



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

ANA CAROLINA COUTINHO CARVALHO

**ANÁLISE DE AUMENTO MÉDIO DO NÍVEL DO MAR NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO ITAQUI, SÃO LUIS-MA**

São Luís
2024

ANA CAROLINA COUTINHO CARVALHO

**ANÁLISE DE AUMENTO MÉDIO DO NÍVEL DO MAR NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO ITAQUI, SÃO LUIS-MA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal Maranhão (PPGGEO/UFMA), como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Taíssa Caroline Silva Rodrigues.

São Luís
2024

CARVALHO, Ana Carolina Coutinho.

Análise de aumento médio do nível do mar na Bacia Hidrográfica do Itaqui,
São Luís-MA / Ana Carolina Coutinho Carvalho. – São Luís. – 2024.
88 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia –
Universidade Federal do Maranhão, São Luís/MA, 2024.

Orientadora: Profª Drª Taíssa Caroline Silva Rodrigues.

Bibliografia

1. Mudanças Climáticas. 2. Nível do Mar. 3. Bacia Hidrográfica do Itaqui. 4. BR-Mangue. I. Título.

ANA CAROLINA COUTINHO CARVALHO

**ANÁLISE DE AUMENTO MÉDIO DO NÍVEL DO MAR NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO ITAQUI, SÃO LUÍS-MA**

APROVADA EM: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Taíssa Caroline Silva Rodrigues
Universidade Estadual do Maranhão (UEMASUL)
(Orientadora)

Prof. Dr. Denilson da Silva Bezerra
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
(Membro interno)

Prof. Dr. Celso Henrique Leite Silva Júnior
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
(Membro externo)

A quem está acima de tudo e todos: Deus. Aos que me acompanharam ao longo desse desafio, em especial: papai, mamãe, Neto, Anderson e Laura – meu Norte.

AGRADECIMENTOS

A minha trajetória de mestrado foi marcada por desafios imensos, mas também por um apoio incondicional de pessoas especiais que estiveram ao meu lado em cada passo, nos momentos mais difíceis e nas vitórias que conquistamos juntas.

Primeiramente, agradeço à minha orientadora e amiga de longa data, Taíssa, que foi um pilar fundamental durante todo o processo. Sua força, dedicação e amizade fizeram toda a diferença, especialmente em um momento tão delicado como o da minha cirurgia, quando corri o risco de perder a mobilidade e a minha própria autonomia. Sou imensamente grata à sua paciência e por me motivar a continuar, mesmo quando tudo parecia difícil.

Agradeço também à turma do mestrado, aos professores e ao coordenador do programa, Márcio Celeri, por toda a compreensão, apoio e incentivo. O acolhimento de vocês foi crucial para que eu me mantivesse firme, com esperança e confiança em minha recuperação e em meu trabalho.

À minha família, que sempre foi minha base, meu porto seguro. As palavras de sabedoria do meu pai Carvalho e a força constante da minha mãe Remedios me deram a coragem para seguir em frente. Ao meu irmão Neto, que em meio à rotina do dia a dia sempre esteve presente, mesmo na ausência física, comemorando cada avanço meu desde que vim ao mundo. Ao meu amado esposo Anderson e à minha querida filha Laura, vocês são a minha razão de continuar, a fonte inesgotável de amor que me faz lembrar que as tempestades, de fato, são as que fazem os bons marinheiros. Sem vocês, eu não teria conseguido.

Quero expressar minha gratidão à Thalita e à Allana, por todas as contribuições valiosas que fizeram ao meu estudo. O apoio de vocês foi fundamental para a realização deste trabalho.

Agradeço também ao pessoal da EMAP, que entenderam o momento desafiador que vivi e me deram o suporte necessário para conciliar o mestrado com o meu trabalho. A flexibilidade e o entendimento de todos vocês foram fundamentais para que eu não perdesse o foco nem a esperança.

A todos que, de alguma forma, estiveram ao meu lado nesse percurso, o meu sincero obrigada. Este trabalho é fruto de todos vocês.

“O que prevemos raramente ocorre; o que menos esperamos geralmente acontece.”

(Benjamin Disraeli)

RESUMO

A pesquisa aborda os impactos das mudanças climáticas na Bacia Hidrográfica do Itaqui, localizada em São Luís-MA, com ênfase no aumento do nível do mar e nas consequências decorrentes desse fenômeno. Utilizou-se o modelo BR-Mangue para simular cenários futuros de elevação do nível do mar, considerando as projeções estabelecidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) até o ano de 2100. Foram analisados cinco cenários distintos de emissões de gases de efeito estufa, cada um com uma elevação projetada do nível do mar, variando entre 0,3 metros e 1,1 metros. Os resultados indicam que o aumento do nível do mar pode ter sérios impactos sobre a infraestrutura portuária, especialmente no Complexo Portuário do Itaqui, uma das principais infraestruturas da região. Além disso, o ecossistema local, composto por áreas de mangue e zonas costeiras, também estaria ameaçado por processos de erosão e intrusão salina. As comunidades que vivem próximas à bacia, muitas das quais dependem das atividades portuárias e da pesca, também seriam severamente afetadas, sendo necessário o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação. A metodologia empregada na pesquisa inclui uma análise geoespacial detalhada, que utiliza ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), combinada com modelagem baseada em autômatos celulares. Essa abordagem permite uma simulação dinâmica e abrangente dos possíveis impactos da elevação do nível do mar sobre a bacia. Este estudo oferece uma contribuição significativa para a compreensão dos desafios que áreas costeiras como a Bacia do Itaqui enfrentam devido às mudanças climáticas. Ao identificar os riscos potenciais e seus impactos, o estudo fornece subsídios essenciais para a implementação de políticas públicas e estratégias de planejamento urbano e ambiental voltadas para a adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas, Nível do Mar, Bacia Hidrográfica do Itaqui, BR-Mangue.

ABSTRACT

This research addresses the impacts of climate change on the Itaqui River Basin, located in São Luís-MA, with an emphasis on sea level rise and the consequences arising from this phenomenon. The BR-Mangue model was used to simulate future sea level rise scenarios, considering the projections established by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) until the year 2100. Five different greenhouse gas emission scenarios were analyzed, each with a projected sea level rise ranging from 0.3 meters to 1.1 meters. The results indicate that sea level rise could have serious impacts on port infrastructure, especially in the Itaqui Port Complex, one of the main infrastructures in the region. In addition, the local ecosystem, composed of mangrove areas and coastal zones, would also be threatened by erosion and saline intrusion processes. Communities living near the basin, many of which depend on port activities and fishing, would also be severely affected, requiring the development of adaptation and mitigation strategies. The methodology used in the research includes a detailed geospatial analysis, which uses Geographic Information System (GIS) tools, combined with modeling based on cellular automata. This approach allows for a dynamic and comprehensive simulation of the possible impacts of sea level rise on the basin. This study offers a significant contribution to understanding the challenges that coastal areas such as the Itaqui Basin face due to climate change. By identifying potential risks and their impacts, the study provides essential support for the implementation of public policies and urban and environmental planning strategies aimed at adapting to and mitigating the effects of climate change.

Keywords: Climate Change, Sea Level, Itaqui River Basin, BR-Mangue.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Evolução Histórica e Legal: Início das Discussões de Mudanças Climáticas e arcabouço da Legislação Mundial e Brasileira	17
2.2	Eventos climáticos extremos da atualidade	19
2.3	Aumento do Nível do Mar e impactos nas regiões costeiras	22
2.4	Uso de modelos na avaliação de cenários climáticos	24
2.5	Cenários SSPs (Shared Socio-Economic Pathways - Caminhos Socioeconômicos Compartilhados)	27
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	31
3.1	Bacia Hidrográfica do Itaqui	31
3.2	Porto do Itaqui	33
4	ASPECTOS METODOLÓGICOS	36
4.1	Materiais	36
4.2	Procedimentos Metodológicos	36
4.3	Cenários de análise	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1	Análise do Meio Físico e Ambiental da Bacia Hidrográfica do Itaqui	42
5.2	Caracterização do Uso e Cobertura da Terra da Bacia Hidrográfica do Itaqui	45
5.3	Panorama da Socioeconômico da Bacia Hidrográfica do Itaqui	52
5.4	Análise dos Cenários de Elevação do Nível do Mar na Bacia Hidrográfica do Itaqui	55
5.5	Modelo A	59
5.6	Modelo B	61
5.7	Modelo C	63
5.8	Modelo D	65
5.9	Modelo E	67
5.10	Análise Comparativa dos Modelos de Cobertura do Solo (2012 a 2100)	69
6	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos de Vizinhança, onde (a) expressa a vizinhança de Von Neumann e (b) expressa a vizinhança de Moore, que é a vizinhança de von Neumann mais as células das diagonais	25
Figura 2 – Localização da Bacia do Itaqui e do Porto do Itaqui	32
Figura 3 – Mapa com o detalhamento da área do porto	34
Figura 4 – Caracterização do Uso e Cobertura da Terra da Bacia Hidrográfica do Itaqui....	51
Figura 5 – Delimitação do Porto do Itaqui, TPM e da área do DISAL.	54
Figura 6 – Representação do espaço celular vazio.	57
Figura 7 – Representação do atributo celular de uso do solo.	57
Figura 8 – Representação do atributo celular de classe de solo.....	58
Figura 9 – Representação do atributo celular de altimetria.....	58
Figura 10 – Resultado comparativo entre as condições iniciais e o Modelo A.....	60
Figura 11 – Dados de análise - Modelo B.....	62
Figura 12 – Dados de análise - Modelo C.....	64
Figura 13 – Dados de análise - Modelo D.....	66
Figura 14 – Dados de análise - Modelo E.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cenários SSP (Shared Socioeconomic Pathways)	28
Tabela 2: Informações para interpretação de cores no modelo BR-Mangue	56
Tabela 3: Dados de análise - Modelo A	59
Tabela 4: Dados de análise - Modelo B	61
Tabela 5: Dados de análise - Modelo C	63
Tabela 6: Dados de análise - Modelo D	65
Tabela 7: Dados de análise - Modelo E	67
Tabela 8: Dados de análise - Modelos A, B, C, D e E.....	71

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALUMAR – Consórcio de Alumínio do Maranhão
ANA – Agência Nacional de Águas
ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AR – Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMIP6 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
CODOMAR – Companhia Docas do Maranhão
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM – Serviço Geológico do Brasil
EMAP – Empresa Maranhense de Administração Portuária
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;
IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas;
IQA – Índice de Qualidade do Ar
MDE – Modelo Digital de Elevação
MTPA – Ministério de Transportes, Portos e Aviação Civil
OMM – Organização Meteorológica Mundial;
PDZ – Plano de Desenvolvimento e Zoneamento
PIB – Produto Interno Bruto;
SIG – Sistema de Informação Geográfica;
SSP - Shared Socio-Economic Pathways;
VIGIAGRO – Vigilância Agropecuária Internacional

1 INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC, criado em 1988 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (ONU Meio Ambiente) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), tem como objetivo fornecer aos formuladores de políticas avaliações científicas regulares sobre a mudança do clima.

Os relatórios disponibilizados pelo IPCC (IPCC 2007; IPCC 2014; IPCC 2021; IPCC 2022) mostram que a aceleração do aquecimento global tem afetado significativamente os sistemas naturais, humanos, de infraestrutura e do sistema produtivo das nações de maneira não-uniforme. As projeções de clima futuro são cruciais para o planejamento nacional das ações de mitigação e adaptação da zona costeira às mudanças climáticas, uma vez que ajudam a reduzir danos sociais, ambientais e econômicos, especialmente nas regiões mais vulneráveis.

O tema é de relevância não apenas social, mas também econômica e ambiental, especialmente se considerarmos os efeitos negativos das mudanças climáticas, que incluem o aumento do nível dos oceanos e toda uma série de alterações e eventos que por sua frequência, potencial de impacto e magnitude podem acarretar diversos prejuízos ao setor marítimo e portuário, por exemplo.

Com efeito, sendo os portos estruturas naturalmente expostas a ações dos mares e do clima, o tema da “mudança climática” e de seus respectivos efeitos sobre as operações e infraestrutura portuárias e marítimas aparece com frequência nos planejamentos e processos das autoridades portuárias e sua agência reguladora (ANTAQ, 2021).

Segundo o Sexto Relatório de Avaliação – AR6 (IPCC, 2022), os portos marítimos encontram-se extremamente vulneráveis e expostos a inundações decorrentes do aumento do nível do mar, apontando sérios danos à infraestrutura portuária, chegando a gerar a interrupção da operação portuária a longo prazo (IPCC, 2022). Ainda assim, apenas 6% dos portos no mundo todo apresentam medidas de adaptação a eventos climáticos extremos (Hanson & Nicholls, 2020). Como qualquer pressão que ocorre na região portuária propaga-se através das cadeias de fornecimento e dos pólos industriais atendidos pelo porto, os impactos gerados pelas mudanças climáticas deverão comprometer tanto a economia regional quanto a global (Chhetri et al. 2016).

Na preparação para o AR6, os estudiosos e contribuidores do IPCC desenvolveram um novo conjunto de cenários de emissões impulsionados por diferentes premissas socioeconômicas, que são os SSPs (Shared Socio-Economic Pathways - Caminhos Socioeconômicos Compartilhados). Em linhas gerais, cada um dos SSPs resulta em níveis de forçamento radiativo semelhantes aos cenários do Quinto Relatório de Avaliação, o AR5. Assim, existem, portanto, uma variedade de cenários que vão de perspectivas mais otimistas à cenários mais catastróficos.

Nesse contexto, considerando os cenários SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 e o SSP5 e o ano base de 2100 como recorte da pesquisa, esse estudo fez análise do aumento do nível do mar na área da Bacia Hidrográfica do Itaqui, localizada no município de São Luís-MA. A escolha da referida área deu-se por conta da localização do Porto do Itaqui naquela localidade.

Historicamente, a área do Porto do Itaqui não sofre de forma expressiva com eventos climáticos e no que se refere às análises envolvendo o índice de risco de aumento do nível do mar, o porto maranhense foi classificado como médio risco de acordo com estudo desenvolvido pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários - ANTAQ (ANTAQ, 2021).

Porém, a magnitude do citado Porto já o torna como interessante campo de estudo para diferentes pesquisas, principalmente àquelas associadas às mudanças do clima e elevação do nível do mar, como propõe o presente estudo.

Associado ao exposto, a pesquisa justifica-se ainda pelo inexpressivo número de trabalhos científicos envolvendo a área de estudo e sua relação com as mudanças climáticas, sobretudo com a temática de aumento do nível médio do mar na região.

Nesse sentido, considerando a possibilidade de utilização de modelos e projeções de cenários capazes de avaliar a elevação do nível médio relativo do mar e sua interferência nesta área, pretende-se com esse estudo utilizar o algoritmo intitulado BRMangue para simular o evento de elevação do nível médio do mar na área da Bacia Hidrográfica do Itaqui, onde localiza-se o Complexo Portuário do Itaqui, permitindo análises de diferentes aspectos econômicos e de infraestrutura do Porto do Itaqui e proximidades e possíveis consequências em caso de eventual subida do nível do mar.

