



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia



Ministério da Ciência,
Tecnologia e Inovações



GABRIELA KOSTRZEWYCZ PEREIRA

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL ÀS
MUDANÇAS DO CLIMA EM MUNICÍPIOS DO
ARQUIPÉLAGO DO MARAJÓ**

2024

GABRIELA KOSTRZEWYCZ PEREIRA

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL ÀS MUDANÇAS DO
CLIMA EM MUNICÍPIOS DO ARQUIPÉLAGO DO MARAJÓ**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Campus de São José dos
Campos; Centro Nacional de Monitoramento
e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden),
como parte dos requisitos para obtenção do
título de MESTRA pelo Programa de Pós-
Graduação em DESASTRES NATURAIS.

Área: Desastres Naturais. Linha de pesquisa:
Desastres associados a eventos extremos,
inundações e movimentos de massa.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Cabral de Sousa Junior

São José dos Campos

2024

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2024]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Pereira, Gabriela Kostrzewycz

Análise de vulnerabilidade socioambiental às mudanças do clima em municípios do arquipélago do Marajó / Gabriela Kostrzewycz Pereira. - São José dos Campos : [s.n.], 2024.
109 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) - Pós-graduação em Desastres Naturais - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2024.

Orientador: Wilson Cabral de Sousa Junior.

1. Projeções climáticas. 2. Municípios costeiros. 3. Perigos costeiros. 4. Zonas costeiras de baixa elevação. 5. índices. I. Sousa Junior, Wilson Cabral de , orient. II. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. IV. Universidade Estadual Paulista (UNESP). V. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). VI. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Neste estudo, propõe-se um índice de vulnerabilidade socioambiental em nível municipal que aborda os principais perigos costeiros associados à elevação do nível do mar, sob a perspectiva de cenários de alterações climáticas para um futuro próximo (2050). Este índice é uma ferramenta prática para avaliar a exposição, a sensibilidade e a capacidade adaptativa dos municípios costeiros, permitindo comparações entre eles e identificando locais prioritários para a implementação de políticas públicas. Integrando dados ambientais, sociais e de governança dos municípios do arquipélago do Marajó, a pesquisa contribui para a compreensão das mudanças climáticas e seus efeitos na região. Além disso, o estudo alinha-se aos objetivos da Década da Ciência Oceânica (2021-2030) declarada pela ONU, promovendo um oceano seguro, onde a vida e os meios de subsistência sejam protegidos dos riscos associados. Ao abordar os desafios das mudanças climáticas e a necessidade de adaptação dos municípios costeiros, a pesquisa também contribui para o alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, especialmente na construção de cidades e comunidades mais resilientes (ODS 11).

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study proposes a socio-environmental vulnerability index at the municipal level, addressing the primary coastal hazards associated with sea-level rise, based on projected climate change scenarios for 2050. This index is a practical tool to assess the exposure, sensitivity, and adaptive capacity of coastal municipalities, enabling comparisons among them and identifying priority areas for the implementation of public policies. By integrating environmental, social, and governance data from municipalities in the Marajó archipelago, the research enhances understanding of climate change impacts in the region. Additionally, the study aligns with the goals of the United Nations Decade of Ocean Science (2021-2030), promoting a safe ocean where life and livelihoods are safeguarded from ocean-related risks. Furthermore, by approaching the challenges of climate change and the need for adaptation in coastal municipalities, the research contributes to achieving the Sustainable Development Goals, particularly in building more resilient cities and communities (SDG 11).

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wilson Cabral de Sousa Junior (Orientador)

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

Divisão de Engenharia Civil

São José dos Campos, SP

Prof. Dr. Silvio Jorge Simões

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos, SP

Prof. Dr. Denilson da Silva Bezerra

Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Departamento de Oceanografia e Limnologia

São Luís, MA

São José dos Campos, 04 de setembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Wilson, por me instigar a rumar por novos caminhos na pesquisa, pela orientação paciente e por acolher minhas limitações.

À banca examinadora, composta pelo Professor Silvio Simões e pelo Professor Denilson Bezerra, com quem tive trocas fundamentais para lapidar a minha pesquisa desde a qualificação.

Ao Professor Walter Mendes por acompanhar e contribuir com a construção da metodologia de pesquisa, pelos conselhos valiosos sobre os melhores caminhos a seguir e, especialmente, pelo incentivo na reta final do trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais – Unesp/Cemaden, por compartilharem seus conhecimentos, pelas provocações, e por inspirarem minha trajetória acadêmica.

Aos meus colegas da turma DN-2022, que dividiram essa jornada comigo e tornaram meus dias em São José dos Campos menos solitários. Em especial, àqueles com quem construí amizades e que se tornaram minha rede de apoio.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agência de fomento responsável pela concessão de bolsa através do Programa de Demanda Social (DS).

Às minhas famílias de sangue e de coração, que foram a base sólida de amor, apoio e companheirismo para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigada por segurarem minha mão, especialmente nos momentos difíceis, e me incentivarem a ir em busca dos meus sonhos.

Por fim, agradeço à todas e todos que ajudaram a trilhar este caminho, para que a Mestra Gabriela se tornasse uma realidade.

“A maioria das pessoas pensa que só se vive em terra firme e não imagina que tem uma parte da humanidade que encontra nas águas a completude da sua existência, de sua cultura, de sua economia e experiência de pertencer.”

Futuro Ancestral - Ailton Krenak

RESUMO

PEREIRA, G. K. **Análise de vulnerabilidade socioambiental às mudanças do clima em municípios do arquipélago do Marajó.** 2024. Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2024.

O arquipélago do Marajó é uma das áreas mais vulneráveis às mudanças climáticas no Brasil, situado em um ambiente costeiro, na interface entre continente e oceano, com parte do seu território em zonas de baixa elevação, com altitudes até 10 metros acima do nível das marés mais altas. Com as alterações no clima, eventos extremos, principalmente relacionados a perigos costeiros, tendem a se tornar cada vez mais frequentes na região. Entretanto, os estudos sobre os efeitos dessas alterações e seus perigos associados, especialmente ao considerar cenários climáticos futuros, são insuficientes para compreender as consequências com profundidade e para subsidiar estratégias de adaptação e mitigação. Nesse contexto, a aplicação de índices de vulnerabilidade se destaca como uma abordagem multifacetada, capaz de sintetizar a complexa inter-relação de aspectos ambientais, sociais, econômicos e de governança de determinado sistema. Existem métodos que integram esses aspectos aos cenários de mudanças climáticas futuras, através de projeções de variáveis climáticas, para auxiliar na análise da vulnerabilidade socioambiental de municípios costeiros. Portanto, a pesquisa tem como objetivo compreender a vulnerabilidade socioambiental atual e futura de municípios do arquipélago do Marajó situados em terras baixas, por meio da aplicação de um Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV). Este índice combina o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) para caracterizar a vulnerabilidade atual dos municípios, com os Índices de Cenários Climáticos (ICC), baseados em dados projetados de precipitação, temperatura e elevação do nível do mar para os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5. O IVC possui uma abordagem multiperigo e é composto pelos elementos fundamentais de vulnerabilidade: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Os resultados indicam que os fatores de sensibilidade (sociodemográfico e de infraestrutura de saneamento) são determinantes na vulnerabilidade atual dos municípios, com Chaves e Afuá apresentando índices altos. Além disso, os diferentes cenários do IMV sugerem que as alterações climáticas intensificarão a vulnerabilidade costeira dos municípios. Níveis altos de vulnerabilidade se repetirem para os municípios do oeste da ilha do Marajó. Sazonalmente, Cachoeira do Arari demonstra índices altos para o período chuvoso e Ponta de Pedras apresenta maior vulnerabilidade para o período seco, os dois casos para ambos os cenários de emissões. Os efeitos das alterações climáticas estão principalmente ligados ao regime hidrológico e podem comprometer a disponibilidade de água doce para o abastecimento desses municípios, em especial daqueles que possuem condições de infraestrutura inadequadas, assim como aumentar a ocorrência e os impactos dos perigos costeiros. Portanto, espera-se que a pesquisa possa contribuir com o aprofundamento do conhecimento frente aos impactos das mudanças climáticas na região, bem como apoiar na elaboração de políticas públicas para os municípios, em busca da manutenção dos ecossistemas e das condições de vida da população.

Palavras-chave: projeções climáticas; municípios costeiros; perigos costeiros; zonas costeiras de baixa elevação; índices.

ABSTRACT

PEREIRA, G. K. Socio-environmental vulnerability analysis to climate change in municipalities of the Marajó archipelago. 2024. Dissertation (Master's degree in Natural Disasters) - São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology, National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (Cemaden), São José dos Campos, 2024.

The Marajó archipelago is one of the most vulnerable areas to climate change in Brazil, located in a coastal environment, at the interface between the continent and the ocean, with part of its territory in low-elevation zones, with altitudes up to 10 meters above the highest tide level. With climate change, extreme events, mainly related to coastal hazards, are expected to become increasingly frequent in the region. However, studies on the effects of these changes and their associated hazards, especially when considering future climate scenarios, are insufficient to understand the consequences in depth and to support adaptation and mitigation strategies. In this context, the application of vulnerability indices stands out as a multifaceted approach, capable of synthesizing the complex interrelationship of environmental, social, economic and governance aspects of a given system. There are methods that integrate these aspects with future climate change scenarios, through projections of climate variables, to assist in the analysis of the socio-environmental vulnerability of coastal municipalities. Therefore, the research aims to understand the current and future socio-environmental vulnerability of municipalities in the Marajó archipelago located in lowlands, through the application of a Municipal Vulnerability Index (MVI). This index combines the Coastal Vulnerability Index (CVI) to characterize the current vulnerability of municipalities, with the Climate Scenario Indices (CSI), based on projected data on precipitation, temperature and sea level rise for the RCP4.5 and RCP8.5 emissions scenarios. The CVI has a multi-hazard approach and is composed of the fundamental elements of vulnerability: exposure, sensitivity and adaptive capacity. The results indicate that sensitivity factors (sociodemographic and sanitation infrastructure) are determinants of the current vulnerability of municipalities, with Chaves and Afuá presenting high indices. In addition, the different MVI scenarios suggest that climate change will intensify the coastal vulnerability of municipalities. High levels of vulnerability are repeated for municipalities in the west of Marajó Island. Seasonally, Cachoeira do Arari shows high rates for the rainy season and Ponta de Pedras is more vulnerable to the dry season, both cases for both emissions scenarios. The effects of climate change are mainly linked to the hydrological regime and can compromise the availability of fresh water for the supply of these municipalities, especially those with inadequate infrastructure conditions, as well as increase the occurrence and impacts of coastal hazards. Therefore, it is expected that the research can contribute to the deepening of knowledge regarding the impacts of climate change in the region, as well as support the development of public policies for the municipalities, seeking to maintain ecosystems and the living conditions of the population.

Keywords: climate projections; coastal municipalities; coastal hazards; low elevation coastal zones; indices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mudança regional do nível do mar até 2100 para diferentes cenários (em relação a 1995-2014)	24
Figura 2 – Quadro conceitual sobre risco segundo o IPCC – AR5, com medidas de adaptação para redução de risco	25
Figura 3 – Mapa de localização da área de estudo	34
Figura 4 – Aspectos geomorfológicos e geológicos da área de estudo	35
Figura 5 – Mapa de uso e cobertura da terra na área de estudo	43
Figura 6 – Estrutura metodológica para caracterização das variáveis climáticas	48
Figura 7 – Localização da área de estudo com os pontos de grade.....	49
Figura 8 – Projeção de aumento regional total para Belém para os dois cenários SSPs.....	52
Figura 9 – Estrutura do Índice Municipal de Vulnerabilidade proposto, com subíndices e fatores considerados	54
Figura 10 – Etapas para o cálculo do Índice Municipal de Vulnerabilidade	55
Figura 11 – Precipitação média anual na série histórica (1976-2005) e projeções RCP4.5 e RCP8.5 (até 2050)	71
Figura 12 – Temperatura média anual na série histórica (1976-2005) e projeções RCP4.5 e RCP8.5 (até 2050)	72

Figura 13 – Diferenças entre períodos projetado (2021-2050) e histórico (1976-2005) dos valores médios mensais e dos meses mais chuvosos e secos para PREC e TP2m e diferentes cenários de emissões	75
Figura 14 – Valores municipais normalizados de fatores do Índice de Exposição (IEx)	77
Figura 15 – Valores municipais normalizados dos fatores e do Índice de Sensibilidade (Ise)	78
Figura 16 – Valores municipais do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC)	80
Figura 17 – Valores do Índice Municipal de Vulnerabilidade para os cenários climáticos mensais sob RCP4.5 e RCP8.5.....	82
Figura 18 – Valores municipais do Índice Municipal de Vulnerabilidade para os cenários sazonais de RCP4.5 e RCP8.5.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Poços ativos e destinados ao consumo humano presentes na área de estudo e informações complementares.....	39
Tabela 2 – Características domiciliares quanto ao saneamento básico	41
Tabela 3 – Dados sociodemográficos dos municípios	45
Tabela 4 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator de exposição costeira	59
Tabela 5 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator erosão costeira.....	60
Tabela 6 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator inundação costeira.....	62
Tabela 7 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator intrusão salina	63
Tabela 8 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator sociodemográfico.....	65
Tabela 9 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator saneamento.....	66
Tabela 10 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator gestão de risco.....	67
Tabela 11 – Dados municipais e pesos das alterações de precipitação mensal (M-RCP), no período chuvoso (C-RCP) e no período seco (S-RCP) para os cenários de emissões	68
Tabela 12 – Dados municipais e pesos das alterações de temperatura mensal (M-RCP), no período chuvoso (C-RCP) e no período seco (S-RCP) para os cenários de emissões	69
Tabela 13 – Resultados do Teste de Mann-Kendall e do Teste de Sen para os valores médios das variáveis, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 e diferentes séries temporais	73

Tabela 14 – Valores municipais normalizados dos fatores e do Índice de Capacidade Adaptativa (ICAd)	79
---	----

Tabela 15 – Valores normalizados por município para os diferentes cenários climáticos	81
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>
COMPDEC	Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil
COSANPA	Companhia de Saneamento do Pará
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
ICAd	Índice de Capacidade Adaptativa
ICC	Índice de Cenário Climático
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IEx	Índice de Exposição
IMV	Índice Municipal de Vulnerabilidade
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISe	Índice de Sensibilidade
ISH	Índice de Segurança Hídrica
IVC	Índice de Vulnerabilidade Costeira
MAM	Meses de Março, Abril e Maio
MCG	Modelos Climáticos Globais
MCR	Modelos Climáticos Regionais
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MUNIC	Pesquisa de Informações Básicas Municipais
NE	Nível Estático
NMGM	Nível Médio Global do Mar
NRM	Nível Relativo do Mar
NUDEC	Núcleo de Defesa Civil
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PNSH	Plano Nacional de Segurança Hídrica
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
SAGA	Sistema Aquífero Grande Amazônia
SGB	Serviço Geológico do Brasil (antiga CPRM)
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SON	Meses de Setembro, Outubro e Novembro
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>
WCRP	<i>World Climate Research Programme</i>
ZCBE	Zonas costeiras de baixa elevação
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NA ZONA COSTEIRA	19
2.1 Modelos climáticos e projeções	19
2.2 Elevação do nível do mar	22
2.3 Vulnerabilidade costeira às mudanças climáticas	25
2.4 Índices de vulnerabilidade para áreas costeiras	28
3 PROPOSTA DE PESQUISA.....	33
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	34
4.1 Geomorfologia e geologia.....	35
4.2 O clima e aspectos meteorológicos	36
4.3 Os sistemas hídricos e a infraestrutura de saneamento	37
4.3.1 Águas superficiais.....	37
4.3.2 Águas subterrâneas	38
4.3.3 Saneamento básico	40
4.4 Aspectos oceanográficos	42
4.5 A cobertura do solo	43
4.6 Aspectos sociodemográficos	44
4.7 Gestão de riscos e de desastres	46
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
5.1 Diagnóstico climático e cenários futuros	48
5.1.1 Variáveis climáticas.....	48
5.1.1.1 Análise de tendência	50
5.1.1.2 Análise sazonal.....	50
5.1.2 Elevação do nível do mar	51
5.2 Construção e aplicação de um índice de vulnerabilidade socioambiental para municípios costeiros	52
5.2.1 Modelo conceitual.....	52
5.2.2 Cálculo do Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV).....	55
5.2.3 As componentes do Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV)	57
5.2.3.1 Índice de Exposição (IEx)	57
5.2.3.1.1 Exposição Costeira	58

5.2.3.1.2 Erosão costeira.....	59
5.2.3.1.3 Inundação costeira	61
5.2.3.1.4 Intrusão salina	62
5.2.3.2 Índice de Sensibilidade (ISe)	63
5.2.3.2.1 Sociodemográfico	63
5.2.3.2.2 Saneamento	65
5.2.3.3 Índice de Capacidade Adaptativa (ICAd).....	66
5.2.3.3.1 Gestão de risco.....	66
5.2.3.3.2 Recursos hídricos.....	67
5.2.3.4 Índice de Cenários Climáticos (ICC).....	68
6 RESULTADOS.....	70
6.1 Mudanças históricas e projetadas de variáveis climáticas para 2050	70
6.2 A vulnerabilidade socioambiental aos cenários climáticos de municípios do Arquipélago do Marajó	76
6.2.1 Os elementos fundamentais de vulnerabilidade	76
6.2.2 Índice de Vulnerabilidade Costeira	79
6.2.3 Índices de Cenários Climáticos	80
6.2.4 Índice Municipal de Vulnerabilidade	81
7 DISCUSSÕES.....	84
7.1 Vulnerabilidade socioambiental dos municípios frente às mudanças do clima	84
7.2 Desafios do índice proposto e recomendações	90
8 CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS	96
APÊNDICE A – Resumo dos índices que compõem o Índice Municipal de Vulnerabilidade	107

1 INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em seu Sexto Relatório de Avaliação (AR6), trouxe atualizações científicas preocupantes em relação aos impactos das mudanças climáticas ao redor do globo, pontuando a necessidade de ação imediata. O relatório apresenta evidências de que a temperatura da superfície global está aumentando devido ao aumento de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, aproximando-se cada vez mais de atingir o aquecimento de 1,5 °C, comparado aos níveis pré-industriais. Com o aquecimento do planeta, a elevação do Nível Médio Global do Mar (NMGM) é praticamente inevitável ao longo do século 21. (IPCC, 2021a)

Estima-se que entre 10 e 13% da população mundial ocupa áreas denominadas de Zonas Costeiras de Baixa Elevação (ZCBE), ou seja, aquelas localizadas até 10 m acima das linhas atuais de maré alta (NICHOLLS; CAZENAVE, 2010; KULP; STRAUSS, 2019), consideradas as mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas (IPCC, 2021a). De acordo com os estudos levantados pelo IPCC (2021a), é extremamente provável que o aumento do Nível Relativo do Mar (NRM) continue ao redor da América do Sul, contribuindo para o aumento de ocorrências de inundações costeiras em cidades localizadas em zonas de baixa elevação e pequenas ilhas. Esses efeitos podem agravar ainda mais a situação de pequenas comunidades costeiras - especialmente as situadas em áreas rurais - socialmente vulneráveis devido ao acesso restrito a cuidados de saúde, bens e serviços, em consequência de suas localizações geográficas (UN, 2021). Portanto, essas áreas demandam de prioridades de ação, especialmente a costa brasileira, cujo conhecimento científico sobre os impactos da elevação do nível do mar, bem como as políticas públicas que considerem seus efeitos são incipientes, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do país (PBMC, 2016).

O arquipélago do Marajó, maior arquipélago fluviomarinho do mundo, é considerado um dos ambientes mais frágeis à elevação do nível do mar no país (ALMEIDA et al., 2016). Especialmente a porção norte-nordeste, onde a influência oceânica é mais significativa e as porções de terra estão situadas em zonas de baixa elevação (DANTAS et al., 2013). Pertencente ao Litoral Amazônico Brasileiro, o arquipélago está situado na desembocadura de dois importantes sistemas fluviais, a bacia do rio Amazonas, na porção oeste, e a bacia do rio Tocantins-Araguaia, na margem leste, que contribuem significativamente para a descarga de água doce e de material sedimentar para a região (DANTAS et al., 2013; COSTA, 2014; TORRES; EL-ROBRINI; COSTA, 2018). Em contrapartida, com o aumento do nível do mar

devido às alterações climáticas, espera-se que os fluxos marinhos se intensifiquem nas desembocaduras, contribuindo para o aumento da ocorrência de inundações e erosões costeiras e de intrusão salina no subsolo e em águas subterrâneas, por exemplo (NICHOLLS; CAZENAVE, 2010; PBMC, 2016), podendo afetar o abastecimento hídrico da população local, bem como os seus meios de cultivo. Além disso, o arquipélago é protegido por leis ambientais, através da instituição de unidades de conservação, visando a manutenção de seus ecossistemas diversos, cujos serviços beneficiam tanto o ambiente quanto a população local, pela regulação do clima, proteção da costa e provisão de recursos para subsistência e/ou como fonte de renda, dentre outros (GONÇALVES et al., 2016). Ou seja, os efeitos das mudanças climáticas ameaçam tanto os aspectos ecossistêmicos quanto os socioeconômicos na área.

O combate aos impactos das mudanças climáticas exige estratégias de mitigação e adaptação fundamentadas em conhecimento robusto e interdisciplinar. Estudos indicam que a análise de riscos, vulnerabilidades e impactos de perigos costeiros é uma das medidas mais eficazes para apoiar a gestão costeira, servindo como base para a tomada de decisões e identificação de áreas prioritárias (NICOLodi; PETTERMANN, 2011; PBMC, 2016; LIMA et al., 2023). Nesse contexto, a aplicação de índices de vulnerabilidade tem se destacado como uma abordagem multifacetada, capaz de sintetizar a complexa inter-relação entre aspectos ambientais, sociais, econômicos e de governança (MENEZES et al., 2018; LIMA et al., 2023). Além disso, a inclusão de cenários de mudanças climáticas futuras é cada vez mais comum, inclusive em estudos em áreas costeiras, oferecendo suporte à compreensão das possíveis alterações climáticas e seus efeitos em municípios costeiros (ex. ZANETTI et al., 2016; SANTOS et al., 2021)

Assim, considerando que os municípios costeiros em zonas de baixa elevação serão os mais impactados pelo aumento do nível do mar e seus perigos associados devido às mudanças climáticas, este estudo busca compreender a vulnerabilidade socioambiental atual e futura dos municípios do arquipélago do Marajó. Para isso, foi proposto um índice a nível municipal, que combina o índice de vulnerabilidade costeira com uma abordagem multiperigo baseada em cenários climáticos projetados.

2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NA ZONA COSTEIRA

Oscilações climáticas ocorrem de forma natural em um sistema complexo como a Terra. Por isso, o sistema climático depende de trocas de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre, em especial o oceano, para manter seu equilíbrio. Este equilíbrio climático está associado ao balanço aproximadamente igual a zero entre os fluxos de entrada e saída de radiação solar (ondas curtas) e terrestre (ondas longas), o que significa que a quantidade de energia radiativa que entra é aproximadamente igual à que sai do sistema. No entanto, quando o fluxo de entrada de energia do planeta supera o de saída (balanço positivo), a tendência é que ocorra o aumento de temperatura. Por outro lado, quando o fluxo de saída é maior (balanço negativo), o planeta tende a esfriar. (CHURCH et al., 2013)

Parte desse balanço é influenciada pela presença de gases na atmosfera que possuem maior capacidade de absorver radiação terrestre, aprisionando calor e aumentando a temperatura da superfície terrestre, desempenhando o papel fundamental para o efeito estufa do planeta (CHURCH et al., 2013). Além de fatores naturais que controlam o balanço de energia entre a superfície e a atmosfera, também são percebidas as influências antrópicas no aumento das concentrações de GEE na atmosfera. As atividades humanas, especialmente associadas à queima de combustíveis fósseis, são responsáveis pelo aquecimento de 1,1° C do planeta desde o período de 1850-1900. (IPCC, 2021a)

De acordo com o AR6 do IPCC (2021a), as mudanças climáticas estão aumentando o risco de desastres ao redor do mundo, principalmente os associados a extremos de temperatura, precipitação e seca, tornando-os mais frequentes e intensos. Outros fatores de impacto climático consequentes de alterações no clima são a elevação do nível do mar, aumento de eventos de inundação e erosão, aquecimento e acidificação do oceano, dentre outros. Portanto, as mudanças climáticas são cada vez mais reconhecidas como um condutor de múltiplos riscos, que podem interagir entre si, gerando novas fontes de sistemas vulneráveis aos perigos climáticos e impactos potencialmente catastróficos e em cascata para os sistemas econômicos, ecológicos e sociais. Inclusive, intensificando a vulnerabilidade daqueles sistemas que já se encontram em situações críticas.

2.1 Modelos climáticos e projeções

As condições climáticas da Terra estão se alterando. Portanto, é necessário que estudos

e metodologias aplicados aos riscos relacionados às mudanças climáticas estejam em constante adaptação. Nesse sentido, o uso da modelagem climática é essencial para aprofundar o conhecimento sobre o sistema climático e realizar simulações para o futuro.

Modelos climáticos são representações numéricas do sistema climático real, que consideram as propriedades físicas, químicas e biológicas, bem como a interação entre os seus componentes (atmosfera, oceano, gelo, superfície terrestre) (IPCC, 2021b). Seus produtos são um dos principais elementos dos estudos de análise de vulnerabilidade e risco climáticos, que podem subsidiar medidas e estratégias de adaptação e mitigação às mudanças climáticas, de curto a longo prazo. (FLATO et al., 2013)

O *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), uma iniciativa global do *World Climate Research Programme* (WCRP), reúne cientistas climáticos de todo o mundo para compartilhar, comparar e analisar resultados de Modelos Climáticos Globais (MCG), com o propósito de fornecer um conjunto comum de simulações climáticas (WCRP, 2022). Esse projeto é dividido em fases e disponibiliza publicamente esses dados, contribuindo amplamente para diversos estudos científicos sobre o clima, especialmente na elaboração dos relatórios de avaliação das mudanças climáticas ocorridas no planeta, pelo IPCC.

As simulações do clima, resultados da modelagem climática, são denominadas também de projeções climáticas e são baseadas em cenários de emissões ou concentrações de GEE e aerossóis na atmosfera. Esses cenários de emissões refletem um conjunto de suposições cientificamente consistentes sobre aspectos físicos, demográficos e de desenvolvimento socioeconômico e tecnológico, que permitem avaliar as possíveis mudanças no sistema climático no futuro e seus impactos, e são aperfeiçoados à medida que são aplicados e amplamente discutidos pela comunidade científica. (O'NEILL et al., 2016; IPCC, 2021b)

O Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC incorporou os chamados *Representatives Concentration Pathways* (RCPs), desenvolvidos pelo CMIP5 (CMIP Phase 5). Esses cenários refletem as alterações no balanço de radiação do sistema terrestre, ocasionadas por diferentes condições de emissões de GEE, e que levam a determinada forçante radiativa (W/m^2) até 2100 (Quadro 1). Os principais cenários são: RCP 2.6 (baixas emissões), RCPs 4.5 e 6.0 (estabilização de médias emissões) e o RCP 8.5 (altas emissões). (VAN VUUREN et al., 2011; IPCC, 2013)

A partir do AR6, os RCPs foram atualizados pelo CMIP6 (CMIP Phase 6), e os cenários de emissões passaram a considerar diferentes condições socioeconômicas, sendo denominados de *Shared Socio-Economic Pathways* (SSPs). Novos cenários foram introduzidos

e classificados de acordo com diferentes políticas climáticas, resultando em 5 caminhos: 1) de sustentabilidade; 2) intermediário; 3) de rivalidade regional; 4) de desigualdade; 5) e de desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis (O'NEILL et al., 2016). Os cenários correspondentes aos RCPs citados acima são chamados SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 e SSP5-8.5, e cada qual resulta em um nível de forçante radiativa semelhante ao de seu cenário antecessor.

Quadro 1 – Cenários de emissões RCPs e SSPs

Cenário (RCP/SSP)	Descrição
1-2.6	Caminho de sustentabilidade, com baixas emissões, cujo aquecimento do planeta provavelmente não excederá 2°C. A forçante radiativa primeiro atinge seu pico a um valor de cerca de 3,1 W/m ² , e diminui até ser limitada a 2,6 W/m ² em 2100
2-4.5	Caminho de estabilização, de emissões intermediárias, com medidas de mitigação relativamente ambiciosas, cuja forçante radiativa é limitada a cerca de 4,5 W/m ² , em 2100
4-6.0	Caminho de estabilização, de emissões altas a intermediárias, em um cenário de desigualdade no desenvolvimento socioeconômico, com forçante radiativa limitada a cerca de 6,0 W/m ² , em 2100
5-8.5	Caminho pessimista, com desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis e elevadas emissões de GEE, com o aquecimento do planeta provavelmente ultrapassando 4°C e forçante radiativa excedendo 8,5 W/m ² em 2100

Fontes: O'Neill et al. (2016); IPCC (2021b).

Embora os SSPs sejam bastante utilizados, ainda é muito comum encontrar estudos com os RCPs como cenários de referências para as projeções. Isso ocorre porque a disponibilidade de dados atualizados varia conforme o recorte espacial e a finalidade do estudo. Ao comparar diferentes cenários, estudos de mais variadas áreas do conhecimento geralmente utilizam os RCP4.5 e RCP8.5 por corresponderem a cenários realista e pessimista de emissões, respectivamente (ex. CHOU et al., 2014a; ZANETTI et al., 2016; SANTOS et al., 2021).

As projeções são normalmente derivadas de MCG, que em geral possuem baixa

resolução espacial (de 100 a 300 km). Portanto, podem ser insuficientes para identificar detalhes importantes para a avaliação de impactos relacionados às mudanças climáticas em escalas menores como, por exemplo, em áreas urbanas, agrícolas e em escalas de bacias hidrográficas. Uma alternativa é o uso da técnica de *downscaling*, que consiste na construção de Modelos Climáticos Regionais (MCR) que incorporam informações regionais como topografia, vegetação, solo, entre outros, aos MCG. (CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b)

Um exemplo de modelo regionalizado aplicado à América do Sul é o modelo Eta, que possui uma resolução horizontal de 20 km, cuja versão mais recente está acoplada a quatro modelos climáticos globais do CMIP5 (CHOU et al., 2014a). Embora as projeções associadas a diferentes MCG apresentem magnitudes diferentes quanto às anomalias de temperatura e precipitação, no geral, resultam em tendências regionais semelhantes. Projeções climáticas obtidas com o uso do modelo Eta, acoplado ao modelo HadCM3, do CMIP3 por Marengo et al. (2012), apontam para significativas mudanças na Bacia Amazônica até a década de 2050 (2041-2070), em comparação com o período de 1961-1990. Espera-se um aumento médio de temperatura de 3,5°C e uma redução na precipitação em torno de 15%. No estudo de Chou et al. (2014b), que utilizou o modelo Eta acoplado aos modelos globais HadGEM e MIROC5 do CMIP5 para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5, as projeções indicam que, até 2040, a temperatura durante o verão no Brasil pode aumentar entre 1,5°C e 2,0°C, conforme o modelo Eta-MIROC5, enquanto o modelo Eta-HadGEM prevê um aumento de até 4°C no mesmo período. Quanto às anomalias de precipitação, os resultados apontam para variações negativas de até 700 mm para a Amazônia e o Sudeste do país até o final do século.

