenvolvido a partir da integração de referenciais teóricos, procedimentos metodológicos e análises aplicadas, buscando compreender a dinâmica desse fenômeno e suas possíveis repercussões sobre um dos sistemas naturais mais importantes e vulneráveis do planeta. Ao longo do trabalho são apresentados os fundamentos científicos que sustentam a pesquisa, os procedimentos adotados para a obtenção e análise dos dados, os resultados alcançados e as discussões deles decorrentes. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas e os elementos complementares que subsidiam a compreensão do estudo.

O primeiro artigo que compõe esta dissertação é intitulado: “Elevação do Nível do Mar entre os Anos de 2022 e 2100, no Parque Nacional de Sundarbans - Índia: uma análise da vulnerabilidade dos manguezais por meio do modelo BR- mangue”. O estudo analisa as projeções futuras de elevação do nível do mar em um dos maiores e mais relevantes sistemas de manguezais do mundo, reconhecido por sua elevada biodiversidade e por sua importância ecológica, econômica e social. A pesquisa busca compreender a magnitude das alterações esperadas ao longo do século XXI e discutir suas possíveis implicações sobre a estabilidade ambiental da região. Será publicado na revista Revista Brasileira de Meteorologia (RBMET). Classificação Qualis (vigente em 2026): B1 na área de Geociências, conforme a classificação Qualis Periódicos referente ao ciclo 2021–2024, que permanece a classificação oficial utilizada em 2026.

O segundo artigo que compõe esta dissertação é intitulado: “Tratamento Estatístico dos Dados Simulados de Elevação do Nível do Mar em uma Unidade de Conservação da Índia”. O estudo apresenta uma análise estatística dos dados gerados por simulações de elevação do nível do mar no Parque Nacional dos Sundarbans, buscando compreender os padrões de resposta dos manguezais frente aos cenários futuros de mudanças climáticas. A pesquisa examina as transformações observadas na distribuição espacial das classes de cobertura da terra, com ênfase na dinâmica dos manguezais e nas áreas suscetíveis à inundação, permitindo identificar tendências, níveis de vulnerabilidade e possíveis limitações adaptativas do ecossistema. Será publicado na revista Revista Brasileira de Meteorologia (RBMET). Classificação Qualis (vigente em 2026): B1 na área de Geociências, conforme a

classificação Qualis Periódicos referente ao ciclo 2021–2024, que permanece a classificação oficial utilizada em 2026.

Além da análise das projeções de elevação do nível do mar, o trabalho contempla uma discussão acerca da vulnerabilidade dos manguezais frente aos cenários de mudanças climáticas, evidenciando os desafios relacionados à conservação desses ecossistemas e à manutenção dos serviços ecossistêmicos por eles desempenhados. Nesse contexto, a pesquisa contribui para o avanço do conhecimento científico sobre os impactos das mudanças climáticas em ambientes costeiros e fornece subsídios para futuras estratégias de gestão, conservação e adaptação ambiental.

RESUMO

Esta dissertação teve como objetivo analisar os impactos da elevação do nível do mar em função das mudanças climáticas nos manguezais do Parque Nacional de Sundarbans, Índia, considerando projeções para o período de 2022 a 2100. Reconhecida como uma das maiores áreas contínuas de manguezal do mundo, a região apresenta elevada relevância ecológica e significativa vulnerabilidade aos efeitos das mudanças climáticas globais. A pesquisa foi desenvolvida por meio de levantamento bibliográfico e documental, associado à aplicação do modelo BR-Mangue para avaliação da vulnerabilidade ambiental da área de estudo e ao tratamento estatístico dos dados simulados. As simulações indicaram redução aproximada de 45,25% da área remanescente de manguezais até o ano de 2100, acompanhada da expansão das áreas inundadas e da limitação da migração ecológica, evidenciando elevada vulnerabilidade do ecossistema frente aos cenários projetados. As análises também permitiram identificar padrões de resposta do ecossistema frente aos cenários simulados, apontando aumento da suscetibilidade desses ambientes a processos de degradação e perda de funções ecológicas, reforçando a necessidade de estratégias de monitoramento, conservação e adaptação climática. Dessa forma, o estudo contribui para a ampliação do conhecimento científico sobre a vulnerabilidade dos ecossistemas costeiros e para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente os ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ODS 14 (Vida na Água) e ODS 15 (Vida Terrestre).

Palavras-chave: Elevação do Nível do Mar, Mudanças Climáticas e Vulnerabilidade Ambiental.

ABSTRACT

This dissertation aimed to analyze the impacts of sea level rise driven by climate change on the mangrove forests of Sundarbans National Park, India, considering projections for the period from 2022 to 2100. Recognized as one of the largest continuous mangrove ecosystems in the world, the region has high ecological importance and is highly vulnerable to the effects of global climate change. The research was conducted through a bibliographic and documentary review, combined with the application of the BR-Mangue model to assess the environmental vulnerability of the study area and the statistical analysis of the simulated data. The simulation results indicated an approximate 45.25% reduction in the remaining mangrove area by 2100, accompanied by the expansion of flooded areas and the restriction of ecological migration, highlighting the high vulnerability of the ecosystem under the projected scenarios. The analyses also identified response patterns of the ecosystem to the simulated scenarios, indicating an increased susceptibility to environmental degradation and the loss of ecological functions, reinforcing the need for monitoring, conservation, and climate adaptation strategies. Therefore, this study contributes to expanding scientific knowledge on the vulnerability of coastal ecosystems and supports the achievement of the Sustainable Development Goals, particularly SDG 13 (Climate Action), SDG 14 (Life Below Water), and SDG 15 (Life on Land).

Keywords: Sea Level Rise, Climate Change and Environmental Vulnerability.

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO.....	12
II. PROBLEMAS DA PESQUISA.....	17
III. HIPÓTESES.....	18
IV. OBJETIVOS.....	18
IV. I Objetivo Geral:.....	18
IV. II Objetivos Específicos:.....	18
V. CAPÍTULO 1.....	19
VI. CAPÍTULO 2.....	40
APÊNDICE.....	66

I. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas configuram-se como um dos fenômenos socioambientais mais complexos e desafiadores do século XXI, em virtude de sua capacidade de desencadear transformações sistêmicas que transcendem escalas espaciais e temporais, repercutindo diretamente sobre os processos ecológicos, econômicos e sociais em âmbito global. O aumento contínuo das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa, intensificado pelas atividades antrópicas desde a Revolução Industrial, tem promovido alterações significativas no sistema climático terrestre, resultando em mudanças nos padrões de precipitação, aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, aquecimento dos oceanos e elevação do nível médio do mar (IPCC, 2023). Diante desse cenário, cresce a preocupação da comunidade científica internacional acerca dos potenciais impactos dessas transformações sobre os ecossistemas naturais, especialmente aqueles situados em regiões costeiras, reconhecidamente mais suscetíveis aos efeitos das mudanças climáticas.

Dentre as múltiplas manifestações associadas às mudanças climáticas contemporâneas, a elevação do nível médio do mar destaca-se pela magnitude de seus efeitos e pela capacidade de reconfigurar ambientes costeiros em escala global. Esse fenômeno resulta, principalmente, da expansão térmica das águas oceânicas e do derretimento acelerado de geleiras e mantos de gelo continentais, constituindo uma das principais ameaças aos ecossistemas costeiros e às populações humanas que deles dependem (IPCC, 2023). Segundo Fox-Kemper et al. (2021), os impactos decorrentes da elevação do nível do mar extrapolam os processos de inundação permanente, abrangendo alterações geomorfológicas, intensificação da erosão costeira, intrusão salina em aquíferos e comprometimento da estabilidade ecológica de diversos ambientes litorâneos.

Sob essa perspectiva, os ecossistemas costeiros assumem papel estratégico na mitigação dos efeitos associados às mudanças climáticas, desempenhando funções ecológicas essenciais para a manutenção do equilíbrio ambiental. Ambientes como recifes de coral, pradarias marinhas, marismas e manguezais atuam como importantes barreiras naturais contra tempestades e eventos extremos, contribuindo para a dissipação da energia das ondas, estabilização dos sedimentos e proteção das populações costeiras (UNEP, 2023). Entretanto, a intensificação das pressões antrópicas associadas às mudanças climáticas, à expansão urbana e às transformações no uso e cobertura da terra tem comprometido progressivamente a

capacidade desses ecossistemas de desempenharem suas funções ecológicas de forma plena e sustentável (Friess *et al.*, 2024).

Nesse contexto, os manguezais assumem singular relevância em razão de sua elevada complexidade ecológica e de sua expressiva contribuição para a manutenção da integridade ambiental das zonas costeiras. Além de constituírem importantes reservatórios de carbono azul, esses ecossistemas fornecem abrigo, alimentação e áreas de reprodução para inúmeras espécies da fauna terrestre e aquática, desempenhando papel fundamental na conservação da biodiversidade e na sustentação dos meios de vida de populações costeiras (Alongi, 2024). Sua importância transcende a dimensão ecológica, abrangendo também aspectos econômicos, sociais e culturais que reforçam a necessidade de sua conservação diante dos desafios impostos pelas mudanças ambientais globais.

Apesar de sua reconhecida relevância ecológica, os manguezais figuram entre os ecossistemas mais vulneráveis aos impactos decorrentes da elevação do nível do mar. O aumento progressivo da frequência e intensidade dos processos de inundação, associado às alterações nos padrões hidro sedimentares e à intensificação da salinização dos solos, pode comprometer significativamente a capacidade adaptativa desses ambientes, especialmente em áreas submetidas a restrições geomorfológicas ou elevadas pressões antrópicas (Lovelock; Reef, 2024). Estudos recentes indicam que a resposta dos manguezais às mudanças climáticas varia de acordo com características locais relacionadas à geomorfologia, hidrologia, disponibilidade de sedimentos e dinâmica de ocupação humana, evidenciando a necessidade de análises específicas para diferentes contextos ambientais (Saintilan *et al.*, 2023).

A vulnerabilidade dos ecossistemas costeiros frente às mudanças climáticas não está associada exclusivamente à magnitude das alterações ambientais projetadas, mas também à capacidade desses sistemas responderem e adaptarem-se às novas condições impostas pelo clima. De acordo com o IPCC (2023), a vulnerabilidade ambiental resulta da interação entre fatores relacionados à exposição, à sensibilidade e à capacidade adaptativa dos ecossistemas diante das transformações climáticas. Nesse sentido, Saintilan *et al.* (2023) destacam que os manguezais figuram entre os ambientes costeiros mais suscetíveis aos impactos decorrentes da elevação do nível do mar, sobretudo em regiões deltaicas de baixa altitude, onde pequenas alterações no nível médio dos oceanos podem desencadear mudanças significativas na dinâmica hidrológica, sedimentar e ecológica.

Além dos impactos ambientais diretos, a elevação do nível do mar exerce influência significativa sobre os serviços ecossistêmicos fornecidos pelos manguezais. Conforme ressaltam Friess et al. (2024), esses ecossistemas desempenham funções essenciais relacionadas à proteção da linha de costa, retenção de sedimentos, ciclagem de nutrientes e manutenção da biodiversidade. Em consonância com essa perspectiva, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2023) destaca que a degradação dos manguezais reduz sua capacidade de proteção frente a eventos extremos, ampliando riscos socioeconômicos e comprometendo a resiliência das comunidades costeiras que dependem direta ou indiretamente desses ambientes.

Entre os diversos serviços ecossistêmicos proporcionados pelos manguezais, destaca-se sua contribuição para o armazenamento de carbono atmosférico. Alongi (2024) afirma que esses ecossistemas estão entre os mais eficientes reservatórios naturais de carbono do planeta, desempenhando papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas por meio do chamado carbono azul. De maneira complementar, Macreadie et al. (2022) observam que a conservação dos manguezais representa uma estratégia relevante para a redução das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono. Contudo, processos de erosão costeira, degradação ambiental e perda de habitat podem comprometer essa capacidade de sequestro e armazenamento de carbono, reduzindo a eficiência ecológica desses ambientes.

À luz dessas considerações, as regiões deltaicas assumem posição central nas discussões científicas relacionadas às mudanças climáticas contemporâneas. Rahman et al. (2023) destacam que os deltas concentram elevada biodiversidade, expressiva densidade populacional e intensa atividade econômica, características que ampliam sua vulnerabilidade frente às alterações ambientais globais. Entre esses sistemas destaca-se o Delta do Ganges-Brahmaputra-Meghna, considerado o maior complexo deltaico do mundo. Segundo Nicholls et al. (2024), a combinação entre subsidência natural, elevação do nível do mar e ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos torna essa região uma das áreas mais suscetíveis aos efeitos das mudanças climáticas em escala planetária.

Inserido nesse contexto, o Parque Nacional de Sundarbans localiza-se na porção oriental da Índia, integrando o sistema deltaico compartilhado entre Índia e Bangladesh. De acordo com a UNESCO (2024), a região abriga a maior floresta contínua de manguezais do planeta e constitui um dos mais importantes patrimônios ecológicos mundiais. Além de sua relevância para a manutenção da biodiversidade, Sundarbans desempenha papel fundamental

na conservação de espécies ameaçadas, incluindo o tigre-de-bengala (*Panthera tigris tigris*), símbolo da fauna asiática e um dos principais ícones da conservação global. Hazra et al. (2023) ressaltam ainda que os recursos naturais presentes na região sustentam milhões de pessoas, conferindo ao ecossistema importância ambiental, econômica e social de alcance internacional.

A singularidade ecológica de Sundarbans decorre da interação entre processos fluviais, marinhos e estuarinos que moldam continuamente sua paisagem. Segundo Hazra et al. (2023), a influência das marés, a dinâmica sedimentar e a baixa altitude do terreno contribuem para a formação de habitats altamente diversificados, capazes de sustentar uma rica biodiversidade. Entretanto, essas mesmas características aumentam a suscetibilidade do sistema às alterações climáticas. Mondal et al. (2024) observam que a região figura entre os ambientes costeiros mais vulneráveis do mundo aos efeitos da elevação do nível do mar, apresentando elevada sensibilidade a processos de inundação, erosão costeira e intrusão salina.

A vulnerabilidade de Sundarbans é intensificada pela recorrência de eventos climáticos extremos associados ao Golfo de Bengala. Conforme discutido por Hazra et al. (2023), ciclones tropicais severos têm provocado impactos cada vez mais expressivos sobre os ecossistemas locais e sobre as populações humanas que dependem dos recursos naturais da região. Eventos recentes, como os ciclones Amphan e Yaas, evidenciaram a fragilidade ambiental do sistema deltaico e reforçaram a necessidade de estratégias voltadas à adaptação climática e ao fortalecimento da resiliência socioecológica.

Nesse cenário, Samanta et al. (2023) demonstram que a continuidade das tendências atuais de elevação do nível do mar poderá provocar perdas substanciais de áreas de manguezal ao longo do século XXI. Os autores identificaram cenários capazes de reduzir significativamente a cobertura vegetal da região até o ano de 2100, comprometendo não apenas a biodiversidade local, mas também os serviços ecossistêmicos responsáveis pela proteção costeira, manutenção da produtividade biológica e suporte às comunidades humanas.

Diante da complexidade dos processos ambientais envolvidos, ferramentas de modelagem assumem papel cada vez mais relevante na compreensão dos impactos das mudanças climáticas sobre ecossistemas costeiros. Conforme argumentam Schaeffer-Novelli et al. (2023), modelos de vulnerabilidade ambiental possibilitam integrar variáveis físicas, ecológicas e climáticas em análises prospectivas, contribuindo para a identificação de áreas

prioritárias para conservação e para a formulação de estratégias de adaptação. Nesse contexto, o modelo BR-Mangue destaca-se como uma importante ferramenta para avaliação da vulnerabilidade dos manguezais frente aos cenários futuros de elevação do nível do mar.

No âmbito da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, a presente pesquisa estabelece estreita relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Conforme preconizado pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2024), ações voltadas ao enfrentamento das mudanças climáticas, à conservação dos ambientes marinhos e à proteção dos ecossistemas terrestres constituem elementos fundamentais para a promoção do desenvolvimento sustentável. Dessa forma, o estudo dialoga diretamente com o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), o ODS 14 (Vida na Água) e o ODS 15 (Vida Terrestre).