Para melhor entendimento da temática abordada, esta dissertação foi estruturada em tópicos que trazem considerações acerca da evolução histórica e legal das mudanças climáticas, incluindo as principais legislações sobre a temática no contexto mundial e nacional. Além disso, importante atenção foi dada aos eventos climáticos extremos da atualidade, uso de modelos na avaliação de cenários climáticos e a definição e explicação dos SSPs (Shared Socio-Economic Pathways - Caminhos Socioeconômicos Compartilhados).

Em seguida, para apresentar ao leitor o contexto da área de análise, são apresentados informações e dados sobre a área de estudo, tanto na perspectiva da área da Bacia Hidrográfica do Itaqui, quanto da região portuária de São Luís/MA.

Em sequência, além de informações sobre os materiais e métodos utilizados, também foram descritos os procedimentos metodológicos da pesquisa, cenários de análise, bem como os resultados e discussões evidenciados ao longo da pesquisa.

No tópico específico de resultados, foram realizadas análises sobre o meio físico e ambiental da Bacia Hidrográfica do Itaqui, incluindo a caracterização do uso e cobertura de terra e o panorama socioeconômico da citada bacia, para enfim, apresentar a análise dos cenários de elevação e nível do mar estudados.

Trata-se, portanto, de uma pesquisa robusta, mas não exaustiva, a respeito da imensidão de assuntos, ideias e considerações sobre a temática ambiental e portuária envolvendo as mudanças do clima.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Evolução Histórica e Legal: Início das Discussões de Mudanças Climáticas e arcabouço da Legislação Mundial e Brasileira

Como apontado por Pereira (2012), as discussões a respeito das mudanças climáticas emergiram como uma das mais significativas e complexas problemáticas do século XXI. Segundo este autor, a mudança relacionada ao clima é um fenômeno sentido no mundo inteiro, em diferentes proporções, caracterizado por alterações significativas nos padrões estabelecidos, e tem sido objeto de crescente preocupação e ação ao longo das últimas décadas.

A bibliografia sobre a temática aponta diversas publicações a nível internacional e nacional capazes de indicarem que o interesse científico por mudanças climáticas começou a ganhar destaque no final do século XIX, com os primeiros estudos indicando que a atividade humana poderia estar influenciando o clima da Terra, corroborando com as próprias constatações dos relatórios do IPCC (IPCC 2007; IPCC 2014; IPCC 2021; IPCC 2022).

Dessas publicações, importante ressalva deve ser dada à pesquisa de Svante Arrhenius, que em 1896, propôs a teoria de que o aumento dos Gases de Efeito Estufa - GEE, como o dióxido de carbono, poderia levar ao aquecimento global (Silva, 2015). No entanto, o reconhecimento do impacto potencialmente devastador das mudanças climáticas só começou a se consolidar nas décadas seguintes (Silva, 2015; Conti, 2005).

Para Eiró-Gomes, Nunes e Raposo (2021) o relatório "The Limits to Growth", produzido pelo Clube de Roma em 1972, é outra obra importante para as discussões sobre o clima e as mudanças pelas quais este pode e vem passando, isso porque tal relatório trouxe uma análise sobre os impactos das atividades humanas no meio ambiente, destacando a necessidade de uma abordagem abrangente sobre o uso de recursos naturais de forma mais sustentável.

Para alguns pesquisadores (Nunes, 2021; Pereira, 2012; Castro, 2010), foi na intenção de equalizar consumo de insumos e necessidade de conservação ambiental que se deu o início de um crescente consenso sobre a necessidade de uma ação coordenada para mitigar os impactos das mudanças climáticas.

Do ponto de vista de ações político-administrativas, a primeira tentativa significativa de um acordo internacional para enfrentar as mudanças climáticas foi a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano, realizada em Estocolmo, Suécia, em 1972 (Nunes, 2021). Embora não tenha produzido um tratado vinculativo específico sobre mudanças climáticas, a conferência estabeleceu a base para futuras discussões e ações, que reverberam consequências até os dias atuais, influenciando de forma direta outros encontros e acordos envolvendo diversas nações.

A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Cúpula da Terra, realizada no Rio de Janeiro em 1992, representou outro marco importante (Silva, 2015). O evento resultou na criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), que entrou em vigor em 1994. A UNFCCC estabeleceu um fórum internacional para negociar e implementar medidas para combater as mudanças climáticas e promover o desenvolvimento sustentável (Pereira, 2012).

Outro marco histórico nas discussões envolvendo a temática climática deu-se em 1997, com a criação do Protocolo de Quioto, adotado na terceira Conferência das Partes (COP3) da UNFCCC, representando um avanço significativo ao estabelecer compromissos legais vinculativos para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (Silva, 2015). O protocolo entrou em vigor em 2005, após a ratificação por um número suficiente de países.

Mais recentemente, o Acordo de Paris, adotado na COP21 em 2015, trouxe novos compromissos internacionais com o objetivo de limitar o aquecimento global a bem abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais, com esforços para limitar o aumento a 1,5°C. O Acordo de Paris introduziu uma abordagem mais flexível e inclusiva, com Contribuições Determinadas Nacionalmente (NDCs) e um sistema de revisão periódica (Hisamoto, 2022).

No cenário brasileiro, considerando a própria extensão territorial do país e suas especificidades geográficas, o país tem implementado uma série de políticas e legislações para enfrentar os desafios ambientais (Artaxo, 2014).

Como marcos legislativos, em 2009, o país criou a Lei nº 12.187, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). Esta lei estabelece metas nacionais para a redução das emissões de gases de efeito estufa e orienta a integração das mudanças climáticas nas políticas públicas.

A PNMC é complementada pelo Plano Nacional sobre Mudança do Clima, que detalha as ações a serem adotadas para atingir as metas estabelecidas. De acordo com Rei, Gonçalves e de Souza (2017), o Brasil também tem se engajado ativamente nas negociações internacionais, demonstrando um compromisso com os objetivos do Acordo de Paris e apresentando suas próprias NDCs.

Além disso, o país tem promovido iniciativas de conservação e desenvolvimento sustentável, como o Fundo Amazônia, que apoia projetos para a preservação da Floresta Amazônica e a mitigação das emissões de carbono (Lemos e Silva, 2011). A Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e a Lei da Mata Atlântica (Lei nº 11.428/2006) também refletem esforços para integrar considerações ambientais em diversas áreas da política nacional.

A evolução das discussões sobre mudanças climáticas, tanto no cenário internacional quanto no brasileiro, reflete um crescente reconhecimento da gravidade e complexidade do assunto. Desde os primeiros estudos científicos até os mais recentes acordos internacionais, a legislação tem evoluído para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

No Brasil, a integração das mudanças climáticas nas políticas públicas e a participação ativa nas negociações internacionais destacam o papel crucial do país na busca por soluções globais (CONTI, 2005), o que pode ser percebido com ações como a confirmação do Brasil como sede da 30ª Conferência das Partes (COP 30), a ser realizada em 2025 na cidade de Belém/PA.

Os Ministérios, as agências fiscalizadoras e demais agentes responsáveis por gerenciar e normatizar sobre diferentes assuntos, dentro de sua capacidade e envolvimento com o tema ambiental, tem produzido material e estabelecido prazos de ações envolvendo as questões climáticas, como é o caso do setor marítimo e aéreo, por exemplo.

A continuidade dos esforços e a implementação eficaz das políticas são essenciais para mitigar os impactos das mudanças climáticas e promover um futuro sustentável para as próximas gerações (Marengo, Schaeffer, Pinto, Zee, 2009).

2.2 Eventos climáticos extremos da atualidade

Os impactos ambientais e sociais resultantes das mudanças climáticas representam uma ameaça significativa aos interesses fundamentais das sociedades contemporâneas (IPCC, 2014; 2019). Entre esses impactos, destacam-se, por exemplo, o aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como períodos de calor extremo e precipitação intensa, que resultam em inundações, alagamentos, deslizamentos de terra e períodos de seca em diversas regiões e o aumento médio do nível do mar à nível mundial (Marengo et al., 2009).

Eventos climáticos extremos são frequentemente designados como "desastres naturais" e têm o potencial de causar interrupções severas no funcionamento cotidiano das comunidades, impactando significativamente suas rotinas e atividades (Giulio et al, 2019). Esses eventos acarretam perdas materiais, humanas e ambientais substanciais, além de representarem riscos à saúde pública, demandando a implementação urgente de medidas preventivas e estudos socioambientais para mitigar seus impactos (Marengo et al., 2009).

De acordo com informações da Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável - FBDS, existem alguns tipos de eventos climáticos extremos que são mais comuns e frequentes, a saber: estiagem e seca, incêndios florestais, ondas de calor e de frio, inundações e enchentes, deslizamentos de terra, e ciclones, tornados e vendavais (Marengo et al, 2011). Esses eventos têm o potencial de provocar danos agrícolas significativos (Neto, 2014; Lovatelli, 2011), escassez de recursos hídricos (Sobral, 2018), interrupções no fornecimento de energia elétrica (Brito, 2021), propagação de doenças (Valdivino, Rodrigues & Coelho, 2021), entre outros impactos.

Com o aumento contínuo da temperatura global, espera-se um incremento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos em escala global (IPCC,2022). Corroborando com as informações do IPCC, a Organização Meteorológica Mundial afirmou em estudo recente que o ano de 2023 foi destacado como o mais quente registrado na história do planeta, ressaltando recordes de riscos climáticos na América Latina e no Caribe (OMM, 2023).

No Brasil, por exemplo, foram registrados 12 eventos climáticos extremos em 2023, dos quais nove foram considerados incomuns e dois sem precedentes (OMM, 2023). A OMM reporta que esses eventos incluíram cinco ondas de calor, três

chuvas intensas, uma onda de frio, uma inundação, uma seca e um ciclone extratropical.

A preocupação com eventos climáticos extremos é justificada por diversas razões essenciais que afetam tanto o meio ambiente quanto a sociedade. Esses eventos representam uma ameaça direta à vida e à segurança das populações, podendo resultar em mortes, pessoas feridas e deslocamentos sociais em larga escala (Giulio et al, 2019). Além disso, eles possuem o potencial de causar danos econômicos significativos, destruindo propriedades, infraestruturas críticas como estradas e sistemas de abastecimento de água, e afetando negativamente setores econômicos locais (Giulio et al, 2019).

Do ponto de vista ambiental, eventos climáticos extremos impactam adversamente os ecossistemas naturais (Milanez & Fonseca, 2010). Por exemplo, incêndios florestais destroem habitats e ecossistemas vulneráveis, enquanto enchentes podem contaminar rios e oceanos com detritos e produtos químicos, comprometendo a biodiversidade e a saúde dos ecossistemas marinhos (Marengo et al, 2011). Secas prolongadas, enchentes repentinas e ondas de calor extremas também podem reduzir a produção agrícola e pecuária, levando à escassez de alimentos e ao aumento dos preços alimentares, aumentando a insegurança alimentar em comunidades vulneráveis, por exemplo (Lovatelli, 2011).

Além dos impactos físicos, econômicos e ambientais, eventos climáticos extremos exercem impactos sociais significativos, desestabilizando comunidades, aumentando a desigualdade social e comprometendo o desenvolvimento humano, especialmente em áreas já marginalizadas ou economicamente vulneráveis (Ribeiro, 2008).

Com o aumento do nível do mar como consequência do aquecimento global, as áreas costeiras se tornam particularmente vulneráveis a eventos climáticos extremos como tempestades costeiras e furacões, intensificando a erosão costeira e aumentando o risco de inundações em áreas densamente povoadas ou com vocação portuária (IPCC, 2022).

Em síntese, a preocupação com eventos climáticos extremos é fundamentada nos amplos e profundos impactos que eles exercem sobre a vida humana, os ecossistemas naturais e a economia global. A adoção de estratégias

eficazes de mitigação e adaptação é crucial para reduzir esses impactos e construir resiliência diante das mudanças climáticas em curso.

2.3 Aumento do Nível do Mar e impactos nas regiões costeiras

De acordo com o Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016), a elevação do nível médio do mar devido ao aquecimento global intensifica a frequência e a severidade das inundações costeiras. Trata-se, portanto, de uma relação de causa e efeito, sendo destacado pelo próprio IPCC que, mesmo variações mínimas no nível do mar podem amplificar impactos nas áreas de costa (IPCC, 2022).

Há que se considerar também que tempestades e furacões de grande intensidade podem gerar ondas gigantes que empurram água para as áreas costeiras, resultando em um aumento temporário do nível do mar (IPCC, 2022). Essa dinâmica pode provocar inundações costeiras severas e erosão (Machado, 2014).

De forma prática, o aumento do nível do mar contribui significativamente para a erosão costeira, onde ondas induzidas por eventos climáticos extremos, como tempestades, erodem as praias e a linha costeira, ameaçando infraestruturas e comunidades litorâneas (PBMC, 2016). A elevação do nível do mar também pode provocar a intrusão de água salgada em aquíferos costeiros e estuários, afetando a disponibilidade de água doce para comunidades humanas e ecossistemas (Castro et. al, 2010).

O último relatório do IPCC (IPCC, 2022) adverte que as regiões costeiras de todo o mundo enfrentarão consequências sérias e inevitáveis associadas ao já evidenciado aumento do nível do mar por todo o mundo.

Mesmo que todos os países alcancem suas metas do Acordo de Paris até 2030 e cessem completamente as emissões de carbono — um cenário considerado ideal, mas irreal —, o nível do mar continuará a subir globalmente (ONU, 2022). Segundo os cientistas da Organização das Nações Unidas, até o ano 2300, espera-se que o nível do mar em todo o mundo esteja cerca de 90 centímetros mais alto do que hoje.

O Acordo de Paris foi aprovado na 21ª Conferência das partes (COP21) e foi criado com o objetivo de reduzir emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) para

atmosfera, mas sem estabelecer limites ao desenvolvimento econômico dos países. O Acordo, que entrou em vigor em 2016, estabeleceu que os países se comprometeriam a reduzir suas emissões até 2025 ou 2030, revisando regularmente suas metas a cada cinco anos (Reis, Gonçalves, de Souza, 2017).

Essas metas, conhecidas como Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), variam amplamente em termos de ambição e viabilidade, mas representam um marco significativo para medir o progresso (Reis, Gonçalves, de Souza, 2017). A nível global, pouco avanço foi evidenciado associado ao cumprimento das NDCs, principalmente porque tais contribuições são declarações unilaterais (Hisamoto, 2022).

As NDCs foram concebidas para ajudar os países a evitar um aumento excessivo da temperatura atmosférica. No entanto, como aponta Hisamoto (2022) não é apenas o calor que afetará as populações no futuro. O aumento da temperatura trará uma série de mudanças no sistema climático, desde tempestades mais intensas até o aumento do nível do mar (Artaxo, 2014) e muitos desses impactos já estão sendo observados.

Em relação às mudanças climáticas e seus impactos no aumento do nível do mar, as decisões tomadas hoje são cruciais: quanto mais rapidamente reduzirmos as emissões de gases GEE, mais gradualmente o ambiente responderá, proporcionando mais tempo para que cidades costeiras e sociedade como um todo se preparem ou se adaptem, e permitindo que soluções para a crise climática sejam implementadas (Artaxo, 2014).

Por outro lado, muitos dos impactos climáticos levarão décadas para serem plenamente sentidos e, provavelmente, não poderão ser revertidos mesmo se o mundo seguir empenhado a alcançar as metas climáticas mais ambiciosas (Jandrey & Aumond, 2020).