Projeções também são realizadas para avaliar mudanças no nível do mar, com base nos modelos climáticos do CMIP e cenários de emissões (RCPs/SSPs). Diferentes métodos são aplicados para projetar o NMGM e NRM, de acordo com seus contribuidores (descritos na Seção 2.2). Isso permite avaliar separadamente a influência de cada um dos contribuidores, bem como o nível total do mar (em metros) e a taxa total de mudança (em mm/ano) até 2150. (FOX-KEMPER et al., 2021)

2.2 Elevação do nível do mar

O nível do mar, de modo geral, é definido como a altura da superfície do mar em um determinado local, medida a partir de uma referência geodésica, como a superfície sólida da Terra (nível relativo do mar) ou como o elipsoide de referência (nível geocêntrico do mar)

(CHURCH et al., 2013). Variações no nível do mar podem ser impulsionadas por diversos processos, ocorrendo global ou localmente. Isso inclui variabilidade na forma das bacias oceânicas, mudanças no volume do oceano devido a alterações na massa d'água do oceano e mudanças no volume do oceano resultantes de alterações na densidade da água do mar. Os processos que contribuem para as mudanças no nível do mar podem ser categorizados como eustáticos ou relativos. (ROVERE et al., 2016)

As mudanças eustáticas do nível do mar são alterações no volume e na massa do oceano em escala global, portanto, independem de fatores locais, resultando em variações globalmente uniformes (ROVERE et al., 2016). Essas mudanças podem ser causadas por derretimento ou acúmulo de camadas de gelo continentais (glacio-eustasia), redistribuição de água entre diferentes reservatórios hidrológicos (hidro-eustasia) e variações na densidade da água devido à temperatura e à salinidade (termo e halo-estéricas, respectivamente), principalmente pela influência de forçantes climáticas. Entretanto, podem ocorrer também alterações ocasionadas por forçantes geológicas, como mudanças no volume da bacia oceânica devido às forças tectônicas (tectono-eustasia) e à sedimentação (eustasia sedimentar). Esses processos podem ocorrer em diferentes escalas de tempo, com duração de décadas a milhões de anos, e são responsáveis por determinar um nível médio para todo o oceano, denominado de nível médio global do mar. (ROVERE et al., 2016; FOX- KEMPER et al., 2021)

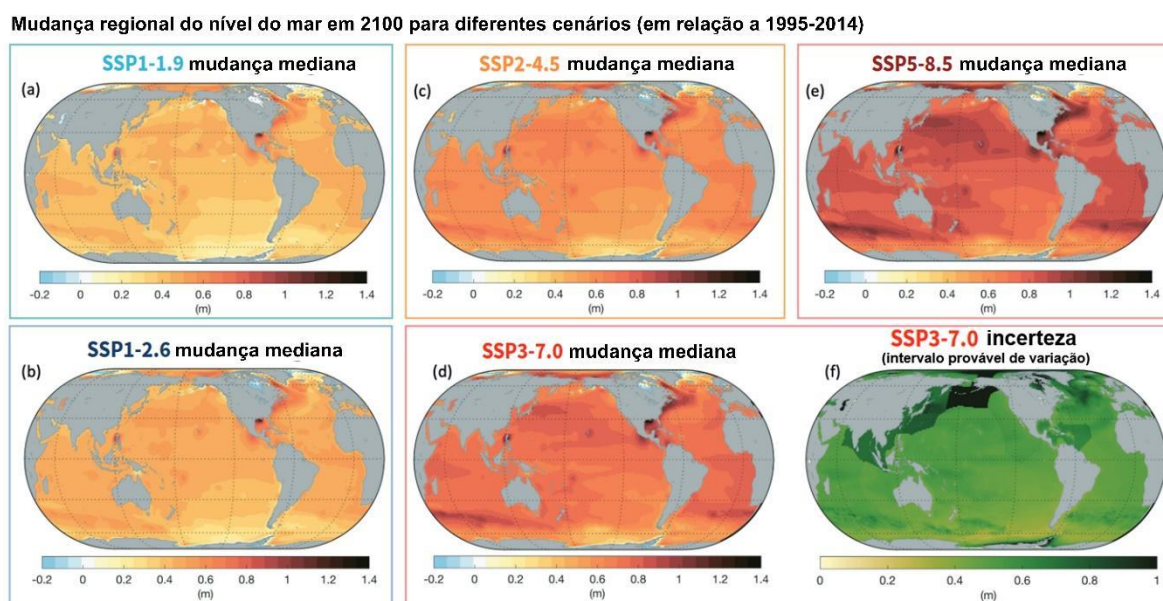
Além disso, é praticamente certo que o NMGM aumente ao longo do século XXI e há alta confiança científica de que continue a aumentar após 2100, pois os efeitos das mudanças climáticas permanecerão sobre os contribuidores do NMGM, mesmo que as concentrações de GEE na atmosfera se estabilizem ainda neste século. O AR6 do IPCC prevê um aumento do nível do mar de 0,77 [0,63 a 1,01] m até o final deste século, relativo a 1995-2014 e para o cenário de emissões de GEE muito altas. Há um elevado consenso científico entre as projeções do NMGM para o ano de 2050 e menor sensibilidade aos cenários de emissões, comparadas às projeções de 2100, em especial para o cenário mais pessimista. (FOX- KEMPER et al., 2021)

Por outro lado, processos eustáticos interagem com outros processos regionais e locais, desencadeando mudanças relativas no nível do mar, experimentadas em um determinado local. Esses processos em menores escalas estão associados à dinâmica da circulação oceânica, ao ajuste isostático da crosta terrestre às mudanças nas massas de gelo polares e no armazenamento de água continental, além de processos tectônicos e subsidências induzidas por ações humanas, como a extração de recursos naturais (ROVERE et al., 2016; OPPENHEIMER et al., 2019). A mudança no nível relativo do mar é a variação na altura média local da superfície do mar em

relação ao fundo do mar, baseada em um referencial terrestre (CHURCH, et al., 2013; ROVERE et al., 2016). Considerar as alterações relativas do nível do mar é relevante para avaliar os impactos costeiros, pois podem intensificar as taxas de aumento do nível do mar eustático. Isso é evidente quando combinado com eventos extremos do mar causados por agentes costeiros, como ondas de tempestade e marés astronômicas, impactando especialmente ambientes de baixa elevação, como os deltas e suas cidades próximas. (OPPENHEIMER et al., 2019)

As projeções regionais do AR6 do IPCC indicam que 60 a 70% da costa global (para os cenários SSP1-1.9 e SSP5-8.5, respectivamente) terá um aumento dentro de $\pm 20\%$ da mudança projetada para o NMGM ao longo do século XXI. Os principais contribuidores para essas mudanças continuarão sendo a perda de massa de gelo terrestre, as dinâmicas do oceano e o movimento vertical da terra. Mudanças positivas significativas são observadas na costa americana do Atlântico Norte, no Oceano Ártico e parte do Sudeste Asiático banhado pelo Oceano Pacífico, para os diferentes cenários (Figura 1). Na América do Sul, em geral, a costa atlântica apresenta mudanças mais elevadas, comparada à costa do Pacífico. Observa-se um aumento de cerca de 0,2 a 0,4 m no nível do mar para o cenário SSP1-1.9 e de 0,4 a 0,85 m para o cenário SSP5-8.5, podendo ultrapassar 1 m na porção noroeste para o cenário de altas emissões. (FOX- KEMPER et al., 2021)

Figura 1 – Mudança regional do nível do mar até 2100 para diferentes cenários (em relação a 1995-2014)

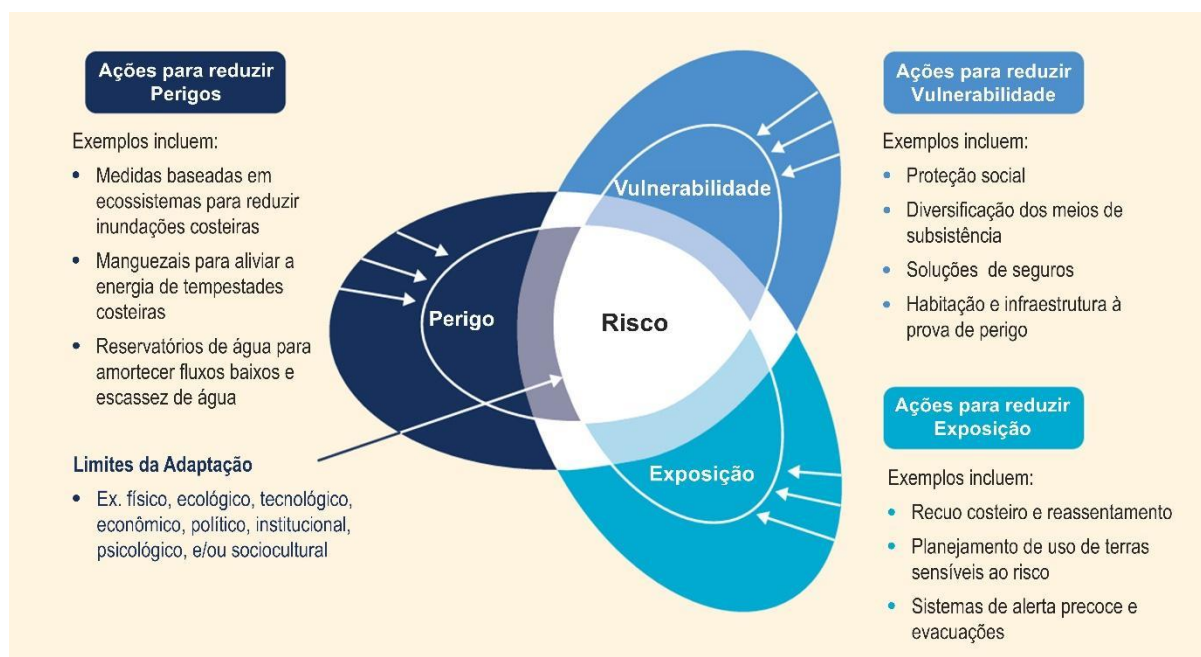


Fonte: Adaptado de Fox-Kemper et al. (2021).

2.3 Vulnerabilidade costeira às mudanças climáticas

No âmbito da avaliação de riscos associados às mudanças climáticas, a vulnerabilidade é considerada uma componente de risco (Figura 2), e é definida como a propensão ou predisposição da sociedade humana, dos ecossistemas e do sistema climático a serem afetados adversamente pelos impactos das mudanças do clima (IPCC, 2021b). No entanto, o conceito de vulnerabilidade é bastante utilizado em diversas áreas do conhecimento, podendo apresentar definições distintas.

Figura 2 – Quadro conceitual sobre risco segundo o IPCC – AR5, com medidas de adaptação para redução de risco



Fonte: Adaptado de IPCC (2019).

Nesse contexto, pode-se atribuir a avaliação de vulnerabilidade voltada para as zonas costeiras, consideradas áreas dinâmicas e complexas, situadas na interface entre os compartimentos continentais, marinhos e atmosféricos, portanto, sujeitas à influência de alterações que possam ocorrer nesses compartimentos (BIRD, 2008; BALICA; WRIGHT; VAN DER MEULEN, 2012). Essas regiões abrigam ecossistemas biodiversos e frágeis (como manguezais e recifes de corais), e fornecem recursos que fomentam a economia, através do turismo, extrativismo e atividade portuária, por exemplo, possibilitam melhorias na qualidade

de vida humana, entre outras importâncias (STROHAECKER, 2008).

Devido a atividades antrópicas como essas, bem como aos contextos sociopolíticos em que estão inseridas, as zonas costeiras sofrem pressões adicionais, além das causadas por agentes e processos costeiros naturais (OPPENHEIMER et al., 2019). Portanto, a vulnerabilidade costeira pode ser entendida como as condições dos sistemas a serem afetados adversamente por fatores que levam aos perigos costeiros devido às mudanças climáticas, como a elevação do nível médio do mar, o aumento da ocorrência e intensidade de extremos climáticos, as alterações no clima de ventos e ondas, dentre outros (GORNITZ, 1991; BALICA; WRIGHT; VAN DER MEULEN, 2012).

A análise de vulnerabilidade às mudanças climáticas, seja específica ou não para as zonas costeiras, abrange uma variedade de conceitos. Sendo assim, alguns conceitos e suas respectivas definições, considerados consonantes com o escopo da pesquisa e que foram importantes para conduzi-la, são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Definições de conceitos relacionados a riscos climáticos

(continua)

CONCEITO	DEFINIÇÃO
PERIGO	É a possível ocorrência de um evento físico natural ou induzido pelo homem que pode causar perda de vidas, ferimentos ou outros problemas de saúde, bem como danos e/ou perda de propriedade, infraestrutura, meios de subsistência, prestação de serviços, ecossistemas e recursos ambientais
EXPOSIÇÃO	Compreende a presença de pessoas, meios de subsistência, ecossistemas, bens econômicos, dentre outros, em ambientes que possam ser afetados adversamente
VULNERABILIDADE	É a propensão ou predisposição do ambiente, das pessoas ou das propriedades a um determinado perigo, englobando diversos elementos e conceitos, como a sensibilidade ou suscetibilidade a danos e a falta de capacidade de adaptação
SENSIBILIDADE	Grau em que os sistemas humanos, ecossistêmicos e econômicos são modificados ou alterados pelas mudanças climáticas

Quadro 2 – Definições de conceitos relacionados a riscos climáticos

(conclusão)

CONCEITO	DEFINIÇÃO
CAPACIDADE ADAPTATIVA	Corresponde à habilidade dos sistemas em se ajustar às mudanças do clima
RISCO	É o produto da probabilidade de ocorrência de um evento potencial (indesejado), pela consequência (indesejada) associada a esse evento, resultante, portanto, da interação de perigo, vulnerabilidade e exposição (Figura 2)
DESASTRE	Séria interrupção no funcionamento de uma comunidade ou sociedade, causada pela interação de eventos perigosos com condições de exposição, vulnerabilidade e capacidade, resultando em perdas e impactos humanos, materiais, econômicos e ambientais
IMPACTO	Consequências dos riscos nos sistemas naturais e humanos, que resultam das interações de perigos, exposição e vulnerabilidade relacionados com o clima

Fonte: Adaptado de IPCC (2021b).

Apesar de os conceitos de exposição e perigo integrarem, juntamente com a vulnerabilidade, a definição de risco, ambos são também considerados para determinar indicadores e variáveis, estabelecendo as métricas que compõem os índices de vulnerabilidade, uma das principais ferramentas de análise. Inclusive, em alguns casos em que se utilizam os índices para avaliar a vulnerabilidade às mudanças do clima, considera-se a vulnerabilidade em função de três elementos fundamentais: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa (MENEZES et al., 2018; SANTO et al., 2021). Isso demonstra a forte relação entre os conceitos, que são passíveis de sobreposições, resultando em diversas formas de operacionalização desses índices e podendo levar a conceituações errôneas também (ROCHA et al., 2023).

A análise de vulnerabilidade é defendida na literatura como um importante método analítico de suporte ao planejamento e gestão costeira para minimizar os efeitos das alterações climáticas, bem como auxiliar na identificação de locais prioritários de ações (NICOLODI; PETTERMANN, 2011; PBMC, 2016; LIMA et al., 2023). As zonas costeiras estão sujeitas a ocorrência de múltiplos perigos, podendo ocorrer simultaneamente ou até mesmo um em

detrimento do outro (P BMC, 2016; OPPENHEIMER, 2019). O aumento do nível do mar pode ocasionar a exposição a certos perigos para a costa, como o aumento da ocorrência de erosão costeira, a ocorrência de inundações costeiras mais frequentes e intensas, a intrusão salina nos solos e nas fontes de água doce e perdas e alterações de ecossistemas costeiros (NICHOLLS; CAZENAVE, 2010; P BMC, 2016; OPPENHEIMER et al., 2019). Esses perigos, juntamente com outros condicionantes climáticos e não-climáticos antropogênicos podem acarretar impactos costeiros diretos, como a perda de terras e usos da terra e de serviços ecossistêmicos costeiros e marinhos, e danos à população, ao ambiente construído e às atividades humanas (OPPENHEIMER et al., 2019). Avaliar a vulnerabilidade a partir da perspectiva multiperigo nas zonas costeiras tem se tornado cada vez mais comum para compreender as inter-relações entre os perigos costeiros e a possibilidade de um desencadear ou aumentar a probabilidade de ocorrência de outros (OPPENHEIMER et al., 2019). Entretanto, a vulnerabilidade e a exposição de determinado sistema aos perigos são dependentes de fatores econômicos, institucionais e de governança, por isso, é necessário que aspectos ambientais e sociais sejam considerados conjuntamente, proporcionando uma visão holística do problema (BALICA; WRIGHT; VAN DER MEULEN, 2012; ZANETTI et al., 2016).

2.4 Índices de vulnerabilidade para áreas costeiras

Os índices de vulnerabilidade são um dos principais métodos para auxiliar na análise de risco na zona costeira (BALICA; WRIGHT; VAN DER MEULEN, 2012; ROCHA et al., 2023). Diversos índices têm sido desenvolvidos nas últimas décadas e são comumente utilizados, pois sistematizam a coleta de informações e facilitam a visualização de fenômenos complexos (MENEZES et al., 2018; LIMA et al., 2023). Isso permite caracterizar rapidamente a vulnerabilidade de um sistema por meio de avaliações quantitativas e/ou qualitativas, combinando múltiplos parâmetros. Revisões da literatura mostram que o número de parâmetros varia significativamente entre os índices, dependendo da finalidade do estudo, do recorte geoespacial e da disponibilidade de dados (TANIM et al., 2022; ROCHA et al., 2023).

Os primeiros índices focados nas zonas costeiras avaliavam principalmente os aspectos físicos dos sistemas costeiros para determinar sua exposição aos perigos (ex. GORNITZ, 2001). No entanto, fatores sociais tornam certos grupos mais vulneráveis aos perigos costeiros, evidenciando a necessidade de avaliar essa vulnerabilidade considerando o contexto das comunidades afetadas (OPPENHEIMER et al., 2019), o que levou à aplicação de índices de

vulnerabilidade social (ex. CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003).

Embora esses índices tenham sido um ponto de partida importante para avaliações locais de vulnerabilidade e adaptação em outros contextos e escalas espaciais, a abordagem unidimensional é criticada por não considerar uma visão sistêmica dos perigos (ZANETTI et al., 2016). Considerando que a vulnerabilidade é socialmente construída, influenciada por fatores econômicos, sociais e ambientais, destaca-se a importância de uma análise que combine esses fatores, adotando uma abordagem socioambiental para obter múltiplas perspectivas sobre um problema (ZANETTI et al., 2016; SANTOS et al., 2021). Em seu trabalho, Zanetti et al. (2016) levantaram as diferentes abordagens presentes na literatura para medir a vulnerabilidade em áreas costeiras, e podem ser consultados no Quadro 3.

Devido à natureza multidimensional da vulnerabilidade, os índices compostos, que agregam diversos indicadores (ou fatores) em um único valor, têm se mostrado ferramentas eficazes para analisar fenômenos que não podem ser explicados por uma única variável. Os indicadores, sejam qualitativos ou quantitativos, condensam informações sobre diferentes fenômenos e ambientes, facilitando comparações e acompanhando mudanças ao longo do tempo, o que os tornam importantes instrumentos para tomada de decisões (OECD, 2008; LIMA et al., 2023). Entretanto, é importante destacar que ao agregar esses indicadores na tentativa de expressar a vulnerabilidade de determinado sistema complexo, os índices estão sujeitos a suposições (LIMA et al., 2023). Por isso, é necessário rigor científico desde a etapa de construção do modelo conceitual, a partir de um conjunto de informações mensuráveis, cujos dados tenham a melhor qualidade e a maior resolução espacial possível, de acordo com o recorte do estudo, até a etapa de interpretação dos resultados (LIMA et al., 2023; ROCHA et al., 2023).

No Brasil, os estudos em abrangência nacional sobre vulnerabilidade costeira no contexto das mudanças climáticas tiveram como marco o trabalho de Nicolodi e Pettermann (2011) que mapearam a vulnerabilidade da zona costeira brasileira com base em seus aspectos ambientais, sociais e tecnológicos, resultando em um único índice. Almeida et al. (2016) propuseram indicadores de desastres para o país, considerando os principais perigos naturais, incluindo a elevação do nível do mar, juntamente com indicadores de vulnerabilidade social. Lima et al. (2023) realizaram uma análise multiescalar da vulnerabilidade social associada a eventos extremos costeiros (inundações e erosões costeiras). Os três estudos consideraram como recorte espacial as unidades administrativas municipais para aplicar seus índices, e ainda agregando a nível estadual e por setor censitário no trabalho de Lima et al. (2023), atribuindo maior nível de detalhe para a análise.

Quadro 3 - Exemplos de diferentes abordagens para medir a vulnerabilidade

(continua)

CONCEITO	ÍNDICE	VARIÁVEIS/PARÂMETROS/FATORES	REFERÊNCIA
GEOFÍSICO	IVC	Relevo, geomorfologia, tipo de rocha, movimento vertical do nível do mar, deslocamento da linha de costa, amplitude da maré, altura das ondas	Gornitz (2001)
	IS	Relevo, tipo de rocha, geomorfologia, tendência do nível do mar, taxa de deslocamento da linha de costa, amplitude média da maré, altura média anual máxima das ondas significativas	Shaw et al. (1998)
	IVC	Geomorfologia, declive costeiro, taxa relativa de elevação do nível do mar, taxa de erosão/acréscimo da linha de costa, amplitude média da maré, altura média das ondas	Thieler; Hammar-Klose (1999)
	ISC	IVC (Thieler e Hammar-Klose, 1999)	Karymbalis et al. (2012)
SOCIAL	IVSo	Riqueza pessoal, idade, densidade do ambiente construído, dependência econômica de um único setor, estoque de habitação e locação, raça—afro-americano, raça—nativo americano, raça—asiático, ocupação, dependência de infraestrutura	Cutter; Boruff; Shirley (2003)
	CsoVI	Pobreza, idade, densidade de desenvolvimento, asiáticos e imigrantes, dicotomia rural/urbana, raça e gênero, declínio populacional, etnia (indígena) e agricultura, dependência de emprego em infraestrutura, renda	Thieler; Hammar-Klose (1999)

Quadro 3 - Exemplos de diferentes abordagens para medir a vulnerabilidade

(conclusão)

CONCEITO	ÍNDICE	VARIÁVEIS/PARÂMETROS/FATORES	REFERÊNCIA
SOCIOAMBIENTAL	PVI	CVI (Thieler e Hammar-Klose, 1999) + CsoVI	Boruff; Cutter (2015)
	N.D	Zonas de risco de inundação, população, unidades habitacionais, mulheres, população étnica, jovens (menores de 18 anos), idosos (acima de 60 anos), famílias chefiadas por mães solteiras, unidades habitacionais ocupadas por locatários	Wu et al. (2002)
	N.D	Risco de inundação, população e estrutura, acesso diferenciado aos recursos, população com necessidades especiais de evacuação	Chakraborty et al. (2005)
	N.D	Índice socioeconômico, índice de uso do solo, índice ecoambiental, índice de construção costeira, índice de capacidade de suporte a desastres	Li; Li (2011)
	N.D	Elevação do nível do mar, ressaca, número de ciclones nos últimos 5 anos, vazão dos rios, declividade da anteparaia, subsidência do solo, quilômetros de litoral, população próxima à linha costeira, percentual de pessoas com deficiência, abrigos, patrimônio cultural, conscientização e preparação, quilômetros de sistemas de drenagem, crescimento da população costeira, tempo de recuperação, zonas de planejamento não regulamentadas, mapas de risco de inundação, organizações institucionais, proteção contra inundações	Balica; Wright; Van Der Meulen (2012)

Legenda: N.D - nome do índice não definido.
Fonte: Adaptado de Zanetti et al. (2016).

A crescente necessidade de entender a vulnerabilidade costeira às mudanças climáticas e seus impactos associados têm levado à busca por alternativas que integrem esses fatores na avaliação da vulnerabilidade atual de um sistema, bem como na realização de cenários futuros. Uma dessas alternativas é a incorporação da componente climática nos índices de vulnerabilidade, utilizando dados de variáveis climáticas sob cenários de emissões de GEE, definidos pelo IPCC, como aplicada nos estudos de Zanetti et al. (2016) e Santos et al. (2021). Zanetti et al. (2016) propuseram um índice socioambiental multiperigo para zonas costeiras, cujas variáveis climáticas foram incorporadas a determinados fatores (associados aos perigos costeiros) componentes dos aspectos físicos do índice. Santos et al. (2021) aplicaram o Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV), um índice geral de vulnerabilidade constituído por subíndices de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, somado a uma componente climática independente, para analisar a vulnerabilidade socioambiental às mudanças climáticas de municípios costeiros do Pará, com enfoque para a área da saúde associada a desastres naturais. Diante dessas iniciativas, é essencial avançar na integração da componente climática aos índices de vulnerabilidade, permitindo uma análise mais precisa e abrangente dos riscos costeiros frente às mudanças climáticas.

3 PROPOSTA DE PESQUISA

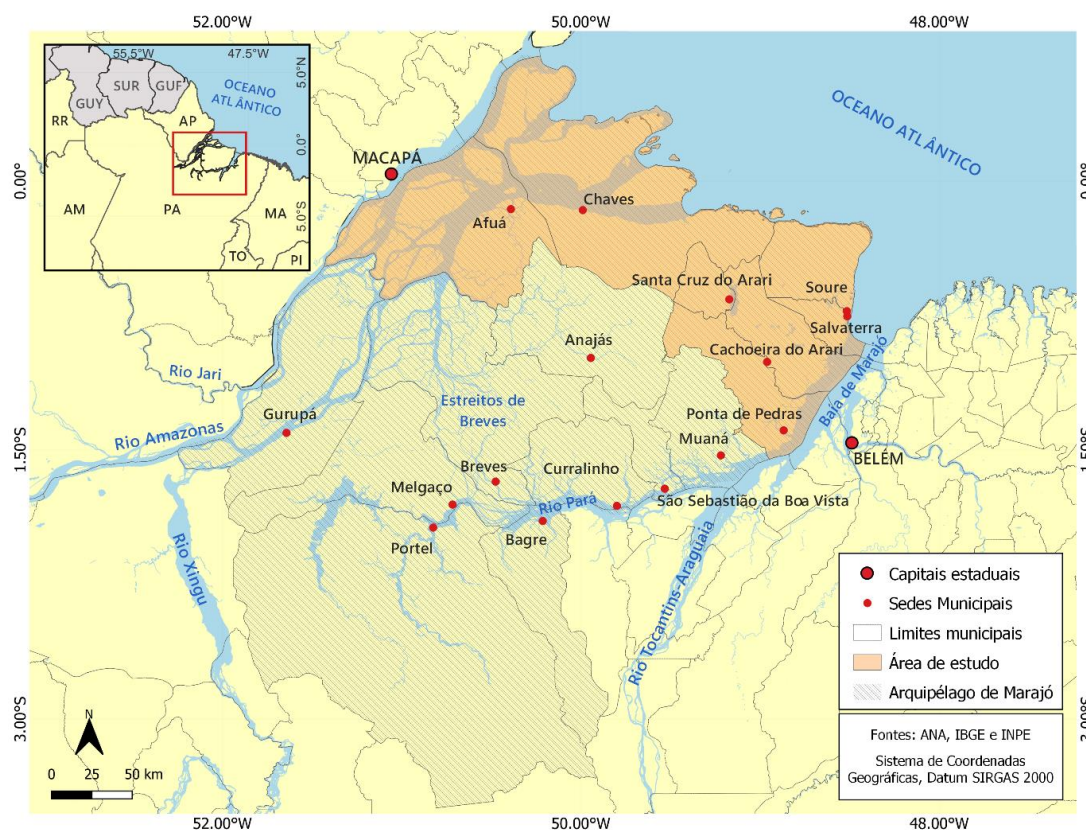
O presente trabalho tem como objetivo geral compreender a vulnerabilidade socioambiental dos municípios do arquipélago do Marajó diante das mudanças climáticas, considerando características ambientais atuais e cenários climáticos futuros. Para alcançar esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar as mudanças históricas e projetadas de variáveis climáticas sob cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5 para 2050 na área de estudo;
- Construir um índice de vulnerabilidade costeira para verificar a vulnerabilidade atual dos municípios, com base nos elementos fundamentais exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa;
- Construir um índice climático considerando as mudanças projetadas de precipitação, temperatura e elevação do nível do mar para diferentes cenários de emissões;
- Identificar o grau de vulnerabilidade socioambiental atual e futura dos municípios, a partir da aplicação do índice de vulnerabilidade costeira, acoplado à componente climática e seus cenários.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O arquipélago do Marajó, o maior arquipélago fluviomarinho do mundo, está situado na costa amazônica brasileira. Do ponto de vista político-administrativo, sua área abrange 16 municípios do estado do Pará, totalizando cerca de 102 mil km² (Figura 3). A maior parte do território é composta por diversas ilhas, onde se encontram a maioria das sedes municipais, enquanto uma porção menor é continental.

Figura 3 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora.