Apesar dos avanços obtidos por estudos anteriores acerca da vulnerabilidade dos manguezais de Sundarbans frente às mudanças climáticas, ainda são limitadas as pesquisas que investigam a aplicabilidade de modelos originalmente desenvolvidos para outros contextos geográficos, como o BR-Mangue, em sistemas deltaicos altamente complexos. Assim, esta pesquisa busca testar, de forma exploratória e crítica, o potencial desse modelo para representar padrões espaciais de vulnerabilidade em Sundarbans, discutindo suas potencialidades, limitações e possibilidades de adaptação ao contexto indiano.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar os impactos da elevação do nível do mar entre os anos de 2022 e 2100 nos manguezais do Parque Nacional de Sundarbans, Índia, utilizando o modelo BR-Mangue como ferramenta de avaliação da vulnerabilidade ambiental e realizar o tratamento estatístico dos dados simulados de elevação do nível do mar nos manguezais do Parque Nacional de Sundarbans, Índia, buscando identificar padrões, tendências e níveis de vulnerabilidade ambiental. Busca-se, assim, ampliar a compreensão acerca dos efeitos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas costeiros e fornecer subsídios técnico-científicos que contribuam para estratégias de conservação, planejamento ambiental e adaptação climática em áreas costeiras vulneráveis.

II. PROBLEMAS DA PESQUISA

O presente estudo norteia-se as seguintes questões:

1. De que forma a elevação do nível do mar, projetada para o período de 2022 a 2100, pode influenciar a dinâmica ambiental e a vulnerabilidade dos manguezais do Parque Nacional de Sundarbans, Índia?
2. Quais são os potenciais impactos da elevação do nível do mar sobre a estrutura ecológica, a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos fornecidos pelos manguezais de Sundarbans ao longo do século XXI?
3. Como a aplicação do modelo BR-Mangue permite identificar padrões espaciais de vulnerabilidade e subsidiar estratégias de conservação para os manguezais do Parque Nacional de Sundarbans diante dos cenários de elevação do nível do mar?

III. HIPÓTESES

A taxa de retração dos manguezais no Parque Nacional de Sundarbans ocorrerá de forma espacialmente heterogênea, com perdas superiores a 40% concentradas em áreas de baixa elevação topográfica (< 2 m) e em regiões próximas a ocupações antrópicas, sob um cenário de elevação do nível do mar de 1 m até o ano de 2100.

O modelo BR-Mangue, após adaptação ao contexto geomorfológico e ambiental de Sundarbans, será capaz de identificar áreas potencialmente mais vulneráveis aos impactos da elevação do nível do mar.

IV. OBJETIVOS

IV. I Objetivo Geral:

Modelar espacialmente os impactos da elevação do nível do mar sobre os ecossistemas manguezais do Parque Nacional de Sundarbans, no período de 2022 a 2100, por meio da aplicação do modelo BR-Mangue adaptado, visando à identificação de áreas de maior vulnerabilidade à submersão.

IV. II Objetivos Específicos:

1. Organizar uma base geoespacial composta por dados de cobertura da terra, altimetria, solos e demais variáveis ambientais do Parque Nacional de Sundarbans;
2. Adaptar e parametrizar o modelo BR-Mangue às condições geomorfológicas e ambientais do Parque Nacional de Sundarbans;
3. Simular cenários de elevação do nível do mar entre 2022 e 2100;
4. Quantificar as perdas, ganhos, áreas inundadas e migração dos manguezais ao longo das simulações;
5. Avaliar estatisticamente os padrões espaciais e temporais das alterações simuladas, identificando tendências, limiares de resposta e níveis de vulnerabilidade ambiental.

V. CAPÍTULO 1

ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR ENTRE OS ANOS DE 2022 A 2100 NO PARQUE NACIONAL DE SUNDARBANS - ÍNDIA: UMA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DOS MANGUEZAIS POR MEIO DO MODELO BR - MANGUE.

RESUMO

A elevação do nível do mar decorrente das mudanças climáticas representa uma das principais ameaças aos ecossistemas costeiros em escala global, especialmente aos manguezais, ambientes fundamentais para a conservação da biodiversidade, proteção da linha de costa e manutenção de serviços ecossistêmicos. Nesse contexto, o Parque Nacional de Sundarbans, na Índia, destaca-se por abrigar uma das maiores áreas contínuas de manguezal do mundo e por apresentar elevada vulnerabilidade às mudanças ambientais. O presente estudo analisa os impactos da elevação do nível do mar sobre os manguezais do Parque Nacional de Sundarbans entre os anos de 2022 e 2100, utilizando o modelo BR-Mangue como ferramenta de avaliação da vulnerabilidade ambiental. A metodologia baseou-se na revisão de literatura científica, levantamento de dados ambientais e aplicação de modelagem espacial para simulação de cenários futuros relacionados às mudanças climáticas. Essa abordagem permitiu identificar possíveis alterações na dinâmica costeira e na distribuição dos manguezais ao longo do período analisado. Os resultados indicam uma redução significativa da área ocupada por manguezais até o ano de 2100, associada ao avanço do nível do mar, ao aumento das áreas sujeitas à inundação e à intensificação dos processos erosivos. Tais mudanças podem comprometer a estrutura ecológica do ecossistema, afetando a biodiversidade, os serviços ambientais e as populações que dependem desses recursos. Conclui-se que a elevação do nível do mar constitui um importante fator de vulnerabilidade para os manguezais de Sundarbans, reforçando a necessidade de estratégias de conservação, monitoramento e adaptação frente aos cenários futuros das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Elevação do nível do mar, Mudanças climáticas e Parque Nacional de Sundarbans.

ABSTRACT

Sea-level rise resulting from climate change is one of the main threats to coastal ecosystems worldwide, particularly mangrove forests, which play a crucial role in biodiversity conservation, shoreline protection, and the provision of ecosystem services. In this context, Sundarbans National Park, India, stands out for hosting one of the largest continuous mangrove areas in the world and for its high vulnerability to environmental changes. This study analyzes the impacts of sea-level rise on the mangroves of Sundarbans National Park from 2022 to 2100 using the BR-Mangue model as a tool for environmental vulnerability assessment. The methodology was based on a review of scientific literature, the collection of environmental data, and the application of spatial modeling to simulate future climate change scenarios. This approach enabled the identification of potential changes in coastal dynamics and mangrove distribution throughout the analyzed period. The results indicate a significant reduction in mangrove cover by 2100, associated with sea-level rise, the expansion of flood-prone areas, and the intensification of erosion processes. These changes may compromise the ecological structure of the ecosystem, affecting biodiversity, ecosystem services, and local communities that depend on these resources. It is concluded that sea-level rise constitutes a major vulnerability factor for the mangroves of Sundarbans, highlighting the need for conservation, monitoring, and adaptation strategies to address future climate change scenarios.

Keywords: Sea-level rise, Climate change and Sundarbans National Park.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas constituem um dos principais desafios ambientais da atualidade, promovendo alterações nos sistemas naturais e intensificando a vulnerabilidade dos ecossistemas costeiros em diferentes regiões do planeta. Entre os efeitos mais expressivos desse processo destaca-se a elevação do nível do mar, associada ao aumento da temperatura global, à expansão térmica dos oceanos e à perda acelerada de massas de gelo continentais, fenômenos que contribuem para a transformação das áreas costeiras (IPCC, 2023).

Os ambientes costeiros estão entre os mais afetados pelas alterações climáticas, especialmente os manguezais, ecossistemas fundamentais para a manutenção da biodiversidade, proteção da linha de costa, retenção de carbono e fornecimento de serviços ecossistêmicos essenciais (Santos *et al.*, 2021). Entretanto, a intensificação da elevação do nível do mar, associada às mudanças nos regimes hidrológicos e ao aumento da salinidade, pode comprometer a capacidade de adaptação natural desses ambientes, provocando modificações na distribuição e estrutura da vegetação (Rogers, 2023).

O Parque Nacional de Sundarbans, localizado na Índia, destaca-se como uma das áreas de maior relevância ecológica e uma das regiões mais vulneráveis aos impactos da elevação do nível do mar. A região apresenta extensas áreas de manguezais inseridas em uma zona deltaica de baixa altitude, sujeita à influência das marés, processos erosivos e alterações na dinâmica costeira (Kanan *et al.*, 2023).

A elevação progressiva do nível do mar pode ocasionar mudanças significativas na cobertura dos manguezais de Sundarbans, favorecendo processos de inundação, erosão costeira e perda de áreas adequadas para o desenvolvimento da vegetação. Estudos recentes indicam que cenários futuros até 2100 podem resultar em reduções expressivas da área ocupada por manguezais, principalmente quando associados ao aumento do nível do mar, subsidência do terreno e limitações na deposição de sedimentos (Samanta *et al.*, 2023).

Embora o modelo BR-Mangue tenha sido originalmente desenvolvido para manguezais brasileiros, sua estrutura baseada em variáveis ambientais, topográficas e de cobertura da terra permite sua adaptação para outros sistemas costeiros. No entanto, essa transposição requer análise crítica, considerando as diferenças geomorfológicas, hidrodinâmicas e sedimentares entre os manguezais brasileiros e o sistema deltaico de

Sundarbans. Assim, este estudo busca avaliar exploratoriamente essa adaptação, discutindo seus potenciais e limitações.

Diante desse cenário, torna-se fundamental compreender a dinâmica futura dos manguezais frente às projeções de mudanças climáticas e seus impactos sobre ecossistemas costeiros vulneráveis. Dessa forma, o presente estudo busca analisar os impactos da elevação do nível do mar nos manguezais do Parque Nacional de Sundarbans, Índia, entre os anos de 2022 e 2100, utilizando o modelo BR-Mangue como ferramenta de avaliação da vulnerabilidade ambiental. A pesquisa pretende contribuir para a compreensão das possíveis alterações na cobertura dos manguezais e fornecer subsídios científicos para estratégias de conservação, monitoramento e adaptação frente aos cenários futuros das mudanças climáticas.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

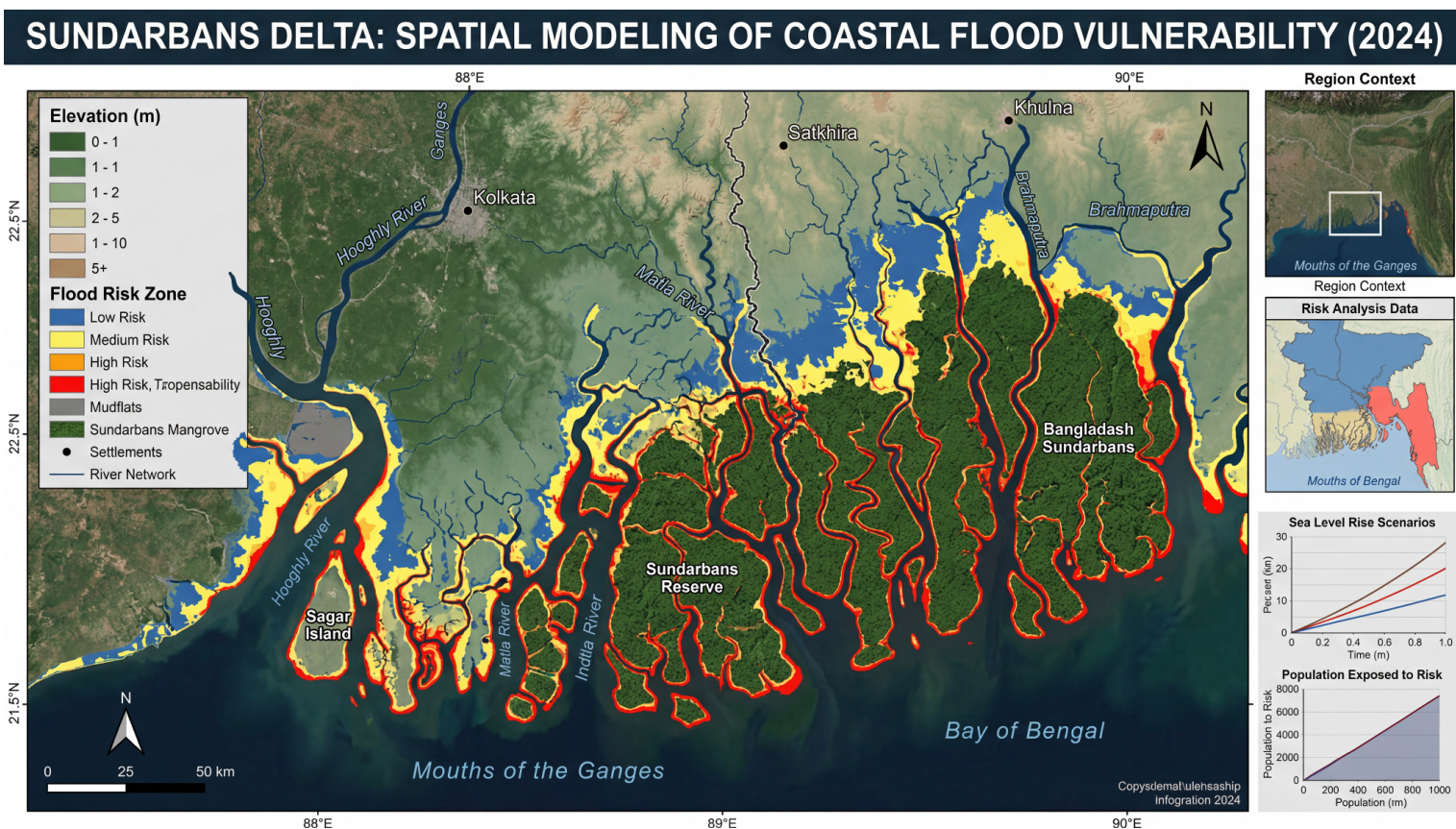


Figura 1. Parque Nacional de Sundarbans, Índia. Fonte: Autoral (2026).

A área de estudo compreende o Parque Nacional de Sundarbans, localizado no sul do estado de Bengala Ocidental, Índia, integrando o delta formado pelos rios Ganges, Brahmaputra e Meghna, considerado o maior sistema deltaico ativo do mundo. A região estende-se aproximadamente entre as coordenadas 21°31' e 22°30' N de latitude e 88°00' e 90°00' E de longitude, sendo caracterizada por uma extensa rede de canais estuarinos, planícies de maré, ilhas fluviais e manguezais sujeitos à influência direta da dinâmica costeira da Baía de Bengala. A configuração hidrogeomorfológica desse sistema resulta da interação entre os processos de transporte e deposição de sedimentos provenientes dos rios Ganges, Brahmaputra e Meghna, os quais exercem papel fundamental na manutenção da morfologia

deltaica, na distribuição da salinidade, no regime hidrossedimentológico e na conservação dos ecossistemas de manguezal (Xiong *et al.*, 2026; Mohammed *et al.*, 2024; Das *et al.*, 2024).

A dinâmica hidrogeomorfológica da região é controlada pelos processos de descarga hídrica e sedimentar do sistema Ganges–Brahmaputra–Meghna, aspecto amplamente discutido por Mohammed *et al.* (2024) ao analisarem a vulnerabilidade geoespacial dos Sundarbans. De maneira complementar, Das *et al.* (2024) destacam que essa rede hidrográfica exerce influência direta sobre a manutenção da produtividade ecológica e da funcionalidade dos manguezais, enquanto Xiong *et al.* (2026) demonstram que as interações entre hidrodinâmica, transporte sedimentar e ação das ondas constituem fatores determinantes para a evolução geomorfológica do delta.