A elevação do nível do mar é um impacto de evolução lenta e, mesmo com emissões de GEE reduzidas a zero, o nível do mar continuará a subir nas próximas centenas de anos, pois o gelo global responde de maneira lenta aos estímulos presentes (ONU, 2022).

Recentemente, cientistas também revisaram mapas que previam os impactos do aumento do nível do mar em cidades globais e a correção dos dados de satélite revelou que aproximadamente 190 milhões de pessoas viverão abaixo da linha

da maré alta em 2100 — 80 milhões a mais do que atualmente previsto e três vezes mais do que se imaginava anteriormente (Benjamin H Strauss et al, 2021).

2.4 Uso de modelos na avaliação de cenários climáticos

O uso de modelos associados à estudos envolvendo as condições climáticas atuais e futuras é cada vez mais frequente, quer seja com críticas aos modelos existentes, quer seja com lançamento de nova proposta à comunidade científica (Araújo Neto, 2019; Oliveira, Pedrollo & Castro, 2015). Fato é que os modelos climáticos são importantes ferramentas para investigar a resposta do sistema climático a diferentes tipos de forçantes (Bernardino & Espírito Santo, 2015).

Nesse contexto, o uso de modelo de autômatos celulares tem sido utilizado para diferentes vertentes de análise climática, como por exemplo na quantificação e neutralização da emissão de carbono (Bastos & Loreto, 2012), análise de impactos (Afonso, 2015), entre outras aplicabilidades.

Os modelos de autômatos celulares são ferramentas computacionais muito importantes para a simulação e estudo de sistemas complexos (Melotti, 2009). No entanto, cabe inicialmente uma definição do que seria um sistema complexo.

Para Melotti (2009), um sistema é dito complexo quando suas propriedades não são uma consequência natural de seus elementos constituintes vistos isoladamente. Segundo o referido autor, as propriedades emergentes de um sistema complexo decorrem, em grande parte, da relação não-linear entre as partes, ou seja, um sistema complexo é o todo e mais a soma das partes.

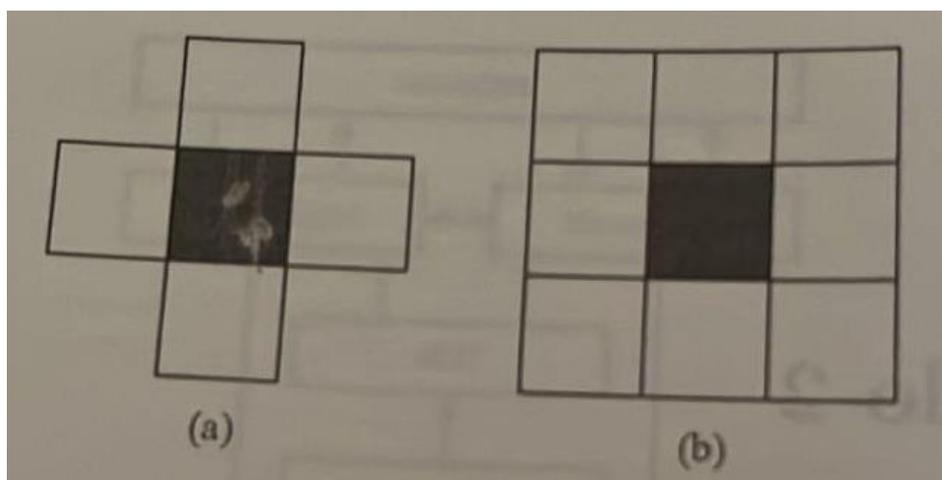
São exemplos de sistemas complexos, as redes sociais, colônias de animais, o clima e até mesmo a economia. Esses sistemas são complexos no sentido de que há um grande número de agentes, que aparentemente independentes, interagem entre si e a riqueza dessas interações muitas vezes permite que o sistema como um todo seja auto-organizado (Pearce; Merletti, 2006; Melotti, 2009).

Uma pergunta recorrente ao estudo de tais sistemas é: “porque e como padrões complexos emergem a partir da interação entre os elementos?”, ou mesmo “como esses padrões evoluem com o tempo?”. Respostas a essas perguntas não são totalmente conhecidas, mas o estudo de modelos de autômatos celulares pode auxiliar no estudo e na análise de tais sistemas.

De acordo com Aguiar (2004), o conceito original de autômato celular está relacionado a John von Neumann, que na década de 1940, a partir do interesse em conectar questões da Biologia com o contexto dos dispositivos computacionais, criou a Teoria dos Autômatos.

Martins (2010) que direcionou sua pesquisa para avaliar o uso de autômato celular aplicado à saúde, acrescenta que John von Neumann tinha como objetivo propor regras matemáticas para simular os princípios evolutivos da natureza considerando uma configuração inicial aleatória, onde cada componente do sistema passaria por influência direta de seus vizinhos e do conjunto de regras (Figura 1).

Figura 1 – Modelos de Vizinhança, onde (a) expressa a vizinhança de Von Neumann e (b) expressa a vizinhança de Moore, que é a vizinhança de von Neumann mais as células das diagonais



Fonte: Aguiar, 2004.

De acordo com Martins (2010), os autômatos celulares foram introduzidos e reutilizados para outros tipos de idealizações e chamados por vários outros nomes, como por exemplo: mosaico autômato, estruturas homogêneas, estruturas de mosaico e arranjos interativos. Para a autora supracitada, “o autômato celular consiste em uma rede uniforme regular (ou arranjo), usualmente infinita no tempo, com uma variável discreta em cada célula (sítio)” (Martins, 2010, p. 5).

Considerando essa definição, entende-se que a célula é a unidade fundamental de um dado sistema lógico, o que permite a aplicabilidade das regras relacionadas aos autômatos celulares com os mais diversos objetivos, podendo ser aplicado à estudos de saúde (Melotti, 2009; Martins, 2010), avaliação do crescimento

urbano (Peres; Pollidori, 2009), avaliação de condição de resiliência vegetal (Lanzer, 2004; Bezerra, 2014), entre outros.

Em um sistema de autômatos celulares, portanto, cada célula tem, em um determinado momento, um estado único e um conjunto de atributos que define este estado (Bezerra; Bezerra, 2023). Assim, durante uma dada simulação, os estados e atributos de cada célula podem mudar de acordo com as regras de transição.

No que se refere às análises acerca do aumento do nível do mar, importantes contribuições tem destaque no cenário acadêmico (Bezerra, 2014; Dalcin, 2022; Bezerra; Bezerra, 2023), principalmente devido à realização de simulações destes eventos em um intervalo temporal pré-determinado.

O modelo utilizado na execução da presente pesquisa foi o BR-Mangue, desenvolvido por Bezerra (2014) para simular a resposta do ecossistema mangue em relação ao avanço e elevação do nível médio do mar (ENMM). Na proposta inicial, o modelo avaliou a ENMM em oitenta etapas de elevação, distribuídas em uma linha temporal de oito décadas (de 2020 à 2100), considerando o aumento de 0,125m por década.

De acordo com o procedimento metodológico de Bezerra (2014), o BR-Mangue tinha por objetivo simular cinco eventos específicos, sendo eles: a) aumento do nível do mar em relação ao continente; b) deslocamento da área de influência das marés; c) formação de novos bancos de lama (acrecção longitudinal do sedimento); d) a resistência do mangue em relação ao ANMM (extensão da área) e; e) desenvolvimento de novas zonas de mangue.

Nesse sentido, partindo de um dos objetivos daquela pesquisa (BEZERRA, 2014), que é a possibilidade de simulação do aumento do nível do mar em relação ao continente, o BR-Mangue se torna interessante ferramenta para avaliação do aumento do nível do mar na área portuária de São Luís - MA.

De forma sintética, o modelo computacional BR-Mangue foi implantado no software TerraME, que se trata de uma caixa de ferramentas para modelagem espacialmente explícita integrada com banco de dados geoespaciais. Nesse programa é possível a realização de uso de banco de dados geográficos do TerraLib, permitindo, portanto, a realização de análises baseadas em modelos computacionais. A linguagem utilizada pelo criador do modelo BR-Mangue é a linguagem LUA, que é entendida como sendo uma linguagem eficiente e leve (BEZERRA, 2014).

2.5 Cenários SSPs (Shared Socio-Economic Pathways - Caminhos Socioeconômicos Compartilhados).

Desde 1990 o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) já lançou seis Relatórios de Avaliação, popularmente conhecidos como ARs. O Primeiro Relatório de Avaliação (FAR) foi lançado em 1990; o Segundo Relatório de Avaliação (SAR) data de 1995; o Terceiro Relatório de Avaliação (TAR) é de 2001; o Quarto Relatório de Avaliação (AR4) é de 2007; O Quinto Relatório de Avaliação (AR5) teve lançamento em várias partes entre 2013 e 2014 e o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) é de 2022.

Na elaboração dos ARs, o IPCC utilizou dois tipos de cenários, os cenários RCP (Representative Concentration Pathways) e o formato de SSP (Shared Socioeconomic Pathways). De acordo com Matias (2022) estes cenários tem por objetivo principal explorar as diferentes trajetórias futuras de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), mudanças climáticas e impactos associados.

De uma forma resumida, os RCPs são usados principalmente nos modelos climáticos para simular o clima futuro com base em diferentes trajetórias de emissões de GEE. Cada RCP representa uma faixa de concentração atmosférica de gases GEE até o ano 2100, derivada de diferentes combinações de políticas de mitigação e desenvolvimento tecnológico (Matias, 2022).

Existem quatro RCPs principais, sendo eles o RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, cada um representando uma faixa de concentração esperada de GEE até o ano 2100, sendo o cenário RCP2.6 o mais otimista em termos de mitigação das mudanças climáticas e o RCP8.5 o mais pessimista, com um alto crescimento de emissões de GEE (Higuera-Castro, 2022).

Os SSPs são cenários que descrevem diferentes trajetórias socioeconômicas globais e regionais, incluindo mudanças demográficas, desenvolvimento econômico, tecnológico e políticas de mitigação (Matias, 2022), são utilizados para explorar como diferentes futuros socioeconômicos podem influenciar as emissões de Gases de Efeito Estufa (Higuera-Castro, 2022).

Existem cinco SSPs principais: SSP1 (Caminho Sustentável), SSP2 (Caminho Reformista), SSP3 (Caminho Desigual), SSP4 (Caminho de

Desenvolvimento Sustentável Rápido) e SSP5 (Caminho de Desenvolvimento Fossil Intensivo) (IPCC, 2022).

Enquanto o RCP concentra-se exclusivamente nas projeções de concentrações atmosféricas de GEE e seus impactos climáticos diretos, o SSP considera uma gama mais ampla de fatores socioeconômicos que influenciam as emissões de GEE, como por exemplo, questões relacionadas ao desenvolvimento econômico das populações, demografia, tecnologia, políticas de mitigação e suas interações com as mudanças climáticas (Matias, 2022).

Entretanto, é importante ressaltar que ambos os conjuntos de cenários são essenciais para entender e planejar respostas às mudanças climáticas globais. Nos relatórios do IPCC, especialmente no último relatório de avaliação, o AR6, são apresentados resultados baseados na combinação de diferentes RCPs e SSPs. Isso permite uma análise abrangente dos impactos climáticos esperados sob diferentes condições socioeconômicas e de emissões, ajudando formuladores de políticas e tomadores de decisão a entenderem as implicações das escolhas atuais e futuras em relação às mudanças climáticas (Higuera-Castro, 2022).

Nesta pesquisa, ao se analisar o aumento médio do nível do mar na Bacia Hidrográfica do Itaqui, são utilizados os cenários SSPs descritos pelo IPCC em seu 6º Relatório de Avaliação, seguindo as projeções específicas do aumento do nível do mar esperado até 2100 por cada um daqueles caminhos.

A fim de sintetizar as informações, organizou-se os dados em informação na Tabela abaixo.

Tabela 1: Cenários SSP (Shared Socioeconomic Pathways).

SSP (<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>)	Descrição	Projeção de aumento do nível do mar até 2100
SSP1 (Caminho Sustentável)	Descreve um futuro onde políticas globais focam na sustentabilidade ambiental, desenvolvimento econômico equitativo e	Cerca de 0,3 a 0,6 metros

	baixas taxas de crescimento populacional.	
SSP2 (Caminho Reformista)	Reflete um cenário intermediário onde as tendências atuais de crescimento econômico e demográfico continuam, com esforços moderados para mitigar as mudanças climáticas.	Cerca de 0,4 a 0,7 metros
SSP3 (Caminho Desigual)	Considera um futuro com desenvolvimento econômico alto e desigualdades persistentes, com um foco limitado na sustentabilidade.	Cerca de 0,5 a 0,9 metros
SSP4 (Caminho de Desenvolvimento Sustentável Rápido)	Imagina um mundo com rápido desenvolvimento econômico, mas com avanços significativos em tecnologias de baixo carbono e mitigação.	Cerca de 0,3 a 0,6 metros
SSP5 (Caminho de Desenvolvimento Fossil Intensivo)	Descreve um cenário onde o crescimento econômico é priorizado sobre a sustentabilidade ambiental, com um uso contínuo e intenso de combustíveis fósseis.	Cerca de 0,6 a 1,1 metros

Fonte: IPCC, 2023.

As projeções dos SSPs são baseadas em modelos climáticos e consideram diferentes trajetórias de emissões de Gases de Efeito Estufa e outras variáveis que influenciam as mudanças climáticas e, conseqüentemente, o aumento do nível do mar ao longo do século XXI (IPCC, 2022).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Bacia Hidrográfica do Itaqui

A princípio, o objetivo principal deste estudo é a possibilidade do uso do algoritmo BR-Mangue na simulação do aumento do nível do mar em relação à porção oeste do continente da Ilha do Maranhão, especificamente na região portuária de São Luís - MA.