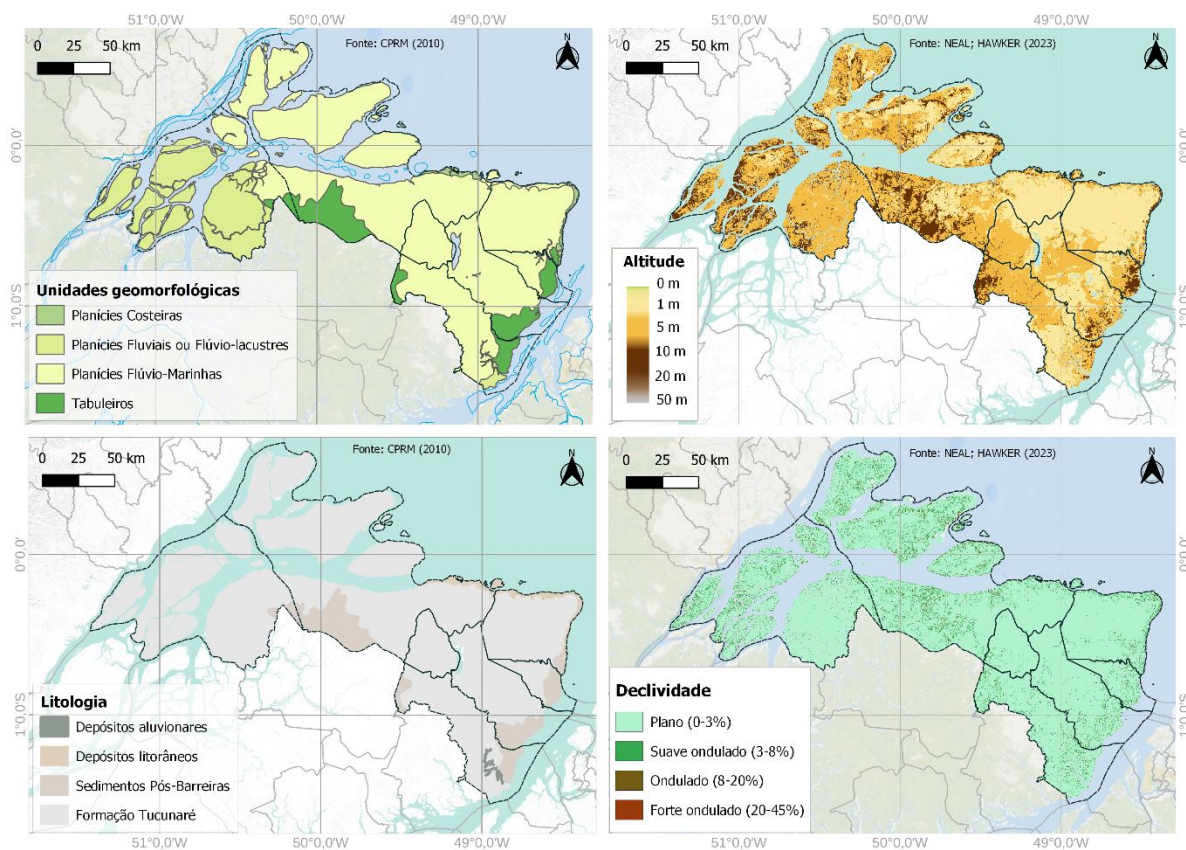
A porção insular do arquipélago é limitada ao norte pelo Oceano Atlântico, a oeste pelo rio Amazonas, ao sul pelo rio Pará e a leste pela baía do Marajó, onde o rio Tocantins-Araguaia deságua. A ilha do Marajó é a maior ilha do arquipélago com cerca de 49 mil km² de área e onde se concentram 12 sedes municipais (GONÇALVES et al., 2016). De acordo com o levantamento das estratificações geoambientais da ilha do Marajó realizado por Henriques et al. (2022), cerca de 59% da área está situada em terras baixas, sujeita majoritariamente a regime

de macromarés e grandes oscilações sazonais de penetração da água do mar, dependendo da precipitação e da dinâmica fluvial. A descrição feita pelos autores auxiliou na definição dos municípios para o presente estudo, considerando também a influência dos sistemas fluviais e de aspectos geomorfológicos, climáticos e meteoceanográficos, detalhados abaixo. Aspectos ambientais, sociais e institucionais sobre os municípios também foram descritos.

4.1 Geomorfologia e geologia

A área de estudo é caracterizada por uma variedade de ambientes deposicionais, resultante da diversidade de depósitos sedimentares quaternários provenientes de rios, lagos e do oceano. De acordo com o levantamento do CPRM (2010), a área de estudo pertence ao domínio geomorfológico ilha do Marajó e golfão marajoara, e possui quatro feições geomorfológicas: i) planícies fluviais ou fluviolacustres; ii) planícies fluviomarinhas; iii) planícies costeiras; iv) tabuleiros (Figura 4).

Figura 4 – Aspectos geomorfológicos e geológicos da área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora.

As planícies fluviais ou fluviolacustres cobrem grande parte do território de Afuá e uma pequena porção na margem direita, na bacia do Rio Marajó-Açu, em Ponta de Pedras. A porção oeste, também denominada de Planície Amazônica, por sua baixa altitude, declividade predominantemente plana e sob influência de processos fluviais, é caracterizada pela formação de grandes ilhas e composta pela Formação Tucunaré, unidade litoestratigráfica da Bacia Sedimentar de Marajó. Já na pequena porção sul-sudeste, coberta por terras baixas e inundáveis, além dos arenitos da Formação Tucunaré, possui planícies aluviais com depósitos fluviais recentes. (CPRM, 2010)

A planície fluviomarinha é a unidade geomorfológica predominante da área de estudo, também denominada de Planície Litorânea do Marajó, também representada pela Formação Tucunaré (CPRM, 2010). Ao longo da linha de costa leste de Soure e na parte mais a leste da linha de costa de Chaves, encontram-se as planícies costeiras, compostas por depósitos litorâneos típicos de ambientes de transição, com declividade entre 0° e 5° e altitudes de 0 a 5 m, representadas por estreitos cordões arenosos e linhas de praias (CPRM, 2010; DANTAS; TEIXEIRA, 2013).

Na porção centro-ocidental e margem leste da ilha do Marajó, encontram-se os tabuleiros, que são feições de topos planos a ligeiramente ondulados, com altitudes entre 5 e 20 m e declividade de 0° a 3°. Esses tabuleiros são formados por rochas sedimentares inconsolidadas da unidade litoestratigráfica Pós-Barreiras (Holoceno-Plioceno), compostas por areias argilosas finas a médias (CPRM, 2010).

4.2 O clima e aspectos meteorológicos

De acordo com a classificação de Köppen, a área está situada em uma zona de clima tropical predominantemente Am (de monção), com temperatura média anual variando entre 25 e 28°C (ALVARES et al., 2013) e precipitação média entre 2.000 e 4.000 mm (LOPES; SOUZA; FERREIRA, 2013; ALVARES et al., 2013). Entretanto, tem influência do clima Af (sem estação seca) entre a porção sul da ilha do Marajó e a foz do rio Tocantins, com precipitação total anual variando entre 3.000 e 4.000 mm (ALVARES et al., 2013).

Embora a região tenha um clima equatorial uniformemente úmido, cuja umidade relativa varia entre 80 e 90% (TORRES; EL-ROBRINI; COSTA, 2018), há uma variação sazonal na quantidade de chuva, associada aos padrões de circulação atmosférica em larga escala, em especial, à dinâmica migratória da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Os

meses de verão e outono (janeiro a junho) geralmente são mais chuvosos e temperaturas menores, enquanto os meses de inverno e primavera (julho a dezembro) tendem a ser um pouco mais secos e com temperaturas maiores (LOPES; SOUZA; FERREIRA, 2013; SOUZA et al., 2016; SOUZA et al., 2017). Segundo Souza et al. (2017) a precipitação climatológica (média entre 1975 e 2014) da área de estudo é de 300 a 400 mm/mês no regime chuvoso, com médias maiores na porção norte, e de 50 a 150 mm/mês no regime seco, cuja porção também se destaca pelas menores taxas, demonstrando um comportamento espacial de precipitação diferenciado quando comparado às médias anuais.

A oscilação da ZCIT também é responsável por caracterizar o regime de ventos na área de estudo. Quando a ZCIT se desloca para o sul, principalmente no período mais chuvoso (entre março e maio), predominam os Ventos Alísios de Nordeste. E ao se deslocar para norte, durante o período seco, predominam os Ventos Alísios de Sudeste, com característica mais intensa. A velocidade dos ventos ao longo das costas varia entre 2 m/s e 7 m/s, com direção predominante de nordeste ao longo do ano. (ROLLNIC et al., 2020)

O estudo de Almeida et al. (2017) identificou o aumento na temperatura média do ar na área de estudo de aproximadamente 1,16 °C entre 1973 e 2013 (+0,029 °C/ano), com base na média de três estações meteorológicas localizadas na região (Soure - PA, Belém - PA e Macapá - AP). Quanto à precipitação, foram observadas variações espaciais e sazonais, com uma tendência significativa apenas para a estação localizada no município de Soure, com uma taxa de redução da precipitação de 22,62 mm/ano. O período chuvoso (dezembro a março) apresentou uma queda de 23 mm/ano, enquanto o período seco (junho a setembro) teve uma redução de 43,01 mm/ano. Além de Soure, Souza et al. (2017) também identificaram tendência negativa de precipitação no período chuvoso para a estação de Macapá para uma série histórica semelhante (1975 a 2014), com divergências devido à definição dos meses chuvosos e secos.

4.3 Os sistemas hídricos e a infraestrutura de saneamento

4.3.1 Águas superficiais

Os rios Amazonas e Tocantins são os dois importantes sistemas fluviais que deságuam na área de estudo e influenciam fortemente a hidrodinâmica da região, por conta do aporte de água doce e de material sedimentar. Há duas desembocaduras principais para o oceano atlântico tropical, cuja porção oeste está localizada a foz do rio Amazonas, e na porção leste, a baía do

Marajó, onde o rio Tocantins encontra o rio Pará. No entanto, há a contribuição da descarga do rio Amazonas também para a desembocadura da baía do Marajó, pois encontra o rio Pará ao sul da ilha do Marajó por meio de pequenos canais denominados de estreitos de Breves. (BORBA; ROLLNIC, 2016; PRESTES et al., 2020)

De acordo com as estimativas realizadas por Prestes et al. (2020), o rio Amazonas possui uma descarga líquida de aproximadamente $189.648 \text{ m}^3/\text{s}$ e contribuição de $9.249 \text{ m}^3/\text{s}$ (5% da descarga líquida total) ao rio Pará. As águas do Amazonas desembocam no oceano por dois canais principais: o canal do Norte, responsável por cerca de 65% do fluxo de água, e o canal do Sul. A vazão máxima do rio Amazonas na região é de 220 mil m^3/s , observada em maio (período chuvoso), e a mínima em novembro (período seco), de $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (RICHEY et al., 1986). O rio Tocantins contribui com uma descarga líquida de $10.987 \text{ m}^3/\text{s}$, e outros rios tributários com $710 \text{ m}^3/\text{s}$, totalizando em $20.946 \text{ m}^3/\text{s}$ desaguando no oceano através da baía do Marajó (PRESTES et al., 2020).

A descarga líquida e de sedimentos dos rios Amazonas e Pará formam uma pluma de água doce no Oceano Atlântico, sendo o principal fator regulador da variação da salinidade na plataforma continental amazônica em períodos de máxima vazão dos rios. O suprimento de material particulado em suspensão e de material dissolvido provenientes da descarga sólida do rio Amazonas contribuem com cerca de 7 a 9% de carga sedimentar para o oceano (TORRES; EL-ROBRINI; COSTA, 2018). De acordo com Costa et al. (2014), os rios Tocantins, Jacaré e Pará são responsáveis por exportar volumes sedimentares estimados entre 3,6 e 5,4 milhões de toneladas anualmente para a baía do Marajó.

4.3.2 Águas subterrâneas

A área de estudo está localizada sobre o afloramento do Sistema Aquífero Marajó, que integra o Sistema Aquífero Grande Amazônia (SAGA), o maior do mundo, composto pelas bacias sedimentares do Acre, Solimões, Amazonas e Marajó. O SAGA possui mais de 160 mil km^3 de reservas de água subterrânea, distribuídas em unidades litoestratigráficas do Neo-Cretáceo ao Quaternário. Cerca de 45% dessas reservas estão concentradas na bacia do Marajó (ABREU et al., 2013), e suas unidades aquíferas são importantes fontes de abastecimento de água na região, em especial, o abastecimento público.

De acordo com o SIAGAS, o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (SGB), responsável por centralizar e atualizar os dados de poços em todo

o país, há 139 poços cadastrados na área de estudo (SGB, 2024). Desses poços, apenas 29 estão ativos, bombeando água regularmente. Entre os inativos, 92 poços são notáveis por estarem equipados, mas sem operação no momento. O restante se refere a poços não instalados, parados, precários ou sem dado de situação.

Dentre os poços ativos, todos são do tipo tubular (Tabela 1). Quanto ao uso da água, 72% (21 poços) são destinados ao uso humano, seja exclusivamente voltado ao abastecimento doméstico e urbano ou de uso múltiplo (incluindo irrigação e dessedentação animal). O restante corresponde a outros usos exclusivos, como abastecimento industrial (4), irrigação (1) e lazer (1) e poços sem dados (2). De 21 poços voltados ao uso humano, 13 correspondem ao abastecimento público, cuja captação de água em 9 poços é identificada como sendo de responsabilidade da Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA) nos municípios de Soure, Salvaterra, Cachoeira do Arari e Ponta de Pedras.

Tabela 1 – Poços ativos e destinados ao consumo humano presentes na área de estudo e informações complementares

(continua)

Código	Município	NE (m)	Vazão (m³/h)	Condição do aquífero	Uso da água
1500002593	Soure	4	17,5	Confinado	Abastecimento urbano
1500002594	Soure	3	19,8	Confinado	Abastecimento urbano
1500002595	Soure	4	19	Confinado	Abastecimento urbano
1500002596	Salvaterra	3	12	Confinado	Abastecimento urbano
1500002597	Salvaterra	2	12	Confinado	Abastecimento urbano
1500002598	Salvaterra	5	10	Confinado	Abastecimento urbano
1500002599	Cachoeira do Arari	5,9	10	Semi-Livre	Abastecimento urbano
1500002600	Cachoeira do Arari	5	9,5	Semi-Livre	Abastecimento urbano
1500002601	Cachoeira do Arari	5	9,7	Semi-Livre	Abastecimento urbano

Tabela 1 – Poços ativos e destinados ao consumo humano presentes na área de estudo e informações complementares

(conclusão)

Código	Município	NE (m)	Vazão (m³/h)	Condição do aquífero	Uso da água
1500002602	Cachoeira do Arari	5,9	7,5	Semi-Livre	Abastecimento urbano
1500002606	Ponta de pedras	6,2	20	Livre	Abastecimento urbano
1500002607	Ponta de pedras	6,3	16	Semi-Confinado	Abastecimento urbano
1500007738	Salvaterra	25	10	ND	Abastecimento múltiplo
1500007739	Salvaterra	25	10	ND	Abastecimento múltiplo
1500007749	Soure	15	10	ND	Abastecimento doméstico
1500007770	Soure	7	3	ND	Abastecimento múltiplo
1500007771	Soure	7	3	ND	Abastecimento doméstico
1500009524	Cachoeira do Arari	ND	ND	ND	Abastecimento doméstico
1500009828	Salvaterra	5,55	ND	ND	Abastecimento doméstico/animal
1500011509	Cachoeira do Arari	1,6	15	ND	Abastecimento doméstico/animal
1500012261	Cachoeira do Arari	ND	ND	ND	Abastecimento urbano

Fonte: SGB (2024).

4.3.3 Saneamento básico

De acordo com as características domiciliares levantadas pelo Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022), no Brasil, 83,88% dos domicílios são atendidos por uma rede geral de abastecimento de água (Tabela 2). No Pará, esse percentual cai drasticamente para 48%, refletindo as desigualdades regionais. A situação se agrava em alguns municípios da área de estudo. Em Afuá e Chaves, onde não são identificados sistemas de captação de água por poços para o abastecimento humano, conforme os dados do SIAGAS, e ainda, apresentam baixas taxas

de ligação à rede geral de abastecimento, a falta de infraestrutura agrava os riscos à saúde pública pelo consumo de água imprópria. Em contrapartida, Salvaterra apresenta o melhor cenário, com mais de 80% dos domicílios atendidos, semelhante à média nacional.

Tabela 2 – Características domiciliares quanto ao saneamento básico

	Número de domicílios	Abastecimento de água (%)	Rede de esgoto (%)
Afuá	11.041	17,82	2,43
Cachoeira do Arari	7.320	40,99	5,53
Chaves	5.818	20,37	0,99
Ponta de Pedras	9.505	52,77	9,33
Salvaterra	10.152	84,40	5,52
Soure	9.360	78,34	1,26
Pará	3.058.916	48,90	19,99
Brasil	90.704.582	83,88	64,69

Fonte: IBGE (2022).

Resultados universais do Censo Demográfico 2022 de características dos domicílios referentes à forma de abastecimento de água e ao tipo de esgotamento sanitário em níveis nacional, regional e estadual foram divulgados recentemente (IBGE, 2024). Embora estejam associados às proporções de pessoas residentes em domicílios particulares, diferentemente dos dados apresentados na Tabela 2, trazem um panorama estadual importante para o estudo. Para suprir a falta de abastecimento de água através de uma rede geral de distribuição, 30,9% dos moradores em domicílios particulares dependem da captação de água por poços profundos ou artesianos, enquanto a média nacional é de 9% (IBGE, 2024).

As disparidades no acesso à rede de esgotamento sanitário são particularmente acentuadas. Em âmbito nacional, 64,7% dos domicílios estão conectados a uma rede de esgoto. A níveis estadual e municipal os percentuais decrescem significativamente. Apenas 19,9% dos domicílios paraenses têm acesso a esse serviço, sendo que cerca de 46% dos moradores em

domicílios particulares permanentes depositam os efluentes domésticos em fossas rudimentares ou buracos, em comparação com 19,4%, a nível nacional. Esse cenário é ainda mais crítico na área de estudo, com condições semelhantes entre os municípios, onde os domicílios contemplados pelo acesso à rede de tratamento de esgoto não ultrapassam 10%. A ausência de acesso a esse serviço em grande parte dos domicílios leva à destinação incorreta dos efluentes, resultando em sérios problemas ambientais, como a contaminação dos recursos hídricos, e coloca em risco a saúde da população que depende deles.

4.4 Aspectos oceanográficos

A área de estudo é extremamente influenciada pelas marés. Na foz do rio Amazonas exhibe valores de macromarés (4m), com trechos mais internos submetidos a mesomarés (3,5 m) (TORRES; EL-ROBRINI; COSTA, 2018). Na porção leste da área, a baía do Marajó sofre influência da mesomaré, com amplitude de até 3,65 m durante as marés de sizígia, no período chuvoso, em janeiro. As menores amplitudes de marés são registradas em abril (0,5 m), durante a maré de quadratura (EL-ROBRINI et al., 2018). Já a porção norte-nordeste da ilha do Marajó, região de maior exposição da costa, é influenciada pela macromaré (ROSÁRIO et al., 2016).

Em ambos os sistemas estuarinos, as correntes de maré são forçadas pelo fluxo de descarga dos rios, e sua intensidade varia sazonalmente. Prestes (2016) identificou na baía do Marajó que as velocidades da corrente de maré durante a descarga máxima do rio Pará alcançaram 1,7 m/s (enchente) e 1,1 m/s (vazante), enquanto durante a descarga mínima, as velocidades foram de 1,5 m/s (enchente) e 1,33 m/s (vazante). Já na foz do rio Amazonas, no canal norte, há registros de correntes de maré alcançando velocidades de 1,55 m/s durante a maré de sizígia e 0,8 m/s na maré de quadratura (TORRES; EL-ROBRINI; COSTA, 2018).

Os efeitos da maré em ambos os estuários se estendem por centenas de quilômetros rio acima a partir da foz. No estuário do rio Amazonas, a influência da maré é perceptível até 800 km de distância, no município de Óbidos (FASSONI-ANDRADE et al., 2021). No estuário do rio Pará, Rosário et al. (2016) observaram a influência da maré através da variabilidade espaço-temporal da salinidade, com a intrusão salina alcançando 70 km da foz durante o período chuvoso e maré de sizígia, e chegando a 130 km no período seco, sob as mesmas condições de maré.

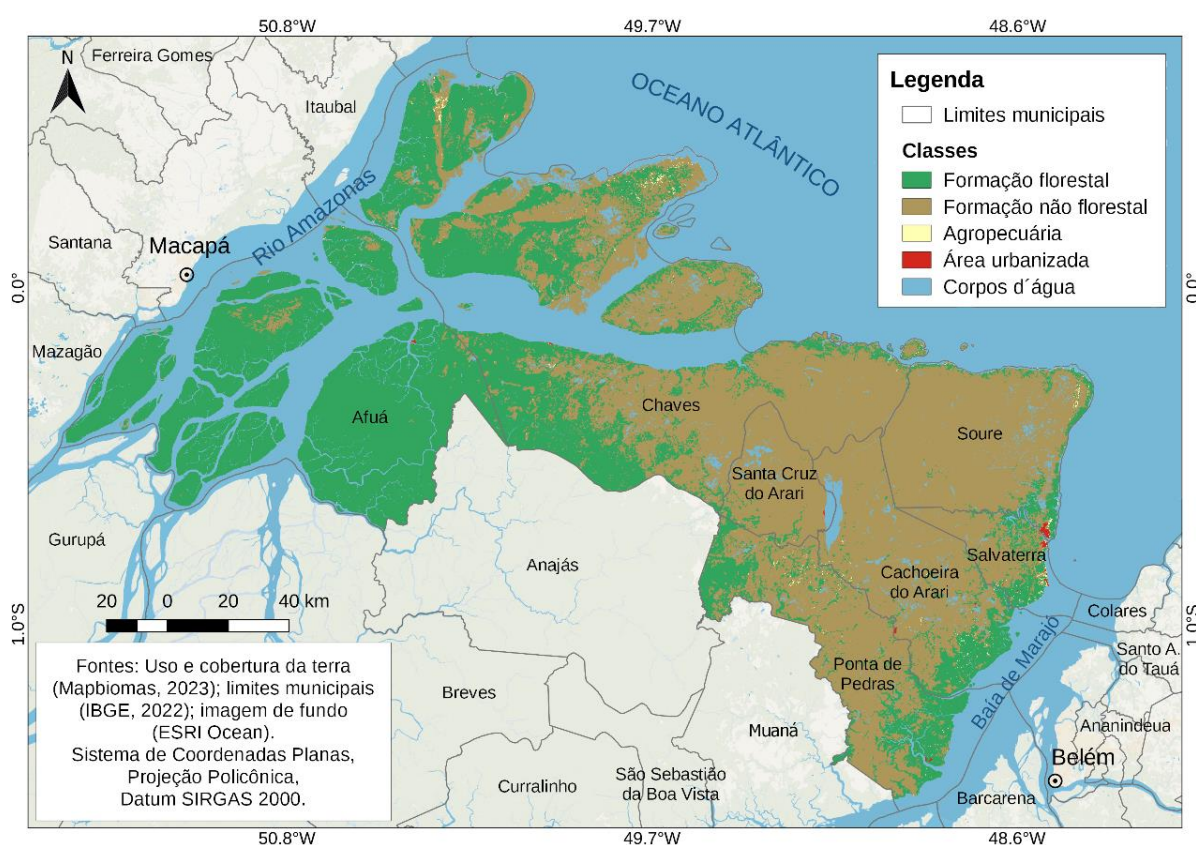
O Setor Norte da Costa Brasileira como um todo, que abrange a costa dos estados do Amapá, Pará e Maranhão, é influenciada pela ação das ondas formadas pelos ventos alísios.

Souza-Filho et al. (2023) identificaram altura significativa de onda de aproximadamente 0,5 m, com base no estudo de Hersbach et al. (2020) a partir do ERA5 (*ECMWF Reanalysis v5*).

4.5 A cobertura do solo

Na área de estudo delimitada pelos municípios, 77,6% da extensão é coberta por vegetação natural, totalizando 24,8 mil km² (Figura 5). Essa vegetação se divide em florestal (32%) e não florestal (45%). As formações florestais incluem formações savânicas, manguezais e florestas alagáveis, enquanto as formações não florestais compreendem campos alagados e áreas pantanosas, formações campestres e apicuns. (MAPBIOMAS, 2023)

Figura 5 – Mapa de uso e cobertura da terra na área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora.

Em todos os municípios, a cobertura vegetal nativa é expressiva, abrangendo mais de 65% do território em todos os casos. O município de Afuá possui a maior cobertura florestal natural, representando 64,9% de sua área total (8,3 mil km²). Embora o município apresente

maior proporção de florestas alagáveis, o estudo de Bernardino et al. (2022) revela que a vegetação presente no entorno da foz do rio Amazonas é caracterizada pela mistura de espécies que se adaptam tanto a ambientes de água doce, como as várzeas, quanto às de manguezais típicos de salinidade alta.

Soure e Santa Cruz do Arari destacam-se pela cobertura natural não florestal, que corresponde a 87,4% e 88,8% dos seus territórios, respectivamente (MAPBIOMAS, 2023). Entretanto, Soure apresenta uma importante porção nordeste-leste da sua costa contemplada por florestas de mangue, cuja toda a costa leste do município abrange a Reserva Extrativista Marinha de Soure, unidade de conservação federal de uso sustentável. O ecossistema de manguezal se destaca pelos seus diversos serviços ecossistêmicos, dentre eles, a fixação do carbono, a ciclagem de nutrientes, a proteção frente a fenômenos costeiros, e o fato de ser berçário de diversas espécies aquáticas, importantes para a economia local. (ICMBIO, 2018)

Além da significativa cobertura vegetal, os corpos d'água representam 22,1% da área de estudo, equivalente a 7,1 mil km². Nos municípios de Afuá e Chaves, que são os maiores em extensão territorial, os corpos hídricos associados à bacia hidrográfica da foz do Amazonas ocupam 33% e 23% das áreas municipais, respectivamente. O restante da cobertura do solo na área de estudo é destinado à agropecuária (0,2%), principalmente pastagem e silvicultura, e às áreas não vegetadas (0,1%), como áreas urbanizadas, praias, dunas e areais (MAPBIOMAS, 2023).

4.6 Aspectos sociodemográficos

Os municípios da área de estudo, ao todo, possuem cerca de 163 mil habitantes, o que corresponde a 27,5% do total de residentes dos municípios do Arquipélago do Marajó e apenas 2% da população paraense (Tabela 3). De acordo com o Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022), constatou-se que, embora pouco expressivo, houve um aumento populacional na maioria dos municípios, comparado ao censo anterior (2010), com destaque para Salvaterra e Cachoeira do Arari, que apresentaram crescimentos de 19,5% e 17,3%, respectivamente. Santa Cruz do Arari, apesar de não incluído no índice de vulnerabilidade do presente trabalho, possui o menor número de habitantes e registrou a maior redução populacional de 8,7%. Ponta de Pedras e Chaves também apresentaram quedas, de 4% e 1,2%, respectivamente.

Quanto aos aspectos raciais, o último Censo apresentou elevada proporção de população não-branca, representada por mais de 80% da população em todos os municípios analisados,

com proporções acima das identificadas para o Pará e o Brasil (80,4% e 56,5%, respectivamente). Com destaque para a população parda que representa entre 60 e 78% da população dos municípios, sendo a maior proporção populacional identificada em Afuá (29.690 habitantes).

Tabela 3 – Dados sociodemográficos dos municípios

	Censo 2022			Censo 2010	
	População total	Pop. não-branca	Pop. não alfabetizada	População total	População rural (%)
Afuá	37.765	32.293	5.584	35.042	73
Cachoeira do Arari	23.981	21.857	1.473	20.443	64
Chaves	20.757	18.137	2.647	21.005	88
Ponta de Pedras	24.984	20.911	2.236	25.999	52
Soure	24.204	21.454	1.036	23.001	9
Salvaterra	24.129	21.531	1.271	20.183	37
Santa Cruz do Arari	7.445	6.468	435	8.155	51
Pará	8.121.025	6.548.679	536.677	7.581.051	32
Brasil	203.080.756	114.817.516	~10.966.360	190.755.799	16

Fonte: IBGE (2010; 2022).

Embora os dados de população rural do último Censo não estejam disponíveis ainda, a maioria dos municípios apresentou um leve aumento populacional total entre 2010 e 2022, e possivelmente o cenário seja semelhante para os dias atuais. A região do arquipélago do Marajó se caracteriza pelo acesso limitado a infraestruturas e serviços públicos, devido à combinação de vastas áreas municipais e pequenas zonas urbanas dispersas pela planície de inundação e pelo interior da ilha, o que, ao longo do processo de ocupação, resultou na dispersão populacional em áreas rurais (MANSUR et al., 2016). Com exceção de Soure, os municípios possuem ao menos duas vezes mais população rural comparada ao nível nacional, assim com a

situação do estado do Pará. Dos sete municípios, cinco apresentaram população rural acima de 50%, com destaque para Chaves e Afuá, com 88% e 73%, respectivamente.

Além disso, os municípios se destacam por Índices de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de muito baixos (0 a 0,49) a baixos (0,50 a 0,59), sendo que oito deles estão entre os 50 menores IDHM do país. Chaves e Afuá estão entre eles, com IDHM de 0,453 e 0,489, respectivamente (PNUD BRASIL; IPEA; FJP, 2022). Ambos os municípios possuem as maiores proporções populacionais de pessoas com 15 anos ou mais não alfabetizadas, entre 19 e 22%, enquanto as proporções estadual e nacional são de 8,8% e 5,4%, respectivamente. Outro ponto importante, é em relação à proporção populacional com renda mensal de meio salário-mínimo. De acordo com o Censo de 2010, os municípios da área de estudo possuem de 50% a 60% da sua população nessa condição. Embora seja um dado antigo, cuja variável não teve seus dados atualizados até o momento pelo novo censo, reflete nos índices baixos e muito baixos do IDHM para esses municípios.

4.7 Gestão de riscos e de desastres

Conforme o Atlas Digital de Desastres no Brasil (CEPED-UFSC, 2024), a área de estudo registrou 35 desastres entre 1994 e 2023, sendo que cerca de 75% ocorreram na última década. Cachoeira do Arari foi o município com maior número de ocorrências, somando 10 desastres, seguido por Salvaterra (7), Chaves (6), Santa Cruz do Arari (5), Ponta de Pedras (4), Soure (3). Afuá não obteve registro. Cerca de 57% dos desastres da área foram de natureza hidrológica (como inundações, chuvas intensas e enxurradas), 25% relacionados a erosão e 17% a fenômenos climatológicos (como estiagens e secas). Considerando todas as ocorrências, mais de 75 mil pessoas foram afetadas, com prejuízos estimados em 71,9 milhões de reais.

Mapeamentos de áreas de risco geo-hidrológico indicam que 3.749 pessoas, ou seja, 2,3% da população total da área de estudo, vivem em áreas de risco. Entre os municípios da região, apenas Afuá não está incluído na lista das localidades mais suscetíveis a deslizamentos, enxurradas e inundações, que recebem prioridade da União para ações de gestão de riscos e de desastres (BRASIL, 2023). A nível federal, com exceção de Afuá, os municípios possuem ao menos um mapeamento de risco, instrumento essencial de diagnóstico do meio físico e de ocupação do solo para dar mais qualidade ao planejamento de estratégias de prevenção (MDR, 2021a), previsto na Lei nº12.608/2012 (BRASIL, 2012). Esses mapeamentos, realizados pelo

Serviço Geológico do Brasil (SGB), referem-se à setorização de riscos geológicos para cada município.

A nível municipal, embora todos os municípios tenham seus Planos Diretores – o instrumento municipal mais relevante em termos de ordenamento e ocupação do território (MDR, 2021a) –, a Pesquisa de Informações Básicas Municipais (MUNIC - IBGE, 2020) demonstra que nem todos contemplam a prevenção de riscos geo-hidrológicos. Nem mesmo na legislação municipal que estabelece regras e parâmetros para o parcelamento, uso e ocupação do solo. De acordo com o IBGE (2020), apenas Salvaterra possui os dois instrumentos voltados para prevenção riscos geológicos e hidrológicos. Soure possui ambos os instrumentos, no entanto, apenas para prevenção riscos hidrológicos, e Cachoeira do Arari, apenas a Lei de Uso e Ocupação do Solo. Embora Afuá tenha apenas seu Plano Diretor voltado para a prevenção de riscos hidrológicos, possui também como mapeamento de risco a carta geotécnica de aptidão à urbanização. O restante dos municípios não possui esses instrumentos. Nenhum deles possui um Plano Municipal de Redução de Riscos e políticas de adaptação e mitigação às mudanças climáticas.