2.2. Modelo Experimental (BR - MANGUE)

O modelo desenvolvido foi preparado de acordo com os preceitos teóricos descritos por Bezerra *et al.* (2014), que desenvolveu um modelo computacional para simular a resposta do ecossistema manguezal a eventos de Elevação do Nível Médio Relativo do Mar (ENMM). O modelo simula a ENMM para a área de interesse de estudo em 80 (noventa) etapas de elevação, distribuídas em 8 décadas, de 0,125 m a 1 m, de acordo com uma progressão aritmética de razão 0,125 por década, de 2022 a 2100. O maior valor de elevação corresponde ao cenário mais alarmante do aumento do nível do mar no AR5-IPCC, ou seja, 1 m de elevação média global em 2100 (IPCC, 2013). Os procedimentos de modelagem computacional são desenvolvidos a fim de simular os seguintes eventos: (I) avanço do nível do mar sobre o continente; (II) deslocamento da área de influência das marés (DAIM); (III) acreção longitudinal do sedimento (formação de novos bancos de lama) em áreas adjacentes às florestas de mangue; (IV) mudanças na extensão das áreas de manguezais e ou sua resistência ao aumento da coluna d'água (V) impacto de barreiras naturais e antrópicas à migração e o desenvolvimento de novas áreas de manguezal. Abaixo está uma descrição dos elementos do modelo apresentada na presente proposta:

- **Área de manguezal original** - corresponde à extensão de manguezal existente no ano inicial na área de estudo.
- **Diminuição do manguezal** - corresponde à área da floresta de manguezal que é suprimida em cada etapa de elevação do nível do mar.
- **Aumento de manguezal** – corresponde à área de manguezal jovem que consegue migrar em cada evento de deslocamento da área de influência das marés;
- **Área remanescente do manguezal** - corresponde à área de manguezal originais que não são afetadas pelo aumento da coluna de água ou das áreas de manguezal que não são afetadas pela ENMM devido às altas taxas de sedimentação (horizontais e verticais).

O modelo computacional foi implementado usando-se o programa TerraME, uma caixa de ferramentas para modelagem espacialmente explícita integrada com bancos de dados geoespaciais. O TerraME suporta autômatos celulares, modelos baseados em agentes e modelos de rede executados em espaços de células 2D. O TerraME fornece uma interface para o banco de dados geográficos TerraLib, permitindo modelos de acesso direto a dados geoespaciais. Sua linguagem de modelagem tem funções internas que facilitam o desenvolvimento de modelos multidimensionais e de vários paradigmas para aplicações ambientais. A implementação é baseada no modelo computacional de autômatos celulares (Wolfram, 1983), um sistema lógico que tem o conceito de célula como a unidade básica: cada célula tem um bairro de células e um estado discreto que pode variar durante a simulação, de acordo com suas regras de transição. A linguagem de programação utilizada no Br-mangue é a LUA, uma linguagem de programação leve, de fácil acesso e com uma excelente qualidade gráfica.

2.3. Banco de dados e espaço celular

O banco de dados geográfico e o espaço celular (Figura 2) foram criados em um sistema de informação geográfica desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), o TerraView 4.2.0, com projeção/Datum: Lat/Long/WGS84. Adotando a resolução espacial de 1 km² (1 km x 1 km), o local de estudo foi representado por um espaço celular contendo 20.603 células (Figura 2A). Como um sistema de autômatos celulares, cada célula tem, em um determinado momento, um estado único e um conjunto de atributos que define este estado. Durante os procedimentos de simulação, os estados e atributos de cada célula podem mudar de acordo com as regras de transição. O estado inicial da célula corresponde às classes de cobertura da terra (floresta de mangue, água, vegetação terrestre, áreas desenvolvidas e outras) para a situação inicial (Figura 2B), e os atributos correspondem às classes solos e altimetria (Figuras 2C e 2D, respectivamente).

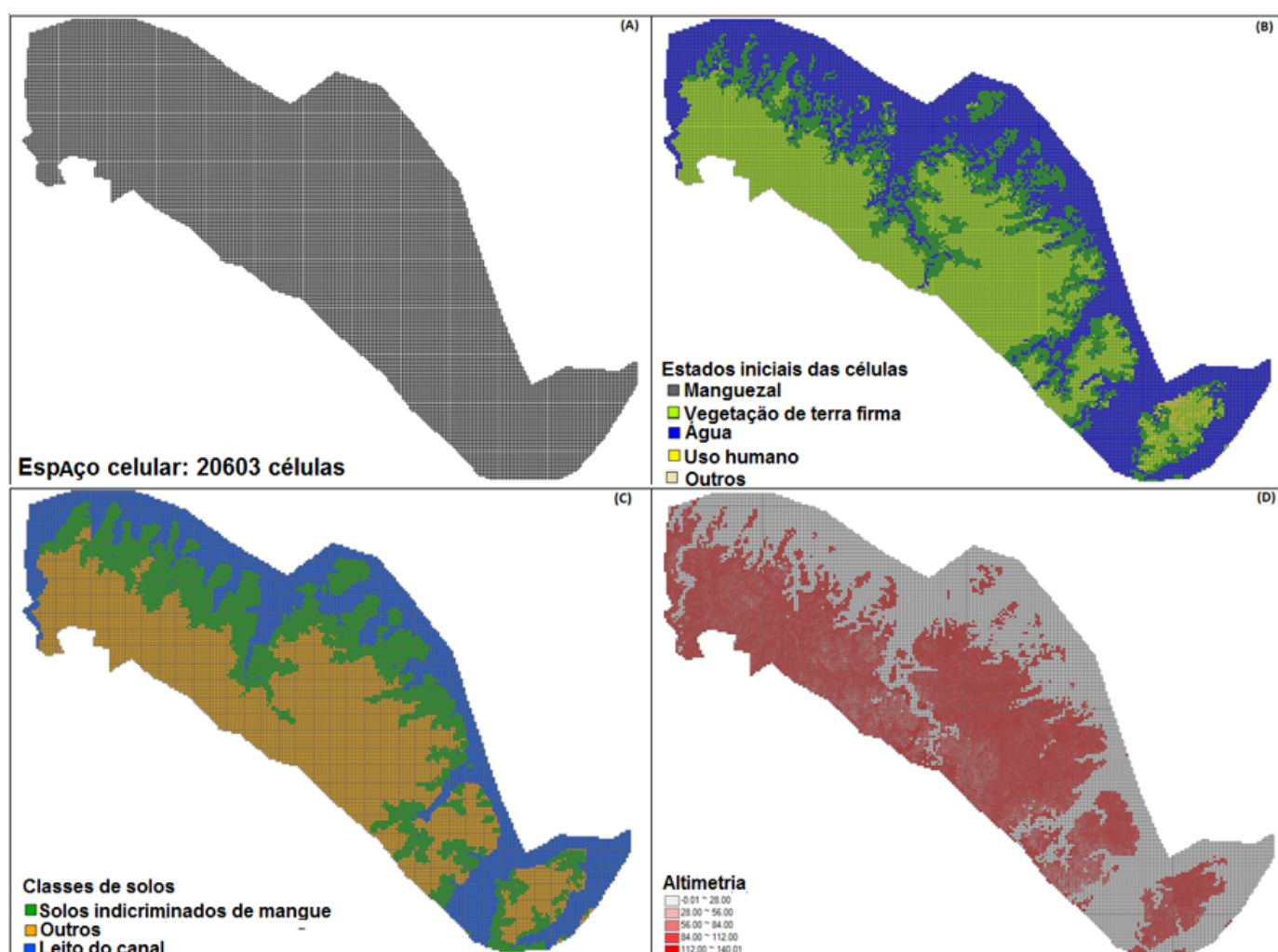


Figura 2. Figura metodológica representando o funcionamento do modelo BR-Mangue originalmente desenvolvido para a costa maranhense, utilizada apenas para ilustrar a estrutura computacional do modelo. Exemplo de bancos de dados no formato de espaço celular para a zona costeira maranhense. (A) Espaço celular vazio (B); Estado inicial da célula; (C) Atributo celular de tipo de solo; (D) Atributo celular de altimetria.

Inicialmente, o espaço celular encontra-se vazio, sem nenhuma informação geográfica no banco de dados. Para preencher as células com valores de atributo, é utilizado o plugin “células de preenchimento” no software TerraView. O plugin “células de preenchimento” permite o cálculo de valores de atributo de tabelas associadas a camadas de tipo de célula. O objetivo é padronizar informações de várias fontes, em diferentes formatos (dados vetoriais e raster, além de outras camadas de células), agregando-os na mesma base espacial-temporal. Ele permite que atributos de tabelas dinâmicas e estáticas sejam calculados. Dependendo da representação geométrica e da semântica dos atributos de dados de entrada, diferentes operadores podem ser aplicados. Para esta pesquisa, o operador "classe majoritária" foi usado.

O espaço celular fica sobreposto nos arquivos com informações geográficas, e cada célula assume a informação geográfica que ocupou a maior parte da área celular (como descrito na Figura 3). Este procedimento foi usado para determinar os atributos das células e os seus estados iniciais. Para o atributo altimetria, o valor da célula final é obtido por meio da média simples calculada de todos os valores de altimetria em cada célula.

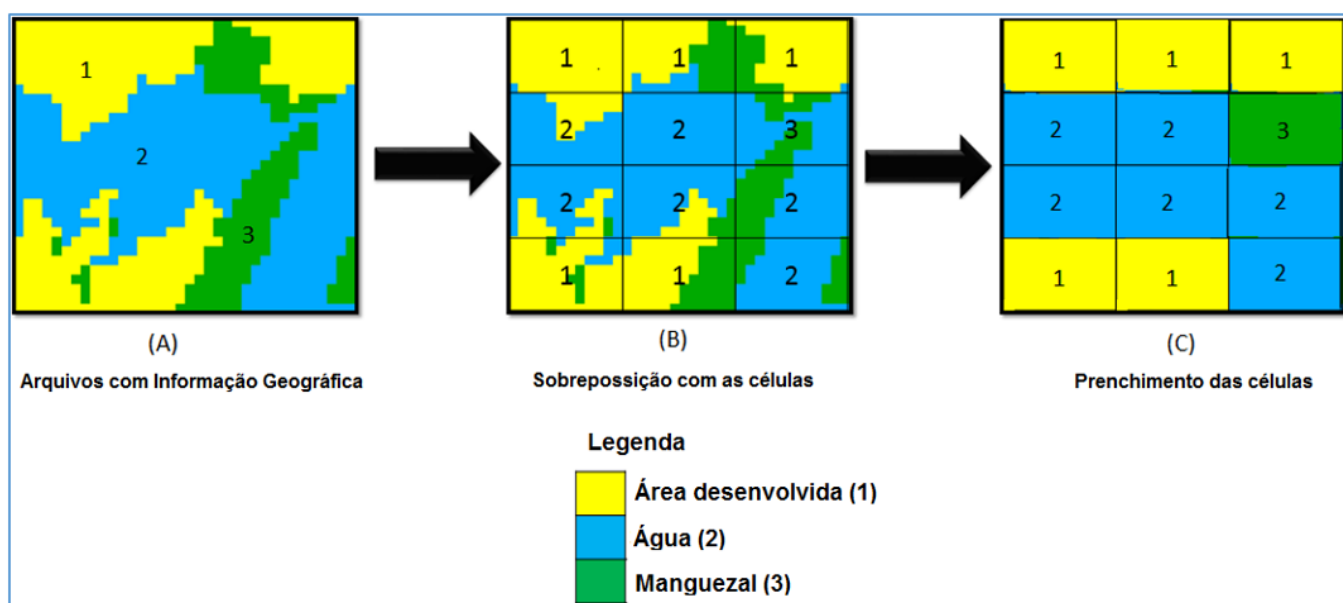


Figura 3. Operador de classe majoritária: (A) Arquivos com informações geográficas (em raster ou vetor); (B) sobreposição do espaço celular no banco de dados; (C) valores resultantes deste operador.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos por meio das simulações realizadas com o modelo BR-Mangue demonstram que a elevação do nível do mar tende a promover profundas transformações na estrutura da paisagem dos Sundarbans ao longo do século XXI. Entre 2022 e 2100, o nível médio do mar aumenta de 0,0125 m para aproximadamente 0,99 m, desencadeando mudanças significativas na distribuição espacial dos ecossistemas costeiros. Esse comportamento é compatível com os cenários globais apresentados pelo relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), segundo o qual regiões deltaicas de baixa altitude figuram entre os ambientes mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas. De acordo com Nicholls e Hinkel (2021), os deltas costeiros do Sul da Ásia apresentam elevada suscetibilidade devido à combinação entre aumento do nível do mar, subsidência natural e intensa ocupação humana, fatores amplamente reconhecidos como determinantes da vulnerabilidade dos Sundarbans.

A redução da área de manguezal remanescente constitui um dos resultados mais expressivos observados nas simulações. Ao longo do período analisado, a cobertura de manguezais diminui de aproximadamente 4.905 km² para 2.686 km², representando uma perda próxima de 45% da área inicial. Esse resultado apresenta forte convergência com as projeções desenvolvidas por Samanta et al. (2023), que estimaram perdas variando entre 42% e 80% da cobertura atual dos manguezais dos Sundarbans sob diferentes cenários de elevação do nível do mar. Entretanto, a redução observada não pode ser atribuída exclusivamente ao avanço das águas. Hazra et al. (2020) destacam que a subsidência do delta do Ganges-Brahmaputra-Meghna e a diminuição do aporte sedimentar contribuem significativamente para a perda de terras costeiras na região. Da mesma forma, Mondal et al. (2022) ressaltam que a erosão das margens insulares constitui um dos principais mecanismos responsáveis pela retração territorial observada nos Sundarbans, intensificando os efeitos das mudanças climáticas sobre os manguezais.

Além da redução dos manguezais remanescentes, observa-se um crescimento substancial da classe “manguezal inundado”, cuja área aumenta de 124,5 km² em 2022 para aproximadamente 2.344 km² em 2100. Esse resultado sugere que a velocidade de expansão das áreas inundadas supera a capacidade adaptativa dos ecossistemas costeiros. Segundo Alongi (2020), a persistência dos manguezais diante da elevação do nível do mar depende da capacidade de acumulação sedimentar e do crescimento vertical do substrato. Quando a taxa de aumento do nível do mar excede essa capacidade de ajuste, ocorre a perda gradual da estabilidade ecológica do sistema. Lovelock e Reef (2020) destacam que esse processo é particularmente crítico em ambientes sujeitos a limitações sedimentares, situação frequentemente observada em diversos setores dos Sundarbans. Assim, o crescimento das áreas de manguezal inundado observado nesta pesquisa pode ser interpretado como um indicativo da redução progressiva da resiliência ecológica do ecossistema frente às mudanças climáticas.