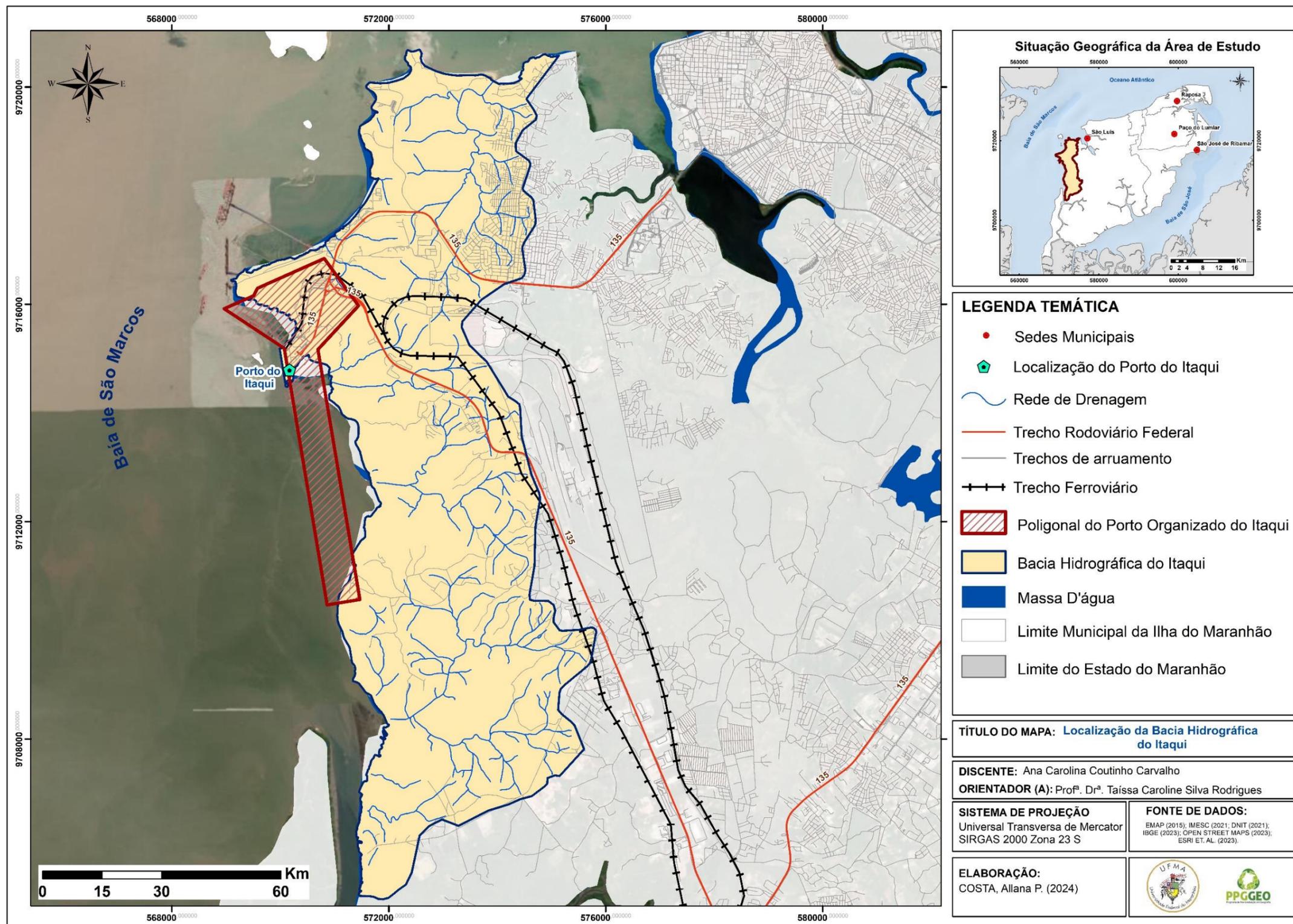
Em decorrência da dificuldade de levantamento de dados públicos, gratuitos e com resolução capaz de trazer informações com boa qualidade da região do Complexo Portuário do Itaqui de forma isolada, optou-se pela realização de uma análise mais abrangente, no caso, utilizando dados referente à Bacia Hidrográfica do Itaqui, onde está localizado os empreendimentos portuários de São Luís/MA.

A necessidade de definição de limites de análise para a interpretação de dados se torna um dos principais *input* de dados nas análises de geoprocessamento e considerando a diferença entre limites político-administrativos e os limites físicos ambientais, as bacias hidrográficas são excelentes unidades de análise, corroborando com a própria indicação da Política Nacional de Recursos Hídricos instituída pela lei nº 9.433/97 que coloca a Bacia Hidrográfica como uma ótima unidade de análise para considerações a respeito de atuação da água e outras características do meio físico (BRASIL, 1997).

A bacia hidrográfica do Itaqui (Figura 2) localiza-se na porção Oeste da Ilha do Maranhão, estando situada inteiramente no município de São Luís. A referida Bacia Hidrográfica possui cerca de 52 km² e hierarquia fluvial de 3ª ordem, de acordo com a hierarquia de Strahler (Araújo; Teles; Lago; 2009).

Em estudo específico sobre as delimitações das Bacias Hidrográficas da Ilha do Maranhão, Araújo, Teles e Lago (2009), descreveram a Bacia Hidrográfica do Itaqui como um sistema fluvial de 49,18km de perímetro, 2,21 km/km² de densidade de drenagem, sendo considerado uma Bacia bem drenada (EMAP, 2017).

Figura 2 – Localização da Bacia do Itaqui e do Porto do Itaqui



Fonte: Autora, 2024.

3.2 Porto do Itaqui

Como anteriormente explicado, a princípio, o objetivo do estudo buscava avaliar o aumento do nível do mar e suas interferências e consequências no Porto do Itaqui, motivo pelo qual, entende-se como necessário e relevante uma apresentação sobre o Porto Público do Maranhão.

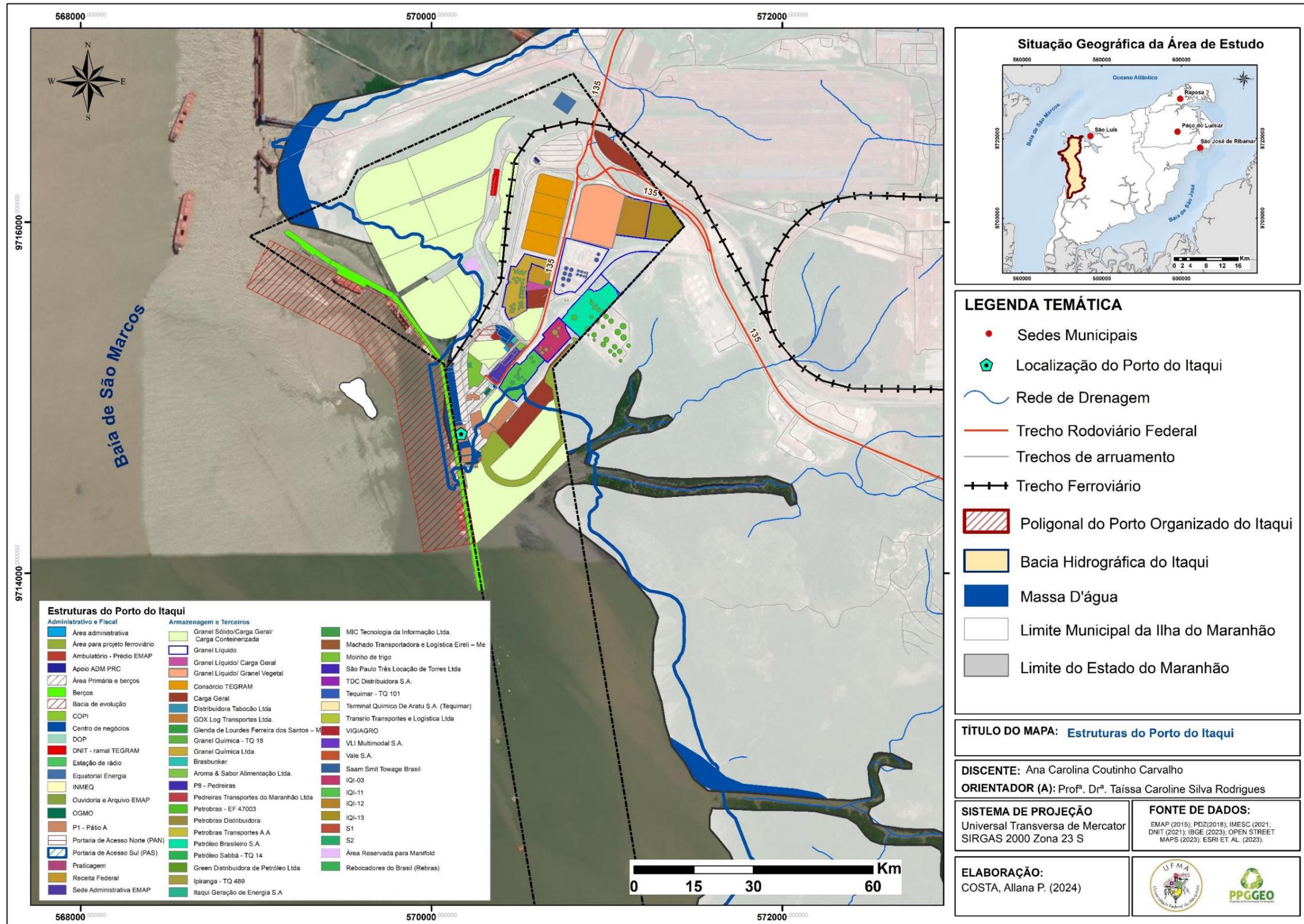
O Porto do Itaqui, de acordo com a Lei nº 12.815/2013, conhecida como “nova Lei dos Portos” é definido como Porto Organizado, tratando-se de um bem público construído e aparelhado para atender a necessidades de navegação, de movimentação de passageiros ou de movimentação e armazenagem de mercadorias, e cujo tráfego e operações portuárias estejam sob jurisdição de autoridade portuária (BRASIL, 2013).

Na sua poligonal, definida pelo Decreto da Presidência da República de 25 de julho de 2005, o Porto do Itaqui é constituído por instalações portuárias e infraestrutura de proteção e acesso aquaviário. A respeito das instalações portuárias propriamente ditas, estas abrangem o cais, docas, pontes, píeres de atracação e de acostagem, armazéns, silos, rampas ro-ro, pátios, edificações em geral, vias internas de circulação rodoviária e ferroviária e, ainda, os terrenos ao longo dessas faixas marginais. A respeito da infraestrutura de proteção e acesso aquaviário, esta é composta por áreas de fundeio, bacias de evolução, canal de acesso e áreas adjacentes a estes, até as margens das instalações terrestres do Porto Organizado (BRASIL, 2005).

Importante ressaltar que data de 1940 o aceite do Departamento de Portos do Governo Federal do Brasil para fixação do Itaqui como local mais adequado para o estabelecimento da região portuária de São Luís (Lima Neto, 2005) e atualmente o Itaqui figura como um dos principais portos brasileiros.

O Porto do Itaqui está localizado na porção oeste da cidade de São Luís – MA (Figura 3), na baía de São Marcos na região do Itaqui, a 11 km do Centro Histórico, ocupando em toda a extensão de sua poligonal uma área aproximada de 5,1 milhões de metros quadrados, dos quais cerca de 40% está sobre terra firme e 60% sobre a água (EMAP, 2017).

Figura 3 – Mapa com o detalhamento da área do porto



Fonte: Autora, 2024.

As estruturas físicas, terrestres e marítimas do Porto do Itaqui são administradas pela Empresa Maranhense de Administração Portuária desde fevereiro de 2000, por meio do Convênio de Delegação nº 016/2000 estabelecido entre o Ministério dos Transportes com a interveniência da Companhia Docas do Maranhão (CODOMAR) e o Estado do Maranhão.

A EMAP é uma empresa pública estadual com personalidade jurídica de direito privado, dotada de autonomia administrativa, técnica, patrimonial e financeira, com sua sede no Porto do Itaqui, em São Luís – Maranhão e figura como Autoridade Portuária, para fins do disposto na própria Lei nº 12.815/2013 (BRASIL, 2013).

Há que se ressaltar, que há diferença entre Porto Organizado do Itaqui e o Complexo Portuário do Itaqui, sendo o último composto pelo Porto Organizado do Itaqui, pelo Terminal de Uso Privado da Ponta da Madeira (VALE), pelo Terminal de Uso Privado da Alumar e por dois terminais que estão em fase de projeto: Terminal Portuário de São Luís e Terminal Portuário do Mearim (EMAP, 2018).

4 ASPECTOS METODOLÓGICOS

4.1 Materiais

Para a realização da pesquisa, fez-se necessário o uso de dados, *Softwares* e Equipamentos, que aqui serão entendidos como “materiais” e especificados abaixo:

Dados:

- Dados vetoriais: cartografia elaborada pelo Zoneamento Costeiro do Estado do Maranhão, na escala 1:100.000 (IMESC, 2021); material sobre a poligonal do Porto do Itaqui disponibilizado em extensão vetorial pela EMAP,

- Dados raster: dados altimétricos obtidos do Alos Palsar, que se trata de um Modelo Digital de Elevação (MDE) da *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM reamostrado para 12,5 metros; além de dados de uso e cobertura do MApBiomias Brasil, em escala de 1:100.000.

- Código Fonte (modelo utilizado nas simulações): o BR-Mangue é baseado em autômatos celulares.

Softwares:

- TerraView 4.1.0: Sistema de Informação Geográfica concebido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;

- Crimson Editor SVN286M: editor de código-fonte para Windows;

- TerraME: que serviu como plataforma de modelagem;

- QGIS em sua versão 3.22.6 (Białowieża): para elaboração dos mapas apresentados ao longo do estudo.

- Pacote office da Microsoft.

Equipamentos:

- Notebook Inspiron 14 DELL, modelo P93G.

4.2 Procedimentos Metodológicos

O ambiente do TerraView 4.1.0 é uma base de dados que foi estabelecida para abarcar tanto os dados iniciais necessários ao procedimento de modelagem quanto o espaço celular empregado no desenvolvimento e na implementação do modelo. O TerraView 4.1.0 se configura como um sistema de

informação geográfica concebido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2011).

No tocante ao mapeamento das categorias de solo, utilizou-se a cartografia elaborada pelo Zoneamento Costeiro do Estado do Maranhão, na escala 1:100.000 (IMESC, 2021) a fim de estabelecer os limites das classes de solo. Quanto aos dados altimétricos, estes foram obtidos do Alos Palsar, que se trata de um Modelo Digital de Elevação (MDE) da Shuttle Radar Topography Mission - SRTM reamostrado para 12,5 metros, permite correções de terreno e ortorretificação, amenizando efeitos de sombreamento, relevo invertido e encurtamento de rampa. Em relação aos dados de uso e cobertura, foram utilizadas informações do MApBiomias Brasil, em escala de 1:100.000.

Foi traçado um cenário celular composto por 7.031 unidades (utilizando como critério o perímetro da Bacia Hidrográfica do Itaqui), abrangendo uma área de 1 hectare (100 x 100 m), onde se localiza a região portuária objeto deste estudo.

Empregando uma abordagem fundamentada nos princípios dos autômatos celulares, cada célula carrega, em seu estágio inicial, uma identidade distinta e um conjunto específico de características. Durante as etapas de simulação, tanto as identidades quanto as características de cada célula podem sofrer alterações, seguindo as regras de transição inerentes ao modelo em análise.

O modelo utilizado, o BR-Mangue, é baseado em tais autômatos celulares e proporcionou possibilidade de análise para a Bacia Hidrográfica estudada, possibilitando avaliação do aumento do nível do mar naquelas delimitações geográficas.

Em linhas gerais, foram elaborados cinco modelos de análise, com o recorte histórico até 2100, cada um associado à um SSP (Shared Socioeconomic Pathways) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), sendo eles, o SSP1-1.9, com projeção de aumento de 0,3 do nível do mar; SSP1-2.6, com estimativa de aumento de nível do mar de 0,6m; SSP2-4.5, com estimativa de aumento de cerca de 0,7m do nível do mar SSP3-7.0, com aumento do nível do mar estimado de cerca de 0,9m e; SSP5-8.5, com estimativa de aumento de cerca de 1,1m do nível do mar até 2100.

Na análise dos modelos citados acima, a natureza das células está intrinsecamente ligada às diferentes categorias de cobertura do solo, enquanto suas características englobam os valores relacionados com as classes de solo, dados altimétricos e a Área de Influência das Marés (AIM), adotada como 6m para todos os cenários. Ressalta-se que o cenário inicial é único, servindo de comparativo a todos os modelos criados.