No aspecto institucional, com exceção de Soure, cujo relator municipal não soube informar sobre a administração pública voltada à proteção e defesa civil, o restante dos municípios possui ao menos uma instituição com essa finalidade. Afuá possui o Núcleo de Defesa Civil (NUDEC), enquanto o restante possui a Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC). Além da COMPDEC, Salvaterra conta com a colaboração do Corpo de Bombeiros. Em Cachoeira do Arari, um dos programas realizados pela instituição é o programa habitacional para realocação de pessoas de baixa renda em áreas de risco.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

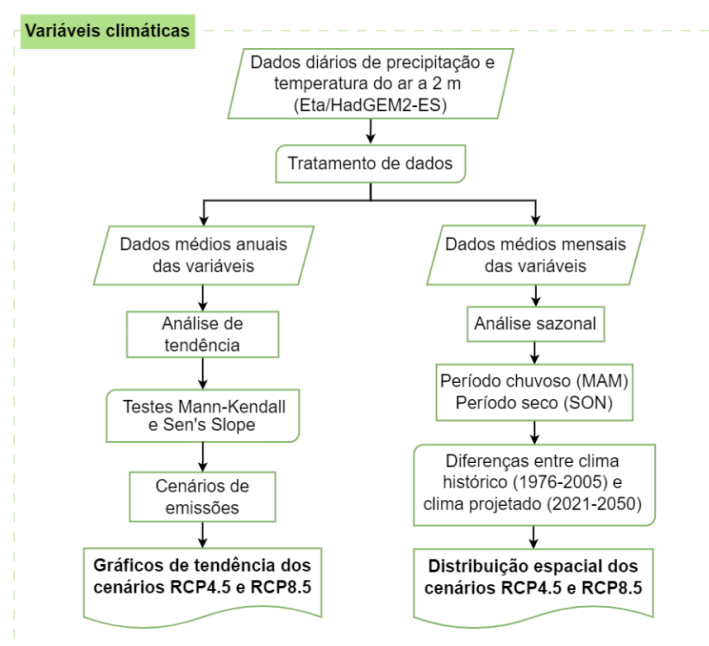
5.1 Diagnóstico climático e cenários futuros

A primeira etapa do estudo consistiu em identificar as mudanças históricas e projetadas de variáveis climáticas, de acordo com os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5. Dados de precipitação, temperatura do ar e elevação do nível do mar foram utilizados neste estudo. Entretanto, como se trata de fontes e representações distintas dos dados, as variáveis foram submetidas a metodologias diferentes para a construção do índice de cenários climáticos.

5.1.1 Variáveis climáticas

Para analisar tendências temporais e comparar as características climáticas do passado e do futuro na área de estudo, foram utilizados dados de temperatura e de precipitação, principais variáveis para perceber as alterações no clima (Figura 6). Os dados utilizados foram gerados por Tavares et al. (2023) a partir de projeções climáticas para a América do Sul, regionalizadas pelo modelo Eta e submetidas à técnica de redução de viés.

Figura 6 – Estrutura metodológica para caracterização das variáveis climáticas

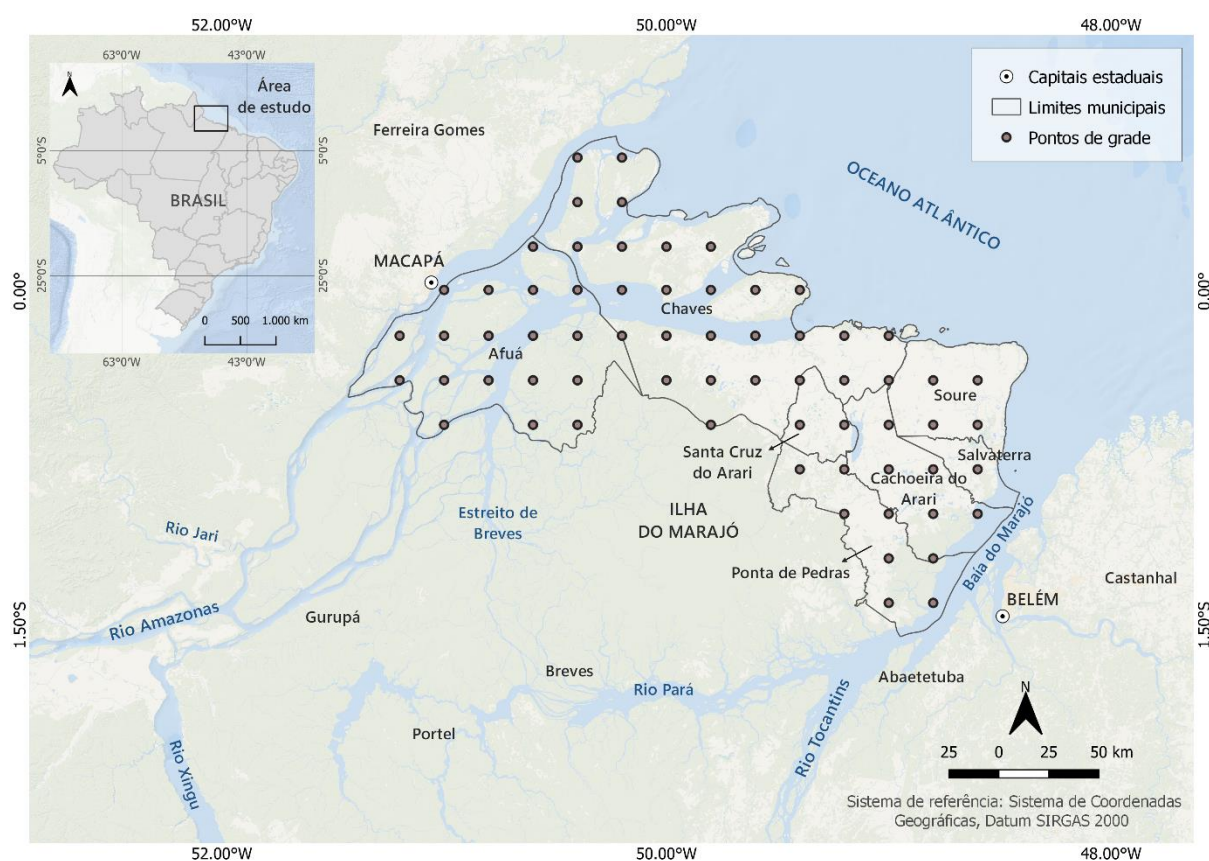


Fonte: Elaborado pela autora.

Foram selecionados os dados diários de precipitação (PREC) e temperatura do ar a 2 m (TP2m), em pontos de grade regular de 0,2 x 0,2 graus de latitude e longitude, e regionalizados a partir do modelo climático global HadGEM2-ES. Esses dados estão disponíveis para o período histórico de 1976 a 2005, representando um período de referência, e para 2006 a 2009, correspondendo às projeções do clima futuro, com base nos cenários de emissões de GEE RCP4.5 e RCP8.5. (TAVARES et al., 2023)

Para o presente estudo, foram considerados os dados de 65 pontos de grade distribuídos dentro dos limites municipais que contemplam a área de estudo (Figura 7) e com recorte temporal de 1976 a 2050. Esses dados foram tratados para a aplicação dos métodos analíticos descritos a seguir.

Figura 7 – Localização da área de estudo com os pontos de grade



Fonte: Base de dados: limites municipais e estaduais (IBGE, 2023); localização dos pontos de grade (Tavares et al., 2023); imagem de fundo (Esri Ocean). Elaborado pela autora.

5.1.1.1 Análise de tendência

A análise de tendência de séries temporais de variáveis climáticas permite uma melhor compreensão das alterações do clima a longo prazo, auxiliando na identificação de possíveis pontos de inflexão, bem como determinar a magnitude dessas alterações ao longo do tempo. Uma alternativa bastante utilizada e de simples aplicabilidade é a análise de tendência linear, como o Teste Mann-Kendall. (MARENGO et al., 2013)

O Teste Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) é um método não-paramétrico, utilizado para determinar se uma série de dados possui tendência temporal crescente/decrecente e estatisticamente significativa. O teste se baseia em rejeitar (ou não) a hipótese nula (H_0), determinando a presença (ou ausência) de tendência em um conjunto de dados analisados, adotando um nível de significância (α). Para identificar se a tendência é crescente ou decrescente, mede-se a ordem relativa de todos os pares possíveis de pontos de dados, cuja variável independente representa o ano, e a variável dependente, neste caso, as variáveis climáticas (MARENGO et al., 2013). Juntamente com o Mann-Kendall, foi aplicado o teste de inclinação de Sen, responsável por determinar a taxa de tendência (SEN, 1968).

Para aplicar as análises de tendência, foram calculados os valores médios anuais para cada variável, considerando a série temporal total dos dados (1976-2050) e ambos os cenários RCP4.5 e RC8.5 para gerar gráficos de tendência. Foram utilizadas planilhas eletrônicas para o tratamento dos dados, o cálculo da linha de tendência da média móvel e a elaboração das representações gráficas. O teste Mann-Kendall e o teste de inclinação de Sen foram calculados através do *software* MATLAB (*MATrix LABoratory*), usando a função desenvolvida por Burkey (2024). Os testes foram calculados, com um nível de significância (α) = 0,05, da seguinte maneira: a) para toda a série temporal de dados para ambos os cenários de emissão e variáveis, abrangendo médias anuais ao longo de 75 anos; b) e separadamente, considerando médias anuais de 30 anos para o período histórico (1976-2005) e para o período futuro (2021-2050), para ambos os cenários de emissão.

5.1.1.2 Análise sazonal

Estudos anteriores sobre a climatologia da área destacaram a variabilidade sazonal, particularmente em relação aos dados de precipitação (LOPES; SOUZA; FERREIRA, 2013; SOUZA et al., 2016; SOUZA et al., 2017). Lopes et al. (2013), em sua análise dos padrões

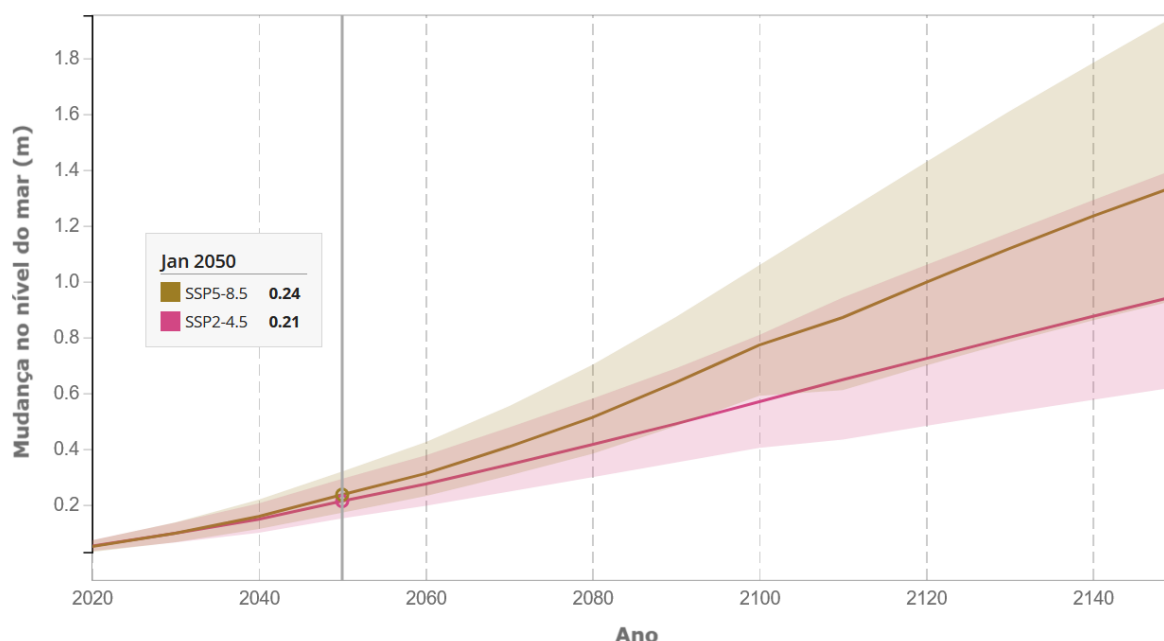
mensais de precipitação, identificaram um ciclo sazonal que delimita o período mais chuvoso entre março, abril e maio (MAM), com o período mais seco observado entre setembro, outubro e novembro (SON). Além da variabilidade sazonal, os autores observaram diferenças espaciais em comparação com o padrão anual de precipitação.

Portanto, para a análise sazonal das variáveis climáticas, foram calculados os valores médios mensais para cada ponto de grade. A partir desses valores, as diferenças em PREC e TP2m para o período de 2021 a 2050 em relação ao período histórico (1976-2005) foram calculadas para ambos os períodos sazonais e mensais, resultando em seis cenários para cada variável. Os valores sazonais para ambos os cenários correspondem às médias dos meses mais chuvosos (MAM) e mais secos (SON). Para a análise da distribuição espacial dos dados, as diferenças para cada ponto de grade foram interpoladas para cada cenário utilizando o *software* QGIS, um sistema de informação geográfica gratuito e de código aberto.

5.1.2 Elevação do nível do mar

Quanto aos dados projetados de elevação do mar, foram utilizados os dados regionais mais próximos da área de estudo, provenientes do município de Belém -PA (Figura 8), gerados pelo *IPCC AR6 Sea Level Projection Tool* (GARNER et al., 2023). Os dados selecionados representam as projeções medianas de aumento regional total do nível do mar para 2050, em relação ao período base de 1995-2014, e especificamente para os cenários de emissões SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Como visto na Seção 2.1, esses cenários são versões atualizadas dos RCP4.5 e RCP8.5, com níveis de forçamento radiativo semelhantes, porém, incorporando premissas socioeconômicas voltadas ao sequestro de carbono. Os valores medianos e os intervalos prováveis (do percentil 17º ao 83º) correspondem a 0,21 m (0,15-1,29) para SSP2-4.5 e 0,24 m (0,17-0,32) para SSP5-8.5. As taxas médias de mudança total do nível do mar para o período de 2040-2060 são de 6,1 mm/ano (4,2-8,6) para SSP2-4.5 e 7,2 mm/ano (5,1-10,1) para SSP5-8.5.

Figura 8 – Projeção de aumento regional total para Belém para os dois cenários SSPs



Fonte: Garner et al. (2023).

5.2 Construção e aplicação de um índice de vulnerabilidade socioambiental para municípios costeiros

5.2.1 Modelo conceitual

Para investigar os impactos das mudanças climáticas, especialmente a elevação do nível do mar, sobre os municípios localizados em terras baixas do arquipélago de Marajó, adotou-se a avaliação de vulnerabilidade a múltiplos perigos costeiros. Diante disso, foi desenvolvido um Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV), baseado no estudo de Santos et al. (2021) e proposto por Menezes et al. (2018), para permitir a comparabilidade entre os municípios pertencentes à área de estudo. O IMV proposto compõe um Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC), considerando os perigos diretos associados à elevação do nível do mar, conforme determinado por Oppenheimer et al. (2019), e um Índice de Cenários Climáticos (ICC), que leva em conta projeções futuras de mudanças na precipitação, temperatura e elevação do nível do mar.

A presente pesquisa foi motivada pela revisão da literatura de Rocha et al. (2023) para desenvolver o IVC associado à elevação do nível do mar. Os autores apontam que tanto os

índices de vulnerabilidade quanto de riscos costeiros possuem diversas designações e definições na bibliografia científica pela falta de padronização desses conceitos. A maioria dos estudos levantados pelos autores utiliza a terminologia de Índice de Vulnerabilidade Costeira, no entanto, muitas vezes é mal utilizado, confundindo os conceitos de vulnerabilidade e risco, assim como outros elementos fundamentais que compõem o risco. De acordo com Rocha et al. (2023), um IVC compõe os perigos costeiros e suas forçantes, bem como os parâmetros físicos e socioeconômicos suscetíveis a esses perigos em determinado recorte espacial de análise. Somado a isso, considerando que os impactos das mudanças climáticas são consequências da interação entre perigos, exposição e vulnerabilidade, e que esta, por sua vez, é determinada pela sensibilidade e pela capacidade adaptativa de sistemas naturais e humanos (IPCC, 2022), integrar todos esses elementos à avaliação da vulnerabilidade costeira permite uma análise sistêmica. Essa abordagem contribui para a padronização do uso do índice e de conceitos chaves para a avaliação da vulnerabilidade da costa associada às alterações do clima.

Já em relação ao ICC, a proposta foi inspirada por estudos que utilizaram projeções climáticas baseadas nos cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5 para compor seus índices de vulnerabilidade socioambiental em municípios costeiros. No trabalho de Zanetti et al. (2016), as variáveis climáticas, como precipitação e elevação do nível do mar, foram consideradas em relação aos fatores geofísicos associados aos perigos de inundação, deslizamento de terra, erosão costeira e exposição a ondas. No IMV aplicado por Santos et al. (2021), a componente climática foi tratada como um índice independente, associando anomalias climáticas geradas pela diferença entre o clima projetado e o clima de referência para precipitação e temperatura. Ambos os estudos foram utilizados como referências para determinar outras componentes do índice, como fatores, parâmetros e fontes de dados para o índice, assim como os trabalhos levantados na Seção 2.4. Embora o índice proposto aqui seja um índice multiperigo, o quadro estrutural, a escolha da componente climática como um índice independente e a operacionalização do índice em si foram embasados pela proposta de Santos et al. (2021), resultando em um Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV, Figura 9).

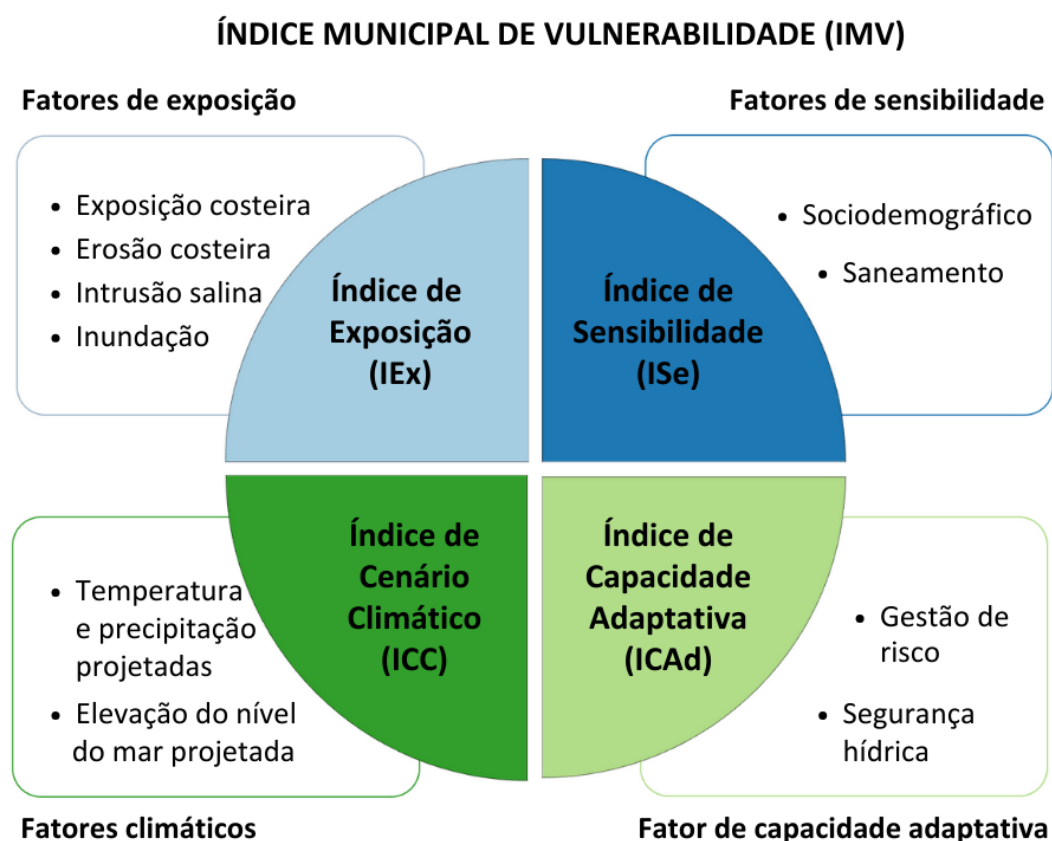
Para compor o IVC, o subíndice de exposição (IEx) abrangeu parâmetros relacionados às características físicas e às forçantes costeiras do sistema, conforme quatro perigos diretos associados à elevação do nível do mar, descritos por Oppenheimer et al. (2019): inundação costeira, erosão costeira, intrusão salina e perda ou alteração dos ecossistemas costeiros. O subíndice de sensibilidade (Ise) retratou características sociodemográficas e de infraestrutura que podem tornar a população suscetível aos impactos das mudanças climáticas. Já para o

subíndice de capacidade adaptativa (ICAd), foi avaliada a presença de instituições e de estratégias de governança, que dão suporte para que a sociedade tenha condições de lidar com as consequências negativas dos perigos costeiros.

Para o Índice de Cenário Climático (ICC), adotou-se a metodologia de Santos et al. (2021), considerando-o uma componente independente para representar a exposição futura às alterações climáticas nos municípios. Os parâmetros considerados incluem mudanças projetadas na precipitação, temperatura e elevação do nível do mar para 2050, conforme descrito na seção anterior (5.1).

A versão resumida dos índices que compõem o IMV proposto, com descrição dos parâmetros, cálculos, dados e fontes, pode ser consultada no Apêndice A.

Figura 9 – Estrutura do Índice Municipal de Vulnerabilidade proposto, com subíndices e fatores considerados

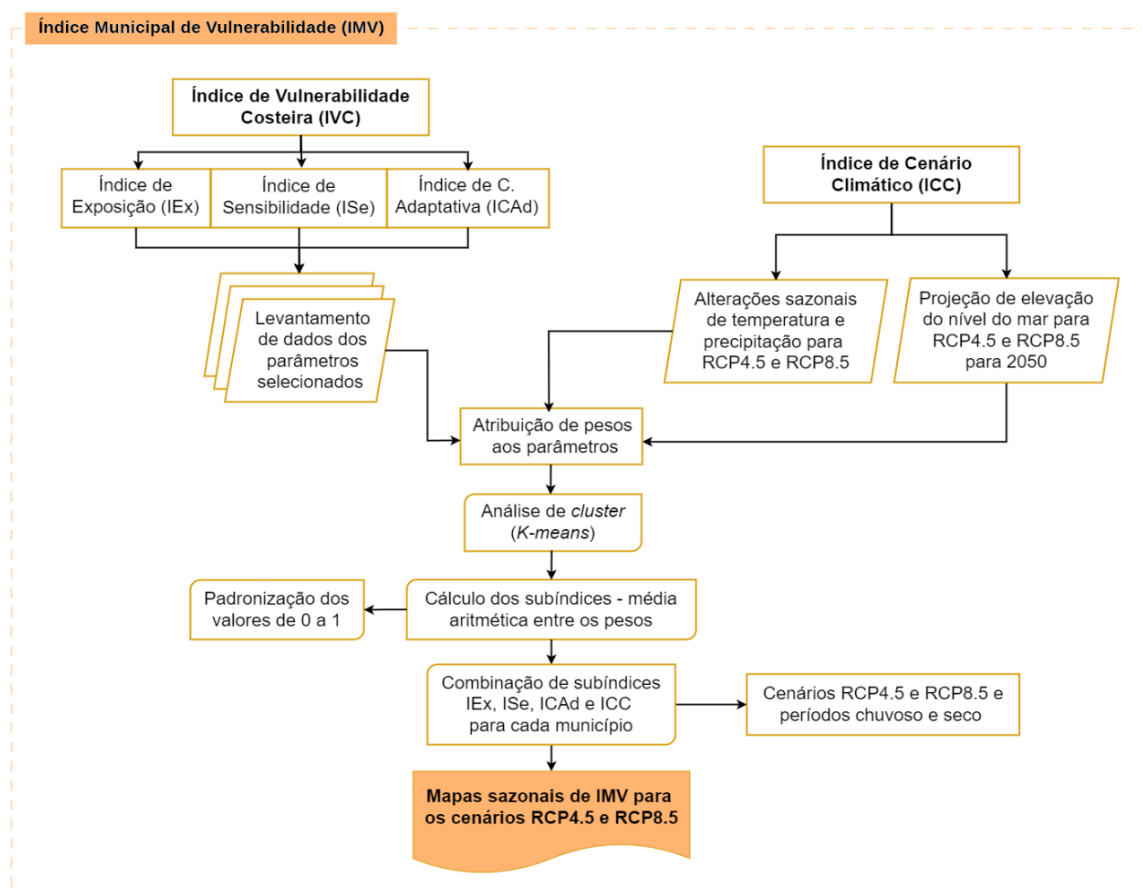


Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.2 Cálculo do Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV)

O cálculo do Índice de Mudança de Vulnerabilidade (IMV) seguiu o método proposto por Santos et al. (2021), baseado em Menezes et al. (2018). As etapas envolveram a atribuição de pesos aos parâmetros com base no agrupamento dos municípios, seguida do cálculo da média aritmética para cada subíndice e índice, e, por fim, a normalização dos dados para que todos representassem o mesmo intervalo de valores (Figura 10). Para uma compreensão mais detalhada das etapas, recomenda-se a consulta a ambos os estudos.

Figura 10 – Etapas para o cálculo do Índice Municipal de Vulnerabilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

O peso para cada parâmetro foi atribuído através da análise de *cluster* por agrupamento de valores (*K-mens*) proposta por Wang e Song (2011). Essa ferramenta de análise permite que um conjunto de dados seja distribuído em classes, sem que os valores para essas classes sejam definidos previamente, buscando por similaridades e heterogeneidades entre os dados. de modo

a agrupar os municípios e atribuir valores de 1 a 5, indicativos de vulnerabilidade aos parâmetros, em que 1 representa vulnerabilidade muito baixa e 5 representa vulnerabilidade muito alta. Ele funciona iterativamente, atribuindo aleatoriamente centroides (pontos centrais) para cada *cluster*, cujos pontos representativos dos dados são distribuídos entre os *clusters* a partir do centroide mais próximo, com base na distância euclidiana. A aplicação da análise de agrupamento para as diferentes variáveis foi realizada em código *Python*, através da plataforma *Google Colab*.

Em alguns casos, os parâmetros possuem contribuição estatisticamente negativa à vulnerabilidade, ou seja, quanto maiores os valores identificados para cada município, menor é a vulnerabilidade, portanto, os pesos foram atribuídos de forma inversa. Além disso, alguns parâmetros baseados em dados da literatura são comuns a todos os municípios e, nesses casos, recorreu-se ao ranqueamento de vulnerabilidade determinado na literatura. Os pesos atribuídos para cada caso foram descritos abaixo, na seção sobre as componentes do IMV.

Os pesos calculados para os parâmetros foram agregados à média aritmética simples para determinar os valores dos subíndices, primeiramente. O resultado de cada índice passou por uma normalização para possibilitar a comparação entre eles, atribuindo a mesma faixa de valores de 0 a 1, em que 0 corresponde ao menos vulnerável e 1, o mais vulnerável, de acordo com a Equação 1:

$$I_p = \frac{I_{obs} - \text{Mínimo } I}{\text{Máximo } I - \text{Mínimo } I} \quad (1)$$

Onde,

I_p = Índice padronizado

I_{obs} = Índice observado (para cada município)

Máximo I = maior valor observado entre os índices calculados

Mínimo I = menor valor observado entre os índices calculados

Com o subíndice determinado para cada fator e os valores padronizados, calculou-se o IVC a partir da média aritmética entre os subíndices referentes aos elementos de vulnerabilidade (I_{Ex} , I_{Se} e I_{Cad}) e o ICC para os cenários RCP4.5 e RCP8.5. No caso do ICC, resultou em 6 cenários diferentes, considerando as alterações mensais e para os períodos chuvosos e secos para cada RCP. Por fim, o cálculo do IMV foi realizado conforme as Equações 2 e 3 abaixo:

$$\text{IMV 4.5} = \frac{(\text{IVC} + \text{ICC4.5})}{2} \quad (2)$$

$$\text{IMV 8.5} = \frac{(\text{IVC} + \text{ICC8.5})}{2} \quad (3)$$

Como o índice gerado é comparativo, Santos et al. (2021) ressaltam que as pontuações 0 e 1 não indicam ausência ou vulnerabilidade máxima, respectivamente, mas sim o grau de vulnerabilidade de um determinado município em relação aos demais. Para visualizar de forma qualitativa os resultados dos índices para cada município através da representação cartográfica os valores foram categorizados da seguinte forma: 1) 0,0 a 0,19 – vulnerabilidade muito baixa; 2) 0,20 a 0,39 – vulnerabilidade baixa; 3) 0,40 a 0,59 vulnerabilidade moderada; 4) 0,60 a 0,79 – vulnerabilidade alta; 5) 0,80 a 1,00 - vulnerabilidade muito alta.

5.2.3 As componentes do Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV)

Nesta seção, serão apresentados de forma detalhada os subíndices que compõem o IMV e seus respectivos fatores e parâmetros, bem como a descrição dos cálculos, os dados e fontes e a relação de cada parâmetro com a vulnerabilidade.

5.2.3.1 Índice de Exposição (IEx)

A exposição é um elemento fundamental da vulnerabilidade, e aumenta a propensão de territórios e populações aos impactos climáticos. Neste sentido, os parâmetros de exposição foram definidos conforme as características que imprimem os aspectos físicos do local e as forçantes principais de cada perigo costeiro, com base em Zanetti et al. (2016). Portanto, para este subíndice, cada fator corresponde a uma ameaça associada à elevação do nível do mar e será detalhado abaixo.

5.2.3.1.1 Exposição Costeira

Para este fator, foram considerados como parâmetros o relevo e a cobertura vegetação nativa. Para ambos os casos, foram consideradas as proporções (%) das áreas municipais expostas. Para o relevo, áreas de baixa altitude estão mais expostas aos perigos relacionados à elevação do nível do mar. Portanto, quanto maior a área municipal localizada em altitudes abaixo de 10 m, mais exposto está o município. No caso da cobertura vegetal nativa, a contribuição é negativa, pois áreas com maior cobertura vegetal nativa preservada estão menos expostas aos efeitos das mudanças climáticas devido aos serviços ecossistêmicos que fornecem, especialmente de proteção da costa. Assim, quanto maior a área municipal coberta por vegetação nativa, menos exposto está o município.

Para extrair valores de altitude dos municípios, foram utilizados arquivos *raster* do FABDEM (*Forest And Buildings removed Copernicus Digital Elevation Model*), um MDE global que remove as distorções de altura de edificações e árvores do modelo Copernicus GLO-30 DEM, com resolução espacial de 30 m (NEAL; HAWKER, 2023). O processamento dos dados *raster* e o cálculo da área municipal foram realizados no *software* QGIS. A espacialização desses dados pode ser observada na Figura 4 (Seção 4.1).