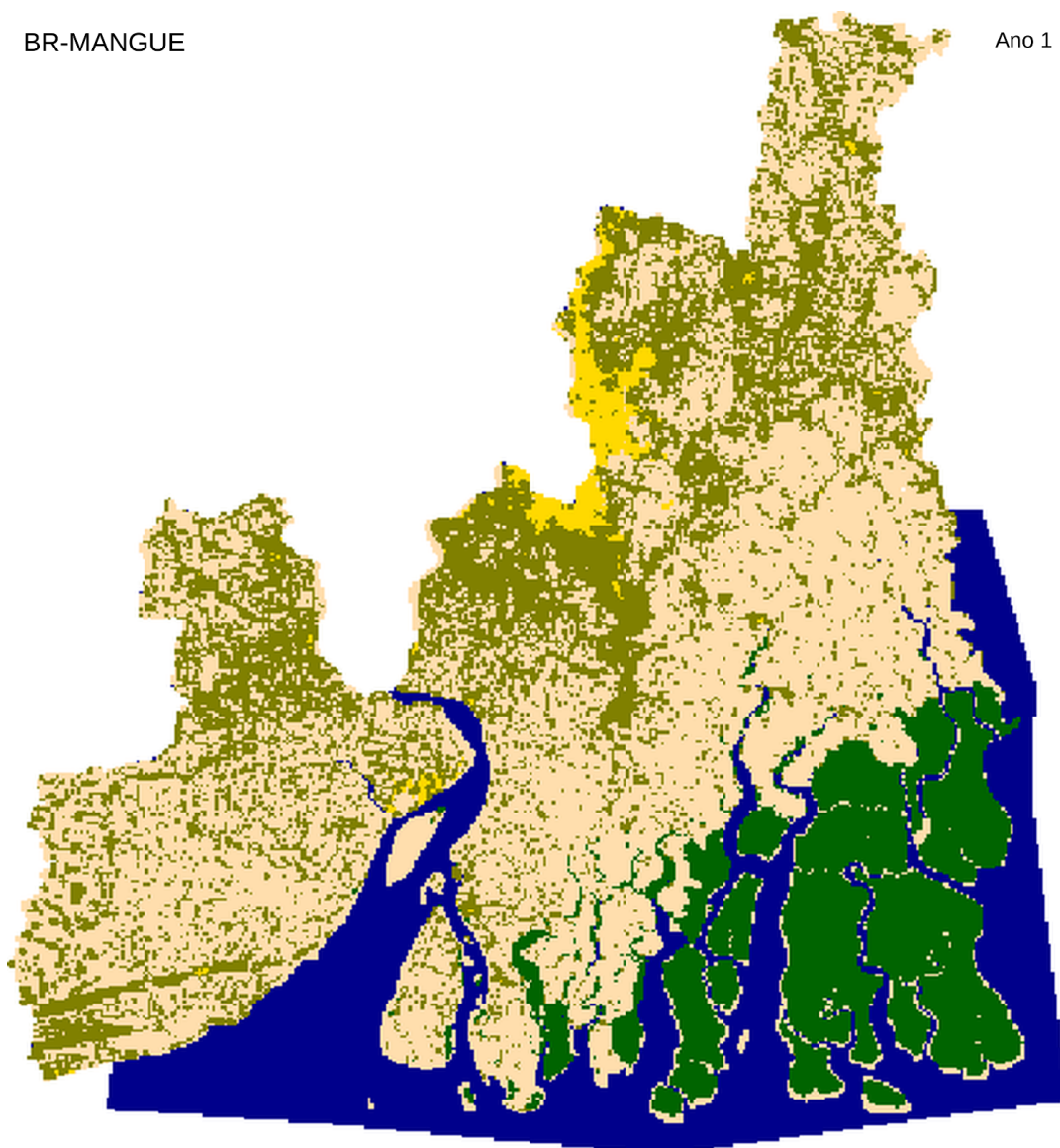
Os resultados relativos à migração dos manguezais revelam um comportamento igualmente relevante. Embora a área de mangue migrado apresenta crescimento inicial, passando de aproximadamente 476 km² para cerca de 505 km², observa-se uma estabilização desse processo ao longo das décadas. Esse padrão sugere que a migração continental dos manguezais encontra limitações impostas pela própria configuração da paisagem. Segundo Saintilan et al. (2020), a migração constitui uma das principais estratégias adaptativas dos manguezais frente à elevação do nível do mar. Entretanto, sua efetividade depende da existência de áreas disponíveis para colonização. Nos Sundarbans, a presença de diques, áreas agrícolas, assentamentos humanos e outras formas de ocupação territorial reduz significativamente essa possibilidade. Ghosh et al. (2021) argumentam que essa restrição favorece o fenômeno conhecido como *coastal squeeze*, caracterizado pela compressão dos ecossistemas costeiros entre o avanço do mar e barreiras localizadas no interior do continente.

A dinâmica observada para a vegetação terrestre reforça a hipótese de que os impactos da elevação do nível do mar não se restringem aos manguezais. Embora a redução da área total de vegetação seja relativamente moderada, passando de aproximadamente 9.469 km² para 9.084 km², verifica-se crescimento expressivo da vegetação inundada, que aumenta de 21,5 km² para 403,5 km². Esses resultados indicam uma expansão progressiva da influência marinha sobre áreas anteriormente ocupadas por formações vegetais continentais.

Mukhopadhyay et al. (2021) demonstram que o aumento da salinidade constitui um dos principais fatores responsáveis pelas alterações florísticas observadas nos Sundarbans, promovendo a substituição gradual de espécies menos tolerantes ao estresse salino. Segundo os autores, esse processo tende a comprometer a diversidade ecológica e reduzir a estabilidade funcional dos ecossistemas terrestres costeiros.

BR-MANGUE

Ano 1



- Mangue
- Vegetação Terrestre
- Mar
- Área Antropizada
- Solo Descoberto
- Solo Descoberto Inundado
- Área Antropizada Inundada
- Mangue Migrado
- Mangue Inundado
- Vegetação Terrestre Inundada

Figura 4. Elevação do Nível do Mar, Parque Nacional de Sundarbans - Simulação referente ao ano 1, 2022.

Outro resultado de destaque refere-se ao crescimento das áreas classificadas como solo inundado. Entre 2022 e 2100, essa classe aumenta de aproximadamente 279 km² para mais de 2.570 km², representando um crescimento superior a 800%. Esse comportamento confirma a tendência de expansão das áreas permanentemente inundadas projetada por diversos estudos recentes realizados nos Sundarbans. Kulp e Strauss (2021) argumentam que milhões de pessoas residentes em regiões costeiras de baixa altitude poderão ser diretamente afetadas pelo avanço das águas até o final do século. Nos Sundarbans, esse cenário é agravado pela subsidência natural do delta e pela ocorrência frequente de ciclones tropicais, fatores que aceleram os processos de erosão e inundação permanente (Hazra et al., 2020; Dasgupta et al., 2022).

Os impactos observados sobre as áreas construídas também merecem atenção. Embora a área construída total apresente pequena redução ao longo do período analisado, a área construída inundada aumenta de aproximadamente 2 km² para 20,5 km². Apesar de os valores absolutos serem inferiores aos observados para os ecossistemas naturais, o crescimento dessa classe evidencia o aumento da exposição das populações locais aos riscos costeiros. Shaw et al. (2021) destacam que os Sundarbans figuram entre os territórios mais vulneráveis do mundo aos impactos das mudanças climáticas devido à combinação entre pobreza, dependência dos recursos naturais e elevada densidade populacional. Nessas condições, mesmo pequenas perdas territoriais podem desencadear impactos significativos sobre habitação, infraestrutura, segurança alimentar e disponibilidade de água doce.

Sob a perspectiva ecológica, os resultados possuem implicações particularmente relevantes para a conservação da biodiversidade. Os Sundarbans abrigam o maior complexo contínuo de manguezais do planeta e desempenham papel fundamental na manutenção de espécies ameaçadas, incluindo o tigre-de-bengala (*Panthera tigris tigris*). Segundo Friess et al. (2024), a degradação dos manguezais compromete não apenas a biodiversidade local, mas também a conectividade ecológica necessária para a manutenção dos processos ecossistêmicos. A redução projetada da cobertura florestal observada nesta pesquisa pode,

portanto, resultar em impactos ecológicos muito mais amplos do que aqueles representados apenas pela perda de área.

Além da importância para a biodiversidade, os manguezais exercem papel estratégico na mitigação das mudanças climáticas globais. Estudos recentes sobre Blue Carbon demonstram que esses ecossistemas figuram entre os mais eficientes reservatórios naturais de carbono existentes no planeta (Macreadie *et al.*, 2021; Duarte *et al.*, 2022). Nesse contexto, a redução de aproximadamente 45% da cobertura de manguezal projetada pelo modelo BR-Mangue sugere não apenas perdas ecológicas locais, mas também diminuição potencial da capacidade de sequestro e armazenamento de carbono da região. Worthington et al. (2023) ressaltam que a conservação dos manguezais representa uma das estratégias mais eficazes de adaptação baseada em ecossistemas, contribuindo simultaneamente para a mitigação climática e para a proteção costeira.

Outro aspecto relevante evidenciado pelas simulações refere-se à alteração da configuração espacial da paisagem. Embora a análise da presente pesquisa tenha priorizado as mudanças de área das classes de cobertura do solo, os resultados sugerem a ocorrência de processos de fragmentação dos ecossistemas costeiros ao longo do período analisado. Segundo Giri et al. (2021), a fragmentação dos manguezais representa uma das consequências mais importantes da elevação do nível do mar, uma vez que reduz a conectividade entre habitats e compromete os fluxos ecológicos necessários para a manutenção da biodiversidade. Em regiões altamente dinâmicas, como os Sundarbans, a fragmentação também pode aumentar a vulnerabilidade das espécies frente a eventos extremos, dificultando processos naturais de dispersão, alimentação e reprodução.

A expansão das áreas inundadas observada nesta pesquisa também possui implicações significativas para os processos hidrológicos do delta. De acordo com Chanda et al. (2022), mudanças na distribuição espacial das áreas alagadas podem alterar os padrões de circulação hídrica, modificando o transporte de sedimentos e nutrientes ao longo dos canais estuarinos. Essas alterações tendem a influenciar diretamente a produtividade biológica dos ecossistemas costeiros, especialmente em regiões onde a dinâmica ecológica depende fortemente das interações entre os ambientes terrestre, fluvial e marinho. Dessa forma, os resultados indicam que os impactos da elevação do nível do mar podem extrapolar as mudanças observadas na

cobertura vegetal, alcançando processos ecológicos fundamentais para o funcionamento do sistema costeiro.

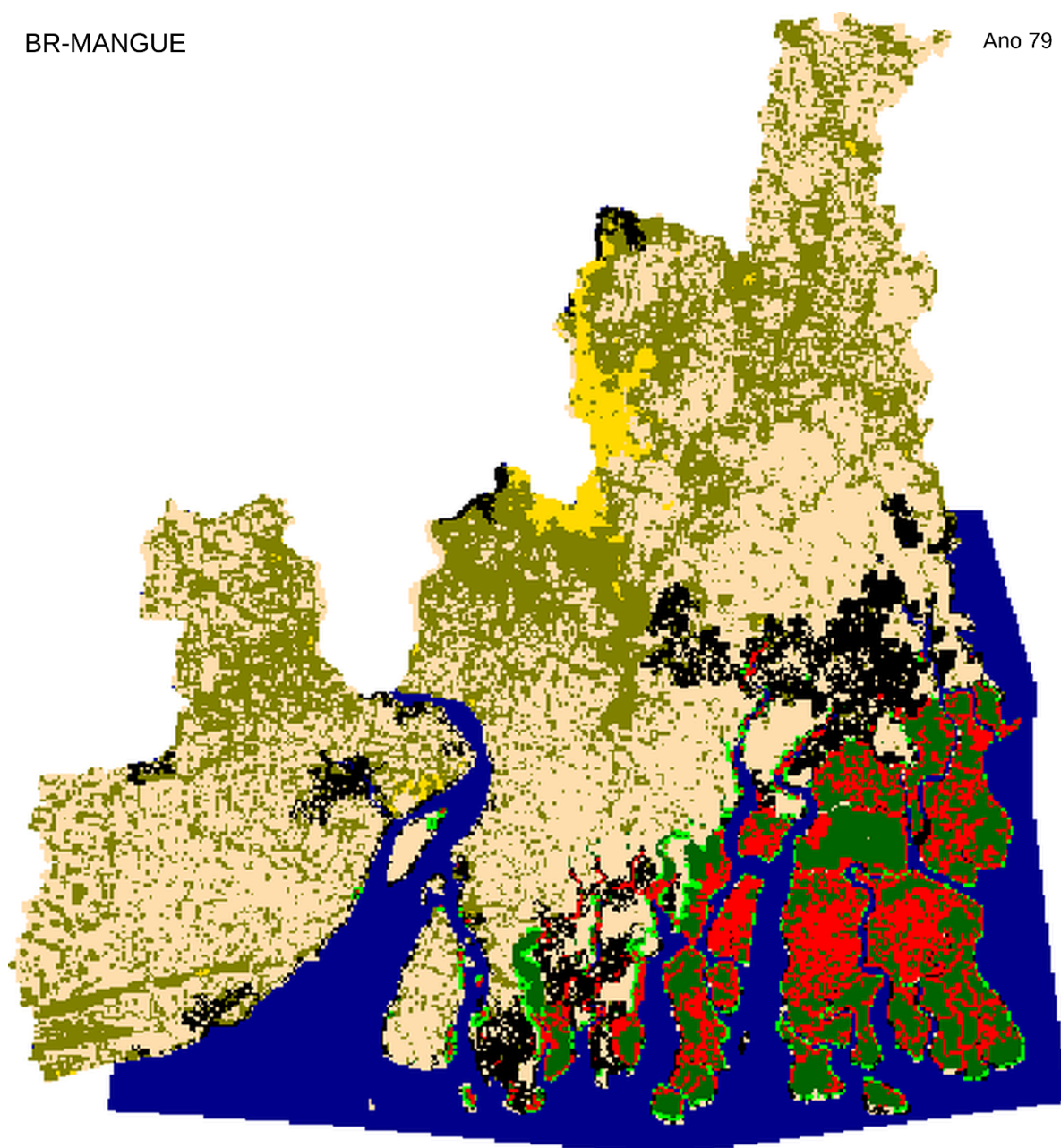
Os resultados obtidos também sugerem potenciais alterações na dinâmica da fauna associada aos manguezais. Estudos recentes conduzidos por Das e Vincent (2023) demonstram que a perda de habitats costeiros afeta diretamente a distribuição de espécies aquáticas e terrestres, particularmente aquelas que dependem dos manguezais durante fases específicas do ciclo de vida. Nos Sundarbans, onde diversas espécies utilizam os manguezais como áreas de alimentação, abrigo e reprodução, a redução progressiva da cobertura florestal pode resultar em mudanças na composição das comunidades biológicas e na estrutura das cadeias tróficas locais. Assim, os impactos projetados pelo BR-Mangue podem desencadear efeitos ecológicos que se estendem para além da vegetação propriamente dita.

Outro ponto que merece destaque refere-se à capacidade dos manguezais de atuar como barreiras naturais contra eventos climáticos extremos. Segundo Friess et al. (2024), ecossistemas de manguezal preservados reduzem significativamente a energia das ondas, minimizam processos erosivos e contribuem para a proteção de populações humanas localizadas em áreas costeiras. Nesse contexto, a redução expressiva da área de manguezais projetada para os Sundarbans pode representar uma diminuição progressiva da proteção natural oferecida por esses ecossistemas. Considerando o aumento esperado da intensidade de ciclones tropicais na região do Oceano Índico, esse cenário pode ampliar a exposição das comunidades locais aos riscos associados a tempestades, ressacas e inundações costeiras.

A análise dos resultados permite ainda discutir a questão da resiliência socioecológica dos Sundarbans. De acordo com Adger et al. (2021), sistemas socioecológicos resilientes são aqueles capazes de absorver perturbações sem perder suas funções essenciais. Entretanto, quando múltiplos fatores de pressão atuam simultaneamente, como elevação do nível do mar, erosão costeira, salinização e expansão das áreas inundadas, a capacidade adaptativa desses sistemas tende a diminuir progressivamente. Os padrões observados nas simulações indicam que os Sundarbans podem enfrentar desafios crescentes para manter o equilíbrio entre conservação ambiental e permanência das atividades humanas tradicionais, exigindo estratégias de adaptação cada vez mais integradas.

BR-MANGUE

Ano 79



- Mangue
- Vegetação Terrestre
- Mar
- Área Antropizada
- Solo Descoberto
- Solo Descoberto Inundado
- Área Antropizada Inundada
- Mangue Migrado
- Mangue Inundado
- Vegetação Terrestre Inundada

Figura 5. Elevação do Nível do Mar, Parque Nacional de Sundarbans - Simulação referente ao ano 79, 2100.

De maneira geral, os resultados obtidos indicam uma trajetória consistente de transformação da paisagem dos Sundarbans sob influência da elevação do nível do mar. A redução dos manguezais remanescentes, a expansão das áreas inundadas, a limitação da migração ecológica e o aumento da vulnerabilidade socioambiental convergem para um cenário de elevada pressão sobre os ecossistemas costeiros ao longo do século XXI. A concordância entre os resultados obtidos pelo BR-Mangue e os estudos recentes conduzidos por Samanta, Hazra, Mondal, Ghosh, Mukhopadhyay, Alongi, Saintilan, Friess e outros pesquisadores reforça a confiabilidade das projeções apresentadas. Dessa forma, os resultados evidenciam a necessidade de estratégias integradas de conservação, restauração ecológica e adaptação climática capazes de ampliar a resiliência dos Sundarbans frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas globais.