Após a organização das informações geográficas no TerraView 4.1.0, trabalhou-se o código fonte do BR-Mangue no software Crimson Editor SVN286M. Ressalta-se que esta pesquisa não contribuiu na análise e/ou alteração do citado código fonte, mas tão somente utilizou daquelas regras pré-estabelecidas por Bezerra (2014) para avaliação da área de estudo.

Auxiliando na interação dos dados do TerraView 4.1.0 e do Crimson Editor SVN286M, utilizou-se o software TerraME que serviu como plataforma de modelagem propriamente dita. Para elaboração dos mapas apresentados ao longo do estudo, foi utilizado o QGIS em sua versão 3.22.6 (Białowieża).

4.3 Cenários de análise

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC desempenha um papel crucial ao fornecer avaliações científicas sobre os impactos das atividades humanas no clima global, apresentando suporte de dados e informações aos tomadores de decisões sobre questões relativas às mudanças climáticas.

Antes de apresentar em detalhes os cenários de estudo da presente pesquisa, é importante o compartilhamento técnico adotado pelo IPCC em relação ao posicionamento do Painel sobre as observações e constatações realizadas no âmbito do AR6 (Sixth Assessment Report).

A fim de transmitir a confiabilidade de suas conclusões e garantir uma definição de parâmetros mensuráveis e padronizados, o IPCC utiliza uma classificação estatística que reflete diferentes níveis de probabilidade associados aos seus resultados. Essa escala estatística é fundamental para que os formuladores de políticas e o público em geral compreendam a robustez das conclusões apresentadas (IPCC, 2022).

De acordo com o AR6 (IPCC, 2022), os níveis de probabilidade são definidos da seguinte maneira: a) Virtualmente certo: 99% a 100% de probabilidade; b) Extremamente provável: 95% a 99% de probabilidade; c) Muito provável: 90% a 95% de probabilidade; d) Provável: 66% a 90% de probabilidade; e) Mais provável que improvável: mais de 50% de probabilidade; f) Tão provável quanto improvável: 33% a 66% de probabilidade; g) Improvável: menos de 33% de probabilidade; h) Muito improvável: menos de 10% de probabilidade e; i) Extremamente improvável: menos de 5% de probabilidade.

Além da probabilidade, o IPCC também expressa a confiança no entendimento científico por meio de intervalos de confiança (IPCC, 2022). Esses intervalos refletem a robustez das conclusões científicas e são representados da seguinte forma: a) Muito alta confiança: 9 em 10 chances; b) Alta confiança: 8 em 10 chances; c) Média confiança: 5 em 10 chances; d) Baixa confiança: 2 em 10 chances e; e) Muito baixa confiança: 1 em 10 chance.

A definição desses termos permite que o IPCC forneça orientações claras aos tomadores de decisões e para a sociedade como um todo. Ao reconhecer e comunicar essas incertezas de maneira transparente, o IPCC fortalece a confiança no processo científico e nas implicações de suas descobertas para o futuro do nosso planeta.

O AR6 tem uma nova série de cenários de emissões, o CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) que em tradução livre trata-se do “Projeto de Intercomparação de Modelos Climáticos Versão 6”.

Segundo Ortega (2021), as projeções do CMIP5 tiveram seus modelos climatológicos atualizados, além da inclusão da consideração dos cenários socioeconômicos e também pela atualização das tendências de emissões de Gases de Efeito Estufa, culminando em um maior detalhamento e nos modelos do CMIP6, sendo este último a ferramenta mais atual disponível para avaliação do impacto das mudanças climáticas.

Os cenários baseados no SSP são referidos como SSPx-y, onde ‘SSPx’ se refere ao Trajetória Socioeconômica Compartilhada descrevendo as tendências socioeconômicas subjacentes aos cenários, e ‘y’ se refere ao nível de forçante radiativa (em watts por metro quadrado, ou $W m^{-2}$) resultante do cenário no ano 2100 (IPCC, 2022).

De acordo com o Sexto Relatório do IPCC (2022),

“O aquecimento global continuará aumentando no curto prazo (2021-2040) principalmente devido ao aumento das emissões acumuladas de CO₂ em quase todos os cenários considerados e trajetórias modeladas. No curto prazo, é mais provável do que improvável que o aquecimento global atinja 1,5°C mesmo sob o cenário de emissões de GEE muito baixas (SSP1-1.9) e provável ou muito provável que exceda 1,5°C sob cenários de emissões mais altas. Nos cenários considerados e nas trajetórias modeladas, as melhores estimativas do momento em que se atinge o nível de aquecimento global de 1,5°C situam-se no curto prazo. O aquecimento global retorna para menos de 1,5°C até o final do século 21 em alguns cenários e trajetórias modeladas. A resposta climática avaliada para os cenários de emissões de GEE resulta em uma melhor estimativa do aquecimento para 2081-2100 que abrange uma faixa de 1,4°C para um cenário de emissões de GEE muito baixas (SSP1-1,9) a 2,7°C para um cenário de emissões de GEE intermediárias (SSP2-4,5) e 4,4°C para um cenário de emissões de GEE muito altas (SSP5-8,5), com faixas de incerteza mais estreitas do que para os cenários correspondentes no AR5” (IPCC, 2022, p 28).

O Painel (IPCC, 2022) ainda aponta que, durante este século, o aquecimento do oceano pode ser de duas vezes maior (SSP1-2.6) a oito vezes maior (SSP5-8.5) do que o observado entre 1971 e 2018, sendo virtualmente certo que o oceano continuará subindo, uma vez que a expansão térmica é irreversível na escala de centenas a milhares de anos.

Assim, a elevação total neste século dependerá do cenário de emissões: ela pode ser de 28 cm a 55 cm (SSP 1.9, melhor cenário) até 63 cm a 1,02 m (SSP 8.5, pior cenário) em relação à média de 1995-2014 .

No pior cenário, picos de maré alta extrema que ocorriam uma vez a cada século poderão ocorrer uma vez por ano em 80% das localidades com medições de maré do mundo. Para além de 2100, a absorção de calor pelo oceano profundo e o derretimento dos mantos de gelo podem seguir elevando o mar por milênios (IPCC,2022).

Assim, considerando o CMIP6 e a execução do presente estudo, será analisado o aumento médio do nível do mar na bacia hidrográfica do Itaquí em cinco cenários distintos: dois de baixas emissões, um de médias emissões e dois de altas emissões.

Os cenários SSP1, conhecidos como “Caminho Sustentável”, são aqueles de muito baixas (SSP 1-1.9) ou baixas (SSP 1-2.6) emissões de Gases de Efeito Estufa. Ele se baseia em uma trajetória de crescimento econômico que é ambientalmente sustentável e socialmente inclusiva. É o cenário que preza

pelo Desenvolvimento Sustentável em sua essência e tem como projeção de aumento de 0,3 a 0,6m do nível do mar.

Os cenários de emissões muito baixas e baixas de GEE (SSP1-1.9 e SSP1-2.6) têm emissões líquidas de CO₂ diminuindo para zero por volta de 2050 e 2070, respectivamente, seguidos por níveis variáveis de emissões líquidas negativas de CO₂.

Para este estudo, o cenário SSP1-1.9, será considerado o modelo A de análise, com aumento do nível do mar de 0,3m até 2100. E o cenário SSP1-2.6, será o modelo B da pesquisa, sendo simulado o aumento de 0,6m do nível do mar no mesmo período de análise.

Como cenário de emissões intermediárias, o cenário SSP2, também considerado como “caminho desigual”, será aquele considerado na presente pesquisa, tido como modelo C, estando associado de forma específica ao SSP2-4.5, com estimativa de aumento de nível do mar de 0,7m até 2100. Esse cenário está associado às emissões de CO₂ que permanecem em torno dos níveis atuais até meados do século.

Os cenários de altas emissões estão associados aos SSP 3 (Caminho Desigual) e SSP5 (Caminho de Desenvolvimento Fóssil intensivo), respectivamente relacionados aos cenários SSP3-7.0 (0,9m de aumento do nível do mar) e SSP5-8.5 (1,1m de aumento do nível do mar). Para a pesquisa em tela o cenário SSP3-7.0 é o modelo D e o SSP5-8.5 é o modelo E. Os cenários de emissões de GEE altas e muito altas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5) têm emissões de CO₂ que aproximadamente dobram em relação aos níveis atuais até 2100.

Na presente pesquisa, descartou-se a realização de modelos do cenário SSP 4 (Caminho de Desenvolvimento Sustentável Rápido) porque este cenário está associado ao aumento do nível do mar estimado de cerca de 0,3 a 0,6m, valores que estão sendo analisados nos modelos A e B desta pesquisa.

Como o modelo BR-Mangue utiliza como dados de entrada as informações sobre classes do solo, uso e ocupação da área, altimetria e a projeção do aumento do nível do mar, não se tornou possível análises das forças que diferem o SSP 4 do SSP 1, tornando desinteressante à pesquisa aquele cenário.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise do Meio Físico e Ambiental da Bacia Hidrográfica do Itaqui

A análise do meio físico e ambiental de uma bacia hidrográfica desempenha um papel fundamental na gestão desse território e na promoção da sustentabilidade ambiental uma vez que compreender as características físicas e ambientais da bacia permite um planejamento mais eficaz para a captação, uso e conservação dos recursos ambientais da região.

Além disso, a análise do meio físico e ambiental é vital para a avaliação e mitigação de riscos ambientais, como erosão, assoreamento de rios, inundações e poluição (Pereira, 2022). Conhecer a topografia, o uso do solo e as características geológicas da bacia possibilita o desenvolvimento de estratégias para reduzir esses riscos e mitigar os impactos negativos no meio ambiente e nas comunidades locais (Matias et al, 2022).

Informações detalhadas sobre o meio físico da bacia, incluindo tipos de solo, cobertura vegetal e relevo, são essenciais para o planejamento territorial. Essa análise pode apoiar a formulação de políticas de uso do solo que buscam equilibrar a exploração econômica com a preservação ambiental, evitando práticas que possam degradar os recursos naturais.

A conservação da biodiversidade é diretamente influenciada pelo meio físico e ambiental da bacia hidrográfica e a análise desses fatores permite identificar habitats críticos para a fauna e flora, além de desenvolver planos de conservação para proteger espécies ameaçadas e ecossistemas frágeis (Pereira, 2024).

De acordo com Pereira (2024), a atividade humana, incluindo urbanização, agricultura e indústria, tem impactos significativos sobre o meio físico e ambiental da bacia e avaliar como essas atividades afetam a qualidade da água, a biodiversidade e os processos ecológicos é crucial para a implementação de práticas mais sustentáveis.

A região de estudo, portanto, situa-se no norte do Maranhão, num contexto no qual prevalece o clima tropical, no entanto, recebe influência do clima Equatorial, que é típico das baixas latitudes (EMAP, 2021). Esta

caracterização corrobora para a apresentação de uma temperatura média anual estável e elevada, apresentando-se em torno de 25°C (UEMA, 2016).

Conforme a classificação de Köppen, a área daquela bacia hidrográfica possui padrões que determinam o clima do local como tropical quente e semiúmido (EMAP, 2017). Este clima (Aw/As) é caracterizado pela temperatura média acima de 18° C durante a maior parte do ano e por períodos distintos definidos por elevada pluviosidade seguida de estiagem. O período de maior precipitação ocorre entre os meses de fevereiro a maio, já a estiagem se dá entre os meses de agosto a outubro.

Segundo dados do Núcleo Geoambiental (UEMA, 2016), como o clima afeta diretamente o regime dos rios e a disponibilidade de água, a variação na quantidade de chuva ao longo do ano pode influenciar a vazão dos rios e a qualidade da água.

Como apontam Araújo; Teles; Lago (2009), a região do sistema hidrográfico analisado compreende o rio Itaqui como um dos principais cursos d'água da bacia e inclui também diversos riachos e pequenos rios que alimentam o Itaqui. A bacia pode ser caracterizada por um regime fluvial que depende das chuvas e da estação seca, típica da região que o Maranhão está inserido.

De acordo com a classificação estabelecidas na Resolução CONAMA nº 357/05, as características físico-químicas e biológica das amostras de água coletadas no entorno da poligonal do empreendimento do Porto do Itaqui se enquadram, na classe 1 ou 2, a depender do ponto de monitoramento e na época do monitoramento, que pode ser influenciado pela ocorrência de chuvas, por exemplo (EMAP, 2022).

A área de estudo não apresenta significativa diferença altimétrica, motivo que contribui para que não haja grandes variações nas medições de temperatura do ar durante o ano, ficando dentro da amplitude térmica de cerca de 3,5°C (EMAP, 2017).

A umidade média relativa do ar da região portuária se mantém em patamares elevados durante todo o ano, com mínima não inferior a 55% e a dinâmica dos ventos segue a direção predominante Norte e Leste (EMAP, 2022). Informações semelhantes são encontradas à nível da Bacia Hidrográfica do Itaqui (Araújo; Teles; Lago; 2009).

No que tange à caracterização geomorfológica da área de estudo, conforme a classificação da CPRM (2013), insere-se em dois domínios geomorfológicos: o Golfão Maranhense e os Tabuleiros de São Luís e Alcântara. Estudo específico realizado na área do Porto do Itaqui foi capaz de definir os três compartimentos geomorfológicos existentes na área, sendo eles: tabuleiro dissecado, planície fluviomarinha e fundo marinho (EMAP, 2017).

Os solos da bacia hidrográfica são majoritariamente latossolos, que são profundos e bem drenados, com características de alta fertilidade. No entanto, há variações locais dependendo da topografia e da presença de outros tipos de solos (Araújo; Teles; Lago; 2009). Os solos da região foram identificados e categorizados em conformidade às classes da EMBRAPA, possuindo matrizes rochosas exclusivamente sedimentares (EMAP, 2017).

Do ponto de vista de análise geológica, a área pode incluir formações sedimentares e basaltos, que influenciam a estrutura dos cursos d'água e a capacidade de infiltração e armazenamento de água (EMAP, 2017).

Considerando o Índice de Qualidade do Ar (IQA), elaborado pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), que indica a circunstância de qualidade do ar por meio de categorização segundo uma escala específica variando de boa à crítica, constata-se que os dados apresentados pela EMAP para a região da Bacia e, de forma específica, do próprio Porto do Itaqui, no período de 2017 à 2021 oscilam entre regular e boa, sendo predominantemente boa (EMAP, 2022).

A caracterização biótica da área compreende informações a respeito da fauna e da flora local. A vegetação da área estudada apresenta o domínio do sistema fitogeográfico Floresta Ombrófila Aberta, com presença significativa de Vegetação de Influência Fluviomarinha (Manguezais) de acordo com os dados disponíveis no mapeamento sistemático do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2006).

A fauna e flora da bacia são diversas, com várias espécies adaptadas ao clima e ao tipo de vegetação da região. A conservação dessas espécies e habitats é fundamental para o equilíbrio ecológico da bacia (Araújo; Teles; Lago; 2009). Considerando a bibliografia existente sobre essa temática na região, percebe-se que não são identificados grandes remanescentes representativos da fauna, muito em decorrência do uso do solo e da dinâmica portuária e do

Distrito Industrial presente naquela bacia hidrográfica. Mas ressalta-se que é recorrente a aparência de anfíbios, répteis, aves e mamíferos, quase sempre de pequeno ou médio porte (EMAP, 2017).