Para identificar a proporção de cobertura vegetal nativa, foram utilizados os dados municipais da Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, do Projeto MapBiomas (MAPBIOMAS, 2023). As classes consideradas para o cálculo do parâmetro foram formação florestal e formação não florestal natural e a distribuição espacial desses dados, é apresentada na Figura 5 (Seção 4.5), derivada de dados *raster* da mesma coleção, com pixel de 30x30 m.

Os valores percentuais obtidos para cada município para ambos os parâmetros foram divididos em grupos de 1 a 5, indicativos de uma gradação de exposição, com contribuição positiva para relevo e negativa para cobertura vegetal nativa e estão apresentados na Tabela 4. Para atribuir um valor para cada município para o fator exposição costeira, foi calculada a média aritmética entre os pesos mencionados abaixo para os dois parâmetros.

Tabela 4 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator de exposição costeira

Município	Relevo		Cobertura vegetal nativa	
	%	Peso	%	Peso
Afuá	75,56	1	66,40	5
Cachoeira do Arari	94,58	5	82,10	3
Chaves	84,46	3	76,68	4
Ponta de Pedras	90,27	4	84,6	2
Salvaterra	80,25	2	77,65	4
Soure	96,65	5	94,76	1

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3.1.2 Erosão costeira

Para o fator de erosão costeira, foram considerados os parâmetros geomorfologia e altura de onda. No caso da geomorfologia, foi calculada a proporção da área municipal sobre planícies, por suas características planas a suavemente onduladas e em altitudes baixas em relação ao nível do mar. Foram utilizados os dados vetoriais das feições geomorfológicas, compatíveis com a escala 1:1.000.000, derivados do Mapa de Geodiversidade do Estado do Pará, elaborado pelo CPRM (2010). Utilizando os dados vetoriais, as áreas municipais de planícies foram calculadas com base nos vetores de limites municipais, de escala 1:250.000, disponibilizados pelo IBGE (2023), através do *software* QGIS. A distribuição espacial do parâmetro geomorfológico foi representada na Figura 4 (Seção 4.1).

Os ambientes sedimentares mais expostos aos agentes costeiros são as praias arenosas, planícies lamosas e deltas (ZANETTI et al., 2016). Esses ambientes são mais dinâmicos que costas rochosas, por exemplo, pois o equilíbrio entre as forças do mar e o fornecimento de sedimentos determinará se a linha costeira avança (acresção), permanece estável ou recua (erosão) (MUEHE, 2020). Embora esses ambientes estejam presentes na área de estudo e estejam associados às planícies, as características geomorfológicas e geológicas descritas na Seção 4.1 não foram suficientes para identificá-los com precisão. Portanto, recomenda-se o mapeamento detalhado desses ambientes sedimentares.

As ondas, oscilações na superfície da água do mar geradas pelos ventos em oceano aberto, são consideradas os principais condicionantes da dinâmica sedimentar (MUEHE, 2020).

Neste caso, foi considerado como parâmetro a altura significativa de onda, que representa a média das maiores ondas da área de estudo. Ondas mais altas possuem maior energia, o que pode intensificar a erosão ao impactar as feições geomorfológicas costeiras, o que contribui para a maior exposição do ambiente. O dado considerado para o cálculo deste foi retirado do trabalho de Souza-Filho et al. (2023) que consideraram a altura significativa de onda de até 0,5 m para todo o Setor Norte da Costa Brasileira, com base no estudo de Hersbach et al. (2020) a partir do ERA5. Como se trata de um dado comum a todos os municípios, optou-se por utilizar o ranqueamento definido por Thieler e Hammar-Klose (1999) para atribuir o peso do parâmetro aos municípios. Os autores consideraram como muito baixa (1) a exposição a alturas de ondas abaixo de 0,55 m.

Os valores percentuais obtidos para cada município correspondem às feições geomorfológicas que possuem praias arenosas, planícies lamosas e deltas, e foram divididos em grupos de 1 a 5, indicativos de uma gradação de exposição, com contribuição positiva e estão apresentados na Tabela 5. Os valores municipais para o fator erosão costeira foram obtidos a partir da média aritmética entre os pesos dos parâmetros.

Tabela 5 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator erosão costeira

Município	Geomorfologia		Altura de onda	
	%	Peso	m	Peso
Afuá	98,09	5	0,5	1
Cachoeira do Arari	83,15	2		
Chaves	88,96	4		
Ponta de Pedras	86,44	3		
Salvaterra	68,62	1		
Soure	98,29	5		

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3.1.3 Inundação costeira

Para o fator inundação costeira foram considerados três parâmetros: declividade do terreno, proximidade dos corpos d'água e extremos históricos de precipitação. Áreas planas e de baixa inclinação são mais expostas à inundação costeira, tanto no curto prazo, devido ao impacto direto, quanto no longo prazo, devido à dificuldade de escoamento da água. Neste sentido, foi considerada a proporção da área municipal com declividade inferior a 20% (ou 11,3°), considerado na literatura com sendo o nível de declividade mais exposto à inundação costeira (SHARP et al., 2014; ZANETTI et al., 2016). Assim como os valores de altitude para o fator exposição costeira, os dados de declividade foram obtidos a partir dos arquivos *raster* do modelo FABDEM e passaram pelos mesmos processamentos de imagem. A classificação de declividade foi feita com base nas classes do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (SANTOS et al., 2018), e posteriormente foram calculadas as áreas.

Quanto à proximidade dos corpos d'água, foi considerada a proporção da área coberta por corpos d'água em relação à área total municipal. Assim como para o parâmetro de cobertura vegetal nativa, os dados municipais foram extraídos da classe de corpos d'água do MapBiomass (2023). A proximidade com rios, lagoas e áreas úmidas aumenta a exposição a inundações, pois essas áreas frequentemente servem como pontos de acúmulo e escoamento das águas.

Eventos de chuva extrema resultam em grandes volumes de água em períodos curtos, sobrecarregando os sistemas de drenagem e aumentando a probabilidade de inundações. Dessa forma, o terceiro parâmetro, referente aos extremos de precipitação, utilizou dados sobre a frequência anual desses eventos em cada município. Esses dados foram extraídos do estudo de Ferreira et al. (2020), que calculou o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) com base em observações de precipitação entre 1998 e 2015. Os autores também realizaram a distribuição espacial dos resultados, permitindo a atribuição de valores específicos para cada município. No entanto, os dados disponíveis estão organizados em intervalos, sendo considerado, neste caso, o valor máximo desses intervalos.

Para os três parâmetros, seus dados municipais foram divididos em grupos de 1 a 5, indicativos de uma gradação de exposição, com contribuição positiva em todos os casos e estão apresentados na Tabela 6. Os valores municipais para o fator inundação costeira foram obtidos a partir da média aritmética entre os pesos dos parâmetros.

Tabela 6 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator inundação costeira

Município	Declividade		Corpos d'água		Extremos de Chuva	
	%	Peso	%	Peso	%	Peso
Afuá	99,56	2	33,45	5	10,00	3
Cachoeira do Arari	99,76	4	17,56	2	8,00	1
Chaves	99,49	1	23,09	4	10,00	3
Ponta de Pedras	99,79	5	15,1	2	8,00	1
Salvaterra	99,56	2	20,4	3	12,00	5
Soure	99,70	3	4,68	1	12,00	5

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3.1.4 Intrusão salina

Para o fator intrusão salina, foram considerados os parâmetros nível estático dos poços ativos dos municípios e amplitude de maré. O nível estático dos poços foi considerado na intenção de estabelecer um parâmetro de relação entre a superfície do terreno e o nível da água dentro do poço, em um momento em que a água se encontra em repouso. Os dados foram obtidos do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS; SGB, 2024) e foram selecionados os poços cadastrados como ativos e destinados ao uso humano (mais detalhes na seção 4.3.2). Níveis estáticos mais baixos indicam que a água subterrânea está mais próxima da superfície, o que pode aumentar a exposição da água doce à intrusão salina em regiões costeiras.

A ação das marés e suas características são um dos fatores determinantes no avanço da intrusão salina. Portanto, foram levantados dados da literatura de amplitude de maré para a região para compor o índice. A maré na foz do rio Amazonas e na porção norte da ilha do Marajó exibe regime de macromaré, e em trechos mais internos da baía do Marajó e do estuário do rio Amazonas, regime de mesomaré (ROSÁRIO et al., 2016; TORRES; EL-ROBRINI; COSTA, 2018). Os pesos foram definidos conforme Thieler e Hammar-Klose (1999), sendo muito baixo para macromaré (1) e baixo para mesomaré (2).

Os dados considerados para nível estático se referem aos valores médios municipais e foram divididos em grupos de 1 a 5, indicativos de uma gradação de exposição, com contribuição negativa, pois quanto menor o valor, maior a exposição do poço à intrusão salina.

Os valores municipais para o fator intrusão salina foram obtidos a partir da média aritmética entre os pesos dos parâmetros apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator intrusão salina

Município	Nível estático		Amplitude de maré	
	m	Peso	m	Peso
Afuá	-	1	3,50	2
Cachoeira do Arari	4,68	5	3,50	2
Chaves	-	1	4,50	1
Ponta de Pedras	6,25	4	3,50	2
Salvaterra	10,9	2	3,50	2
Soure	6,67	3	4,50	1

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3.2 Índice de Sensibilidade (ISe)

O Índice de Sensibilidade proposto retrata características sociodemográficas e condições de infraestrutura de saneamento, que podem tornar a população mais suscetível aos impactos dos perigos costeiros frente às mudanças climáticas.

5.2.3.2.1 Sociodemográfico

Para o fator sociodemográfico, focou-se na identificação de grupos sociais mais vulneráveis aos desastres, segundo a diretriz *Leave no one behind* da Organização das Nações Unidas (ONU), no âmbito dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). De acordo com a diretriz, cinco fatores determinam os grupos mais vulneráveis (UNSDG, 2019, p. 13):

- Discriminação, baseada em um ou mais aspectos da sua identidade como gênero, idade, etnia, classe social, deficiência, dentre outros;
- Geografia, levando em consideração o acesso (ou a falta de acesso) a infraestruturas e serviços devido à localização da população;
- *Status* socioeconômico, que levam ao enfrentamento de privações ou desvantagens em termos de renda, educação, saúde, dentre outros;

- Governança, onde as pessoas enfrentam desvantagens devido às instituições inadequadas e ineficazes;
- Exposição a choques, em relação aos grupos mais afetados pelos impactos das alterações climáticas, desastres, conflitos, emergências de saúde, dentre outros.

Para evitar certa sensibilidade no cálculo do índice ao incluir diversos parâmetros, embora importantes para discussões sobre o tema, baseou-se no estudo de vulnerabilidade social dos municípios costeiros de Lima et al. (2023) para selecionar os parâmetros sociodemográficos. Os autores identificaram escolaridade, renda e raça como mais representativos para os municípios costeiros da região norte do país. Além disso, foi adicionado o parâmetro sobre população rural, visto que parte dos municípios possui população significativa em áreas rurais (IBGE, 2010; MANSUR et al., 2016). Os dados foram retirados dos últimos Censos Demográficos de 2010 e 2022 (IBGE, 2010; IBGE, 2022). Até o momento, apenas os dados de escolaridade e raça do censo mais atual estão disponíveis. Os pesos municipais atribuídos a cada variável estão representados na Tabela 8.

O parâmetro escolaridade mede a proporção da população não alfabetizada em relação à população total do município. Os dados utilizados correspondem ao número de pessoas com 15 anos ou mais não alfabetizadas. A escolaridade mais baixa restringe a capacidade de compreender as informações de alerta e o acesso às informações de recuperação em caso de desastres (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003).

O parâmetro renda é determinado pelo percentual da população com rendimento nominal mensal per capita de até 1/2 salário-mínimo. Quanto menor a renda, mais difícil e demorado é para uma pessoa absorver e se recuperar das perdas após um evento (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003).

Quanto ao parâmetro raça, considera-se a proporção da população não-branca em relação à população total do município. Os dados censitários referem-se ao número de pessoas por cor ou raça. Barreiras linguísticas e culturais podem prejudicar o acesso à ajuda e ao financiamento pós-evento, e essas populações geralmente residem em áreas de maior risco (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003).

Por fim, a população rural é medida pela proporção de residentes na zona rural do município. Os dados distinguem a situação domiciliar entre áreas urbanas e rurais. Residentes rurais podem ser mais vulneráveis devido a rendimentos mais baixos e maior dependência de

economias baseadas na extração de recursos locais, como agricultura e pesca (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003).

Tabela 8 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator sociodemográfico

Município	Escolaridade		Renda		Raça		População rural	
	%	Peso	%	Peso	%	Peso	%	Peso
Afuá	22,02	5	55,30	4	85,51	2	72,95	4
Cachoeira do Arari	8,37	2	55,50	4	91,14	5	64,02	4
Chaves	19,14	4	55,40	4	87,38	3	88,05	5
Ponta de Pedras	12,06	3	54	3	83,7	1	52,21	3
Salvaterra	6,98	2	50,7	2	89,23	4	37,21	2
Soure	5,63	1	50,2	1	88,64	4	8,63	1

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3.2.2 Saneamento

A vulnerabilidade das pessoas e de suas comunidades a perigos costeiros é influenciada não apenas pela exposição de seus assentamentos (ex. ROCHA et al., 2023), mas também pela qualidade dos serviços disponíveis nesses locais. Alguns autores consideram o saneamento um fator de sensibilidade (MENEZES et al., 2018; LIMA et al., 2023), cujos domicílios com infraestrutura inadequada de saneamento são mais suscetíveis a serem modificados por conta dos perigos associados ao clima.

Nesse contexto, para o fator saneamento, foram considerados dois parâmetros: abastecimento de água e rede de esgoto. Os dados foram retirados do Censo Demográfico de 2022 e se referem aos domicílios particulares permanentes ocupados conectados às redes gerais de abastecimento de água e de coleta de esgoto (IBGE, 2022). Para o cálculo, foram consideradas para ambos os parâmetros as proporções de domicílios conectados a esses serviços de saneamento em relação ao número total de domicílios particulares por município. Domicílios sem conexão à rede geral de água dependem de fontes alternativas, muitas vezes não tratadas ou seguras, aumentando os riscos à saúde humana e que podem ser agravados com a ocorrência de perigos costeiros. E ainda, a falta de conexão dos domicílios a uma rede de esgoto adequada

pode levar à contaminação de águas superficiais e subterrâneas, especialmente durante eventos de perigos costeiros, além da disseminação de doenças.

Para ambos os parâmetros, os resultados municipais foram divididos em grupos de 1 a 5, indicando uma gradação de sensibilidade e contribuições negativas para os dois casos, ou seja, quanto menor o número, menor o acesso ao saneamento básico e maior a sensibilidade do município. Tabela 9.

Tabela 9 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator saneamento

Município	Abastecimento de água		Rede de esgoto	
	%	Peso	%	Peso
Afuá	17,82	5	2,43	4
Cachoeira do Arari	40,99	4	5,53	3
Chaves	20,37	5	0,99	5
Ponta de Pedras	52,77	3	9,33	2
Salvaterra	84,40	1	5,52	3
Soure	78,34	2	1,26	5

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3.3 Índice de Capacidade Adaptativa (ICAd)

Para determinar os fatores que compõem o ICAd, considerou-se a capacidade de resposta dos municípios aos perigos costeiros com base em medidas estratégicas institucionais e de governança. Portanto, parâmetros envolvendo o gerenciamento de risco e a gestão de recursos hídricos foram considerados.

5.2.3.3.1 Gestão de risco

Para o fator Gestão de Risco, os parâmetros definidos correspondem às medidas não estruturais de prevenção e redução de risco, correspondentes aos instrumentos de gestão básicos e previstos em lei e à existência de instituições de segurança. Foram utilizadas informações qualitativas presentes na Pesquisa de Informações Básicas Municipais – MUNIC (IBGE, 2020). Informações complementares também foram consideradas com base em instrumentos elaborados para os municípios em outros níveis de governo (como o mapeamento do Serviço

Geológico do Brasil) e em sites municipais (descritos na Seção 4.7). Esses elementos são fundamentais para que um município seja capaz de lidar com riscos e desastres, proporcionando uma base sólida para a prevenção, resposta e adaptação à ocorrência de perigos.

Quanto à atribuição de pesos, para ambos os parâmetros, os resultados foram agrupados de 1 a 5 (Tabela 10), com contribuições negativas para o índice, ou seja, quanto maior a quantidade de instrumentos e instituições, maior a capacidade adaptativa do município, logo, menos vulnerável.

Tabela 10 – Dados municipais e pesos de parâmetros do fator gestão de risco

Município	Instrumentos de gestão		Instituições de segurança	
	Nº	Peso	Nº	Peso
Afuá	2	3	1	3
Cachoeira do Arari	4	1	1	3
Chaves	1	4	1	3
Ponta de Pedras	1	4	1	3
Salvaterra	4	1	2	1
Soure	3	2	0	5

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3.3.2 Recursos hídricos

Para o fator recursos hídricos, utilizou-se a variável segurança hídrica, que representa a capacidade de garantir acesso sustentável à água de qualidade, essencial para a saúde dos ecossistemas e o desenvolvimento econômico (UN-WATER, 2013). Os dados foram extraídos do Índice de Segurança Hídrica (ISH) de 2017 (ANA, 2020), estabelecido pelo Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) da Agência Nacional de Águas (ANA), e abrangem quatro dimensões: humana, econômica, ecossistêmica e resiliência. Neste estudo, considerou-se o ISH na dimensão humana, que reflete a oferta de água para abastecimento das cidades, acompanhada de um nível aceitável de risco relacionado a secas e cheias. Os dados, de natureza qualitativa, classificam a segurança hídrica em uma escala de 1 a 5, onde 1 indica segurança mínima e 5, máxima. Em todos os municípios analisados, o ISH na dimensão humana correspondeu à classe alta (4). Dado que o ISH varia de 1 a 5, a classe 4 foi proporcionalmente ajustada como classe

2 nos pesos do estudo, pois quanto maior a segurança hídrica, maior a capacidade adaptativa e menor a vulnerabilidade do sistema.

5.2.3.4 Índice de Cenários Climáticos (ICC)

Um componente climático foi incorporado aos outros elementos fundamentais da vulnerabilidade socioambiental para avaliar os impactos dos perigos associados às mudanças climáticas a partir de possíveis alterações climáticas futuras. Foram definidos ao todo 6 cenários climáticos possíveis, de acordo com resultados obtidos para as variáveis precipitação e temperatura na primeira etapa do trabalho, de diagnóstico climático e cenários futuros. Os cenários correspondem às diferenças mensais e sazonais – para regimes chuvoso e seco - de precipitação e temperatura, entre o período histórico (1976-2005) e as projeções climáticas futuras (2021-2050), para os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5. Os valores considerados para cada município correspondem às médias das diferenças entre os pontos de grade do território municipal, e estão representados abaixo (Tabelas 11 e 12).

Tabela 11 – Dados municipais e pesos das alterações de precipitação mensal (M-RCP), no período chuvoso (C-RCP) e no período seco (S-RCP) para os cenários de emissões

	M- RCP4.5		C- RCP4.5		S- RCP4.5		M- RCP8.5		C- RCP8.5		S- RCP8.5	
Município	mm	P	mm	P	mm	P	mm	P	mm	P	mm	P
Afuá	- 24,9	2	- 48,9	1	- 5,7	1	- 27,1	1	- 33,5	1	- 9,8	1
Cachoeira do Arari	- 29,0	5	- 65,7	4	- 11,4	4	- 38,8	4	- 51,1	4	- 17,3	3
Chaves	- 27,3	4	- 68,1	5	- 8,8	2	- 36,9	5	- 49,6	3	- 16,2	2
Ponta de Pedras	- 26,5	3	- 56,9	2	- 9,3	3	- 33,3	2	- 38,1	2	19,0	4
Salvaterra	- 29,3	5	- 69,1	5	- 11,5	4	- 40,2	5	- 56,7	5	- 17,1	3
Soure	- 24,0	1	- 63,6	3	- 13,2	5	- 36,2	3	- 56,7	5	- 20,7	5

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 12 – Dados municipais e pesos das alterações de temperatura mensal (M-RCP), no período chuvoso (C-RCP) e no período seco (S-RCP) para os cenários de emissões

Município	M-RCP4.5		C-RCP4.5		S-RCP4.5		M-RCP8.5		C-RCP8.5		S-RCP8.5	
	°C	P	°C	P	°C	P	°C	P	°C	P	°C	P
Afuá	1,5	5	1,5	5	1,6	5	2,1	5	2,0	5	2,0	5
Cachoeira do Arari	1,3	3	1,4	3	1,4	2	1,8	2	1,7	3	1,6	2
Chaves	1,3	2	1,3	2	1,4	3	1,8	3	1,6	2	1,7	3
Ponta de Pedras	1,4	4	1,5	4	1,5	4	1,9	4	1,8	4	1,8	4
Salvaterra	1,3	1	1,3	2	1,4	2	1,7	1	1,6	1	1,6	1
Soure	1,3	1	1,3	1	1,4	1	1,7	1	1,6	1	1,6	1

Fonte: Elaborado pela autora.

Neste caso, não foram definidos fatores, apenas parâmetros climáticos. Portanto, o índice climático municipal resulta da média aritmética das alterações na precipitação, temperatura e elevação do nível do mar para cada cenário. Para esta última variável, foram utilizados dados de projeções regionais de elevação do nível do mar para Belém (PA), conforme o IPCC AR6 (GARNER et al., 2023), para ambos os cenários de emissões, conforme descrito na Seção 5.1.2. A fim de compreender todo o intervalo provável de elevação do nível do mar projetado para 2050 na região, foram considerados os valores mínimo e máximo verificados entre os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (ou SSP2-4.5 e SSP5-8.5, neste caso). Assim, para o cenário RCP4.5, considerou-se um aumento de 0,15 m, e para o RCP8.5, um aumento de 0,32 m. Para atribuir pesos aos valores, foi utilizado como base o ranqueamento definido por Zanetti et al. (2016), sendo de ordem 2 para o RCP4.5 e 3 para o RCP8.5.

6 RESULTADOS

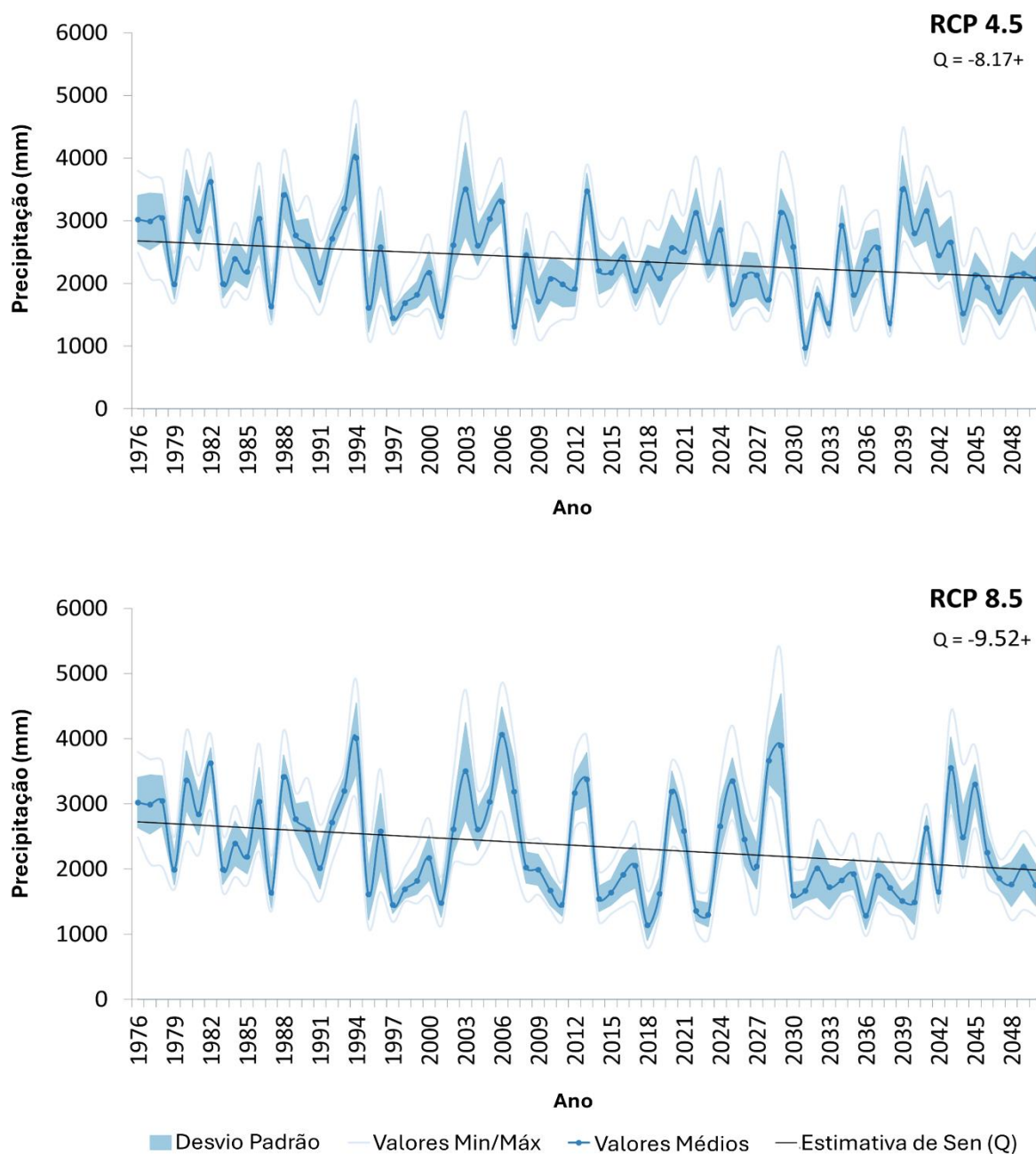
6.1 Mudanças históricas e projetadas de variáveis climáticas para 2050

Os valores médios anuais de PREC e TP2m, calculados a partir de 65 pontos de grade para os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5, foram utilizados para identificar tendências históricas e projetadas dessas variáveis climáticas na área de estudo. As Figuras 11 e 12 mostram a tendência para toda a série temporal considerada no estudo (1976-2050), exibindo não apenas os valores médios, mas também medidas descritivas como desvio padrão, valores máximos e mínimos entre os pontos, bem como a magnitude da tendência estimada pelo método da inclinação de Sen. Ambas as variáveis apresentam tendências significativas para os dois cenários de emissões, de acordo com os resultados do Teste de Mann-Kendall (Tabela 13). No entanto, a precipitação média anual mostra uma tendência negativa, enquanto as temperaturas médias anuais mostram uma tendência positiva. Como esperado, a magnitude dessas tendências em ambos os casos é exacerbada no cenário de altas emissões (RCP8.5).

Para o período histórico (1976-2005), os valores de PREC variam de 1.108 mm a 4.904 mm, enquanto para o futuro próximo (2021-2050), variam de 685 mm a 4.459 mm para o cenário RCP4.5 e de 917 mm a 5.322 mm para RCP8.5. No caso dos valores de TP2m, eles variam de 23,2 °C a 31,5 °C para o período histórico, e de 23,5 °C a 33,8 °C para o cenário RCP4.5 e de 24,1 °C a 33,5 °C para o cenário RCP8.5. Em ambas as variáveis, percebe-se o aumento da amplitude entre máximos e mínimos em relação ao período histórico.

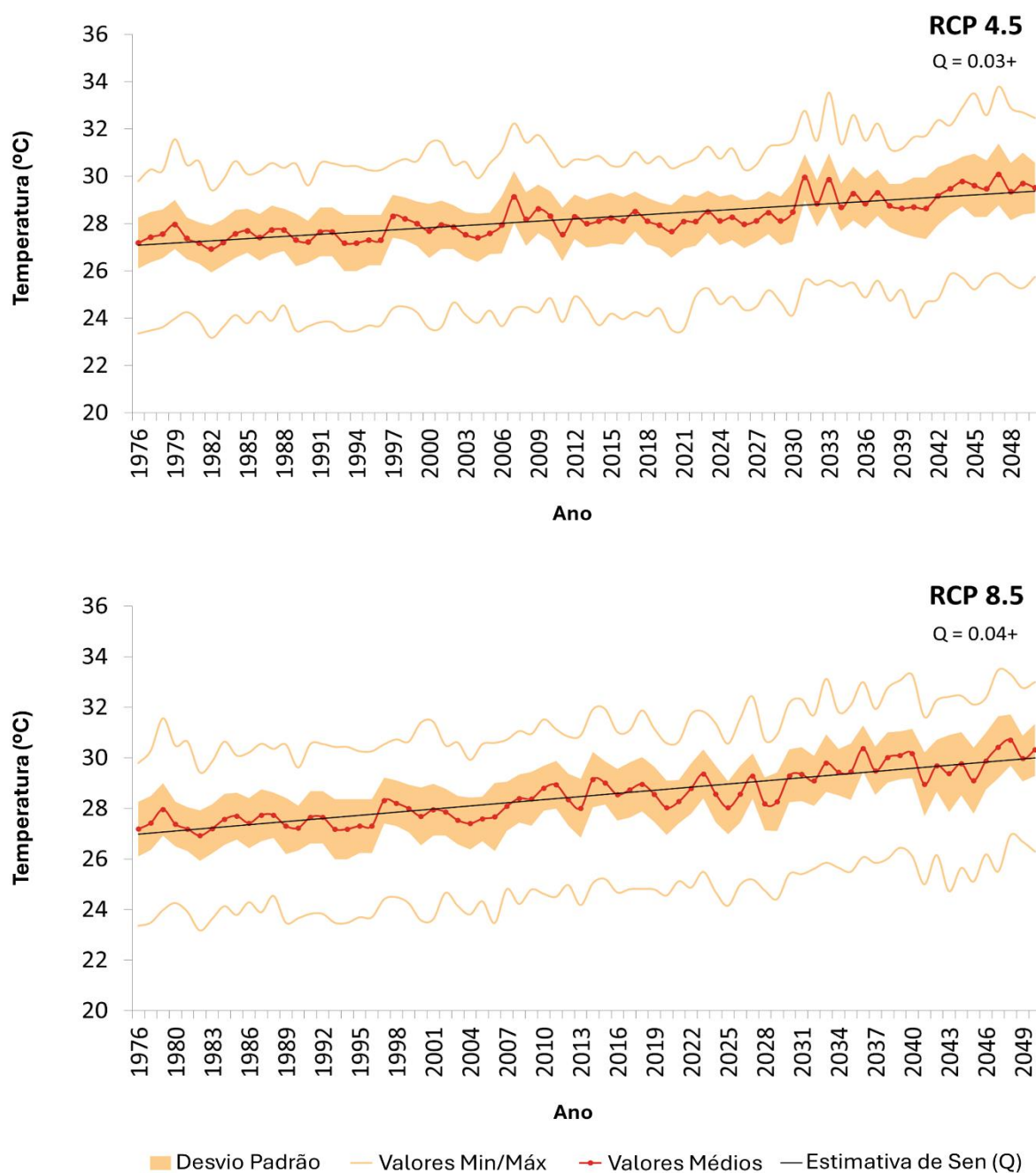
A PREC média anual para o período histórico (1976-2005) é de aproximadamente 2.579 mm (± 679), enquanto para o futuro próximo (2021-2050) estima-se que a média anual seja de 2.248 mm (± 604) para o RCP4.5 e 2.174 mm (± 723) para o RCP8.5, correspondendo a reduções de 331 mm e 405 mm (12,8% a 15,7%), respectivamente. Por outro lado, a média anual de TP2m para o período histórico é de 27,5 °C ($\pm 0,33$), e 28,9 °C ($\pm 0,66$) para o período projetado do cenário RCP4.5 e 29,49 °C ($\pm 0,71$) para o RCP8.5, correspondendo ao aumento entre 1,4 e 1,9 °C, em comparação ao período histórico.