Por fim, os resultados reforçam a importância do uso de modelos espaciais preditivos como instrumentos de apoio à gestão ambiental. Conforme destacado por Rogers et al. (2023), a modelagem de cenários futuros permite identificar áreas prioritárias para conservação, restauração ecológica e planejamento territorial, contribuindo para a formulação de políticas públicas mais eficientes. No caso dos Sundarbans, as projeções geradas pelo BR-Mangue possibilitam antecipar potenciais áreas de perda de manguezais e expansão das inundações, fornecendo informações estratégicas para gestores ambientais e tomadores de decisão. Dessa forma, além de contribuir para o avanço do conhecimento científico, os resultados da presente pesquisa apresentam relevante potencial de aplicação prática no contexto da adaptação às mudanças climáticas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises desenvolvidas ao longo do presente estudo demonstram que:

- A elevação do nível do mar associada às mudanças climáticas representa um dos principais fatores de vulnerabilidade para os ecossistemas costeiros, especialmente os manguezais do Parque Nacional de Sundarbans, Índia, devido à sua localização em uma região deltaica de baixa altitude e elevada influência das marés;
- Os cenários projetados entre os anos de 2022 e 2100 indicam uma redução significativa da área ocupada pelos manguezais, decorrente do avanço do nível do mar, aumento das áreas suscetíveis à inundação e intensificação dos processos erosivos, comprometendo a permanência e distribuição espacial da vegetação;
- A aplicação do modelo BR-Mangue permitiu avaliar a vulnerabilidade dos manguezais frente aos cenários futuros de mudanças climáticas, contribuindo para a identificação de áreas potencialmente mais afetadas pelos impactos associados à elevação do nível do mar;
- A perda progressiva da cobertura de manguezal pode ocasionar impactos ecológicos expressivos, como redução de habitats, alterações na biodiversidade e comprometimento de serviços ecossistêmicos fundamentais, incluindo proteção costeira, armazenamento de carbono e manutenção da dinâmica ambiental;

Diante desse cenário, torna-se fundamental o fortalecimento de estratégias de monitoramento, conservação e adaptação climática voltadas aos manguezais de Sundarbans, considerando a necessidade de reduzir os impactos futuros associados à elevação do nível do mar. Recomenda-se a continuidade de estudos utilizando ferramentas de modelagem ambiental e análise espacial, capazes de subsidiar políticas de gestão costeira e ações de conservação direcionadas à manutenção desses ecossistemas frente aos cenários previstos para o século XXI.

REFERÊNCIAS

ADGER, W. Neil. **Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary**. In: MASSON-DELMOTTE, V. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021;

ALONGI, Daniel M. Carbon Balance in Salt Marsh and Mangrove Ecosystems: **A Global Synthesis**. *Journal of Marine Science and Engineering*, Basel, v. 8, n. 10, p. 767, 2020. DOI: 10.3390/jmse8100767;

DAS, S. **Mangrove ecosystem vulnerability and adaptation under climate change in the Indian Sundarbans**. *Forests*, Basel, v. 15, n. 10, 2024;

DASGUPTA, R. Assessing climate change impacts on mangrove ecosystem services in the Asia-Pacific Region. Cham: **Springer Nature**, 2022;

FOX-KEMPER, Baylor. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: MASSON-DELMOTTE, V. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: **Cambridge University Press**, 2021;

FRIESS, Daniel A. Mangrove Blue Carbon in the Face of Deforestation, Climate Change, and Restoration. In: ROBERTS, J. A. *Annual Plant Reviews Online*. **Hoboken: Wiley**, 2020. DOI: 10.1002/9781119312994.apr0752;

GHOSH, T. **Climate change and the Indian Sundarbans**: interlinkages between sea-level rise, geomorphology and mangrove ecosystems. *Regional Studies in Marine Science*, v. 47, 2021;

GIRI, Chandra. **Monitoring mangrove forest dynamics of the Sundarbans using satellite observations**. *Remote Sensing*, Basel, v. 13, 2021;

HAZRA, Sugata. **Sea level and associated changes in the Sundarbans**. *Journal of Coastal Conservation*, v. 24, 2020;

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: **Cambridge University Press**, 2013;

KANAN. **Mapping inundation from sea level rise and its interaction with land cover in the Sundarbans mangrove forest.** *Climatic Change*, Dordrecht, v. 176, art. 104, 2023. DOI: 10.1007/s10584-023-03574-5;

KULP. **New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding.** *Nature Communications*, London, v. 10, art. 4844, 2019;

LOVELOCK. **Variable impacts of climate change on blue carbon.** *One Earth*, Cambridge, v. 3, n. 2, p. 195–211, 2020;

MACREADIE. **Blue carbon as a natural climate solution.** *Nature Reviews Earth & Environment*, London, v. 2, p. 826–839, 2021;

MOHAMMED, E. **Assessing vulnerability of the Indian Sundarbans to climate change using geospatial techniques.** *Environmental Monitoring and Assessment*, Dordrecht, 2024;

MONDAL. **Assessing the impacts of global sea level rise (SLR) on the mangrove forests of Indian Sundarbans using geospatial technology.** In: *Geographic Information Science for Land Resource Management*. Singapore: Springer, 2022. p. 209–227;

MUKHOPADHYAY, A. **Climate change impacts on the Indian Sundarbans: a review.** *Regional Studies in Marine Science*, Amsterdam, v. 47, 2021;

NICHOLLS. **Sea level rise and coastal impacts.** In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (ed.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021;

ROGERS. **Mangrove responses to sea-level rise in the Anthropocene.** *Annual Review of Marine Science*, Palo Alto, v. 15, p. 331–356, 2023;

SAINTILAN. **Thresholds of mangrove survival under rapid sea-level rise.** *Science*, Washington, DC, v. 368, n. 6495, p. 1118–1121, 2020;

SAMANTA, S. **Projected mangrove loss under sea level rise scenarios in the Indian Sundarbans.** *Remote Sensing of Environment*, v. 305, 114065, 2024;

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. *Manguezais brasileiros: características, ecologia e conservação*. São Paulo: Instituto Oceanográfico da USP, 2023;

SHAW, R. *Climate vulnerability of Sundarbans communities*. In: SHAW, R. (ed.). **Climate Change and Coastal Vulnerability in South Asia**. Tokyo: Springer, 2021;

SANTOS, R. S. **Vulnerability of coastal ecosystems in Brazil: A systematic review of current threats**. *Ocean & Coastal Management*, v. 209, 105672, 2021;

WOLFRAM, S. **Statistical mechanics of cellular automata**. *Reviews of Modern Physics*, v. 55, n. 3, p. 601–644, 1983;

WORTHINGTON, T. A. **A global review of mangrove-based solutions for coastal protection**. *Science of the Total Environment*, v. 892, 164741, 2023;

XIONG, Y. **Coastal dynamics and sediment transport in deltaic systems**. *Journal of Coastal Research*, 2026.

VI. CAPÍTULO 2

TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS SIMULADOS DE ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR EM UMA UNIDADE DE CONSERVAÇÃO DA ÍNDIA.

RESUMO

A elevação do nível do mar constitui uma das principais consequências das mudanças climáticas e representa uma ameaça crescente aos ecossistemas costeiros, especialmente aos manguezais. O Parque Nacional dos Sundarbans, localizado no delta dos rios Ganges, Brahmaputra e Meghna, abriga a maior floresta contínua de manguezal do mundo e apresenta elevada vulnerabilidade aos impactos das mudanças ambientais. Neste estudo, avaliou-se o efeito da elevação do nível do mar sobre os manguezais dos Sundarbans entre 2022 e 2100 por meio da adaptação do modelo espacial BR-Mangue. A modelagem foi baseada em autômatos celulares e utilizou dados de altimetria, cobertura da terra, regime de marés e características sedimentares da região. Foram simulados cenários progressivos de elevação do nível do mar de até 1 metro, permitindo analisar alterações na distribuição espacial dos manguezais, áreas inundadas e demais classes de cobertura da terra. Os resultados indicaram redução de aproximadamente 45% da área de manguezal remanescente até 2100, acompanhada por expansão expressiva das áreas classificadas como manguezal inundado e solo inundado. Observou-se que grande parte das mudanças ocorreu nos estágios iniciais da elevação do nível do mar, evidenciando elevada sensibilidade do ecossistema a pequenas variações altimétricas. Além disso, o potencial de migração dos manguezais mostrou-se limitado pela disponibilidade de áreas adequadas para colonização, sugerindo restrições à adaptação natural do ecossistema. Os resultados reforçam a vulnerabilidade dos Sundarbans frente aos cenários futuros de mudanças climáticas e destacam a importância de estratégias de conservação, monitoramento e adaptação voltadas à proteção dos serviços ecossistêmicos fornecidos pelos manguezais.

Palavras-chave: Elevação do Nível do Mar, Mudanças Climáticas e Modelagem espacial.

ABSTRACT

Sea-level rise is one of the main consequences of climate change and poses an increasing threat to coastal ecosystems, particularly mangrove forests. Sundarbans National Park, located in the Ganges–Brahmaputra–Meghna Delta, hosts the largest continuous mangrove forest in the world and is highly vulnerable to environmental changes. This study evaluated the effects of sea-level rise on the Sundarbans mangroves between 2022 and 2100 through the adaptation of the BR-Mangue spatial model. The modeling approach was based on cellular automata and incorporated elevation, land cover, tidal regime, and sedimentary characteristics of the region. Progressive sea-level rise scenarios of up to 1 meter were simulated to assess changes in the spatial distribution of mangroves, flooded areas, and other land-cover classes. The results indicated an approximately 45% reduction in the remaining mangrove area by 2100, accompanied by a substantial expansion of flooded mangrove and inundated soil areas. Most of the projected changes occurred during the early stages of sea-level rise, highlighting the high sensitivity of the ecosystem to small altimetric variations. Furthermore, mangrove migration potential was constrained by the limited availability of suitable areas for colonization, suggesting restrictions on the natural adaptation capacity of the ecosystem. These findings reinforce the vulnerability of the Sundarbans to future climate change scenarios and emphasize the need for conservation, monitoring, and adaptation strategies aimed at safeguarding the ecosystem services provided by mangrove forests.

Keywords: Sea-Level Rise, Climate Change and Spatial Modeling.

1. INTRODUÇÃO

Os manguezais estão entre os ecossistemas costeiros mais importantes do planeta devido à sua elevada produtividade biológica, capacidade de armazenamento de carbono, proteção da linha de costa e suporte à biodiversidade marinha e estuarina. Além de fornecer habitat para inúmeras espécies de peixes, crustáceos e moluscos, esses ambientes desempenham papel fundamental na manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais para comunidades costeiras, incluindo segurança alimentar, proteção contra eventos extremos e regulação climática (Bunting *et al.*, 2022). Apesar de ocuparem uma pequena parcela da superfície terrestre, os manguezais exercem influência desproporcional sobre os processos ecológicos e socioeconômicos das zonas costeiras.

Nas últimas décadas, as mudanças climáticas têm intensificado as pressões sobre os ecossistemas costeiros em escala global. Entre os diversos impactos observados, a elevação do nível do mar destaca-se como uma das principais ameaças aos manguezais, uma vez que altera os padrões de inundação, acelera processos erosivos e modifica a disponibilidade de áreas adequadas para o estabelecimento e a migração dessas florestas (Kanan *et al.*, 2023). Embora os manguezais possuam certa capacidade adaptativa por meio da sedimentação vertical e da migração para áreas mais elevadas, essa resposta pode ser limitada pela velocidade da elevação do nível do mar e pela presença de barreiras naturais ou antrópicas.

Nesse contexto, os Sundarbans constituem um dos sistemas costeiros mais vulneráveis do mundo. Localizado no delta dos rios Ganges, Brahmaputra e Meghna, entre a Índia e Bangladesh, esse complexo abriga a maior floresta contínua de manguezal do planeta e desempenha papel fundamental na proteção costeira, na conservação da biodiversidade e na manutenção dos meios de subsistência de milhões de pessoas (Samanta *et al.*, 2023). Entretanto, a região apresenta características que ampliam sua vulnerabilidade climática, incluindo baixas altitudes, intensa dinâmica hidrossedimentar, subsidência do terreno e elevada exposição a ciclones tropicais e inundações costeiras.

Estudos recentes indicam que os efeitos combinados da elevação do nível do mar, da erosão costeira e das limitações na reposição sedimentar podem provocar perdas expressivas de áreas de manguezal nos Sundarbans ao longo do século XXI. Simulações realizadas por Samanta *et al.* (2023) apontam que os manguezais da porção indiana dos Sundarbans podem perder entre 42% e 80% de sua extensão atual até 2100, dependendo dos cenários climáticos e

das condições de manejo adotadas. De forma semelhante, Kanan et al. (2023) demonstraram que a expansão das áreas sujeitas à inundação permanente poderá alterar significativamente a distribuição espacial dos habitats costeiros da região.

A compreensão desses processos requer ferramentas capazes de integrar variáveis ambientais, hidrodinâmicas e geomorfológicas em análises prospectivas de longo prazo. Nesse sentido, os modelos espaciais baseados em autômatos celulares têm se mostrado instrumentos eficientes para simular respostas ambientais frente a diferentes cenários de mudanças climáticas. Entre essas ferramentas destaca-se o modelo BR-Mangue, desenvolvido por Bezerra et al. (2014), que permite representar processos como inundação, migração, retração e persistência dos manguezais a partir da interação entre elevação do nível do mar, altimetria, sedimentação e cobertura da terra.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar os potenciais impactos da elevação do nível do mar sobre os manguezais do Parque Nacional dos Sundarbans entre 2022 e 2100 por meio da adaptação e aplicação do modelo BR-Mangue. Busca-se identificar padrões espaciais de vulnerabilidade, estimar alterações na distribuição dos manguezais e compreender os principais limiares de resposta do ecossistema frente aos cenários futuros de mudança climática. Os resultados pretendem contribuir para o planejamento ambiental, a gestão de áreas protegidas e a formulação de estratégias de adaptação voltadas à conservação de um dos mais importantes ecossistemas costeiros do mundo.

2. METODOLOGIA

2.1. Base de dados e variável indutora da mudança

A análise estatística foi realizada a partir de uma série de dados simulados de elevação do nível do mar e de respostas espaciais associadas às classes de cobertura e condição de inundação da área de estudo. A variável indutora da mudança foi a elevação simulada do nível do mar, expressa em metros, enquanto as variáveis resposta corresponderam às áreas, em quilômetros quadrados, das classes mangue remanescente, vegetação, área construída, solo descoberto, solo inundado, área construída inundada, mangue migrado, mangue inundado e vegetação inundada.

A série analisada abrangeu registros anuais entre 2022 e 2100. O cenário de referência adotou elevação progressiva do nível do mar até aproximadamente 1 m ao final do período, em coerência com a configuração metodológica do experimento de simulação. A modelagem espacial foi concebida no ambiente BR-Mangue, com base em autômatos celulares, a partir de informações de perímetro da área de interesse, cobertura e uso da terra, classes de solo e altimetria. Essa estrutura permitiu avaliar não apenas a perda direta de classes terrestres, mas também a conversão simulada de áreas para condições de inundação, resistência ou potencial migração do manguezal.

Por se tratar de dados simulados, sequenciais e dependentes da lógica interna do modelo, não derivados de amostragem probabilística em campo, a estratégia analítica priorizou métodos robustos e não paramétricos. Essa escolha reduz a dependência de pressupostos de normalidade e permite caracterizar padrões monotônicos, magnitudes de mudança e limiares de resposta ao longo do gradiente de elevação simulada do nível do mar. Contudo, esses métodos foram empregados com finalidade descritiva e diagnóstica, e não como testes inferenciais clássicos sobre observações independentes.

2.2. Justificativa para o uso de estatística não paramétrica

Os dados utilizados neste estudo não representam observações independentes obtidas por medições repetidas em campo. Eles correspondem a saídas determinísticas de um modelo espacial, no qual cada ano e cada valor de elevação do nível do mar fazem parte de uma mesma trajetória de simulação. Em séries desse tipo, a premissa de independência entre observações é limitada, pois os estados sucessivos derivam do cenário anterior e das regras de transição do modelo. Portanto, testes inferenciais clássicos, como regressões paramétricas convencionais ou análises de variância, poderiam produzir interpretações inadequadas caso os p-valores fossem tratados como evidência estatística no sentido amostral tradicional.

Dessa forma, as estatísticas não paramétricas foram utilizadas como ferramentas de caracterização da tendência, da direção da resposta e da sensibilidade das classes simuladas à variável indutora. Os coeficientes de associação e as inclinações robustas foram interpretados como descritores do comportamento do modelo. Os p-valores, quando disponíveis, foram mantidos apenas como indicadores auxiliares da consistência monotônica das séries, sem caráter confirmatório, sem prova de causalidade ecológica e sem validação independente do cenário simulado.