Além disso, nos monitoramentos de biota aquática, os resultados apresentados pela Autoridade Portuária indicam ocorrência em quantidade e variabilidade de fauna em acordo com o esperado, sendo destacado a não ocorrência de espécies exóticas nesta região portuária (EMAP, 2022).

O uso da terra na bacia pode incluir atividades agrícolas, urbanização e indústrias (Araújo; Teles; Lago; 2009). Essas atividades podem impactar a qualidade da água e a integridade dos ecossistemas locais, atividades estas que usualmente estão associadas a questões como desmatamento, poluição dos cursos d'água e ocupação desordenada podem afetar a bacia hidrográfica.

Implementar práticas de gestão integrada dos recursos hídricos, recuperação de áreas degradadas e proteção das matas ciliares são importantes para a preservação da bacia. Assim, é crucial que haja políticas públicas voltadas para a proteção e o manejo sustentável dos recursos hídricos e ambientais da bacia do Itaqui.

5.2 Caracterização do Uso e Cobertura da Terra da Bacia Hidrográfica do Itaqui

A caracterização do uso e cobertura da terra da Bacia Hidrográfica do Itaqui, localizada em São Luís/MA, é essencial para entender as interações entre atividades humanas e as características físicas da região.

Embora essenciais para orientar o planejamento e a definição de prioridades tanto para o setor público quanto para o privado, estudos com dados confiáveis sobre a distribuição espacial do uso da terra nessa região ainda são limitados. Portanto, há uma necessidade contínua de desenvolver metodologias que apoiem o monitoramento e o ordenamento do uso da terra, principalmente quando se considera a vocação portuária e industrial da região.

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos em sensoriamento remoto têm permitido a obtenção de informações mais precisas e detalhadas. Um exemplo notável desses avanços é a classificação orientada a objetos geográficos, que se destaca no mapeamento do uso da terra (Luz et al., 2010).

Esse método baseia-se no agrupamento de pixels por meio da segmentação da imagem.

A classificação tradicional de imagens por pixel utiliza a informação espectral de cada pixel individualmente, aplicando algoritmos probabilísticos ou determinísticos para realizar a classificação (Meneses; Almeida, 2012; Moreira, 2003). Este método foca nas diferenças espectrais entre os diversos atributos para extrair informações temáticas, sem levar em consideração a relação com os pixels adjacentes. Blaschke et al. (2014) observam que essa abordagem é adequada quando os objetos de interesse possuem dimensões comparáveis à resolução espacial da imagem.

No entanto, quando a resolução espacial é superior ao tamanho do objeto de interesse (por exemplo, árvores individuais ou campos agrícolas), resultando em objetos compostos por múltiplos pixels, surge a necessidade de analisar os padrões espaciais formados por esses objetos, e não apenas os pixels isolados. Em tais casos, especialmente em imagens de alta resolução, a aplicação da classificação pixel a pixel pode levar a resultados com aparência fragmentada e baixa acurácia (Gao; Mas, 2008).

Com o avanço das tecnologias computacionais e a limitação das metodologias de classificação tradicionais em explorar plenamente os dados de alta resolução, foi desenvolvida uma nova abordagem: a análise orientada a objetos, ou Análise de Imagens Geográficas Baseada em Objetos (GEOBIA). Nesse método, a unidade de classificação passa a ser uma região de pixels com propriedades espectrais homogêneas, permitindo a exploração de atributos adicionais da imagem, como forma e textura, e, conseqüentemente, aumentando a precisão da classificação (Zhong et al., 2005; Hay; Castilla, 2008; Blaschke et al., 2014).

A segmentação, etapa inicial do processo, divide a imagem em objetos homogêneos e contíguos, e a precisão dessa segmentação influencia diretamente a eficácia da classificação (Fernandes et al., 2012). De acordo com Luz et al. (2010), as melhorias recentes na segmentação de imagens tornaram a classificação orientada a objetos uma ferramenta essencial para a definição eficiente de classes de uso e cobertura da terra.

Considerando o avanço desta técnica na análise de imagens com alta resolução espacial, sua aplicação pode ser bastante eficaz na identificação do

uso e cobertura da terra em áreas de paisagens fragmentadas, como na Bacia Hidrográfica do Itaqui. Com base nessa premissa, apresenta-se abaixo a classificação de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Itaqui, localizada no Município de São Luís, Estado do Maranhão.

Cumprido ressaltar que, utilizando-se o padrão de informações disponibilizados pelo MapBiomias, foi quantificado a área de uso para as seguintes categorias: Formação Florestal; Formação Savânica; Mangue; Campo Alagado e Área Pantanosa; Formação Campestre; Pastagem; Lavoura Temporária; Praia, Duna e Areal; Área Urbanizada; Outras áreas não vegetadas; Mineração; Rio, Lago e Oceano.

O MapBiomias é uma iniciativa colaborativa que visa fornecer dados detalhados sobre a cobertura e o uso da terra no Brasil. O projeto utiliza imagens de satélite e técnicas de processamento de dados para criar mapas temáticos que refletem as mudanças na cobertura do solo ao longo do tempo (Mapbiomas, 2024).

Os aspectos de cobertura do solo caracterizados pelo MapBiomias (2024) abrangem uma variedade de categorias ecossistêmicas e de uso da terra. Entre essas categorias, destacam-se as Formações Florestais, que incluem a Floresta Amazônica, com sua densa cobertura florestal na Amazônia; a Mata Atlântica, que compreende as florestas da região costeira do Brasil; e o Cerrado, caracterizado por vegetação de savana tropical.

Além disso, o MapBiomias (Mapbiomas, 2024) classifica as Áreas de Vegetação de Cerrado e Campo, que englobam vegetações savânicas e campos abertos predominantes em certas regiões do Brasil. As Áreas Úmidas são representadas por ecossistemas como os Manguezais, situados em regiões costeiras de água salobra, e as Áreas de Campo Alagado e Pantanosa, que são sujeitas a alagamentos sazonais. Áreas Urbanizadas referem-se a regiões transformadas por infraestrutura, como cidades e vilarejos. As Pastagens são definidas como terras usadas para a criação de gado e atividades pecuárias. As Culturas Agrícolas incluem a Lavoura Temporária, composta por cultivos com ciclos anuais, e a Lavoura Permanente, que abrange cultivos de longa duração como frutas e café, por exemplo.

O MapBiomias (Mapbiomas, 2024) também identifica Áreas Não Vegetadas, como Desertos e Áreas de Solos Expostos, caracterizados por

terrenos áridos e não vegetados, e áreas impactadas por Mineração. Corpos d'Água, que incluem rios, lagos e oceanos, são essenciais para a definição da cobertura do solo, e as Praias, Dunas e Areais representam áreas costeiras e de transição entre a terra e o mar, como praias e formações de areia

Essas categorias proporcionam uma visão detalhada do uso e cobertura do solo no Brasil, oferecendo dados cruciais para a análise ambiental, planejamento territorial e monitoramento das mudanças na paisagem (Mapbiomas, 2024). O MapBiomas emerge como uma fonte de dados e informações essencial para a compreensão das dinâmicas ambientais e para a promoção da gestão sustentável do território.

Os resultados obtidos para a Bacia Hidrográfica do Itaqui apontam a distribuição do uso e cobertura do solo na região de forma heterogênea, sendo a maior quantidade de área da bacia identificada como formação florestal, e a menor, como área de lavoura temporária.

Com uma representação significativa de 34.06%, a Formação Florestal é o tipo de cobertura predominante na Bacia do Itaqui. Isso indica que a maior parte da área é coberta por florestas, sugerindo um ecossistema relativamente saudável e com boas condições ambientais. Com 20.38%, o Mangue é também uma cobertura relevante. Este tipo de ecossistema é crucial para a proteção costeira e a biodiversidade, além de desempenhar um papel importante na captura de carbono.

Assim, considerando as áreas de floresta e de mangue, a Bacia Hidrográfica do Itaqui possui mais de 54% de seu território coberto por vegetação.

Representando 19.29% da área, a urbanização é uma característica significativa do uso do solo. Isso sugere uma presença considerável de desenvolvimento humano e infraestrutura na região. À esse número, de forma associada, ressalta-se a presença do Distrito Industrial de São Luís naquela região. O Distrito Industrial de São Luís, conhecido como DISAL, é uma área de desenvolvimento industrial e foi criado para estimular a industrialização e o crescimento econômico regional de São Luís (FAPEAD, 2023), desempenhando um papel crucial na economia local ao abrigar uma variedade de empresas e indústrias.

Com 8.16% da área da Bacia Hidrográfica do Itaqui, a mineração indica uma presença notável de atividades extrativas. Esse uso do solo pode ter impactos ambientais significativos, incluindo a degradação do solo e a alteração dos ecossistemas locais. No DISAL, várias empresas mineradoras estão estabelecidas, aproveitando a infraestrutura e os recursos disponíveis no distrito.

A mineração é uma das atividades econômicas fundamentais no Maranhão, e o DISAL proporciona um ambiente adequado para a instalação e operação dessas empresas (FAPEAD, 2023). As indústrias mineradoras no DISAL podem incluir empresas envolvidas na extração de minerais como ferro, bauxita, e outros recursos minerais importantes para a economia local e nacional. A proximidade com o Porto do Itaqui é particularmente vantajosa para a exportação de minerais extraídos, facilitando o escoamento dos produtos para mercados internacionais (FAPEAD, 2023).

A pastagem ocupa 6.88% da área da Bacia, refletindo a utilização do solo para atividades pecuárias. Isso pode implicar em alterações na vegetação natural e possíveis impactos na qualidade do solo.

No que se refere às categorias de Formação Savânica e Outras Áreas não Vegetadas, ambos os tipos de cobertura representam uma pequena parte da Bacia, ocupando 3.28% e 3.94% do total da área da Bacia do Itaqui, respectivamente. Essas áreas podem contribuir para a diversidade da paisagem, mas têm menor extensão.

Os dados quantitativos de Campo Alagado e Área Pantanosa (0.02%) e Lavoura Temporária (0.01%), dado a sua inexpressividade, sugerem que esses tipos de uso ocupam áreas muito pequenas, indicando que a agricultura temporária e os campos alagados não são predominantes e nem relevantes na região.

As áreas de praia, duna e areal (0,17%), assim como corpos d'água (2,56%), têm uma presença relativamente pequena na paisagem, refletindo que essas características geográficas não são predominantes.

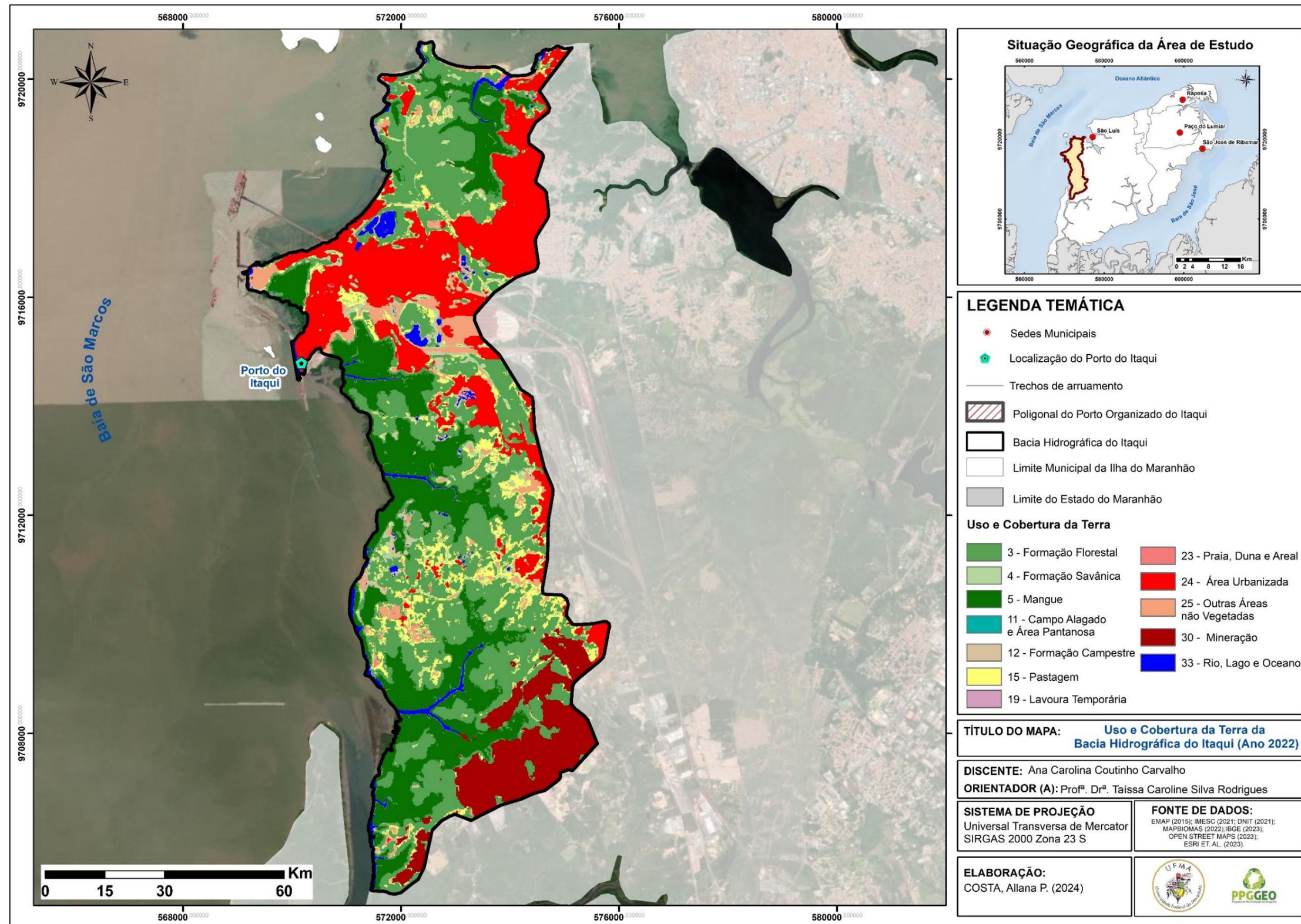
A caracterização do uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Itaqui revela uma complexa interação entre atividades humanas e o meio ambiente. Os resultados revelam, que a formação florestal e os manguezais dominam a cobertura do solo, seguidos por áreas urbanizadas e de mineração.

A presença de áreas urbanas e atividades de mineração é relevante, o que pode sugerir pressões humanas significativas sobre o meio ambiente.

A compreensão desses aspectos é essencial para promover práticas de manejo sustentável e políticas de conservação que garantam uma interação saudável entre a manutenção do meio ambiente e, neste caso, apoio às práticas de conservação ambiental para as áreas verdes presentes na Bacia do Itaquí e, no outro lado, que não sejam fator impossibilitador de desenvolvimento econômico da região, considerando os demais usos apontados.

De toda forma, considerando o objetivo primeiro desta pesquisa, qual seja avaliar o avanço do nível do mar na bacia hidrográfica do Itaquí, percebe-se que eventual avanço do nível do mar sobre a área trará impactos diversos, tanto sociais quanto ambientais, e também econômicos

Figura 4 – Caracterização do Uso e Cobertura da Terra da Bacia Hidrográfica do Itaqui



Fonte: Autora, 2024.