Figura 11 – Precipitação média anual na série histórica (1976-2005) e projeções RCP4.5 e RCP8.5 (até 2050)



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 – Temperatura média anual na série histórica (1976-2005) e projeções RCP4.5 e RCP8.5 (até 2050)



Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 13 apresenta, primeiramente, quatro resultados obtidos pelos testes de Mann-Kendall e de inclinação de Sen para toda a série temporal dos dados (1976-2050), revelando tendências estatisticamente significativas para ambas as variáveis e os cenários de emissões.

Com a aplicação dos testes de tendência para valores médios das variáveis de interesse, foi possível determinar a significância das tendências observadas nos gráficos anteriores e identificar a magnitude dessas tendências, considerando um nível de significância de 5%. A PREC exibiu tendências negativas com uma maior taxa de redução para os cenários RCP8.5. Observa-se que, para este cenário, uma diminuição de 704 mm é esperada até 2050 (cerca de 27%) em relação à média do período de referência. Por outro lado, TP2m exibiu tendências positivas com uma maior taxa de crescimento para o RCP8.5, indicando um aumento na temperatura média de 3,1 °C até 2050.

Tabela 13 – Resultados do Teste de Mann-Kendall e do Teste de Sen para os valores médios das variáveis, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 e diferentes séries temporais

Variável	Estatística S	p-valor	Sen	Significância (S/NS)
(1976-2050)				
PREC – RCP4.5	-456	0.04	-8.17 mm/ano	S
PREC – RCP8.5	-521	0.02	-9.52 mm/ano	S
TP2m – RCP4.5	1846	3.16×10^{-17}	0.03 °C/ano	S
TP2m – RCP8.5	1978	1.52×10^{-19}	0.04 °C/ano	S
(1976-2005)				
PREC – Hist	-65	0.25	-18.43 mm/ano	NS
TP2m – Hist	92	-0.10	0.01 °C/ano	NS
(2021-2050)				
PREC – RCP4.5	-40	0.49	-11.11 mm/ano	NS
PREC – RCP8.5	-19	0.75	-4.47 mm/ano	NS
TP2m – RCP4.5	253	6.83×10^{-6}	0.06 °C/ano	S
TP2m – RCP8.5	244	1.45×10^{-5}	0.06 °C/ano	S

Legenda: Estatística S: valores negativos - tendências de diminuição, valores positivos - tendências de aumento; p-valor: < 0,05 - tendências significativas, p-valor > 0,05 - tendências não significativas; inclinação de Sen: representa a taxa de tendência; significância: S - tendências significativas, NS - tendências não significativas. Fonte: Elaborado pela autora.

Os testes de tendência também foram aplicados para avaliar uma série de dados de 30 anos, a fim de identificar diferenças entre o clima passado (1961-1990) e o clima do futuro próximo (2021-2030) para os dois cenários de emissões. Embora os resultados para PREC não tenham indicado significância estatística, para os três diferentes cenários a tendência de redução

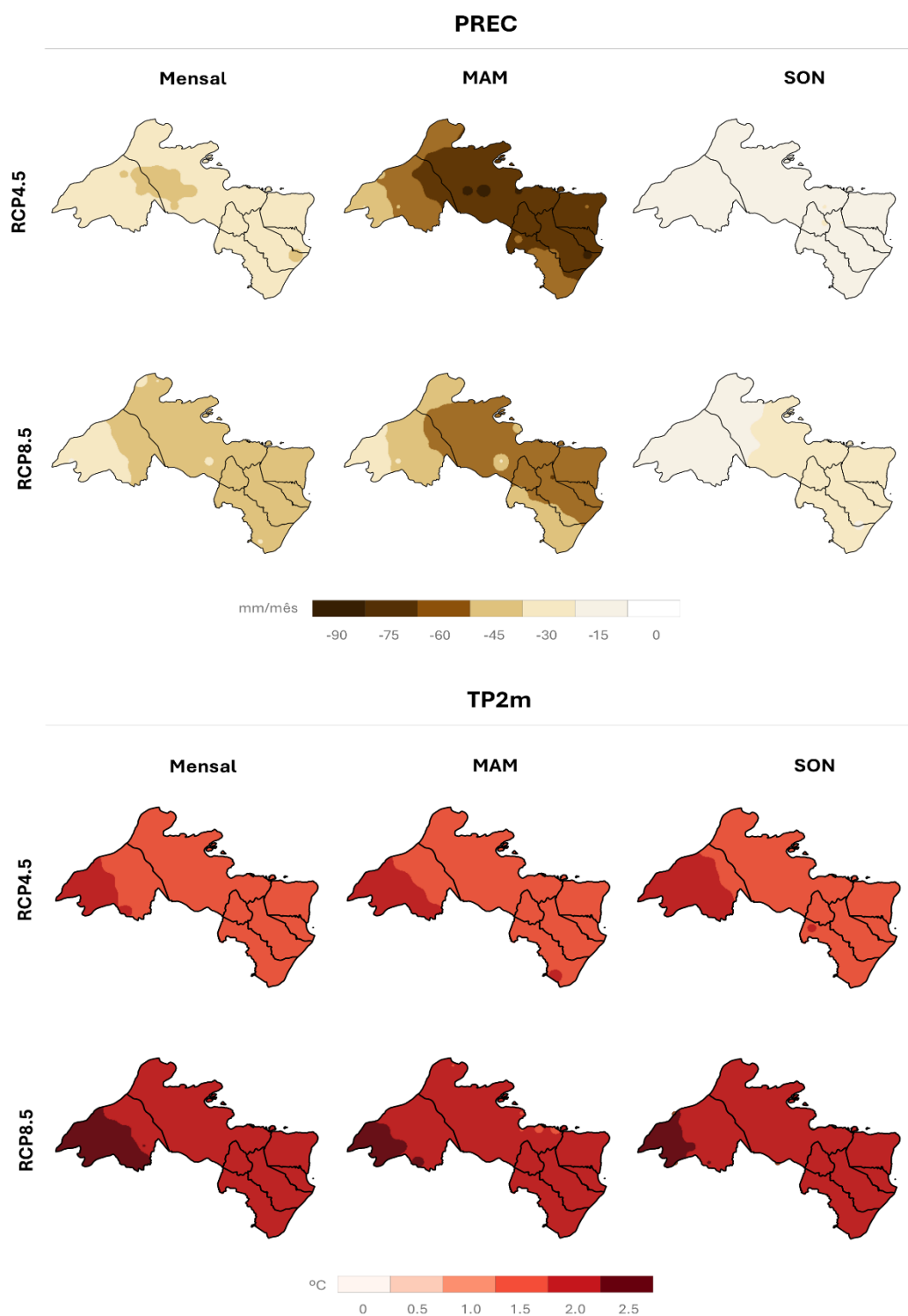
permanece evidente. Por outro lado, a taxa de redução da precipitação anual para o período histórico foi maior em comparação com as taxas para os cenários de emissões, com destaque para o RCP8.5, que obteve a menor taxa de redução. Para este cenário, observou-se o maior p-valor, que pode estar associado à variabilidade dos dados ao longo dos anos, resultante dos valores médios anuais dos 65 pontos de grade distribuídos na área de estudo. Almeida et al. (2017) observaram uma redução anual significativa da precipitação de 22,62 mm/ano em Soure, com uma taxa próxima à obtida neste estudo para a tendência histórica (-18,43 mm/ano).

Para TP2m, os três cenários apresentaram tendências de aumento; no entanto, para o período histórico, foi considerada uma tendência não significativa. O cenário RCP8.5 apresentou uma taxa ligeiramente superior ao RCP4.5. Esses resultados destacam uma tendência de aquecimento significativo para ambos os cenários de emissões e corroboram com a literatura que mostra o aumento constante da temperatura global ao longo dos anos (IPCC, 2021).

A Figura 13 ilustra a distribuição espacial das mudanças mensais e sazonais entre a série histórica (1976-2005) e a série projetada (2021-2050) para os diferentes cenários de emissões. Assim como os resultados na escala de tempo anual, são projetados cenários de redução da precipitação média e aumento da temperatura média mensal, tanto nos meses úmidos quanto nos secos, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Maior redução da precipitação é observada no período chuvoso para o RCP4.5, especialmente nas porções norte-nordeste da ZCBE do arquipélago, com reduções entre 75 e 90 mm/mês. A maior redução observada foi no município de Chaves, de cerca de 84 mm, o que corresponde a 21% da média histórica dos meses chuvosos nesse ponto. Por outro lado, no período seco e para médias mensais, o RCP8.5 mostrou valores mais negativos, indicando que em cenários de alta emissão, as porções norte-nordeste e leste da área experimentarão as maiores reduções mensais e períodos secos mais intensos. Além disso, é importante considerar que, embora os períodos secos apresentem valores mensais de precipitação mais baixos, as diferenças médias entre o período histórico e o RCP8.5 projetado mostram que, em alguns locais, a precipitação pode ser 46% menor em comparação com a média histórica.

Figura 13 – Diferenças entre períodos projetado (2021-2050) e histórico (1976-2005) dos valores médios mensais e dos meses mais chuvosos e secos para PREC e TP2m e diferentes cenários de emissões



Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto às mudanças projetadas na temperatura mensal, um padrão comum é observado entre os cenários, com aumentos acima de 1 °C para toda a área, sendo mais intensos para o RCP8.5. Diferenças notáveis são observadas para o município de Afuá em todos os cenários, com aumentos de temperatura acima de 2 °C em comparação com a média histórica, particularmente na porção sudoeste. Embora as maiores médias de temperatura mensal dos pontos estejam associadas ao período seco, seja para dados históricos ou projetados, observou-se que, para o cenário de alta emissão, as diferenças médias para todos os municípios foram maiores para o cenário mensal, em comparação com as diferenças médias nos períodos chuvoso e seco. Consequentemente, é possível que os períodos de transição entre regimes mais chuvosos e mais secos experimentem um aumento maior na temperatura. Embora o estudo de Marengo et al. (2012) tenha considerado períodos chuvosos e secos distintos, prevendo uma diminuição de 20-30% na precipitação no período chuvoso (verão austral) e de 30-50% no período seco (inverno austral), os resultados obtidos neste estudo são semelhantes e podem sugerir uma explicação para o que foi relatado acima.

6.2 A vulnerabilidade socioambiental aos cenários climáticos de municípios do Arquipélago do Marajó

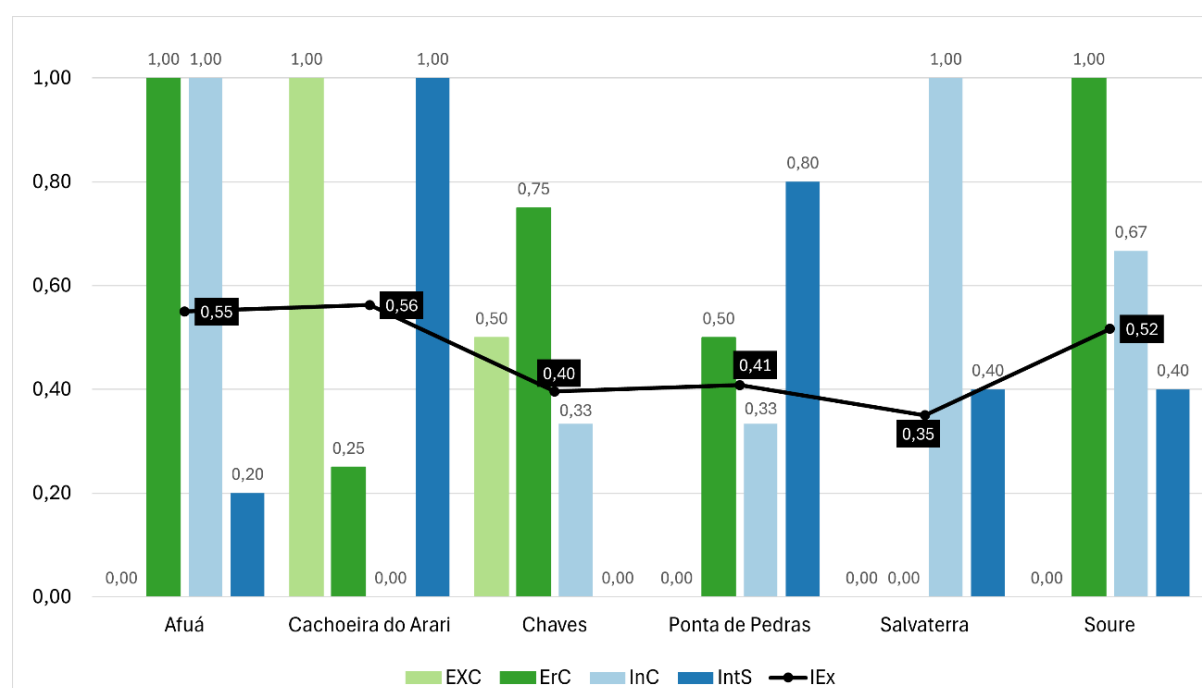
Para caracterizar a vulnerabilidade atual dos municípios da área de estudo, foi aplicado o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC), que abrange três elementos fundamentais: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. A análise do desempenho dos municípios em cada um desses elementos é crucial para identificar os fatores que exercem maior influência na vulnerabilidade do território e da população e que, consequentemente, podem potencializar os impactos das alterações do clima no futuro.

6.2.1 Os elementos fundamentais de vulnerabilidade

O índice de exposição (IEx) abrange quatro fatores relacionados a ameaças associadas à elevação do nível do mar, cujos parâmetros considerados remetem às características ambientais e às forçantes associadas. A Figura 14 apresenta os valores normalizados (de 0 a 1) obtidos para cada fator de exposição, calculados a partir das médias dos seus respectivos parâmetros para cada município, além dos valores do índice de exposição, que representam a média entre os fatores. Os resultados indicam níveis baixos a moderados de exposição, sendo

Cachoeira do Arari o município mais exposto aos perigos costeiros, seguido de Afuá e Soure. Enquanto Salvaterra foi identificado como o menos exposto. É importante relembrar que a metodologia adotada permite a comparação entre os municípios, e que valores iguais a zero não implicam na ausência de determinado perigo.

Figura 14 – Valores municipais normalizados de fatores do Índice de Exposição (IEx)



Fonte: Elaborado pela autora.

O fator de exposição costeira (ExC) identificou Cachoeira do Arari como o município mais exposto, devido à grande parte de sua área estar situada em altitudes inferiores a 10 metros e com baixa cobertura vegetal nativa, embora todos os municípios tenham uma cobertura vegetal expressiva (acima de 65% da área total). A baixa cobertura em Cachoeira do Arari resulta da aplicação de pesos específicos nos dados municipais. A maioria dos municípios, exceto Chaves, apresentou valores normalizados iguais a zero, indicando menor exposição.

Sobre o fator de erosão costeira (ErC), Soure e Afuá foram os municípios mais afetados, enquanto Salvaterra apresentou a menor exposição. Com a altura de ondas sendo um parâmetro comum aos municípios e ranqueado como muito baixo (peso 1), as feições geomorfológicas se destacaram como o principal parâmetro de diferenciação.

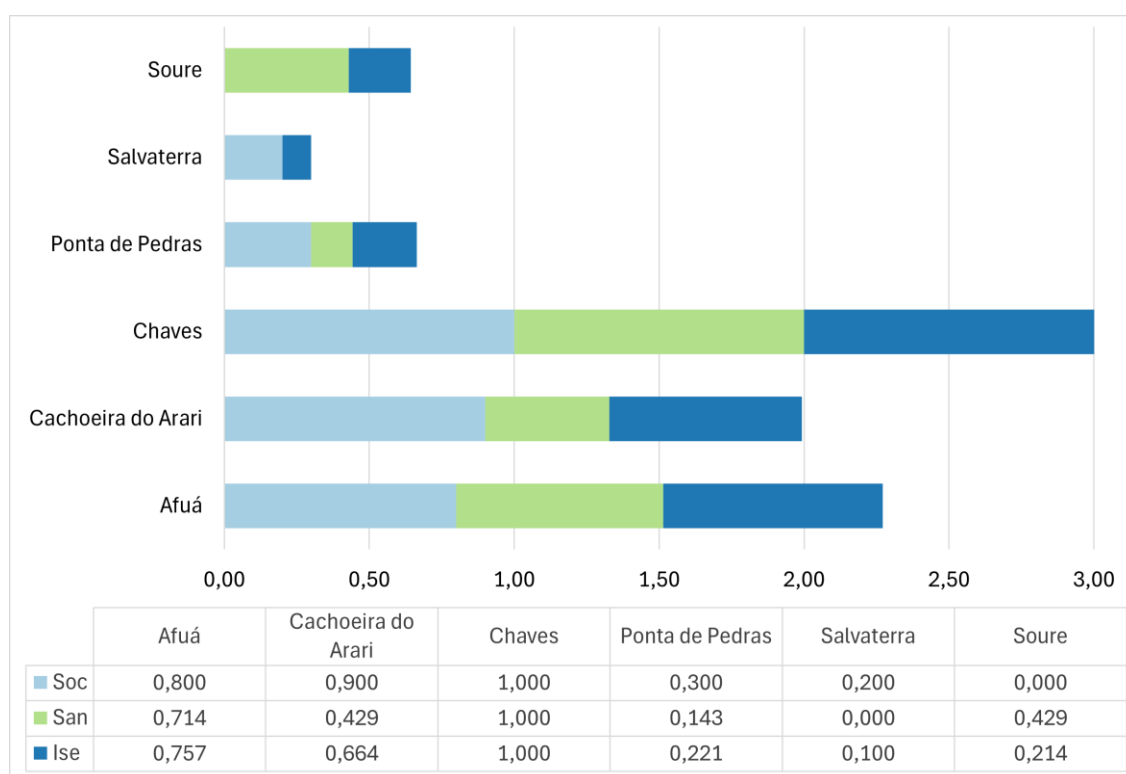
Para o fator de inundação costeira (InC), Afuá e Salvaterra apresentaram a maior exposição. Em ambos os municípios, a proporção de corpos d'água em relação à área total

municipal e a frequência anual de eventos extremos de chuva exerceram uma influência significativa. Já Cachoeira do Arari apresentou a menor exposição.

Por fim, para o fator de intrusão salina (IntS), Cachoeira do Arari apresentou a maior exposição devido ao nível estático médio dos poços mais próximo da superfície e a característica local de regime de mesomares. Chaves foi considerado o município menos exposto. Chaves e Afuá receberam valores iguais a zero para o parâmetro nível estático médio dos poços, pois não possuem poços cadastrados ativos para uso humano no SIAGAS. Portanto, a amplitude de maré foi o parâmetro determinante para identificar Chaves como o município menos exposto, uma vez que está sob regime de macromaré.

Quanto ao Índice de Sensibilidade (ISe), os resultados indicam que Chaves é o mais sensível entre os municípios, com índice muito alto, seguidos de Afuá e Cachoeira do Arari, com índices altos. Enquanto Salvaterra apresentou a menor sensibilidade (Figura 15). De modo geral, observa-se um nível de sensibilidade semelhante entre ambos os fatores, indicando que os municípios mais sensíveis em relação às suas condições sociodemográficas, também apresentam alta sensibilidade em termos de infraestruturas de saneamento, e vice-versa.

Figura 15 – Valores municipais normalizados dos fatores e do Índice de Sensibilidade (Ise)



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos para o Índice de Capacidade Adaptativa (ICAd) variaram de muito baixo a alto (Tabela 14). Neste caso, quanto mais próximos os valores estão de 1, menor é a capacidade dos municípios de desenvolver estratégias de prevenção aos perigos costeiros. Chaves, Ponta de Pedras e Soure possuem os maiores índices, revelando uma capacidade adaptativa baixa. No caso de Soure, o fato de não haver informações sobre a presença de instituições de segurança no município foi determinante para enquadrá-lo em situação de baixa capacidade adaptativa. Já Salvaterra apresenta o melhor desempenho entre os municípios.

Tabela 14 – Valores municipais normalizados dos fatores e do Índice de Capacidade Adaptativa (ICAd)

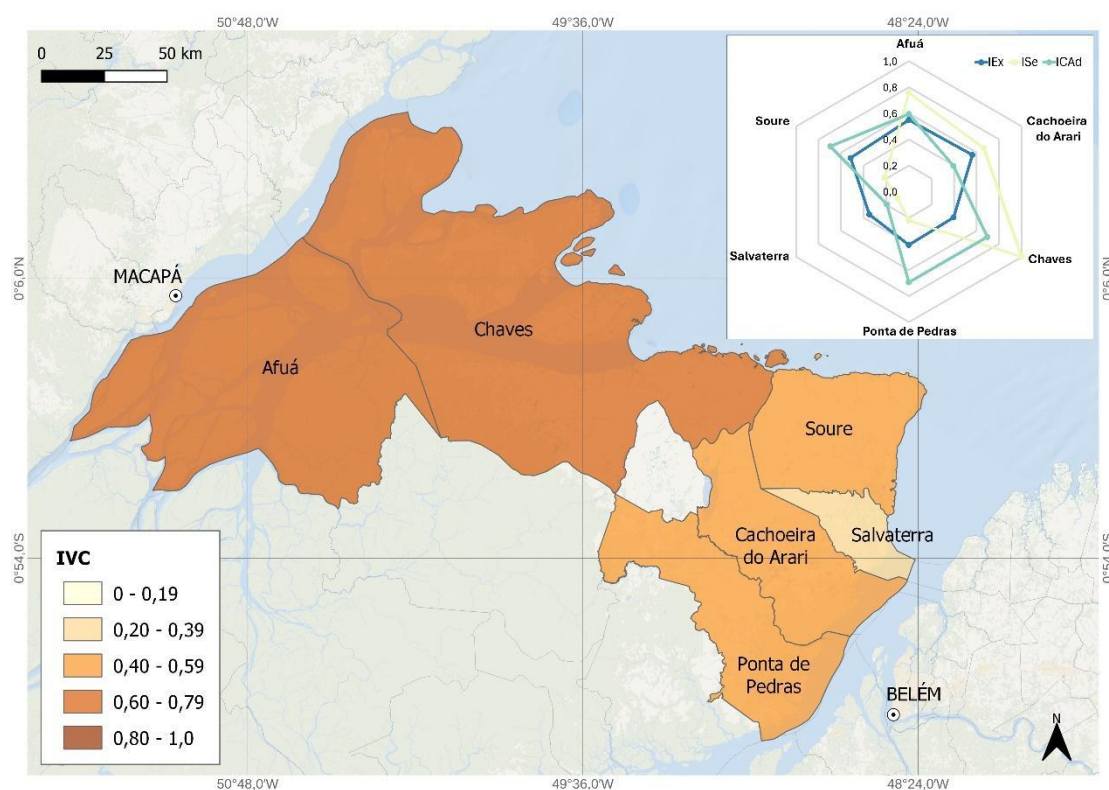
Município	GesR	ISH	ICAd
Afuá	0,80		0,59
Cachoeira do Arari	0,40		0,39
Chaves	1,00	0,39	0,69
Ponta de Pedras	1,00		0,69
Salvaterra	0,00		0,19
Soure	1,00		0,69

Fonte: Elaborado pela autora.

6.2.2 Índice de Vulnerabilidade Costeira

A Figura 16 apresenta a distribuição espacial dos resultados do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) para cada município. Afuá e Chaves se destacam como os mais vulneráveis, com valores que indicam alta vulnerabilidade. O gráfico de radar ilustra a relação entre os elementos fundamentais, evidenciando que a alta sensibilidade e a baixa capacidade adaptativa (valores elevados) foram determinantes para a vulnerabilidade elevada nesses municípios. Em contrapartida, Salvaterra apresentou baixa vulnerabilidade, atribuída aos menores valores para os três subíndices, em comparação com os demais municípios. Os outros municípios apresentaram vulnerabilidade moderada.

Figura 16 – Valores municipais do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC)



Fontes: Bases cartográficas: limites municipais – IBGE (2023); imagem de fundo - ESRI Ocean. Sistema de Coordenadas Geográficas – SIRGAS 2000. Elaborado pela autora.

6.2.3 Índices de Cenários Climáticos

A partir das diferenças sazonais entre o período histórico e futuro para as variáveis climáticas, bem como a elevação do nível do mar, em ambos os RCPs, foram calculados os Índices de Cenários Climáticos, resultando em seis cenários, e apresentados na Tabela 15. Os resultados obtidos identificaram que Cachoeira do Arari foi o município que apresentou alta vulnerabilidade às ameaças climáticas futuras, em especial, para ambos os cenários de emissões considerando a média mensal e o período chuvoso. Já para o período seco para ambos os cenários, o município de Ponta de Pedras será mais afetado pelas alterações do clima. Destaque para o cenário RCP8.5 geral (ICC) em que a maioria dos municípios apresentaram elevadas vulnerabilidades climáticas.

Tabela 15 – Valores normalizados por município para os diferentes cenários climáticos

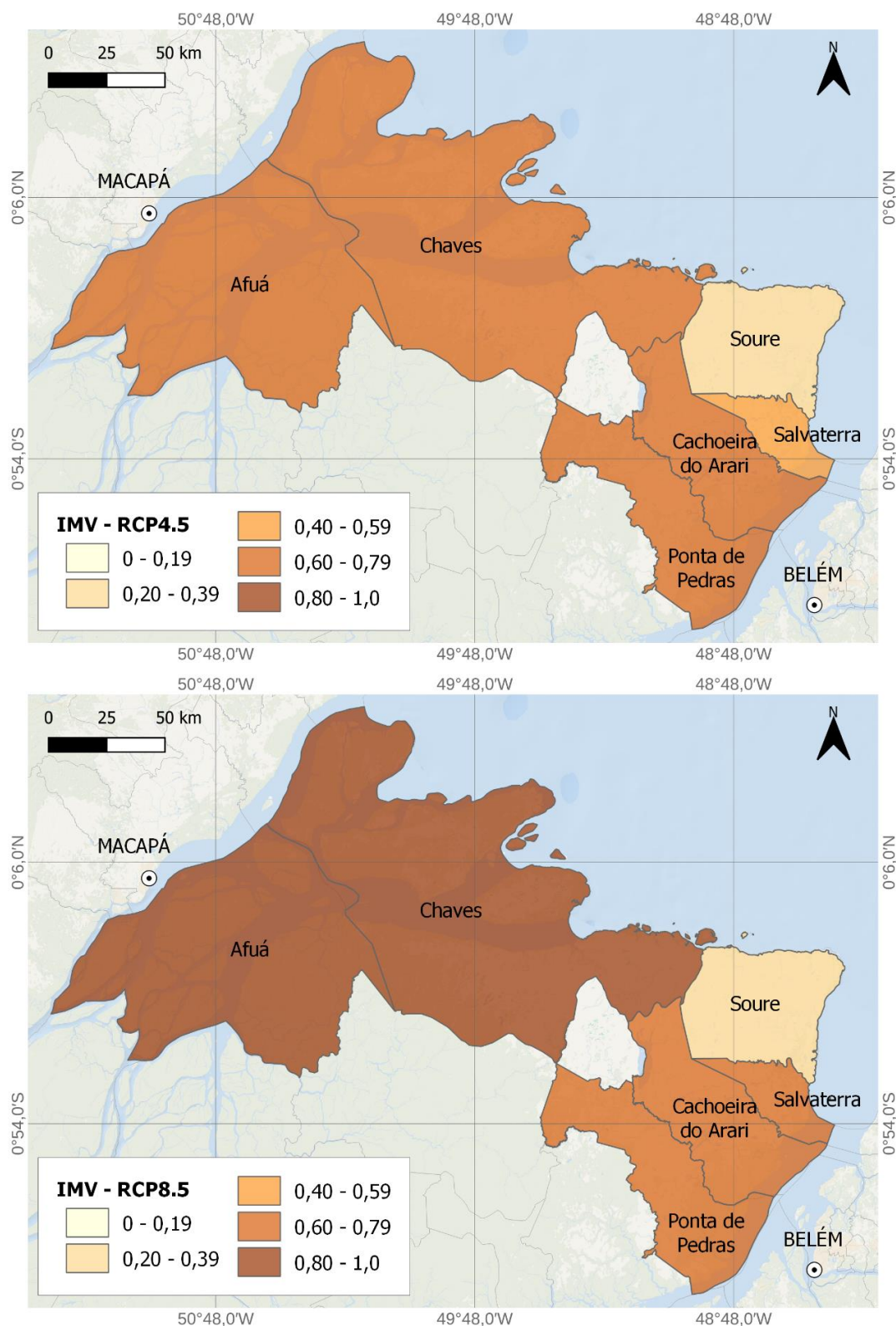
Município	ICC (RCP4.5)	ICC (RCP8.5)	Chuvoso (RCP4.5)	Chuvoso (RCP8.5)	Seco (RCP4.5)	Seco (RCP8.5)
Afuá	0,83	1,0	0,67	0,50	0,50	0,50
Cachoeira do Arari	1,000	1,0	1,00	1,00	0,50	0,25
Chaves	0,67	1,0	1,00	0,00	0,00	0,25
Ponta de Pedras	0,83	1,0	0,67	0,50	1,00	1,00
Salvaterra	0,67	1,0	1,00	0,50	0,50	0,00
Soure	0,000	0,0	0,00	0,50	0,50	0,50

Fonte: Elaborado pela autora.

6.2.4 Índice Municipal de Vulnerabilidade

A combinação entre o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) e o Índice de Cenários Climáticos (ICC) foi primeiramente atribuída às diferenças climáticas médias mensais para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e a distribuição espacial dos resultados é apresentada na Figura 17. No cenário RCP 4.5, os municípios de Ponta de Pedras e Cachoeira do Arari se juntam à Afuá e Chaves (que já haviam apresentado vulnerabilidade alta com o IVC) como os municípios com alta vulnerabilidade. Salvaterra também apresenta um aumento na vulnerabilidade. Já para RCP 8.5, Afuá e Chaves apresentam vulnerabilidade muito alta. Para ambos os cenários, o município de Soure apresentou a menor vulnerabilidade.