2.3. Correlação de Spearman

A correlação de Spearman foi aplicada para descrever a força e a direção da associação monotônica entre a elevação simulada do nível do mar e cada variável resposta. Esse coeficiente é baseado na ordenação dos dados e, portanto, é apropriado quando o interesse principal é identificar se uma variável tende a aumentar ou diminuir de forma consistente à medida que outra variável aumenta, sem exigir linearidade estrita ou normalidade dos resíduos. No presente estudo, entretanto, sua interpretação foi limitada à caracterização da trajetória simulada, sem inferir independência amostral.

Neste estudo, valores de rho próximos de +1 foram interpretados como indicação de aumento monotônico da classe analisada dentro da trajetória simulada, enquanto valores próximos de -1 indicaram redução monotônica. Assim, a interpretação concentrou-se no sinal e na magnitude do coeficiente, especialmente para classes como mangue remanescente, mangue inundado, solo descoberto e solo inundado, evitando atribuir aos p-valores uma função comprobatória.

2.4. Correlação de Kendall

A correlação de Kendall foi utilizada como medida complementar à associação ordinal. Diferentemente de Spearman, que opera sobre ranks e diferenças entre posições, o tau de Kendall baseia-se na proporção de pares concordantes e discordantes entre duas variáveis. Essa característica torna o coeficiente útil para avaliar a consistência direcional das mudanças simuladas ao longo da trajetória temporal e do gradiente de elevação.

A convergência entre os resultados de Spearman e Kendall foi empregada como critério de robustez descritiva. Quando ambos os coeficientes apresentaram magnitude elevada e mesmo sinal, considerou-se que a variável resposta possuía comportamento fortemente monotônico em relação à elevação do nível do mar no âmbito da simulação, e não que houvesse uma comprovação estatística independente baseada em observações empíricas.

2.5. Inclinação robusta de Theil-Sen

Para estimar a magnitude da mudança associada à elevação do nível do mar, foi utilizado o estimador robusto de Theil-Sen. Esse método calcula a mediana das inclinações entre todos os pares de pontos da série, produzindo uma estimativa menos sensível a valores extremos do que a regressão linear ordinária.

A inclinação foi expressa em quilômetros quadrados por metro de elevação do nível do mar e, adicionalmente, em quilômetros quadrados por centímetro. A primeira unidade facilita a leitura da resposta total ao cenário de elevação acumulada, enquanto a segunda favorece a interpretação da sensibilidade incremental em escalas mais próximas dos incrementos simulados ao longo do tempo.

2.6. Limiar de resposta e sensibilidade incremental

Além das medidas de tendência, foram estimados limiares de resposta para cada variável. Esses limiares indicaram em qual valor de elevação do nível do mar e em qual ano da simulação foram alcançados 50%, 75%, 90% e 95% da mudança total projetada entre 2022 e 2100. Essa análise foi particularmente importante por não depender de premissas de independência amostral: seu objetivo foi identificar se a mudança simulada ocorreu de forma gradual ao longo de todo o período ou se foi concentrada nos estágios iniciais da elevação do

nível do mar.

Também foi calculada a sensibilidade incremental entre eventos sucessivos de elevação, expressa como variação de área dividida pela variação correspondente da elevação do nível do mar. Essa métrica permitiu identificar os intervalos em que a paisagem simulada apresentou maior resposta espacial por unidade de elevação.

2.7. Organização gráfica dos resultados

A representação gráfica foi organizada em cinco produtos principais. O primeiro gráfico normalizou as classes terrestres em relação ao ano inicial, permitindo comparar respostas relativas entre classes com diferentes áreas absolutas. O segundo gráfico apresentou a expansão das áreas inundadas ao longo do gradiente de elevação do nível do mar. O terceiro sintetizou a mudança absoluta entre 2022 e 2100. O quarto avaliou a sensibilidade incremental do manguezal remanescente. O quinto apresentou a proporção acumulada da mudança total, permitindo visualizar limiares de resposta ecológica e espacial.

Essa combinação de gráficos foi adotada porque permite articular três dimensões complementares dos resultados: a direção da mudança, a magnitude absoluta da resposta e o momento em que os principais limiares são atingidos. Em conjunto, esses produtos oferecem uma leitura mais adequada para dados simulados do que a simples apresentação de testes de significância.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados neste capítulo constituem uma continuidade das simulações espaciais desenvolvidas no capítulo anterior. Enquanto o Capítulo 1 concentrou-se na representação espacial dos impactos da elevação do nível do mar sobre os manguezais de Sundarbans, o presente capítulo dedica-se à análise estatística das variáveis produzidas pelo modelo BR-Mangue, buscando identificar tendências temporais, padrões de comportamento e níveis de vulnerabilidade ambiental.

3.1. Síntese estatística das respostas simuladas

A elevação simulada do nível do mar produziu respostas contrastantes entre as classes analisadas. As maiores mudanças absolutas ocorreram no solo descoberto, no solo inundado e no conjunto das classes relacionadas ao manguezal. O mangue remanescente diminuiu de 4.905,5 km² em 2022 para 2.686,0 km² em 2100, representando perda simulada de 2.219,5 km², equivalente a 45,25% da área inicial. Em sentido oposto, o mangue inundado aumentou de 124,5 km² para 2.344,0 km², com acréscimo absoluto de mesma magnitude.

Essa equivalência entre a perda do mangue remanescente e o aumento do mangue inundado sugere que, dentro das regras do modelo, parte expressiva da área originalmente classificada como manguezal passa a uma condição de inundação ao longo do cenário. Portanto, o aumento do mangue inundado não deve ser interpretado como ganho ecológico líquido, mas como mudança de condição espacial associada à elevação simulada do nível do mar.

Tabela 1. Síntese dos principais indicadores estatísticos das variáveis simuladas em resposta à elevação do nível do mar.

Variável	Δ 2022-2100 (km ²)	Δ (%)	Spearman rho	Kendall tau	Theil-Sen (km ² /m)	Limiar 50% / 90%
Mangue remanescente	-2219.5	-45.25	-0.999	-0.993	-96.4	2026 (0.06 m) / 2035 (0.18 m)
Vegetação	-385.0	-4.07	-0.999	-0.994	-150.0	2029 (0.10 m) / 2062 (0.51 m)
Construída	-18.5	-2.78	-0.893	-0.798	-6.5	2026 (0.06 m) / 2085 (0.80 m)
Solo Descoberto	-2317.5	-13.84	-1.000	-1.000	-1096.2	2032 (0.14 m) / 2052 (0.39 m)
Solo inundado	2291.5	821.33	1.000	1.000	1096.2	2032 (0.14 m) / 2052 (0.39 m)
Construída inundada	18.5	925.00	0.893	0.798	6.5	2026 (0.06 m) / 2085 (0.80 m)
Mangue Migrado	29.0	6.09	0.194	0.159	0.0	2023 (0.03 m) / 2023 (0.03 m)
Mangue inundado	2219.5	1782.73	0.999	0.993	96.4	2026 (0.06 m) / 2035 (0.18 m)
Vegetação inundada	382.0	1776.74	0.999	0.994	150.0	2029 (0.10 m) / 2063 (0.53 m)

Nota: Os coeficientes foram interpretados como descritores da resposta monotônica da simulação. Os p-valores não foram utilizados como inferência amostral clássica, pois a série representa uma trajetória determinística simulada, com variáveis dependentes entre si, e não medições independentes de campo.

3.2. Redução das classes terrestres e destaque para o manguezal remanescente

A normalização das classes terrestres em relação ao ano inicial evidencia que o manguezal remanescente foi a classe com maior retração proporcional entre as classes não inundadas analisadas. Enquanto a vegetação total apresentou redução relativa discreta, de aproximadamente 4,07%, e a área construída apresentou redução absoluta pequena, de 18,5 km², o mangue remanescente perdeu quase metade de sua área inicial ao longo do cenário.

A intensidade dessa resposta é descrita pelos coeficientes de associação. O mangue remanescente apresentou correlação de Spearman de -0,999 e tau de Kendall de -0,993, indicando uma redução praticamente monotônica com o aumento da elevação do nível do mar

dentro da trajetória simulada. A inclinação robusta de Theil-Sen indicou perda mediana de aproximadamente 96,43 km² por metro de elevação simulada, ou 0,96 km² por centímetro. Esses valores devem ser interpretados como medidas de monotonicidade e sensibilidade do modelo, e não como comprovação estatística independente baseada em medições de campo.

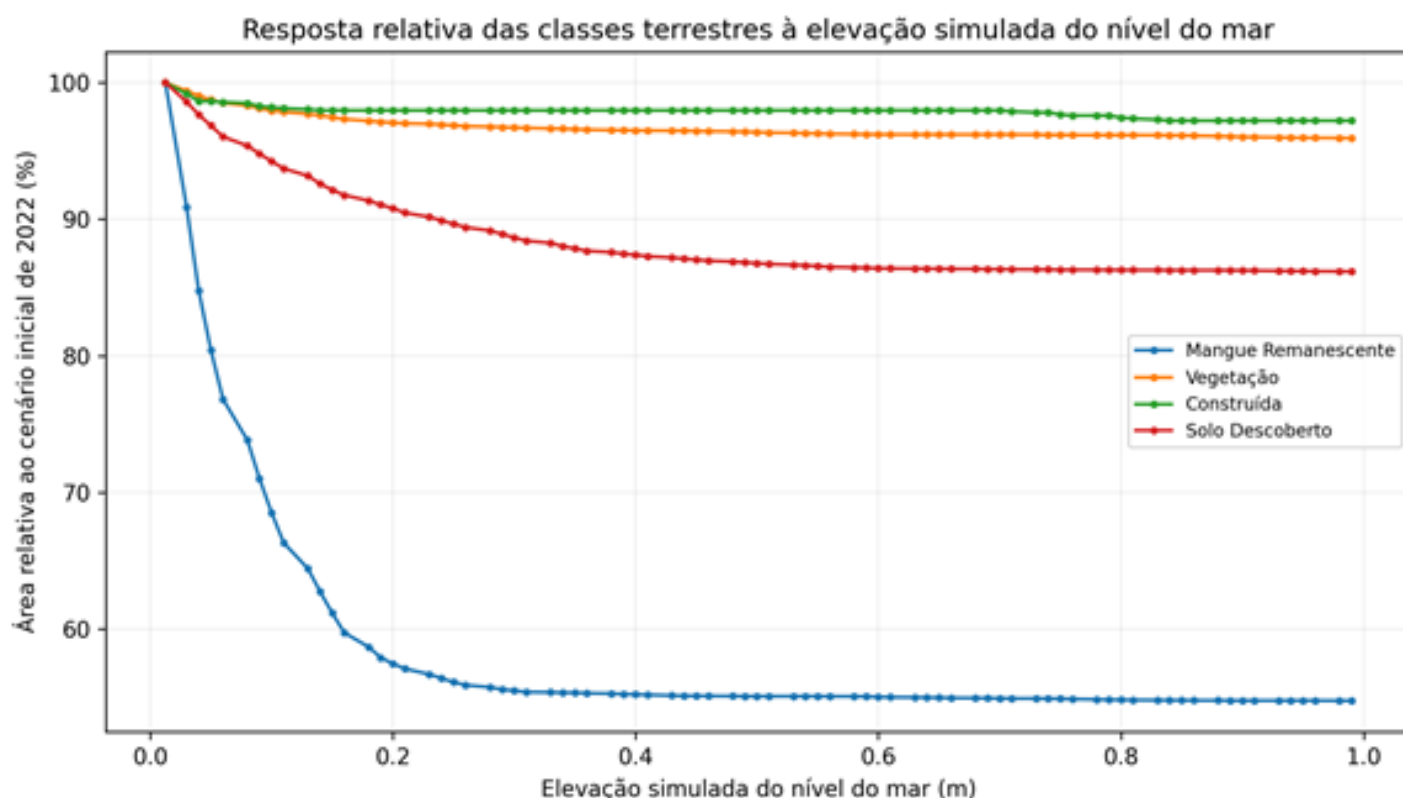


Figura 6. Classes terrestres normalizadas em relação ao ano inicial da simulação.

A ilustração evidencia a trajetória relativa das classes não inundadas em resposta ao aumento progressivo do nível do mar, com destaque para a redução mais acentuada do manguezal remanescente.

A Figura 6 mostra que a perda proporcional do mangue remanescente ocorre de forma rápida nos primeiros anos do cenário, sugerindo que parte relevante dessa classe está localizada em faixas altimétricas mais vulneráveis à inundação. Esse comportamento é particularmente importante para uma unidade de conservação, pois indica que a proteção formal da área não elimina a exposição física do ecossistema a processos de mudança ambiental induzidos pela elevação do nível do mar.

3.3. Expansão das áreas inundadas

As classes inundadas apresentaram comportamento oposto ao observado nas classes terrestres correspondentes. O solo inundado aumentou de 279,0 km² para 2.570,5 km², com acréscimo de 2.291,5 km². A correlação com a elevação do nível do mar foi fortemente positiva no âmbito da série simulada, com Spearman de 0,999 e Kendall de 0,999. A inclinação de Theil-Sen para o solo inundado foi de aproximadamente 1.096,15 km² por metro, caracterizando uma elevada sensibilidade espacial do modelo a essa classe de resposta.

O mangue inundado também apresentou expansão expressiva, aumentando 2.219,5 km² até 2100. Como esse aumento tem a mesma magnitude da perda do mangue remanescente, o resultado deve ser interpretado como alteração da condição hidrológica simulada das áreas de mangue. A vegetação inundada apresentou crescimento absoluto menor, de 382,0 km², mas crescimento relativo elevado, em razão da pequena área inicial da classe em 2022.

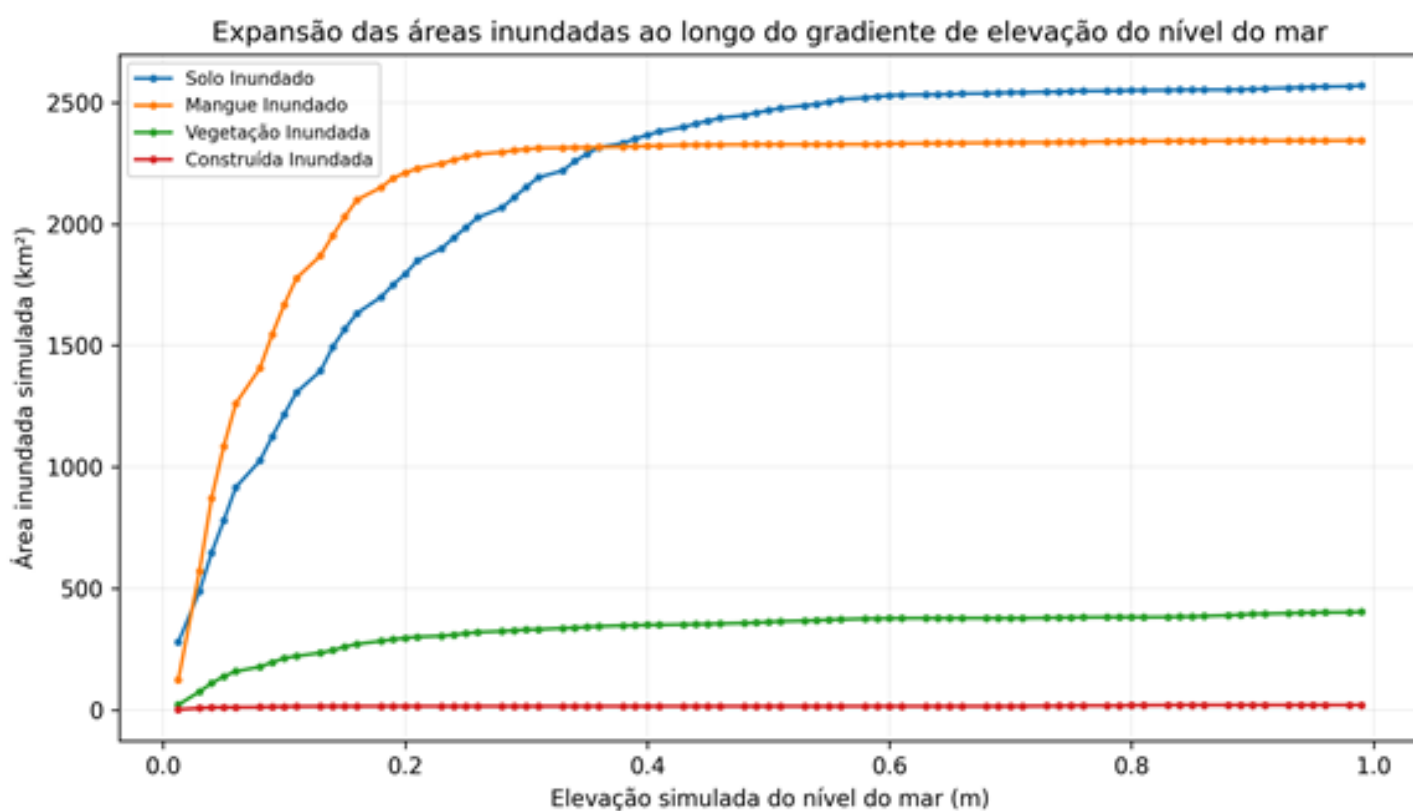


Figura 7. Expansão das áreas inundadas em função da elevação simulada do nível do mar. As séries mostram o crescimento das classes inundadas, especialmente mangue inundado, solo inundado e vegetação inundada.