5.3 Panorama da Socioeconômico da Bacia Hidrográfica do Itaqui

Embora o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) não publique diretamente um perfil específico apenas da Bacia Hidrográfica do Itaqui, os dados relevantes para composição deste tópico foram extraídos de diversas fontes e estudos relacionados a região do Itaqui Bacanga, ao município de São Luís e ao estado do Maranhão. Assim, este tópico fornece uma visão geral dos principais aspectos socioeconômicos da região, abordando a demografia, a economia, a infraestrutura, os aspectos sociais e os desafios e oportunidades presentes na área. De forma adicional, a bibliografia local sobre tal bacia foi visitada, o que também contribuiu com as informações aqui apresentadas.

A Bacia Hidrográfica do Itaqui é predominantemente influenciada pela cidade de São Luís, a capital do estado do Maranhão, e seus arredores. Segundo o IBGE, a população estimada de São Luís em 2023 é de aproximadamente 1.242.891 habitantes (IBGE, 2024). Este dado reflete a importância de São Luís como um centro urbano significativo no estado do Maranhão e destaca a pressão demográfica sobre os recursos e infraestrutura da região da bacia em estudo.

Num contexto histórico, ressalta-se que a população e consequente ocupação da Bacia Hidrográfica do Itaqui, iniciou de forma mais expressiva a partir da década de 1960, com a fixação do núcleo de ocupação na área, conformando o atual bairro Anjo da Guarda (BRASIL, 2018), momento em que se iniciava as obras do Porto do Itaqui, porto público localizado na bacia hidrográfica homônima.

A região do Itaqui-Bacanga está situada na zona norte de São Luís e é delimitada pelo rio Bacanga ao norte e pelo rio Itaqui ao sul. Esta área inclui uma variedade de ambientes, desde zonas urbanas densamente povoadas até áreas com vegetação nativa e ecossistemas aquáticos (EMAP, 2014). Nesse contexto geográfico se encontra a Bacia Hidrográfica do Itaqui, o que explica como relevante a análise do panorama da socioeconômico dessa região para entendimento da Bacia do Itaqui como um todo.

Ao longo dos anos, o crescimento da região conhecida como Itaqui-Bacanga aconteceu de forma desordenada, com conglomerados urbanos avançando sem planejamento e carentes de infraestrutura, contribuindo para as

atuais características e problemas dos bairros das bacias do Bacanga e do Itaqui (EMAP, 2014).

A área do Itaqui-Bacanga é uma região importante de São Luís, caracterizada por uma mistura de áreas urbanas e periurbanas, onde a população nesta região é influenciada pela expansão urbana e pelos desafios associados à infraestrutura e aos serviços públicos (BRASIL, 2018).

A infraestrutura da área, incluindo transporte, saneamento e abastecimento de água, tem sido um desafio devido ao crescimento rápido e não planejado da população (Conceição e Costa, 2018), onde a disponibilidade de serviços públicos e a qualidade de vida variam, com áreas urbanas geralmente tendo melhor acesso comparado às áreas mais periféricas (EMAP, 2014).

A população da região do Itaqui-Bacanga é predominantemente urbana, com uma concentração significativa nas áreas adjacentes aos portos e empreendimentos da região, que configuram uma zona de expansão urbana significativa da cidade de São Luís (BRASIL, 2018).

Assim como em outras localidades brasileiras, é íntima a relação de fixação populacional nas áreas circunvizinhas à grandes empreendimentos. Além do início das construções do Porto do Itaqui na década de 1960, importante ressalva deve ser dada às décadas de 1970 e 1980, que foram marcadas pela construção e início das atividades do terminal de embarque marítimo da Vale e da fábrica de alumina e alumínio do Consórcio de Alumínio do Maranhão - ALUMAR (ERM, 2004), esses fatores foram decisivos no aumento populacional da região do Itaqui-Bacanga.

O Porto do Itaqui, o Terminal de Uso Privado da Alumar e o Terminal Marítimo da Ponta da Madeira integram o Complexo Portuário do Itaqui e desempenha um papel crucial na economia local e regional, facilitando o escoamento de produtos e recursos (EMAP, 2017). Tal Complexo Portuário está inserido na área da Bacia Hidrográfica do Itaqui e, portanto, interfere diretamente na realidade econômica do município de São Luís na própria Bacia Hidrográfica do Itaqui.

Como aponta o Plano Mestre do Complexo Portuário do Itaqui (BRASIL, 2017), além da atividade portuária, também deve ser comentado como aspecto econômico significativo para o município a atuação de pequenas indústrias que contribuem para a economia local, além da agricultura e a pesca,

que na bacia de estudo acontece de forma artesanal e tem pouca expressividade em âmbito regional.

Na seara econômica, para a realidade da área da bacia do Itaqui, deve ser destacado o Distrito Industrial do Estado (DISAL), implantado em área contígua ao Porto do Itaqui (BRASIL, 2018). O DISAL foi criado pelo Decreto Estadual nº 7.646, de 6 de junho de 1980, que definiu as macroáreas e os tipos de indústrias destinados para cada uma delas (GOVERNO DO ESTADO DO MARANHÃO, 1980).

Tal Distrito está localizado nas glebas Tibiri–Pedrinhas e Itaqui–Bacanga e engloba a área do Porto do Itaqui assim como o local previsto para sua expansão, o porto da Alumar e o porto da Vale.

Figura 5 – Delimitação do Porto do Itaqui, TPM e da área do DISAL.



Fonte: BRASIL, 2017.

Essa explanação configura a Bacia Hidrográfica do Itaqui como excelente área de análise frente à desafios ambientais relacionados às

mudanças climáticas. Isto porque, além de um considerável adensamento populacional, é uma área que concentra boa parte das indústrias e portos do município, que possuem uma relevância no cenário regional e nacional.

Avaliar cenários de aumento do nível do mar nessa região pode propiciar recursos ímpares para o planejamento público e privado, com foco na sociedade e na economia da região que, em efeito cascata pode impactar a economia em uma forma mais ampla.

5.4 Análise dos Cenários de Elevação do Nível do Mar na Bacia Hidrográfica do Itaqui

De acordo com informações do AR6, o nível do mar subiu 20 cm entre 1901 e 2018 e a taxa de elevação saltou de 1,35 mm por ano entre 1901 e 1990 para 3,7 mm por ano entre 2006 e 2018, sendo que, desde 1900, o nível do mar subiu mais rápido do que em qualquer outro período nos últimos 3.000 anos (IPCC, 2022).

Esse cenário torna imperativo tomada de ação por diversos setores da sociedade, incluindo a Academia, fornecendo estudos diversos que estejam associados à temática das mudanças climáticas, sendo o caso da presente pesquisa.

Para a possibilidade de execução do BR-Mangue, utilizou-se as seguintes categorias de análise associadas ao tipo de solo: solo de mangue, solo de mangue migrado e canal do rio. Estas categorias são as pré-estabelecidas e associadas ao código fonte utilizado. Da mesma forma e pelo mesmo motivo, utilizou-se as seguintes categorias para a análise de uso e ocupação: mangue, vegetação terrestre, mar, área antropizada, solo descoberto, solo descoberto inundado, área antropizada inundada, mangue migrado, mangue inundado e vegetação terrestre inundada.

Em relação à altimetria do terreno, foram utilizados dados remotos, sendo importante destacar que a taxa de elevação do nível do mar foi diferente para cada um dos cinco modelos avaliados, mas sempre sendo considerado como último cenário o ano de 2100.

Abaixo, na Figura 6 é possível se perceber a delimitação de análise no BR-Mangue, qual seja, a delimitação da Bacia Hidrográfica do Itaqui. A Figura

7, apresenta as informações relacionadas ao uso do solo, informações estas obtidas a partir do Zoneamento Costeiro do Estado do Maranhão.

A Figura 8, por sua vez, representa as informações relativas à classe do solo, obtida junto ao MapBiomass Brasil e a Figura 9 traz a representação visual dos dados de altimetria, obtidas a partir do Modelo Digital de Elevação da Alos Palsar.

Neste estudo, as condições climáticas utilizadas como base correspondem aos dados de mangue original, vegetação terrestre, água, áreas ocupadas e solo desnudo do ano de 2012, conforme imagem avaliada disponibilizada.

No final da simulação, isto é, considerando o ano de 2100, calculou-se novamente a área de cada uma das condições avaliadas, sendo possível a análise da variação de perda e/ou incremento das categorias. Foi estabelecido o valor de 6 metros como valor padrão relacionado a amplitude de maré da região, com base nas fontes bibliográficas da DHN (Ferreira, 1988).

Os resultados obtidos nos modelos A, B, C, D e E resultaram nas imagens apresentadas abaixo, sendo todas comparadas ao mesmo cenário inicial, baseado no ano de 2012. Nas imagens apresentadas, cumpre ressaltar que para melhor análise e interpretação utilizou-se as seguintes (Quadro 2):

Tabela 2: Informações para interpretação de cores no modelo BR-Mangue

Amostra do modelo	Descrição do Atributo
	Mangue Remanescente
	Vegetação Terrestre
	Água
	Área Desenvolvida
	Solo exposto
	Manguezal Migrado
	Manguezal perdido
	Outras áreas perdidas

Elaboração: Autora, 2023.

Figura 6 – Representação do espaço celular vazio.

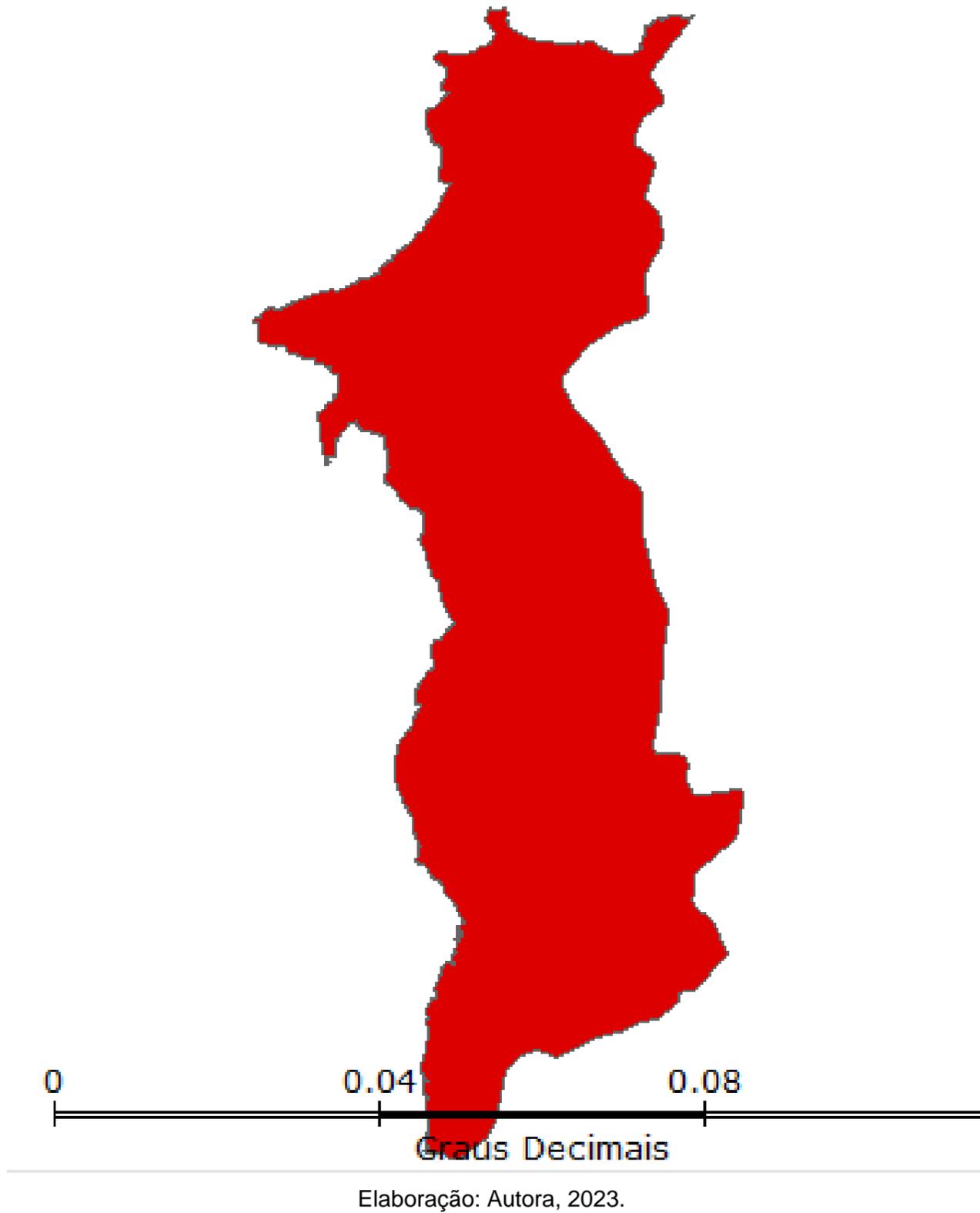


Figura 7 – Representação do atributo celular de uso do solo.

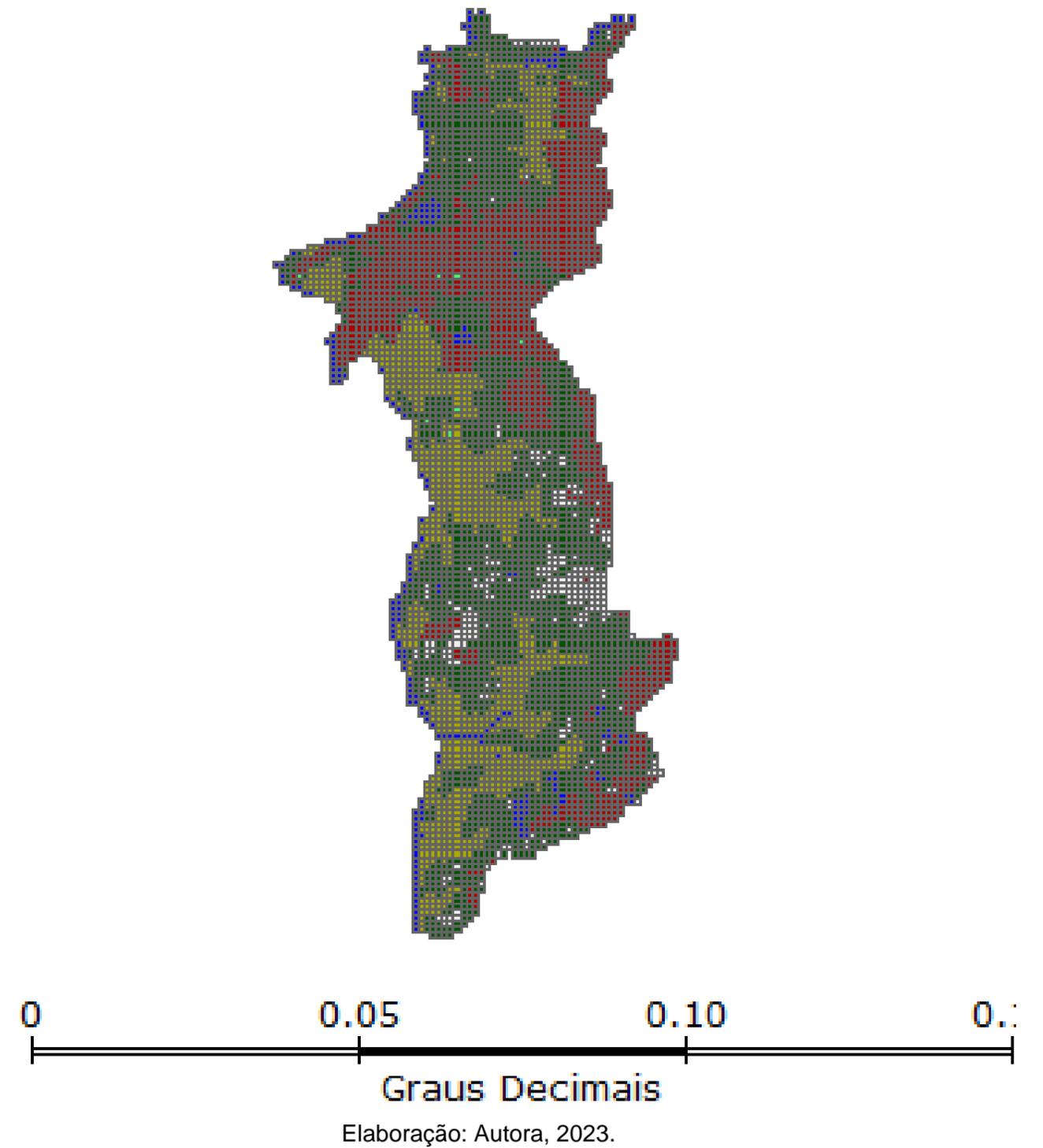


Figura 8 – Representação do atributo celular de classe de solo.