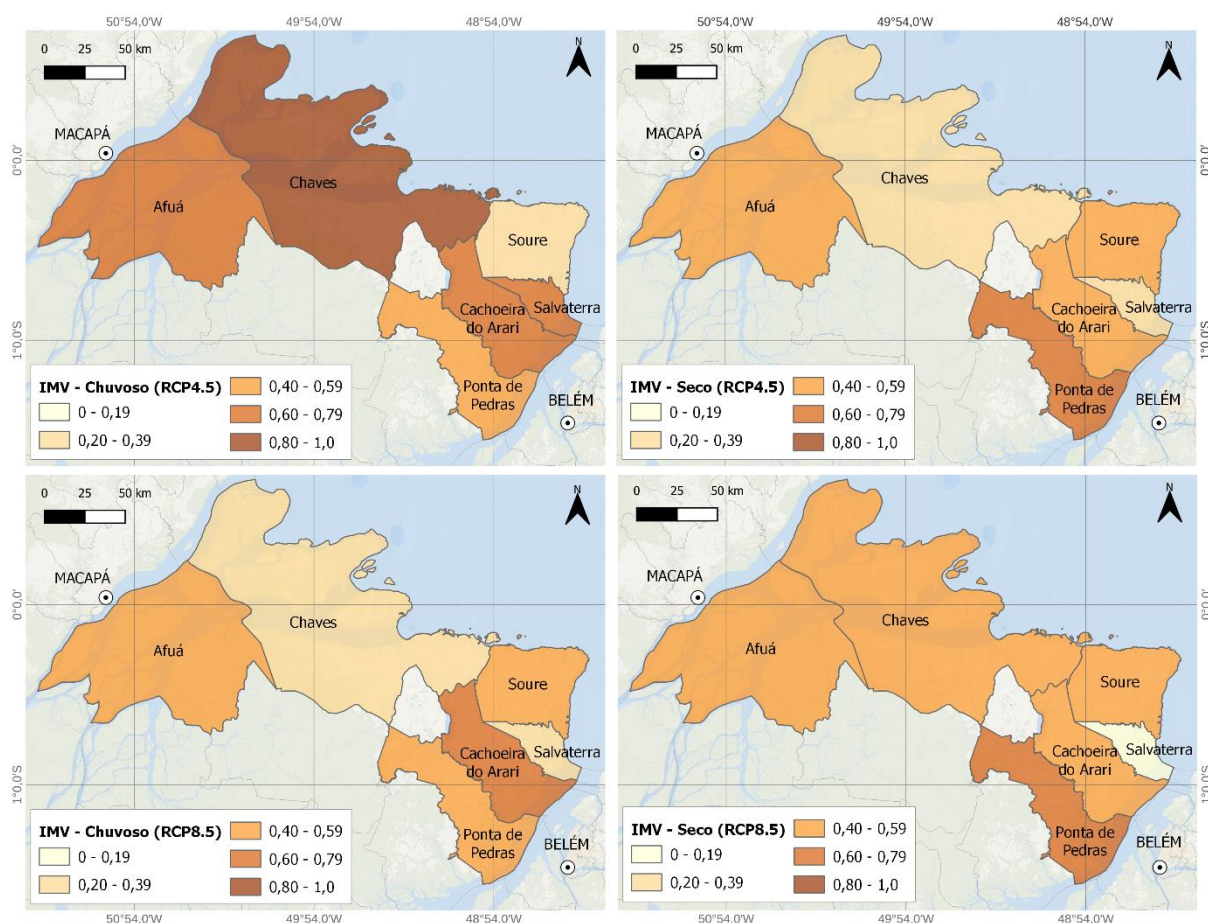
Figura 17 – Valores do Índice Municipal de Vulnerabilidade para os cenários climáticos mensais sob RCP4.5 e RCP8.5



Fonte: Bases cartográficas: limites municipais – IBGE (2023); imagem de fundo - ESRI Ocean. Sistema de Coordenadas Geográficas – SIRGAS 2000. Elaborado pela autora.

Os IMVs foram calculados também sob alterações climáticas para os períodos chuvoso e seco, considerando os cenários de emissões, e os resultados são apresentados na Figura 18 por meio da distribuição espacial dos dados. O cenário mais significativo foi o RCP4.5 para o período chuvoso, em que Chaves apresenta a maior vulnerabilidade, embora Afuá, Cachoeira do Arari e Salvaterra também demonstrem alta vulnerabilidade. Para o mesmo período, porém para RCP8.5, Cachoeira do Arari apresenta maior vulnerabilidade. Já para o período chuvoso e ambos os cenários de emissões Ponta de Pedras apresenta maior vulnerabilidade.

Figura 18 – Valores municipais do Índice Municipal de Vulnerabilidade para os cenários sazonais de RCP4.5 e RCP8.5



Fonte: Bases cartográficas: limites municipais – IBGE (2023); imagem de fundo - ESRI Ocean. Sistema de Coordenadas Geográficas – SIRGAS 2000. Elaborado pela autora.

7 DISCUSSÕES

Cada município é um sistema formado por subsistemas complexos e abertos, pois são dinâmicos, interconectados e ultrapassam o limite municipal. Esses subsistemas abrangem aspectos sociais, econômicos, ambientais e infraestruturais que, em conjunto, moldam a realidade local. Nesse contexto, a análise da vulnerabilidade socioambiental enfrenta o desafio de sintetizar essa complexidade em modelos lineares.

O Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV) tem sido amplamente utilizado por pesquisadores e gestores em diversos níveis (regionais, microrregionais, estaduais) como uma ferramenta para auxiliar na formulação de políticas públicas voltadas à vulnerabilidade socioambiental diante das mudanças climáticas (ex. MENEZES et al., 2018; SANTOS et al., 2021). A replicabilidade e adaptação do índice para diferentes contextos têm gerado avanços importantes, embora grande parte das aplicações ainda se concentre na área da saúde. Neste estudo, propõe-se uma nova abordagem ao IMV, integrando o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) a uma componente climática, com ênfase nos cenários projetados de alterações climáticas para os períodos chuvoso e seco até 2050.

7.1 Vulnerabilidade socioambiental dos municípios frente às mudanças do clima

Com base nas projeções climáticas, as mudanças esperadas indicam uma tendência significativa de redução na precipitação anual (PREC) e um aumento na temperatura média anual (TP2m) sob os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5, com esses padrões se estendendo até 2050. A redução na precipitação é mais acentuada no cenário RCP8.5, enquanto o aumento da temperatura é significativo em ambos os cenários, sendo mais intenso também no RCP8.5, alcançando um aumento de até 3,1 °C. Marengo et al. (2012) identificaram uma tendência semelhante de aumento de temperatura, projetando uma elevação de 3,5 °C para o mesmo período. No cenário RCP4.5, estima-se um aumento médio de temperatura de 2,2 °C até o final do período, valor superior à média de aquecimento global projetada para o mesmo RCP para 2100 (IPCC, 2013).

Sobre as alterações sazonais, espera-se uma redução de precipitação durante o período chuvoso (MAM) nos próximos anos, especialmente no cenário RCP4.5. No entanto, para o período seco (SON), as projeções para o cenário de altas emissões (RCP8.5) indicam que pode haver uma redução de 50% na precipitação em comparação com a média histórica, assim como

a observada por Marengo et al. (2012). Em relação à temperatura, os cenários são bem parecidos para as diferentes variáveis temporais, de acordo com o cenário de emissões, variando de 1,5°C a 2,0 °C em RCP4.5, e predominantemente de 2,0 °C a 2.5°C para RCP8.5. Com destaque para Afuá, com grande parte do seu território com anomalias acima de 2,0 °C para o cenário de altas emissões, em especial, em relação à média mensal. Embora este estudo tenha se baseado no trabalho de Lopes et al. (2013) para definir os trimestres mais chuvosos e secos da região, é importante considerar que as mudanças projetadas na precipitação e na temperatura podem alterar esses períodos com o tempo, potencialmente prolongando ou adiantando sua ocorrência. Portanto, para uma análise sazonal mais detalhada, recomenda-se agrupar os meses em períodos trimestrais, permitindo uma identificação mais ampla das mudanças no clima.

Os índices de cenários climáticos (ICC) calculados para os municípios mostram alta vulnerabilidade na maioria deles, especialmente sob o cenário de RCP8.5, exceto em Soure. Cachoeira do Arari destacou-se pela alta vulnerabilidade em ambos os cenários de emissões, tanto para o período mensal quanto para o chuvoso. Já Ponta de Pedras será o mais afetado durante o período seco, tanto para RCP4.5 quanto para RCP8.5.

Os resultados do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) revelam que fatores sociais, de infraestruturas e governança são determinantes para a vulnerabilidade dos municípios estudados frente aos perigos costeiros. Chaves e Afuá apresentaram índices altos de vulnerabilidade, Cachoeira do Arari, Soure e Ponta de Pedras índices moderados, e Salvaterra índice baixo.

Quanto ao Índice de Exposição (IEx), os resultados indicam níveis baixos a moderados entre os municípios, com Cachoeira do Arari o mais exposto aos perigos costeiros, seguido por Afuá e Soure. Em relação ao fator de exposição costeira, Cachoeira do Arari apresentou o maior nível de exposição. Embora predomine a proporção da vegetação nativa não florestal na região, porções mais próximas à costa na maioria dos municípios, em especial em Soure, bem como parte do território de Afuá, são cobertas por formações florestais bem preservadas, como os manguezais e florestas alagáveis. Isso reflete também para o caso de Cachoeira do Arari, representado como o município mais exposto, pois, embora em menor proporção há a cobertura de formações florestais próximas à costa do município. (Figura 5, Seção 4.5) Essas formações podem atuar como importantes barreiras naturais contra os perigos costeiros, mesmo em áreas de baixa elevação, pois são adaptadas a esses ambientes sujeitos às forças costeiras (TOMAZ, et al., 2019; BERNARDINO et al., 2022), capazes de atenuar a energia das ondas e reduzir ou evitar os impactos da erosão costeira (RABELO, et al. 2018).

As alterações climáticas podem implicar também em desafios para a conservação dos ecossistemas costeiros da região. O aumento da temperatura e a redução da precipitação, somados à elevação do nível do mar, poderão provocar mudanças nas taxas de crescimento, produtividade e distribuição geográfica de diferentes espécies de manguezais, incluindo a substituição de espécies ambientalmente sensíveis por aquelas que possuem maior tolerância climática (FRIESS et al., 2022). Em cenários de elevação do nível do mar, pode ocorrer a migração dessas vegetações. No caso dos manguezais, cuja distribuição é limitada à estreita zona entremarés, sua migração pode ser reduzida em casos de locais que tenham estruturas de contenção da costa e atuem como barreiras para o crescimento (TOMAZ et al., 2019).

Quanto ao fator de erosão costeira, Soure e Afuá registraram níveis muito altos, enquanto Chaves apresentou um nível alto. Tanto Soure quanto Chaves registraram ocorrências de erosão nos últimos 10 anos (CEPED-UFSC, 2024), assim como Ponta de Pedras, que, apesar de apresentar exposição moderada, também teve registros. É necessário prestar atenção à situação de Afuá. Embora não haja registros de ocorrências no Atlas Digital de Desastres, o município é afetado pelo fenômeno de terras caídas, comum na bacia do Amazonas e majoritariamente influenciado pela ação dos rios. Segundo Bandeira et al. (2018), esse fenômeno difere do processo de erosão fluvial por estar associado a movimentos gravitacionais relacionados a grandes deslizamentos de terra. De acordo com Santos et al. (2022), a superposição entre processos erosivos causados por agentes fluviais e marinhos pode potencializar as taxas de erosão em determinados locais e representam um desafio para as análises de vulnerabilidade.

No que diz respeito ao fator de inundação costeira, Afuá e Salvaterra são os municípios mais expostos, devido à alta proporção de corpos d'água em relação à área municipal e à frequência dos eventos. Ponta de Pedras e Chaves, que apresentam exposição moderada, possuem registros de inundações nos últimos 10 anos (CEPED-UFSC, 2024). Cachoeira do Arari foi considerado o município com a menor exposição. No entanto, apesar disso, é o município com o maior número de desastres ocasionados por inundações, totalizando cinco ocorrências nos últimos sete anos (CEPED-UFSC, 2024). Isso sugere que os parâmetros selecionados para o fator de inundação costeira podem não ter sido suficientes para representar a realidade. Assim como no caso da erosão, Santos et al. (2022) destacam a dificuldade de analisar a vulnerabilidade à inundação costeira devido à influência tanto de forçantes fluviais quanto oceanográficas.

Em relação ao fator de intrusão salina, Cachoeira do Arari apresentou a maior exposição devido ao nível estático médio dos poços, que estão mais próximos da superfície, e ao regime de mesomarés característico da região. Embora os poços do município estejam localizados em áreas com altitudes entre 1 e 10 metros, eles se distribuem em porções mais interiores do território municipal. Em contrapartida, Ponta de Pedras, que também apresentou exposição elevada, merece atenção especial. Os poços desse município são utilizados para o abastecimento urbano e estão situados próximos ao baixo curso do rio Marajó-Açu, um importante sistema fluvial local que deságua na baía do Marajó. Além disso, esses poços estão em altitudes de até 10 metros, sendo que um deles se encontra sobre depósitos aluvionares da planície fluvial, com condição de aquífero não confinado, o que o torna mais suscetível ao avanço da cunha salina (ARAÚJO et al., 2023).

Outro ponto importante é o município de Salvaterra, que apresentou exposição moderada e possui alguns poços sem uso definido, mas com níveis estáticos mais elevados em comparação aos demais, chegando a 25 m. Em contraste, os poços destinados ao abastecimento urbano no município têm níveis estáticos mais próximos da superfície. A variabilidade dos dados influenciou na média municipal considerada para o cálculo do fator. Além disso, os poços em Salvaterra, assim como em Soure, estão localizados próximos à costa e ao curso do rio Paracauari, nas respectivas áreas urbanas, situadas em áreas de tabuleiros, mas identificadas como estando abaixo de 10 metros de altitude pelo MDE. Os poços com informações sobre a condição do aquífero foram identificados como confinados. De acordo com Araújo et al. (2023), o aquífero confinado pode ser o mais vulnerável ao avanço da cunha salina devido ao rebaixamento do lençol freático, que forma cones de depressão quando a água bombeada supera a recarga natural do aquífero.

Além disso, Chaves foi considerado o município menos exposto à intrusão salina. No entanto, assim como em Afuá, essa baixa exposição foi determinada pela ausência de dados de poços ativos para uso humano no SIAGAS, o que traz certa limitação para a análise, já que isso não significa que não existam poços para captação de água. Outro ponto importante é sobre evidências de intrusão salina em uma região próxima aos municípios. Silva Júnior et al. (2022) relataram que no arquipélago de Bailique, localizado ao norte do município de Chaves e pertencente ao Amapá, a população tem notado a salinização da água desde 2019, prejudicando o abastecimento nas comunidades. Amostras de água foram coletadas nas comunidades do arquipélago e analisadas, constatando que os níveis de salinidade ultrapassaram 0,5 ‰ (o limite para ser definida como água doce pela legislação) em todas as comunidades, chegando a 4,47

%. Portanto, é necessário aprofundar os estudos para identificar as estruturas de captação de água nesses municípios e avaliar seus níveis de exposição à intrusão salina.

Quanto aos resultados do Índice de Sensibilidade (ISe), os cenários semelhantes entre ambos os fatores indicam que os municípios mais sensíveis em termos de condições sociodemográficas também apresentam alta sensibilidade em relação às infraestruturas de saneamento, e vice-versa. Entre os municípios analisados, Afuá, Chaves e Cachoeira do Arari destacam-se como os mais sensíveis. Entretanto, Cachoeira do Arari possui uma condição melhor de abastecimento de água comparado aos outros dois municípios. No estudo de Lima et al. (2023), em que os autores avaliaram a vulnerabilidade social de municípios costeiros frente a eventos extremos costeiros, foram considerados apenas três municípios do arquipélago do Marajó: Chaves, Salvaterra e Soure, cuja escala de vulnerabilidade social determinou situação muito alta para os dois primeiros e alta para o último. Os fatores de sensibilidade foram um agravante para o resultado do IVC. Outro apontamento importante, é que embora os resultados reflitam de fato os municípios mais sensíveis entre eles, os dados sociodemográficos e de infraestrutura de saneamento demonstram uma realidade comum entre os municípios, que é o enquadramento de grande parte da população entre os grupos mais vulneráveis a desastres, segundo o UNSDG (2022).

Os resultados do Índice de Capacidade Adaptativa (ICAd) demonstram que Chaves, Soure e Ponta de Pedras possuem índices altos de vulnerabilidade, portanto, estão menos preparados em termos institucionais e de governança para o enfrentamento dos riscos aos perigos costeiros. Enquanto Salvaterra apresentou um desempenho elevado. Porém, é necessário ressaltar que as informações utilizadas para avaliar o aspecto de gestão de risco dos municípios foram obtidas do MUNIC (IBGE, 2020), uma base de dados que depende das autodeclarações dos próprios gestores locais. Essa base pode apresentar um certo grau de sensibilidade às variáveis, influenciada pelas percepções individuais dos respondentes.

A conjugação entre os índices de vulnerabilidade climática e de cenários climáticos futuros revelaram um aumento na vulnerabilidade para a maioria dos municípios, com destaque para Salvaterra, por exemplo, que passou de um nível baixo de vulnerabilidade costeira para alto, considerando os cenários de alterações climáticas mensais para RCP8.5. Afuá e Chaves, no mesmo cenário, atingiram níveis considerados muito altos de vulnerabilidade. No recorte sazonal, Chaves apresentou maior vulnerabilidade para o período chuvoso e sob o cenário RCP4.5, entretanto Cachoeira do Arari obteve índices altos de vulnerabilidade para ambos os cenários de emissões. Para o período seco, o município de Ponta de Pedras apresenta a maior

vulnerabilidade para os dois cenários. No geral os resultados de IMV destacam uma tendência de maiores vulnerabilidades nos municípios da porção oeste, cenários semelhantes aos obtidos por Santos et al. (2021).

As mudanças climáticas apresentadas podem impactar a área de estudo de diversas maneiras, especialmente no que diz respeito ao regime hidrológico. A redução da precipitação na região está correlacionada com uma diminuição da vazão dos rios no arquipélago. Esse efeito pode ser intensificado pela significativa redução da precipitação nas bacias dos rios Amazonas e Tocantins, os principais sistemas fluviais que drenam a região. Segundo Brêda et al. (2020), as projeções das médias anuais de vazão para essas bacias sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5 indicam uma tendência de redução significativa, variando entre 8% e 14%. Por outro lado, os impactos das alterações do clima nos sistemas fluviais já são uma realidade, com o aumento de ocorrências de eventos extremos de seca na região. Em 2023, a bacia do rio Amazonas experienciou uma seca excepcional, resultante da combinação de baixa precipitação e temperaturas elevadas durante o ano todo (WWA, 2024). A ocorrência desse desastre afetou os municípios de Ponta de Pedra, Soure e Chaves (CEPED-UFSC, 2024).

Em ambientes estuarinos, a vazão dos rios e as oscilações das marés são os principais fatores que influenciam a variação longitudinal da salinidade e a extensão da intrusão salina, e suas contribuições estão diretamente associadas à sazonalidade (ROLLNIC et al., 2020). Segundo o estudo sobre a variabilidade espaço-temporal da salinidade no estuário do rio Pará, realizado por Rosário et al. (2016), a extensão da intrusão salina pode variar significativamente entre as estações, atingindo até 130 km à montante durante a estação seca. Com a redução da vazão dos rios, combinada com a diminuição da precipitação e a intensificação dos períodos secos, pode haver um aumento na penetração das marés e, consequentemente, uma maior intrusão salina nos corpos d'água, resultando em um maior risco de salinização do solo e das águas costeiras. Isso pode impactar o abastecimento de água para consumo e as atividades agrícolas. Em termos de infraestrutura de abastecimento de água, Afuá e Chaves, que são menos contemplados por sistemas gerais de abastecimento, têm sua sensibilidade aos perigos costeiros aumentada e podem ser fortemente impactados pelas mudanças climáticas.

Além da descarga líquida, os rios Amazonas e Tocantins possuem uma importante contribuição para a morfodinâmica do arquipélago com o aporte sedimentar (COSTA, 2014; TORRES; EL-ROBRINI; COSTA, 2018). A redução desse aporte devido à redução da precipitação para os cenários de alterações climáticas pode comprometer a sustentabilidade do arquipélago, levando ao aumento dos processos erosivos (DAY et al., 2016). Além disso, esses

processos podem ser potencializados por conta das alterações induzidas pelas atividades antrópicas ao longo das bacias hidrográficas, como a construção de barragens e as mudanças no uso da terra (OPPENHEIMER et al., 2019).

7.2 Desafios do índice proposto e recomendações

O índice proposto teve como um dos princípios a síntese dos subíndices e parâmetros, visando uma interpretação mais adequada da vulnerabilidade dos municípios, evitando redundâncias que poderiam comprometer a representatividade dos parâmetros e a eficácia do índice. No caso dos fatores de exposição, tomou-se o cuidado para não repetir os parâmetros referentes às forças e características ambientais. Nesse sentido, para a análise de inundação costeira, foram adotados os parâmetros propostos por Zanetti et al. (2016), ainda que não representem uma força costeira específica, devido à indisponibilidade de alguns dados. A inundação em regiões costeiras, além da ação de ondas e marés, pode ser causada por ondas de tempestade e pela descarga de rios, conforme considerado por Balica et al. (2012). Portanto, recomenda-se avaliar a inclusão dessas variáveis para trabalhos futuros, caso a área de estudo disponha de dados suficientes.

Ainda no que diz respeito à inundação costeira, um dos parâmetros considerados foi a ocorrência de eventos extremos de chuva. Os dados utilizados, retirados do estudo de Ferreira et al. (2020), foram derivados da espacialização das frequências em intervalos, com informações disponíveis para cada município, baseadas em dados observados. Recentemente, Tavares et al. (2023) forneceram projeções com redução de viés de índices climáticos extremos, que podem ser utilizadas como fontes alternativas em pesquisas futuras na região. Além disso, há a possibilidade de incorporar essas variáveis ao Índice de Capacidade Climática (ICC) para identificar a vulnerabilidade climática futura. Os índices climáticos disponíveis são valiosos na identificação de secas meteorológicas e eventos de inundação, oferecendo dados cruciais para aprofundar a análise das mudanças climáticas no arquipélago do Marajó, com ênfase especial nos eventos extremos que têm se tornado cada vez mais frequentes e intensos (IPCC, 2021). A incorporação desses novos dados em pesquisas futuras aprimora a compreensão dos impactos climáticos e contribui para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes para enfrentar os desafios climáticos emergentes na região.

O índice de exposição foi construído com o objetivo de incluir os principais perigos costeiros associados à elevação do nível do mar, conforme discutidos na literatura (ex.

OPPENHEIMER et al., 2019; ROCHA et al., 2023). A primeira tentativa de representar o parâmetro elevação do nível do mar seria a partir da identificação de áreas potencialmente afetadas por esses perigos com base nos cenários de emissões, e posteriormente, estabelecer conexões com características ambientais e sociais. Na tentativa de espacializar essas áreas, foram exploradas alternativas com dados de livre acesso, incluindo a aplicação das projeções de elevação do nível do mar do IPCC-AR6 (GARNER et al., 2023) em conjunto com o Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizando a metodologia "*bathtub*", um modelo de inundação estática (SCHMID et al., 2014). O FABDEM, o MDE utilizado neste trabalho para inferir dados sobre relevo e declividade, embora tenha apresentado resultados condizentes com os produtos do CPRM (2010) e menor erro vertical em comparação com outros modelos de mesma resolução horizontal (NEAL; HAWKER, 2023), ainda pode gerar erros significativos de altitude, especialmente em zonas costeiras de baixa elevação. Portanto, optou-se por utilizar as projeções regionais de elevação do nível do mar para Belém (PA) para os diferentes cenários de emissões por se tratar de dados mais confiáveis, embora tenha limitado as discussões sobre áreas potencialmente afetadas.

Quanto ao fator intrusão salina, acredita-se que haja um grau de sensibilidade na escolha do parâmetro nível estático e que precisa ser reavaliado para eventuais trabalhos futuros. O SIAGAS é responsável por centralizar as informações sobre poços no país para auxiliar em estudos, relatórios, dentre outros produtos. Entretanto, a responsabilidade de alimentar e atualizar a plataforma é compartilhada aos gestores estaduais de águas subterrâneas, responsáveis técnicos geradores das informações sobre os poços e usuários desses recursos. Embora seja uma fonte importante de dados e informações, para a área de estudo e especificamente para abordar o abastecimento humano, a ausência de uma quantidade grande de variáveis físicas foi fator limitante para definir o parâmetro a ser utilizado. Propostas como a de Satta (2014), que avalia a vulnerabilidade de aquíferos costeiros, e a metodologia GALDIT, usada em estudos de vulnerabilidade à intrusão salina com dados de poços (ex. ARAÚJO et al., 2023), foram consideradas, mas não puderam ser aplicadas devido à falta de dados. Recomenda-se que a proposta de Satta (2014) seja avaliada para estudos em áreas com dados disponíveis e que busquem analisar a vulnerabilidade multiperigo, visto que o índice de intrusão salina elaborado pelo autor é parte de um índice multiperigo para zonas costeiras.

Quanto ao fator de gestão de risco, para identificar a capacidade adaptativa de cada município frente aos perigos costeiros, os dados foram retirados do MUNIC (IBGE, 2020), resultantes de informações dadas pelos próprios gestores municipais, podendo apresentar certo

nível de sensibilidade aos resultados do índice. O Projeto Elos mapeou as capacidades e necessidades das defesas civis municipais em todo o Brasil (MDR, 2021b). No entanto, assim como observado nos dados do MUNIC, que dependem da participação dos gestores públicos, os municípios da área de estudo não forneceram respostas. A ausência de dados e informações destaca a necessidade dos gestores locais se comprometerem com a divulgação de informações municipais, fundamentais para promover melhorias para os próprios municípios. Por outro lado, tanto o Projeto Elos quanto o MUNIC oferecem dados importantes para estudos mais aprofundados sobre a gestão de riscos. Esses dados podem ser utilizados para aprimorar as estratégias de gestão de risco, considerando a capacidade municipal de forma mais detalhada.

A articulação entre os diferentes níveis de governo é fundamental para enfrentar os desafios dos riscos de desastres. Em 2012, o Governo Federal lançou o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais, que previa a articulação de diversos órgãos para desenvolver o mapeamento de riscos e desastres em 821 municípios brasileiros considerados prioritários, em consonância com as diretrizes e objetivos da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, instituída pela Lei nº 12.608/2012 (BRASIL, 2012). Os municípios prioritários foram definidos de acordo com a suscetibilidade a ocorrências de deslizamentos, enxurradas e inundações. Embora o plano não contemplasse os municípios da área de estudo, a Setorização de Riscos Geológicos, realizada pelo SGB para auxiliar na prevenção de desastres de origem geológica nos municípios, foi posteriormente executada, exceto no município de Afuá. O SGB também desenvolve outros mapeamentos, como as cartas de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações, além das cartas geotécnicas de aptidão à urbanização. Entretanto, esses mapeamentos não foram elaborados para os municípios.

Recentemente, os critérios e indicadores para identificar municípios prioritários de ações da União na Gestão de Risco e de Desastres Naturais foram revisados por diversas instituições federais que atuantes na área, sob a coordenação da Secretaria Especial de Articulação e Monitoramento da Casa Civil (BRASIL, 2023). Com essa atualização, o número de municípios considerados prioritários aumentou para 1.942, incluindo os municípios da área de estudo, com exceção de Afuá. Nesse sentido, destaca-se a importância do comprometimento do poder público municipal em adequar suas políticas públicas às temáticas de gestão de risco, associada às alterações do clima, bem como na priorização de ações preventivas de proteção e defesa civil, em detrimento das respostas emergenciais. Em contrapartida, sabe-se que se trata de municípios de pequeno porte, com aspectos institucionais e de governança limitados, sendo imprescindível o apoio dos níveis estaduais e federal nessas iniciativas, assim como na busca

por fundos de investimentos. O fato de estarem enquadrados como municípios prioritários abre caminhos para essas articulações entre os diferentes níveis de governo, além de evidenciar a necessidade de ação.

8 CONCLUSÕES

As mudanças na precipitação e na temperatura no arquipélago do Marajó foram avaliadas usando dados históricos e cenários futuros derivados de projeções climáticas. Foram observadas tendências nessas variáveis em diferentes escalas temporais, níveis de significância estatística e cenários de emissões, apresentando comportamentos comuns: uma redução consistente na precipitação e um aumento na temperatura até.

Quanto à variabilidade sazonal, essas alterações são ainda mais significativas. Municípios da porção N/NE serão mais afetados pela redução da precipitação no período chuvoso, em um cenário de emissões intermediárias (RCP4.5). Enquanto o aumento da temperatura será mais significativo no município de Afuá, especificamente na porção SO, para ambos os cenários de emissões e diferentes escalas temporais, porém com intensificação para RCP8.5.

Já os resultados obtidos dos índices de cenários climáticos aplicados às variáveis de precipitação e temperatura, juntamente com elevação do nível do mar, para diferentes escalas temporais e cenários de emissões, apresentam alta vulnerabilidade na maioria dos municípios, especialmente sob o cenário de RCP8.5. Com destaque para Cachoeira do Arari com vulnerabilidade muito alta para ambos os cenários de emissões e períodos mensal e chuvoso, enquanto Ponta de Pedras será o município mais afetado durante período seco.

Os resultados do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) revelam que fatores sociais e de infraestrutura são, no geral, são determinantes para a vulnerabilidade dos municípios estudados frente aos perigos costeiros. Chaves e Afuá apresentando os maiores níveis de vulnerabilidade entre os municípios.

A combinação dos cenários climáticos com o IVC indicou que as alterações climáticas intensificarão a vulnerabilidade nos municípios. Afuá e Chaves atingem níveis muito altos de vulnerabilidade, assim como Salvaterra passa de um nível baixo de vulnerabilidade costeira, para um nível alto sob o cenário RCP8.5 de alterações climáticas mensais. Já para os cenários sazonais, Cachoeira do Arari demonstra índices altos para o período chuvoso e Ponta de Pedras apresenta maior vulnerabilidade para o período seco, os dois casos para ambos os cenários de emissões.

O presente trabalho demonstrou a importância da análise de vulnerabilidade local para compreender os aspectos que mais influenciam na vulnerabilidade de cada município, bem como identificar locais prioritários para estratégias de ação, para garantir a resiliência dos

municípios costeiros frente às alterações do clima. Reconhece-se que abordar os dados ambientais e sociais apenas por unidade administrativa apresenta desafios significativos para o planejamento e a gestão dos municípios. Essa região, caracterizada pela geografia complexa e uma dispersão populacional expressiva, necessita de compreensão mais detalhada das realidades locais para a formulação de políticas públicas eficazes visando medidas de adaptação aos perigos costeiros. De todo modo, espera-se que os resultados aqui apresentados contribuam como ponto de partida para o desenvolvimento dessas medidas, garantindo a sustentabilidade e a qualidade de vida das populações e dos ecossistemas da região.

REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas, 2020. **Índice de Segurança Hídrica – 2017**. Arquivo shapefile. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c349dc5a-0c01-4f14-9519-e3340fef2c66>. Acesso em: 21 jul. 2024.
- ABREU, F. de A. M. de; CAVALCANTE, I. N.; MATTA, M. A. da S. O Sistema Aquífero Grande Amazônia – SAGA: um imenso potencial de água subterrânea no Brasil. **Águas Subterrâneas**, 2013. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27831>. Acesso em: 13 ago. 2024
- ALMEIDA, L. Q.; WELLE, T.; BIRKMAN, J. Disaster risk indicators in Brazil: a proposal based on the world risk index. **Disaster Risk Reduction**, v. 17, p. 251-272, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.04.007>.
- ALMEIDA, C. T., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., DELGADO, R. C., CUBO, P., AND RAMOS, M. C. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 4, p. 2013–2026, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4831>.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/09412948/2013/0507>.
- ARAÚJO; K. V. de; CAVALCANTE, I. N.; FREIRE, D. F. G.; OLIVEIRA, R. M. de; MAIA, S. R. R.; SOUSA, J. P.; LIMA NETO, I. O. de. Vulnerabilidade à salinização por intrusão marinha em aquífero costeiro do estado do Ceará. **Derbyana**, São Paulo, v. 44, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14295/derb.v44.794>.
- BANDEIRA, I. C. N.; ADAMY, A.; ANDRETTA, E. R.; CONCEIÇÃO, R. A. C. da; ANDRADE, M. M. N. de. Terras caídas: Fluvial erosion or distinct phenomenon in the Amazon? **Environmental Earth Science**, v. 77, n. 222, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7405-7>.
- BERNARDINO, A. F.; MAZZUCO, A. C. A.; SOUZA, F. M.; NÓBREGA, G. N.; SILVA, T. S. F.; KAUFFMAN, J. B. The novel mangrove environment and composition of the Amazon Delta. **Current Biology**, v. 32, n. 16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.06.071>.
- BALICA, S. F.; WRIGHT, N. G.; VAN DER MEULEN, F. A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. **Natural Hazards** v. 64, p. 73–105, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0234-1>.
- BIRD, E.C.F. **Coastal geomorphology: an introduction**. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd., Ed.2, 2008, 411p.

BORBA, T. A. C.; ROLLNIC, M. Runoff quantification on Amazonian Estuary based on hydrodynamic model. **Journal of Coastal Research, Special Issue**, n. 75, p. 43-47, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2112/SI75-009.1>.

BRASIL. **Nota Técnica nº 1/2023/SADJ-VI/SAM/CC/PR**. Atualização dos critérios e indicadores para a identificação dos municípios mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos, enxurradas e inundações para serem priorizados nas ações da União em gestão de risco e de desastres naturais. Brasília: Casa Civil, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec/copy_of_NotaTcnica12023SADJVISAMCCPR_SEI_00042.000497_2023_74.pdf. Acesso em: 12 ago. 2024.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC); dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e sobre o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC). Presidência da República: Diário Oficial da União, 2012. Disponível em: <http://dspace.mj.gov.br/handle/1/1708>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BRÊDA, J. P. L. F.; PAIVA, R. C. D. DE; COLLISCHONN, W.; BRAVO, J. M.; SIQUEIRA, V. A.; STEINKE, E. B.. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. **Climate Change**, v. 159, p. 503-522, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>.

BURKEY, J., 2024. **Mann-Kendall Tau-b with Sen's Method (enhanced)**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11190-mann-kendall-tau-b-with-sen-s-method-enhanced>. Acesso em: 22 jul. 2024.

CEPED-UFSC - Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. **Atlas Digital de Desastres no Brasil**. Site. 2024. Disponível em: <https://atlasdigital.mdr.gov.br/>. Acesso em: 08 ago 2024.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECHYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 438-454, 2014a. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECHYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512, 2014b. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>.

CHURCH, J. A.; CLARK, P. U.; CAZENAVE, A.; GREGORY, J. M.; JEVREJEVA, S.; LEVERMANN, A.; MERRIFIELD, M. A.; MILNE, G. A.; NEREM, R. S.; NUNN, P. D.; PAYNE, A. J.; PFEFFER, W. T.; STAMMER, D.; UNNIKRIISHNAN, A. S. Sea Level Change. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (eds.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth**

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, p. 1137–1216, 2013.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geodiversidade do Estado do Pará.** SIG de Geodiversidade. 2010. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/14705>. Acesso em: 14 ago. 2024.

COSTA, M. S. **Aporte hídrico e de material particulado em suspensão para a baía de Marajó: contribuições dos rios Jacaré Grande, Pará e Tocantins.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará, 2014.

CUTTER, S.L.; BORUFF, B.J.; SHIRLEY, W.L. Social Vulnerability to Environmental Hazards. **Social Science Quarterly**, v. 84, p. 242–261, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>.

DANTAS, M.; TEIXEIRA, S. G. Origem das paisagens do Estado do Pará. In: João, X.S.J.; TEIXEIRA, S.G.; FONSECA, D.D.F. (Eds.) **Geodiversidade do Estado do Pará.** CPRM - Serviço Geológico do Brasil: Belém, Brasil, ed. 1, p. 25-52, 2013.

DAY, J.W.; AGBOOLA, J.; CHEN, Z.; D'ELIA, C. FORBES, D.L.; GIOSAN, L.; KEMP, P.; KUENZER, C.; LANE, R.R.; RAMACHANDRAN, R.; JAMES, S.; YAÑEZ-ARANCIBIA, A. Approaches to defining deltaic sustainability in the 21st century. **Estuar. Coast. Shelf Sci.**, v. 183, p. 275–291, dez. 2016. DOI:10.1016/j.ecss.2016.06.018.

EL-ROBRINI, M.; RANIEIRI L. A.; SILVA, P.V.M.; GUERREIRO, J.S.; ALVES, A.M. da S.; OLIVEIRA, R.R.S. da; SILVA, M. do S.F. da.; AMORA, P.B.C.; EL ROBRINI, M. H.S.; FENZL, N.; FARIAS, D. R. Pará. In: MUEHE, D. (org.). **Panorama da erosão costeira no Brasil.** Brasília, DF: MMA, 2018. p. 65-165. ISBN: 978.85.7738.394-8.

FASSONI-ANDRADE, A.C.; FLEISCHMANN, A.S.; PAPA, F.; PAIVA, R. C.D. D.; WONGCHUIG, S.; MELACK, J.M.; MOREIRA, A.A.; PARIS, A.; RUHOFF, A.; BARBOSA, C.; MACIEL, D.A.; NOVO, E.; DURAND, F.; FRAPPART, F.; AIRES, F.; ABRAHÃO, G.M.; FERREIRA-FERREIRA, J.; ESPINOZA, J.C.; LAIPELT, L.; COSTA, M. H.; ESPINOZA-VILLAR, R.; CALMANDT, S.; PELLET, V. Amazon hydrology from space: Scientific advances and future challenges. **Reviews of Geophysics**, 59 v., 4 n., p. 1-91, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>.

FERREIRA, D. B. da S.; SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, J. V. de. Identificação de extremos de precipitação em municípios do estado do Pará e sua relação com os modos climáticos atuantes nos oceanos pacífico e atlântico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 197-222, jul/dez 2020. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v27i0.64630>.

FLATO, G.; MAROTZKE, J.; ABIODUN, B.; BRACONNOT, P.; CHOU, S. C.; COLLINS, W.; COX, P.; DRIQUECH, F.; EMORI, S.; EYRING, V.; FOREST, C.; GLECKLER, P.; GUILYARDI, E.; JAKOB, C.; KATTISOV, V.; REASON, C.; RUMMUKAINEN, M. Evaluation of Climate Models. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (eds.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working**

Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, p. 741-866, 2013.

FOX-KEMPER, B.; HEWITT, H. T.; XIAO, C.; AÐALGEIRSDÓTTIR, G.; DRIJFHOUT, S. S.; EDWARDS, T. L.; GOLLEDGE, N. R.; HEMER, M.; KOPP, R. E.; KRINNER, G.; MIX, A.; NOTZ, D.; NOWICKI, S.; NURHATI, I. S.; RUIZ, L.; SALLÉE, J.-B.; SLANGEN, A. B. A.; YU, Y. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇİ, O.; YU, R.; ZHOU, B. (eds.). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.**

Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, p. 1211–1362, 2021.

FRIESS, D. A.; ADAME, M. F.; ADAMS, J. B.; LOVELOCK, C, E. Mangrove forests under climate change in a 2_C world. **WIREs Climate Change**, v. 13, n. 4, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.792>.

GARNER, G. G; HERMANS, T.; KOPP, R. E.; SLANGEN, A. B. A; EDWARDS, T. L.; LEVERMANN, A.; NOWICKI, S.; PALMER, M. D.; SMITH, C.; FOXKEMPER, B.; HEWITT, H. T.; XIAO, C.; AÐALGEIRSDÓTTIR, G.; DRIJFHOUT, S. S.; GOLLEDGE, N. R.; HEMER, M.; KRINNER, G.; MIX, A.; NOTZ, D.; NURHATI, I. S.; RUIZ, L.; SALLÉE, J.- B.; YU, Y.; HUA, L.; PALMER, T.; PEARSON, B. **IPCC AR6 WGI Sea Level Projections.** World Data Center for Climate (WDCC)- DKRZ, 2022. DOI: https://doi.org/10.26050/WDCC/AR6.IPCCDDC_AR6_Sup_SLP

GONÇALVES, A C. O.; CORNETTA, A.; ALVES, F. BARBOSA, L.J.G. Marajó. In: ALVES, F. (Ed.) **A função socioambiental do patrimônio da União na Amazônia**”. IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, p. 107-198, 2016.

GORNITZ, V. Global coastal hazards from future sea level rise. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 89, p. 379-398, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(91\)90173-O](https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90173-O).

HENRIQUES, R. J.; OLIVEIRA, F.S. de; SCHAEFER, C. E. G. R.; FRANCELINO, M. R.; LOPES, P. R. C.; SENRA, E. O.; LOURENÇO, V. R. Soils and landscapes of Marajó island, Brazilian Amazonia: Holocene evolution, geoarchaeology and climatic vulnerability. **Environmental Earth Sciences**, v. 81, n. 9, p. 254, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10310-2>.

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de Manejo da Reserva Extrativista Marinha de Soure.** Brasília: ICMBIO, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-deconservacao/unidades-de-biomas/marinho/lista-de-ucs/resex-marinhadesoure/arquivos/plano_de_manejo_resex_marinha_de_soure_v19.pdf. Acesso em: 08 ago. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Base Cartográfica Contínua do Brasil, escala 1:250.000, 2023.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/download>

ds-geociencias.html?caminho=cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc250/versão 2023/. Acesso em: 14 ago. 2024.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**, Pesquisas, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 08 ago. 2024

IBGE. **Censo Demográfico 2022**, Panorama, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 08 ago. 2024.

IBGE. **Censo Demográfico 2022 - Características dos domicílios: Resultados do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3106/cd_2022_domicilios.pdf. Acesso em: 08 ago. 2024.

IBGE. **Pesquisa de Informações Básicas Municipais - MUNIC**, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/protecao-social/10586-pesquisa-de-informacoes-basicas-municipais.html?edicao=32141>. Acesso em: 08 ago. 2024.

IPCC. Summary for Policymakers. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (eds.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

IPCC. Technical Summary. In: PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D. C.; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; POLOCZANSKA, E.; MINTENBECK, K.; TIGNOR, M.; ALEGRÍA, A.; NICOLAI, M.; OKEM, A.; PETZOLD, J.; RAMA, B.; WEYER, N. M. (eds.). **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 39–69, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157964.002>.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇİ, O.; YU, R.; ZHOU, B. (eds.). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 3–32, 2021a. DOI: <https://dx.doi.org/10.1017/9781009157896.001>.

IPCC. Annex VII: Glossary. [MATTHEWS, J. B. R.; MÖLLER, V.; VAN DIEMEN, R.; FUGLESTVEDT, J. S.; MASSON-DELMOTTE, V.; MÉNDEZ, C.; SEMENOV, S.; REISINGER, A. (eds.)]. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇİ, O.; YU, R.; ZHOU, B. (eds.). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 2215–2256, 2021b. DOI: [10.1017/9781009157896.022](https://doi.org/10.1017/9781009157896.022).

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. 4th Edition, Charles Griffin, London, p. 202, 1975.

KULP, S. A.; STRAUSS, H. B. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. **Nature Communications**, v. 10, n. 4844, p. 1-12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12808-z>.

LIMA, C. O.; BONETTI, J.; GANDRA, T. B. R.; BONETTI, C.; SCHERER, M. E. G. Multiscale Analysis of Coastal Social Vulnerability to Extreme Events in Brazil. **Natural Hazards**, v. 120, p. 1163 – 1184, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06246-w>.

LOPES, M. N. G.; SOUZA, E. B. de; FERREIRA, D. B. da S. Climatologia Regional Da Precipitação No Estado Do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 12, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v12i1.31402>.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245–259, 1945. DOI: <https://doi.org/10.2307/1907187>.

MANSUR, A. V., BRONDÍZIO, E. S., ROY, S., HETRICK, S., VOGT, N. D., & NEWTON, A. An assessment of urban vulnerability in the Amazon Delta and Estuary: a multi-criterion index of flood exposure, socio-economic conditions and infrastructure. **Sustainability Science**, v. 11, n. 4, p. 625-643, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11625-016-0355-7>.

MAPBIOMAS. 2023. **Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil (1985-2022)**. MapBiomias Data, V1. Disponível em: <https://data.mapbiomas.org/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.58053/MapBiomias/VJIJCL>. Acesso em: 14 maio 2024.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C.; OBREGON, G. Observed and projected changes in rainfall extremes in the metropolitan area of São Paulo. **Climate Research**, v. 57, p. 61–72, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.3354/cr01160>.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 1829–1848, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>.

MENEZES, J. A., CONFALONIERI, U., MADUREIRA, A. P., DUVAL, I. D. B., SANTOS, R. B. D., MARGONARI, C. Mapping human vulnerability to climate change in the Brazilian Amazon: the construction of a municipal vulnerability index. **PLoS One**, v.13, n.2, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190808>.

MDR - MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. **GIRD + 10: caderno técnico de gestão integrada de riscos e desastres**. Coordenação: Samia Nascimento Sulaiman. Brasília, 2021a.

MDR. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil **Diagnóstico de capacidades e necessidades municipais em proteção e defesa civil**. Coordenação: Victor Marchezini.

Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional: Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, 2021b.

MUEHE, D. O sistema praial: formas, termos, processos e medição. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L.S. (orgs.) **Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos**. Rio de Janeiro: PGGM, p. 27-55, 2020. ISBN 978-65-992571-0-0
NEAL, J., HAWKER L. **FABDEM V1-2**. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn>. Acesso em: 14 ago. 2024.

NICHOLLS, R. J.; CAZENAVE, Sea-level rise and its impact on coastal zones. **Science**, v. 328, n. 5985, p. 1517–1520, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1185782>.

NICOLODI, J. L., PETTERMANN, R. M. Vulnerability of the Brazilian Coastal Zone in its Environmental, Social, and Technological Aspects. **Journal of Coastal Research**, Edição especial n. 64, p. 1372 – 1379, 2011.

O’NEILL, B. C., TEBALDI, C., VUUREN, D. P. V., EYRING, V., FRIEDLINGSTEIN, P., HURTT, G., KNUTTI, R., KRIEGLER, E., LAMARQUE, J.-F., AND LOWE, J.: The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6, **Geoscientific Model Development**, v. 9, p. 3461–3482, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-201>.

OPPENHEIMER, M.; GLAVOVIC, B. C.; HINKEL, J.; VAN DE WAL, R.; MAGNAN, A.; ABD-ELGAWAD, A.; CAI, R.; CIFUENTES-JARA, M.; DECONTO, R. M.; GHOSH, T.; HAY, J.; ISLA, F.; MARZEION, B.; MEYSSIGNAC, B.; SEBESVARI, Z. Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D. C.; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E.; MINTENBECK, K.; ALEGRÍA, A.; NICOLAI, M.; OKEM, A.; PETZOLD, J.; RAMA, B.; WEYER, N. M. (eds.). **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. p. 321–445. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>.

OECD - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Handbook on constructing composite indicators: Methodology and User guide**. Paris: OECD Publishing, 2008. 162 p. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>.

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. MARENGO, J. A.; SCARANO, F. R. (Eds.). Rio de Janeiro: PBMC; COPPE - UFRJ, 2016. 184 p. ISBN 978-85-285-0345-6.

PNUD BRASIL - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento; IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada; FJP – Fundação João Pinheiro. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**. 2022. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/ranking>. Acesso em: 08 ago. 2024.

PRESTES, Y. O., BORBA, T. A. C., SILVA, A. C., ROLLNIC, M. A discharge stationary model for the Pará-Amazon estuarine system. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 28, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100668>.

PRESTES, Y. O. **Interações Físicas entre o Estuário do rio Pará e a Plataforma Continental no Norte do Brasil**. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2016. 122 p.

RABELO, T. O. SANTOS, N. M.; COSTA, D. F. da S.; NASCIMENTO, M. A. L. do; LIMA, Z. M. C. A Contribuição da geodiversidade na prestação dos serviços ecossistêmicos do manguezal. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, Número Especial, 2018. p. 281-297. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2018v4n0ID16110>.

RICHEY, J. E.; MEADE, R. H.; SALATI, E.; DEVOL, A. H.; NORDIN JR., C. F.; DOS SANTOS, U. Water discharge and suspended sediment concentration in the Amazon River, 1982-1984. **Water Resources Research**, [S.l.], v. 22, p. 756-764. 1986. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR022i005p00756>.

ROCHA, C.; ANTUNES, C.; CATITA, C. Coastal indices to assess sea-level rise impacts - A brief review of the last decade. **Ocean & Coastal Management**, v. 237, abr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106536>.

ROLLNIC, M., BORBA, T.A.C., MASCARENHAS, A.C.C., PEREIRA, D.R., PEREIRA, L.S., M.R.O., SOARES, M.L.G., BÖCK, C.S., SANTOS, R.T.F., ASSAD, L.P.F., LANDAU, L., CARVALHO, G.V. Capítulo 2 - Área de Estudo Regional. In: **Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira**, v.1, p. 21-45, 2020.

ROSÁRIO, R. P.; BORBA, T. A. C.; SANTOS, A. S.; ROLLNIC, M. Variability of salinity in Pará river estuary: 2D analysis with flexible mesh model. **Journal of Coastal Research**, v. 75, (sp1), p. 128-133, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2112/SI75-026.1>.

ROVERE, A.; STOCCHI, P.; VACCHI, M. Eustatic and Relative Sea Level Changes. **Current Climate Change Reports**, v. 2, n. 4, p. 221–231, dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0045-7>.

SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C., OLIVEIRA, V.A., LUMBRERAS, J.F., COELHO, M.R., ALMEIDA, J.A., CUNHA, T.J.F., OLIVEIRA, J.B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. Ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018, 356 p.

SANTOS, M.R.S; VITORINO, M.I.V; PEREIRA, L.C.C; QUINTÃO, A.F. Socio environmental Vulnerability to Climate Change: Conditions of Coastal Municipalities in the State of Pará. **Ambiente & Sociedade**. São Paulo, v. 24, p. 1-22, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200167r1vu2021L3AO>.

SANTOS, V. F. dos; NOBRE JUNIOR, B. B.; SOUZA, F. M.; SILVA, L. M. A. S.; Amapá: um estado costeiro – reflexões sobre vulnerabilidades, riscos e adaptações a mudanças climáticas. In: PORTO, J. (Org.) **Encontros e percepções geográficas: diálogos e provocações**. Maringá, PR: Uniedusul, p. 110-132, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.51324/54180221.8>.

SATTA, A. **An Index-based method to assess vulnerabilities and risks of Mediterranean coastal zones to multiple hazards**. Tese de Doutorado, Scuola Dottorale di Ateneo, Università Ca'Foscari Venezia, 2014. 293p.

SCHMID, K.; HADLEY, B.; WATERS, K. Mapping and portraying inundation uncertainty of bathtub-type models. **Journal of Coastal Research**, v. 30, n., p. 548-561, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00118.1>.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, dez. 1968. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>.

SGB – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS**. Pesquisa geral. Brasília: 2024. Disponível em: https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php. Acesso em: 24 jul. 2024.

SHARP, R.; TALLIS, H.T.; RICKETTS, T.; GUERRY, A.D.; WOOD, S.A.; CHAPLIN-KRAMER, R.; NELSON, E.; ENNAANAY, D.; WOLNY, S.; OLWERO, N.; et al. **Invest User's Guide, 2014**. Disponível em: <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/>. Acesso em: 14 ago. 2024.

SILVA JÚNIOR, O. M.; SZLAFSZTEIN, C. F.; BAIA, M. M. Gestão de riscos de desastres no Arquipélago do Bailique, foz do rio Amazonas, Amapá, Brasil. In: MAGNONI JUNIOR, L.; MELLO MAGNONI, M. G.; CABRAL, M.; TORRES, M. M.; CASTRO, C. E.; LONDE, L. R.; SERRANONOTIVOLI, R.; FIGUEIREDO, W. S.; BARBOSA, H. A.; PRIETO, J. I. **Ensino de Geografia e a Redução do Risco de Desastres em espaço rural e urbano**. 1ªEd. São Paulo: CPS, p. 674-696, 2022. DOI: <https://doi.org/10.57243/BHUG1272>.

SOUZA, E. B. de; CARMO, A. M. C.; MORAES, B. C.; NACIF, A.; FERREIRA, D. B. da S.; ROCHA, E. J. P. SOUZA, P. J. de O. P. Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia Legal Brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo RegCM4. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, n. 12, jan/jun 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43711>.

SOUZA, E. B. de; FERREIRA, D.B. da S.; FRANCO, V. dos S.; AZEVEDO, F. T. M. de; SOUZA, P. J. de O. P. de. Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 4 set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v21i0.41232>.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; CORTINHAS, C. G. D. L.; SOUZA-NETO, P. W. M.; FERNANDES, N. E. Asp. M. E. B.; DOMINGUEZ, J. M. L. Mangrove Swamps of Brazil: Current Status and Impact of Sea-Level Changes. In: DOMINGUEZ, J. M. L.; KIKUCHI, R. K. P. D.; FILHO, M. C. D. A.; SCHWAMBORN, R.; VITAL, H. (eds.). **Tropical Marine Environments of Brazil**. Cham: Springer, p. 45- 75, 2023. (The Latin American Studies Book Series). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21329-8>.

STROHAECKER, T. M. Dinâmica Populacional. In: MMA. **Macrodiagnóstico da zona costeira e marinha do Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 59-92, 2008.

TANIM, A. H.; GOHARIAN, E.; MORADKHANI, H. Integrated socio-environmental vulnerability assessment of coastal hazards using data-driven and multi-criteria analysis approaches. **Scientific Report**, v. 12, n. 11625, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15237-z>.

TAVARES, P. da S.; PILOTTO, I. L.; CHOU, S. C.; SOUZA, S. A.; FONSECA, L. M. G. **Projeções climáticas para América do Sul regionalizadas pelo modelo Eta com correção de viés**. 2023. DOI: <https://doi.org/10.57810/lattesdata/WAVGSL>, LattesData, V2.

THIELER, E.R.; HAMMAR-KLOSE, E.S. **National Assessment of Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast**. United States Geological Survey: Reston, VA, USA, 1999. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/of/1999/of99-593/>. Acesso em: 14 ago. 2024.

TOMAZ, R. B.; SANTOS, A. L. S. dos; BORGES, H. P.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; BEZERRA, D. da S. Predicting The Impacts Of Sea-Level Rise On The Amazon Macrotidal Mangrove Coast. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 5 ago. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.60891>.

TORRES, A. M.; EL-ROBRINI, M.; COSTA, W. J. P. Amapá In: MUEHE, D. (org.). **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília, DF: MMA, 2018. p. 19-64. ISBN: 978.85.7738.394-8.

UN - United Nations. **The Second World Ocean Assessment**, Volume II. New York: United Nations, 2021. 520p.

UNSDG - UN Sustainable Development Group. **Operationalizing leaving no one behind: good practice note for UN Country Teams**. Disponível em: <https://unsdg.un.org/resources/leaving-no-one-behind-unsdg-operational-guide-un-country-teams>. Acesso em: 13 ago. 2024.

UN-WATER, 2013: **What is Water Security?** Infographic. UN-Water, Geneva, Switzerland. Disponível em: www.unwater.org/publications/watersecurity-infographic. Acesso em: 10 ago. 2024.

VAN VUUREN, D. P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A., HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J-F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; STEVEN, K. R. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic change**, v. 109, n. 5, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.

WANG, H.; SONG, M. Ckmeans.1d.dp: Optimal k-means Clustering in One Dimension by Dynamic Programming. **The R Journal**, v. 3, n. 2, p. 29-33, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.32614/RJ-2011-015>.

WCRP – World Climate Research Programme, 2022. **WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)**. Disponível em: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/>. Acesso em: 14 abr. 2024.

WWA – World Weather Attribution. **Climate change, not El Niño, main driver of exceptional drought in highly vulnerable Amazon River Basin.** Disponível em: <https://www.worldweatherattribution.org/climate-change-not-el-nino-main-driver-of-exceptional-drought-in-highly-vulnerable-amazon-river-basin/>. Acesso em: 08 ago. 2024.

ZANETTI, V. B., DE SOUSA JUNIOR, W. C., DE FREITAS, D. M. A climate change vulnerability index and case study in a Brazilian coastal city. **Sustainability**, v.8, n. 811, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8080811>.

APÊNDICE A – Resumo dos índices que compõem o Índice Municipal de Vulnerabilidade

Quadro 4 – Índices que compõem o IMV, com respectivos cálculos e informações sobre parâmetros e fonte de dados

(continua)

COMPONENTE E CÁLCULO	ÍNDICE/FATOR E CÁLCULO	PARÂMETRO E DESCRIÇÃO	DADOS E FONTES
Índice de Exposição (IEx) $IEx = (ExC + ErC + InC + IntS)/4$	Exposição Costeira (ExC) $ExC = (REL + COB)/2$	Relevo (REL): Proporção (%) da área municipal localizada até 10 metros de altitude em relação à área total	Dados matriciais de altitude obtidos do FABDEM (NEAL; HAWKER, 2023)
		Cobertura vegetal nativa (COB): Proporção (%) da área municipal coberta por vegetação nativa florestal e não florestal em relação à área total	Dados matriciais de cobertura vegetal nativa. Coleção 8 - Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil (MAPBIOMAS, 2023)
	Erosão Costeira (ErC) $ErC = (GEOM + ONDA)/2$	Geomorfologia (GEOM): Proporção (%) da área municipal sobre planícies em relação à área total	Dados vetoriais de unidades geomorfológicas (CPRM, 2010)
		Altura de onda (ONDA): altura significativa de onda na área de estudo	Dados obtidos de Hersbach et al. (2020) <i>apud</i> Souza-Filho et al. (2023)
	Inundação Costeira (InC) $InC = (DEC + PROX + EXTC)/3$	Declividade (DEC): Proporção (%) da área municipal com declividade inferior a 20% (11,3°)	Dados matricial de declividade do relevo obtidos a partir do FABDEM (NEAL; HAWKER, 2023)
		Proximidade de corpos d'água (PROX): Proporção (%) da área municipal coberta por corpos d'água Extremos de chuva (EXTC): Frequência anual (%) de extremos de chuva por município	Dado matricial de cobertura florestal e não florestal nativa - Coleção 8 de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil (MAPBIOMAS, 2023) Dados municipais obtidos de Ferreira et al. (2020)

Quadro 4 – Índices que compõem o IMV, com respectivos cálculos e informações sobre parâmetros e fonte de dados

(continua)

COMPONENTE E CÁLCULO	ÍNDICE/FATOR E CÁLCULO	PARÂMETRO E DESCRIÇÃO	DADOS E FONTES
Índice de Exposição (IE_x) $IE_x = (ExC + ExC + InC + IntS)/4$	Intrusão Salina (IntS) $IntS = (NE + AMP)/2$	Nível estático de poços (NE): Valores médios de níveis estáticos de poços por município	Poços cadastrados para uso humano (SIAGAS/SGB, 2024)
		Amplitude de maré (AMP): amplitude de maré observada em cada município	Dados de Rosário et al. (2016) e Torres et al. (2018)
Índice de Sensibilidade (ISe) $IE_x = (Soc + San)/2$	Sociodemográfico (Soc) $Soc = (ESC + RAÇA + REN + PR)/4$	Escolaridade (ESC): Proporção (%) da população municipal com 15 anos ou mais não alfabetizada	Dados do Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022)
		Raça: Proporção (%) da população municipal não-branca	
		Renda (REN): Proporção (%) da população municipal com rendimento nominal mensal de até ½ salário mínimo	Dados do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010)
		População rural (PR): Proporção (%) da população municipal residente na zona rural	
	Saneamento (San) $San = (ÁGUA + ESG)/2$	Abastecimento de água (ÁGUA): Proporção (%) de domicílios por município conectados à rede geral de abastecimento de água	Dados do Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022)
		Rede de esgoto (ESG): Proporção (%) de domicílios por município conectados à rede de esgoto	

Quadro 4 – Índices que compõem o IMV, com respectivos cálculos e informações sobre parâmetros e fonte de dados

(conclusão)

COMPONENTE E CÁLCULO	ÍNDICE/FATOR E CÁLCULO	PARÂMETRO E DESCRIÇÃO	DADOS E FONTES
Índice de Capacidade Adaptativa (ICAd) $ICAd = (GEST + RH) / 2$	Gestão de Risco (GEST) $GEST = (IGEST + ISEG) / 2$	Instrumentos de gestão (IGEST): Número de instrumentos de gestão de risco e de desastres municipais.	Pesquisa de Informações Básicas Municipais – MUNIC (IBGE, 2020).
		Instituições de segurança (ISEG): Número de instituições de segurança municipais.	
Índice de Cenários Climáticos (ICC) $ICC = (PREC + TEMP + ENM) / 3$	Recursos Hídricos (RH)	Índice de Segurança Hídrica (ISH): grau de segurança hídrica municipal para a dimensão humana.	Dados municipais vetoriais do Índice de Segurança Hídrica – Dimensão Humana, do PNRH (ANA, 2017).
		Precipitação (PREC) e temperatura (TEMP): Diferenças médias mensais e sazonais por município, entre períodos histórico (1976-2005) e projetado (2021-2050) para os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5.	Projeções climáticas Eta/HadGEM-ES (TAVARES et al., 2023)
		Elevação do nível do mar (ENM): Valores mínimo e máximo prováveis de elevação do nível do mar projetados para 2050 entre SSP2-4.5 e SSP5-8.5.	Projeções regionalizadas para Belém (PA) – IPCC/AR6 (GARNER et al., 2023).

Fonte: Elaborado pela autora.