A Figura 7 reforça que a inundação simulada não ocorre de maneira homogênea entre as classes. O solo inundado e o mangue inundado concentram a maior parte da expansão, enquanto a área construída inundada aumenta apenas 18,5 km². Ainda assim, mesmo mudanças absolutas pequenas em área construída podem ter importância para o planejamento territorial, pois indicam possível exposição de infraestrutura, ocupações ou zonas de uso humano dentro ou no entorno da área de interesse.

3.4. Balanço absoluto das mudanças entre 2022 e 2100

O balanço absoluto das mudanças simuladas permite distinguir classes que apresentam grandes variações proporcionais daquelas que realmente dominam a transformação espacial da paisagem. A área construída inundada, por exemplo, apresentou aumento relativo de 925%, mas esse valor decorre de uma linha de base inicial muito pequena, de apenas 2,0 km². Por isso, sua mudança absoluta é limitada quando comparada às alterações observadas em solo descoberto, solo inundado, mangue remanescente e mangue inundado.

O solo descoberto perdeu 2.317,5 km², correspondendo à maior redução absoluta observada. Essa perda foi acompanhada pelo aumento de 2.291,5 km² no solo inundado, o que sugere forte substituição de condição espacial entre solo exposto e solo inundado no cenário modelado. Esse resultado indica que a elevação do nível do mar pode reorganizar amplamente a matriz física da área simulada, com efeitos indiretos sobre conectividade, disponibilidade de superfícies para migração ecológica e distribuição futura das classes vegetadas.



Figura 8. Mudança absoluta das áreas simuladas entre 2022 e 2100. Valores negativos indicam retração de área e valores positivos indicam expansão de área no cenário final.

A Figura 8 é particularmente útil para a interpretação da magnitude espacial dos resultados, pois evita que percentuais elevados derivados de áreas iniciais pequenas dominem a leitura do cenário. Nessa perspectiva, as principais transformações simuladas estão associadas ao par solo descoberto-solo inundado e ao par mangue remanescente-mangue inundado.

3.5. Sensibilidade incremental do manguezal

A análise de sensibilidade incremental revelou que a perda de manguezal remanescente foi mais intensa nos primeiros intervalos de elevação simulada. O maior intervalo de sensibilidade ocorreu entre 2023 e 2024, quando a elevação passou de 0,0300 m para 0,0400 m. Nesse intervalo, a perda incremental atingiu o maior valor da série, indicando que pequenas elevações iniciais foram suficientes para acionar mudanças espaciais expressivas na classe manguezal.

Esse padrão sugere a existência de uma faixa de vulnerabilidade inicial, possivelmente relacionada à distribuição altimétrica das áreas de mangue no espaço celular do modelo. Em termos ecológicos e de planejamento, a leitura mais relevante não é apenas a perda total até 2100, mas a velocidade com que uma parcela substancial dessa perda é atingida nos estágios iniciais da simulação.

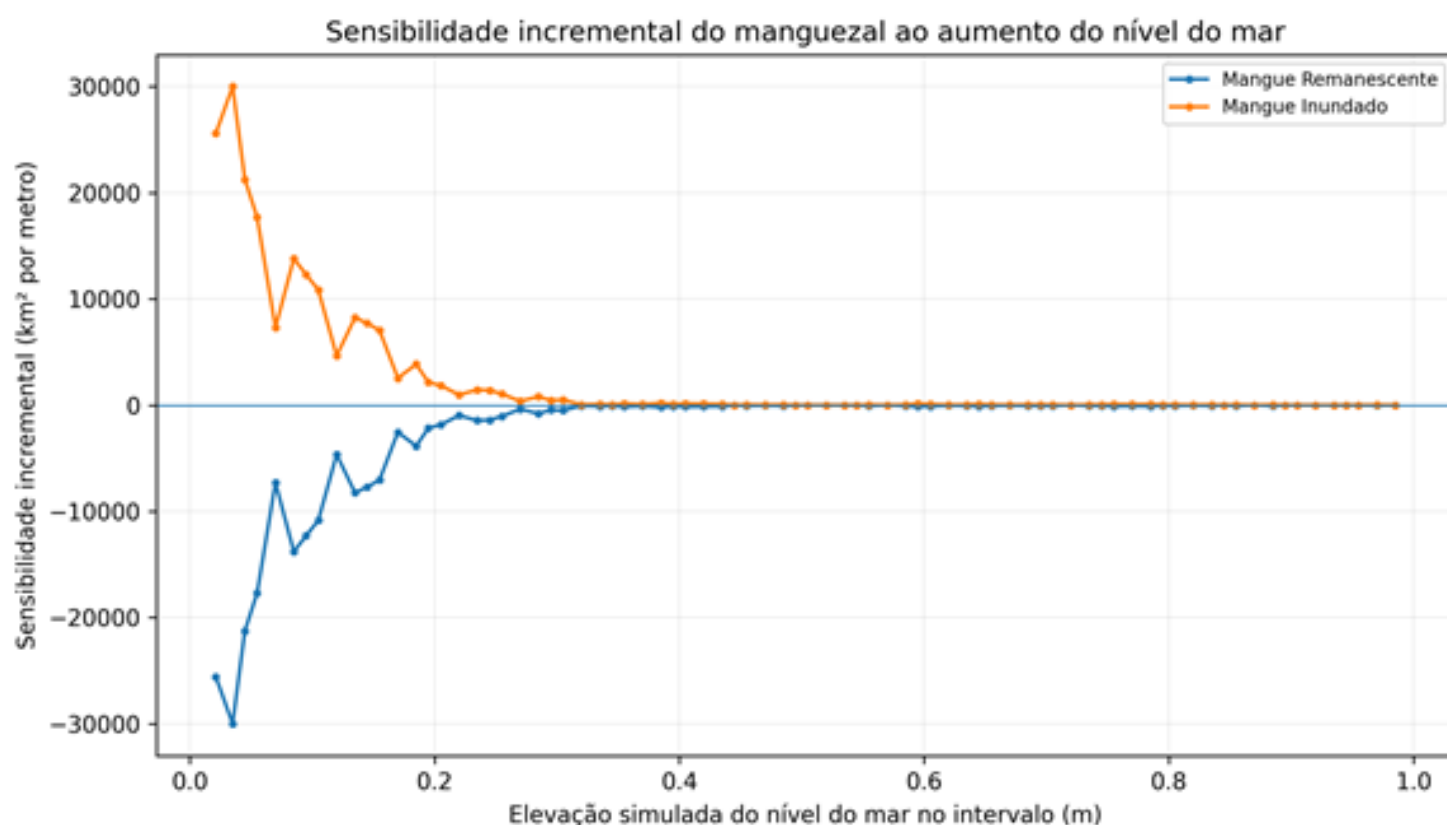


Figura 9. Sensibilidade incremental do manguezal remanescente em resposta aos incrementos sucessivos de elevação do nível do mar. Valores negativos indicam perda adicional de área por unidade de elevação simulada.

A Figura 9 mostra que a resposta incremental do manguezal não é constante ao longo do gradiente de elevação. A maior sensibilidade no início da série indica que o sistema pode apresentar perda precoce de áreas mais baixas, seguida por uma redução gradual da taxa de perda à medida que as áreas remanescentes se tornam relativamente menos expostas ou mais elevadas dentro do cenário modelado.

3.6. Limiares de mudança acumulada

A análise de limiares indicou que o manguezal apresenta uma resposta precoce à elevação simulada do nível do mar. Aproximadamente 50% da mudança total do mangue remanescente já foi alcançada em 2026, com 0,06 m de elevação simulada. O limiar de 90% da mudança foi atingido em 2035, com 0,18 m de elevação. Esse resultado mostra que, sob os pressupostos do modelo, a maior parte da transformação simulada do manguezal ocorre muito antes do final do período de análise.

O mesmo padrão foi observado para o mangue inundado, que atingiu 50% e 90% da mudança total nos mesmos anos e níveis de elevação. Em contraste, a vegetação total apresentou resposta mais gradual, atingindo 50% da mudança em 2029 e 90% apenas em 2062. A área construída apresentou comportamento ainda mais tardio para o limiar de 90%, alcançado em 2085, com 0,80 m de elevação simulada.

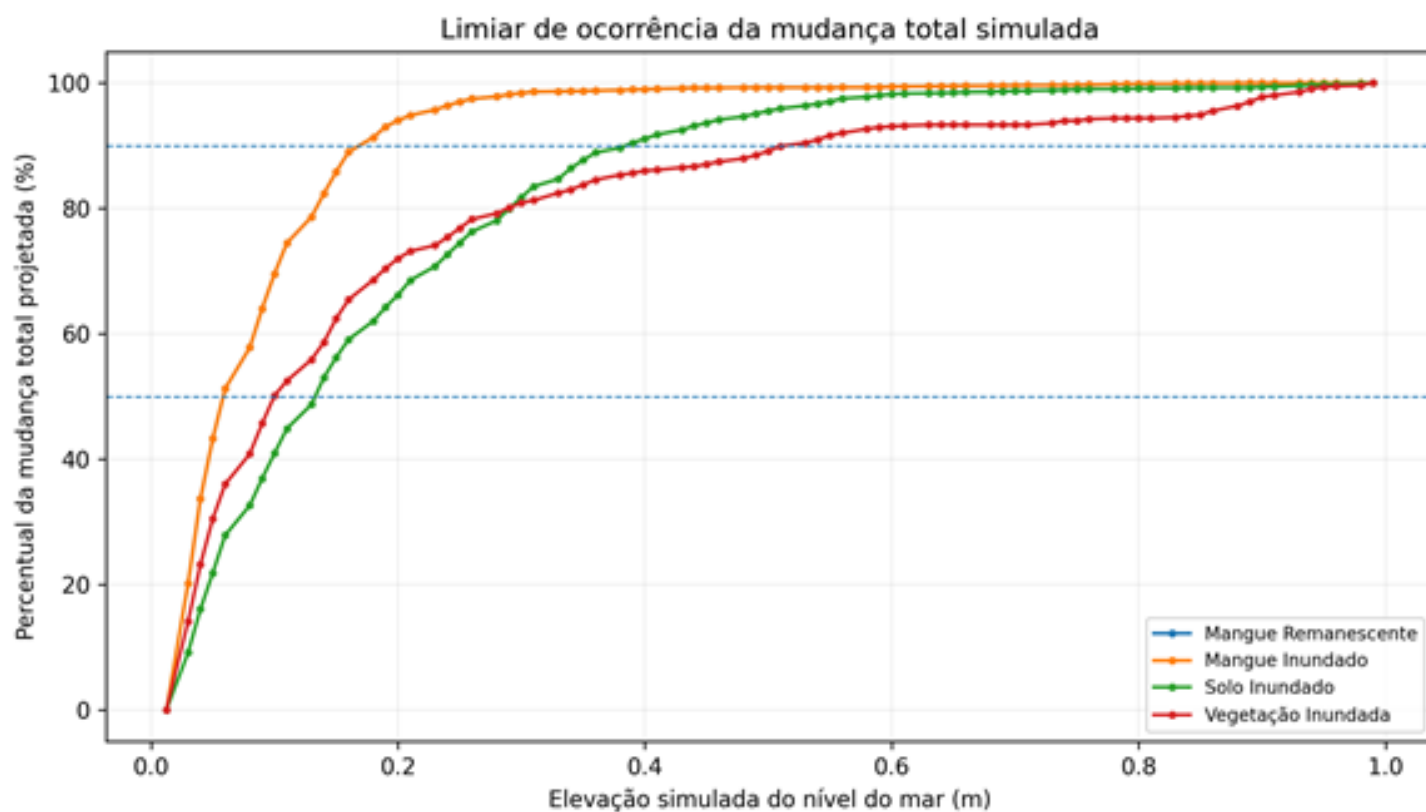


Figura 10. Percentual da mudança total acumulada em função da elevação simulada do nível do mar. A figura permite identificar limiares de resposta para as principais classes analisadas.

A Figura 10 sintetiza esse contraste temporal entre classes. O manguezal concentra a maior parte da sua mudança nos estágios iniciais, enquanto vegetação e área construída apresentam respostas mais distribuídas ao longo do tempo. Essa diferença é central para a discussão da vulnerabilidade ecológica, pois indica que estratégias de conservação e adaptação precisam considerar não apenas o cenário final de 2100, mas também os limiares de curto e médio prazo.

3.7. Mangue migrado e limites da acomodação espacial

A classe mangue migrado apresentou comportamento distinto das demais. A área aumentou de 476,0 km² em 2022 para 505,0 km² em 2023 e permaneceu praticamente estabilizada até 2100. Por essa razão, a inclinação robusta de Theil-Sen foi igual a zero, e os coeficientes de Spearman e Kendall foram baixos quando comparados às demais classes.

Esse resultado é relevante porque sugere uma saturação precoce do potencial de migração identificado pelo modelo. Em outras palavras, o cenário simulado indica que a existência de áreas potencialmente adequadas para migração do manguezal não cresce continuamente com a elevação do nível do mar. A migração parece limitada por condições espaciais previamente definidas, como altimetria, cobertura do solo, disponibilidade de superfície e regras de transição do modelo celular.

Do ponto de vista da conservação, esse padrão reforça que a migração do manguezal não deve ser assumida como resposta automática ou ilimitada à elevação do nível do mar. Mesmo quando há potencial inicial de deslocamento, a acomodação espacial pode ser restringida pela configuração da paisagem, pela presença de barreiras naturais ou antrópicas e pela disponibilidade de áreas compatíveis com a colonização futura.

3.8. Implicações para a interpretação ecológica e para a gestão da unidade de conservação

A reorganização espacial observada nas simulações reforça que os impactos da elevação do nível do mar sobre os manguezais dos Sundarbans transcendem a simples redução da área ocupada pela vegetação, refletindo mudanças complexas na configuração da paisagem e no funcionamento ecológico do ecossistema. Segundo Hazra et al. (2023), a resposta dos manguezais à elevação do nível relativo do mar resulta da interação entre processos de inundação, erosão costeira, subsidência, dinâmica sedimentar e capacidade de acreção vertical, fatores que atuam simultaneamente e condicionam diferentes trajetórias de transformação da paisagem. Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo corroboram a interpretação de que a conversão de áreas vegetadas para condições de inundação representa uma reorganização ecológica progressiva, cuja magnitude depende tanto da intensidade da elevação do nível do mar quanto das características geomorfológicas locais.

A identificação de perdas mais expressivas nos primeiros incrementos de elevação evidencia a elevada sensibilidade das áreas de baixa altitude do Parque Nacional de Sundarbans. Nesse contexto, Roy et al. (2024) destacam que os setores costeiros mais baixos do delta apresentam maior suscetibilidade a processos de inundação permanente, salinização dos solos e alterações hidrológicas, uma vez que pequenas variações no nível relativo do mar podem desencadear respostas ambientais desproporcionais. Tal comportamento reforça a existência de limiares ecológicos, nos quais modificações aparentemente discretas no ambiente físico promovem alterações significativas na estrutura da paisagem e na distribuição dos habitats, aspecto igualmente observado nas simulações desenvolvidas nesta pesquisa.

Sob a perspectiva da conservação, os resultados também evidenciam que a permanência dos manguezais dependerá, cada vez mais, da existência de áreas disponíveis para sua migração em direção ao continente. Mondal et al. (2023) demonstram que, mesmo em cenários de manejo conservador, a continuidade da elevação do nível do mar poderá ocasionar perdas expressivas de cobertura vegetal caso os processos naturais de migração sejam restringidos por diques, ocupação humana ou mudanças no uso da terra. Essa realidade é particularmente preocupante nos Sundarbans, onde a elevada densidade populacional e a intensa modificação antrópica das ilhas reduzem significativamente o espaço disponível para o deslocamento natural dos manguezais, comprometendo sua capacidade adaptativa frente às mudanças climáticas.

Outro aspecto relevante refere-se à necessidade de interpretar as áreas inundadas sob uma perspectiva funcional e não exclusivamente espacial. A conversão de determinadas classes da paisagem para ambientes permanentemente inundados não implica, necessariamente, a perda imediata de todas as funções ecológicas, mas representa alterações graduais nos processos biogeoquímicos, na composição florística e nas interações entre organismos e ambiente. Estudos recentes ressaltam que mudanças na frequência e na duração da inundação modificam a salinidade, a disponibilidade de nutrientes, a produtividade primária e os ciclos de carbono, afetando diretamente a estabilidade ecológica dos manguezais e sua capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos essenciais às comunidades costeiras.

Do ponto de vista da gestão ambiental, os resultados reforçam a importância da adoção de estratégias adaptativas baseadas em evidências científicas. Chanda e Akhand (2023) argumentam que medidas de adaptação voltadas às regiões costeiras devem priorizar ações preventivas, considerando a vulnerabilidade diferencial das áreas de menor altitude, a conservação dos corredores ecológicos e o monitoramento contínuo das alterações ambientais. Nesse sentido, a identificação prévia das áreas mais suscetíveis à inundação, conforme demonstrado neste estudo, representa importante subsídio para o planejamento territorial, permitindo direcionar esforços de conservação para setores cuja proteção poderá reduzir perdas ecológicas futuras e aumentar a resiliência do ecossistema frente às mudanças climáticas.

Embora os resultados obtidos apresentem padrões espaciais consistentes, é fundamental reconhecer que toda modelagem ambiental está condicionada aos pressupostos adotados durante sua construção. Nesse aspecto, Das e Bandyopadhyay (2025) ressaltam que projeções sobre os Sundarbans dependem fortemente da qualidade dos modelos digitais de elevação, dos parâmetros hidrodinâmicos, das taxas de subsidência e da representação da dinâmica sedimentar, fatores que podem influenciar significativamente os resultados simulados. Em resposta a essas críticas, Samanta et al. (2026) reforçam que estudos dessa natureza devem ser compreendidos como ferramentas exploratórias de apoio ao planejamento ambiental e não como previsões determinísticas do comportamento futuro da paisagem. Essa interpretação converge diretamente com a abordagem adotada nesta pesquisa, na qual as simulações são entendidas como cenários prospectivos destinados a subsidiar a gestão ambiental e orientar futuras investigações empíricas.

Por fim, os padrões espaciais identificados nesta pesquisa evidenciam o potencial da modelagem ambiental como instrumento de suporte   tomada de decisão em unidades de conservação costeiras. A possibilidade de antecipar áreas mais vulneráveis   inundação, identificar limiares de transformação da paisagem e reconhecer setores estratégicos para a migração dos manguezais permite estabelecer prioridades de manejo e conservação com maior embasamento científico. Assim, os resultados aqui obtidos reforçam as recomendações de Bera et al. (2023) de que a integração entre modelagem espacial, monitoramento de campo, dados altimétricos de alta resolução e informações hidrodinâmicas representa um dos

caminhos mais promissores para fortalecer políticas públicas de adaptação às mudanças climáticas nos Sundarbans e em outros ecossistemas costeiros sujeitos à elevação do nível do mar.

Outro aspecto que merece destaque refere-se à necessidade de integrar continuamente produtos de sensoriamento remoto, modelagem espacial e monitoramento de campo na gestão de unidades de conservação costeiras. Islam et al. (2024) destacam que a utilização integrada dessas ferramentas permite identificar tendências de degradação antes que alterações ecológicas irreversíveis sejam observadas em campo, favorecendo a adoção de medidas preventivas em vez de ações corretivas. Nos Sundarbans, essa abordagem torna-se ainda mais relevante devido à elevada dinâmica hidrossedimentológica do delta, onde pequenas modificações na topografia, na salinidade ou na frequência de inundação podem alterar significativamente a distribuição da vegetação em curtos intervalos de tempo. Nesse contexto, os resultados obtidos neste estudo demonstram que a modelagem espacial não deve ser compreendida apenas como instrumento de projeção futura, mas também como ferramenta de apoio ao monitoramento contínuo e à definição de áreas prioritárias para conservação e restauração ambiental.

Adicionalmente, os padrões espaciais identificados evidenciam a importância de incorporar abordagens de adaptação baseadas em ecossistemas (*Ecosystem-based Adaptation – EbA*) às políticas públicas destinadas aos Sundarbans. Chanda e Akhand (2023) ressaltam que a conservação dos manguezais representa uma estratégia de múltiplos benefícios, uma vez que contribui simultaneamente para a proteção da biodiversidade, a manutenção dos estoques de carbono azul, a redução dos impactos de eventos extremos e a segurança dos meios de subsistência das comunidades costeiras. Sob essa perspectiva, a preservação das áreas potencialmente favoráveis à migração natural dos manguezais deve ser entendida não apenas como uma medida de conservação ambiental, mas também como uma estratégia de adaptação climática capaz de aumentar a resiliência do sistema costeiro frente à elevação do nível do mar. Assim, os resultados desta pesquisa reforçam que o planejamento ambiental do Parque Nacional de Sundarbans deve considerar a dinâmica espacial da paisagem como elemento central na formulação de políticas públicas voltadas à conservação de longo prazo e à adaptação às mudanças climáticas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises desenvolvidas ao longo do presente estudo demonstram que:

- As análises estatísticas realizadas a partir dos dados simulados pelo modelo BR-Mangue permitiram identificar padrões consistentes de resposta dos ecossistemas costeiros dos Sundarbans frente aos cenários projetados de elevação do nível do mar entre os anos de 2022 e 2100.
- Os resultados demonstraram que a elevação do nível do mar constitui uma variável indutora capaz de promover alterações expressivas na dinâmica espacial das classes de cobertura da terra, evidenciando respostas distintas entre os diferentes componentes da paisagem. As análises de correlação de Spearman e Kendall revelaram associações monotônicas de elevada magnitude entre a elevação do nível do mar e as principais variáveis avaliadas, indicando forte consistência na direção das mudanças simuladas ao longo do período analisado.
- Entre as classes estudadas, o manguezal remanescente apresentou uma das respostas mais sensíveis ao avanço do nível do mar, registrando redução expressiva de sua área ao longo da série temporal. Em contrapartida, observou-se crescimento significativo das classes associadas às condições de inundação, especialmente manguezal inundado, solo inundado e vegetação inundada, evidenciando a progressiva expansão da influência marinha sobre a paisagem costeira.
- A aplicação do estimador robusto de Theil-Sen permitiu quantificar a magnitude dessas transformações, demonstrando que grande parte das alterações projetadas ocorre nos estágios iniciais do processo de elevação do nível do mar. Os limiares de resposta identificados indicaram que parcelas substanciais das mudanças simuladas são alcançadas antes mesmo da ocorrência dos cenários mais extremos projetados para o final do século, sugerindo elevada sensibilidade ambiental a pequenas variações altimétricas.
- A análise da sensibilidade incremental reforçou esse comportamento ao evidenciar que as maiores taxas de transformação espacial ocorrem nos primeiros incrementos de elevação do nível do mar. Esse padrão demonstra que os efeitos das mudanças

climáticas sobre os ecossistemas costeiros não se distribuem de maneira uniforme ao longo do tempo, mas tendem a concentrar-se em fases iniciais do processo de inundação, quando pequenas alterações no nível médio do mar podem desencadear respostas ambientais significativas.

- Os resultados obtidos também evidenciaram que o potencial adaptativo dos manguezais por meio da migração territorial apresenta limitações importantes, uma vez que os ganhos simulados por expansão ou deslocamento espacial foram insuficientes para compensar as perdas associadas ao avanço das áreas inundadas. Tal comportamento sugere que a capacidade de resposta natural do ecossistema pode ser progressivamente reduzida diante da continuidade dos cenários de elevação do nível do mar.

Dessa forma, conclui-se que a abordagem estatística adotada mostrou-se eficiente para caracterizar padrões de tendência, magnitude e sensibilidade das respostas simuladas pelo modelo BR-Mangue. Além de contribuir para a interpretação dos cenários projetados, os resultados reforçam a importância da utilização integrada de ferramentas de modelagem espacial e análise estatística como suporte ao planejamento ambiental, à gestão costeira e à formulação de estratégias de adaptação frente aos impactos das mudanças climáticas em ecossistemas altamente vulneráveis, como os manguezais dos Sundarbans.

REFERÊNCIAS

- ADGER, W. N. **Social-ecological resilience in coastal systems**. *Annual Review of Environment and Resources*, 2021;
- ALONGI, D. M. **Mangrove forests in a changing climate**. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020;
- BEZERRA, M. **BR-Mangue: modelo espacial para simulação de manguezais sob elevação do nível do mar**. 2014;
- BUNTING, P. **Mangrove ecosystem services and global distribution patterns**. 2022;
- CHANDA, A. **Hydrological alterations in deltaic systems**. *Hydrological Processes*, 2022;
- DAS, S.; VINCENT, J. **Mangrove loss and biodiversity impacts**. *Ecological Indicators*, 2023;
- DASGUPTA, S. **Climate risk and coastal exposure in South Asia**. **World Bank Report**, 2022;
- DUARTE, C. M. **Coastal blue carbon ecosystems**. *Nature Climate Change*, 2022;
- FRIESS, D. A. **Mangroves as coastal protection systems under climate change**. *Annual Review of Marine Science*, 2024;
- GHOSH, S. **Coastal squeeze and human infrastructure in delta systems**. *Journal of Environmental Management*, 2021;
- GIRI, C. **Mangrove distribution and fragmentation patterns**. *Remote Sensing*, 2021;
- HAZRA, S. **Sea-level rise and subsidence in the Ganges delta**. *Environmental Development*, 2020;
- HOLLANDER, M.; WOLFE, D. A.; CHICKEN, E. *Nonparametric statistical methods*. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2013;

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge: **Cambridge University Press**, 2021;

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate change 2023: Synthesis report*. **Geneva**: IPCC, 2023;

KANAN, M. **Coastal dynamics and environmental vulnerability in the Sundarbans region**. 2023;

KULP, S. A.; STRAUSS, B. H. Global vulnerability to sea-level rise. *Nature Communications*, 2021;

LOVELOCK, C. E.; REEF, R. **Mangrove responses to sea-level rise**. *Global Change Biology*, 2020;

MACREADIE, P. I. **Blue carbon ecosystems and climate mitigation**. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021;

MONDAL, B. **Coastal erosion dynamics in the Sundarbans delta**. *Geomorphology*, 2022;

MUKHOPADHYAY, A. **Salinity intrusion and vegetation change in Sundarbans**. *Science of the Total Environment*, 2021;

ROGERS, K. **Spatial modeling for coastal management and adaptation**. *Environmental Modelling & Software*, 2023;

SAINTILAN, N. **Mangrove migration and coastal squeeze**. *Nature Communications*, 2020;

SAMANTA, S. **Mangrove loss under sea-level rise scenarios in the Sundarbans**. *Science of the Total Environment*, 2023;

SEN, P. K. **Estimates of regression coefficient based on Kendall's tau**. *Journal of the American Statistical Association*, 1968;

SPEARMAN, C. **The proof and measurement of association between two things**. *The American Journal of Psychology*, 1904;

THEIL, H. **A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis.** 1950;

WOLFRAM, S. **Cellular automata and complexity.** 1983;

WORTHINGTON, T. A. **Blue carbon ecosystems and policy frameworks.** *Global Change Biology*, 2023.

APÊNDICE

MODELO DE NORMAS DA REVISTA, ARTIGO 1:

Elevação do Nível do Mar Entre os Anos De 2022 A 2100 No Parque Nacional De Sundarbans- Índia, Como Parâmetro O Manguezal.



Tabela A1: Bases de dados utilizadas.

Variável:	Descrição:	Finalidade:	Formato:	Sistema:
Limite da área de estudo	Delimitação do Parque	Área de simulação	Shapefile	WGS84
MDE	Dados altimétricos	Controle da inundação	Raster	WGS84
Cobertura e uso da terra	Classes temáticas	Estado inicial	Raster	WGS84
Classes de solo	Informações pedológicas	Atributos ambientais	Raster	WGS84
Cenário ENM	Elevação 2022–2100	Variável indutora	Numérico	-

Fonte: Elaboração do autor (2026).

Tabela B1: Parâmetros do modelo.

Parâmetro:	Valor:	Justificativa:
Período	2022–2100	Horizonte temporal
Etapas	80	Simulação anual
Elevação máxima	1,0 m	Cenário adotado
Incremento médio	0,0125 m	Progressão
Resolução	1 km x 1 km	Compatível com os dados
Número de células	20.603	Representação espacial
Plataforma	TerraME	Implementação
Linguagem	Lua	Regras do modelo

Fonte: Elaboração do autor (2026).

Tabela C1: Variáveis simuladas.

Variável:	Unidade:	Descrição:
Manguezal remanescente	km ²	Área preservada
Manguezal inundado	km ²	Área inundada
Manguezal migrado	km ²	Nova colonização
Vegetação	km ²	Cobertura terrestre
Vegetação inundada	km ²	Vegetação afetada
Solo exposto	km ²	Sem cobertura
Solo inundado	km ²	Área alagada
Área construída	km ²	Ocupação preservada
Área construída inundada	km ²	Ocupação afetada

Fonte: Elaboração do autor (2026).

Tabela E1: Regras conceituais.

Processo:	Condição:	Resultado:
Elevação do nível do mar	Incremento anual	Expansão da inundação
Inundação	Altitude inferior	Conversão para área inundada
Migração	Área disponível	Novo manguezal
Barreiras	Ausência de espaço	Redução da expansão
Sedimentação	Condições favoráveis	Persistência parcial

Fonte: Elaboração do autor (2026).

Tabela D1: Projetos financiadores relacionados ao desenvolvimento da pesquisa.

Instituição de fomento:	Projeto:	Processo / Edital:	Modalidade de apoio:
Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA)	MANGUE-SAT: Monitoramento do Manguezal na Ilha do Maranhão por Satélite	Processo APP-00008/25; Edital FAPEMA nº 15/2024 – Plano Maranhão 2050: Soluções Inovadoras	Apoio ao projeto de pesquisa.
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)	Avaliação dos Potenciais Impactos da Elevação do Nível do Mar para as Atividades Portuárias da Zona Costeira do Maranhão	Processo 305336/2025-8; Chamada CNPq nº 18/2024	Bolsa de Produtividade em Pesquisa vinculada ao projeto.

Fonte: Elaboração do autor (2026).

Tabela E1: Relação entre os dados de entrada, processamento e produtos gerados pelo modelo BR-Mangue.

Etapa:	Dado de entrada:	Processamento realizado:	Produto gerado:	Finalidade:
1	Limite do Parque Nacional de Sundarbans	Delimitação da área de estudo	Área de simulação	Definir o domínio espacial do modelo
2	Modelo Digital de Elevação (MDE)	Processamento altimétrico	Superfície de elevação	Identificar áreas suscetíveis à inundação
3	Cobertura e uso da terra	Classificação temática	Mapa temático inicial	Definir o estado inicial das células
4	Classes de solo	Integração espacial	Camada pedológica	Representar condições ambientais locais
5	Cenário de elevação do nível do mar	Incremento anual da lâmina d'água	Cenários anuais (2022–2100)	Simular a evolução da inundação costeira
6	Regras do modelo BR-Mangue	Aplicação dos autômatos celulares	Atualização das células	Simular persistência, migração e inundação dos manguezais
7	Resultados anuais	Cálculo das áreas por classe	Banco de dados tabular	Subsidiar a análise estatística
8	Banco de dados final	Tratamento estatístico	Tabelas, gráficos e mapas	Apoiar a interpretação dos resultados

Fonte: Elaboração do autor (2026).