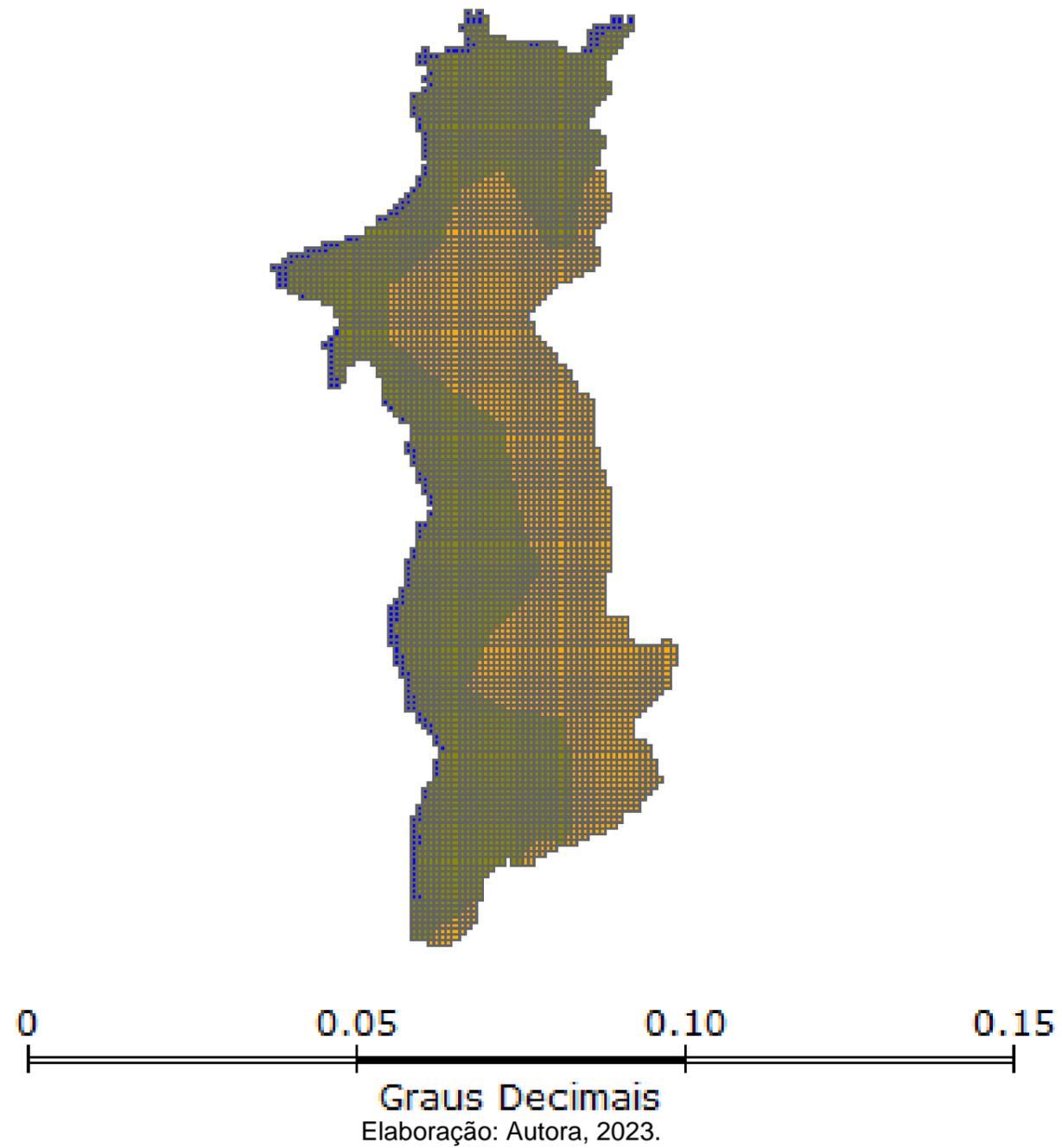
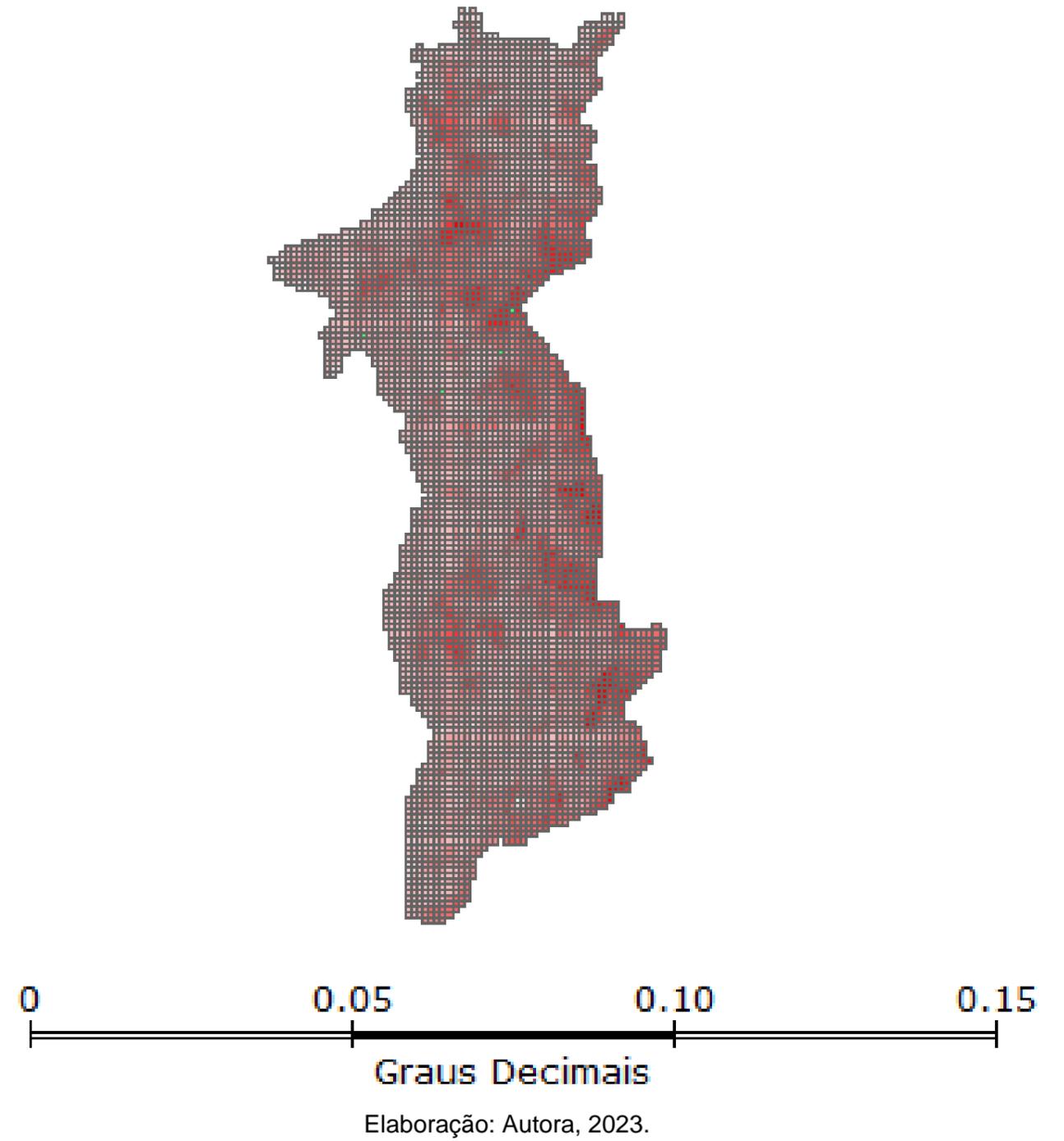


Figura 9 – Representação do atributo celular de altimetria.



5.5 Modelo A

O modelo A considera o cenário SSP1-1.9 do Sexto Relatório do IPCC, e se baseia em um crescimento econômico que é ambientalmente sustentável e socialmente inclusivo, refletindo o conceito de Desenvolvimento Sustentável em sua forma mais completa (IPCC, 2022).

Considerando que, para o SSP1, a projeção é que o nível do mar aumente entre 0,3 e 0,6 metros até o final do século XXI (IPCC, 2022), no modelo A, utilizou-se como critério de análise a elevação do nível do mar na ordem de 0,3 metros até o ano de 2100, projetando-se o aumento de 0.0375 metros por década, obtendo-se os seguintes resultados (Tabela 3):

Tabela 3: Dados de análise - Modelo A

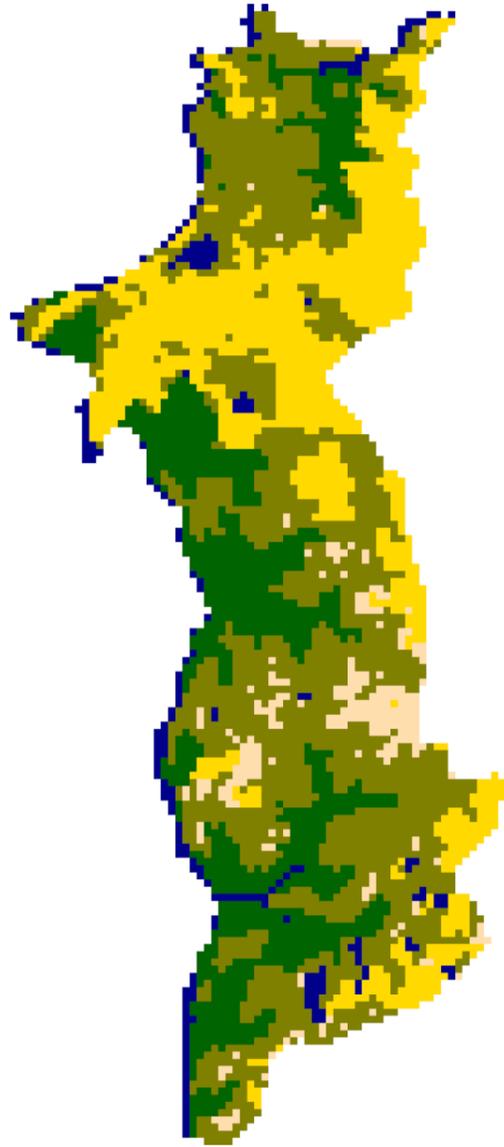
Classificação	Condições iniciais para o modelo (ano de 2012)		Modelo A (ano de 2100)	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Mangue Remanescente	1111	21.3	0	0
Vegetação	2250	43.3	177	3.4
Mar	262	5.0	262	5.03
Antropizada	1335	25.7	331	6.36
Solo descoberto	249	4.8	108	2.07
Solo descoberto inundado	0	0.0	141	2.71
Área Antropizada inundada	0	0.0	1004	19.28
Mangue Migrado	0	0.0	0	0
Mangue Inundado	0	0.0	1112	21.36
Vegetação Inundado	0	0.0	2072	39,79
TOTAL	5207	100	5207	100

Elaboração: autora, 2024.

Considerando o comparativo dos cenários inicial e modelo A e levando em consideração o aumento progressivo da coluna de água culminando em 2100 com o avanço de 0,3m da coluna de mar percebe-se aumento de 4329 hectares de área inundada, o que equivale à mais de 83% da área da bacia hidrográfica do Itaqui inundada em 2100 caso seja confirmado o aumento estimado nos cenários mais alarmantes do IPCC.

Figura 10 – Resultado comparativo entre as condições iniciais e o Modelo A.

**Condições iniciais para o modelo
(ano de 2012)**



**Modelo A
(ano de 2100)**



Elaboração: Autora, 2024.

No referido cenário estudado, reduziu-se a área de mangue à zero. As demais áreas de vegetação diminuíram significativamente e apenas 3,4% da área inicial de vegetação mapeada no cenário inicial, permaneceram no ano de 2100 (Modelo A). A área antropizada e a área de solo descoberto também sofreram grande variação de perda. De acordo com a interpretação dos resultados do modelo, estas áreas cederam lugar àquelas intituladas como “inundado”, isto é, solo descoberto inundado, área antropizada inundada, mangue inundado e vegetação inundada.

5.6 Modelo B

Para este estudo, o cenário SSP1-2.6 será considerado o modelo B da pesquisa, prevendo um aumento do nível do mar de 0,6 metros até o ano de 2100. A partir de uma média aritmética, evidenciou-se o aumento equivalente a 0,075 metros de mar por década, obtendo-se os seguintes resultados (Tabela 4):

Tabela 4: Dados de análise - Modelo B

Classificação	Condições iniciais para o modelo (ano de 2012)		Modelo B (ano de 2100)	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Mangue Remanescente	1111	21.3	0	0
Vegetação	2250	43.3	177	3.4
Mar	262	5.0	262	5.03
Antropizada	1335	25.7	331	6.36
Solo descoberto	249	4.8	108	2.07
Solo descoberto inundado	0	0.0	141	2.71
Área Antropizada inundada	0	0.0	1004	19.28
Mangue Migrado	0	0.0	0	0
Mangue Inundado	0	0.0	1112	21.36
Vegetação Inundado	0	0.0	2072	39,79
TOTAL	5207	100	5207	100

Elaboração: autora, 2024.

Os modelos A e B apresentaram os mesmos quantitativos de área para as classificações estudadas, mesmo com diferença de 0,3 metros de aumento do nível do mar entre os dois modelos estudados.

Condições iniciais para o modelo
(ano de 2012)

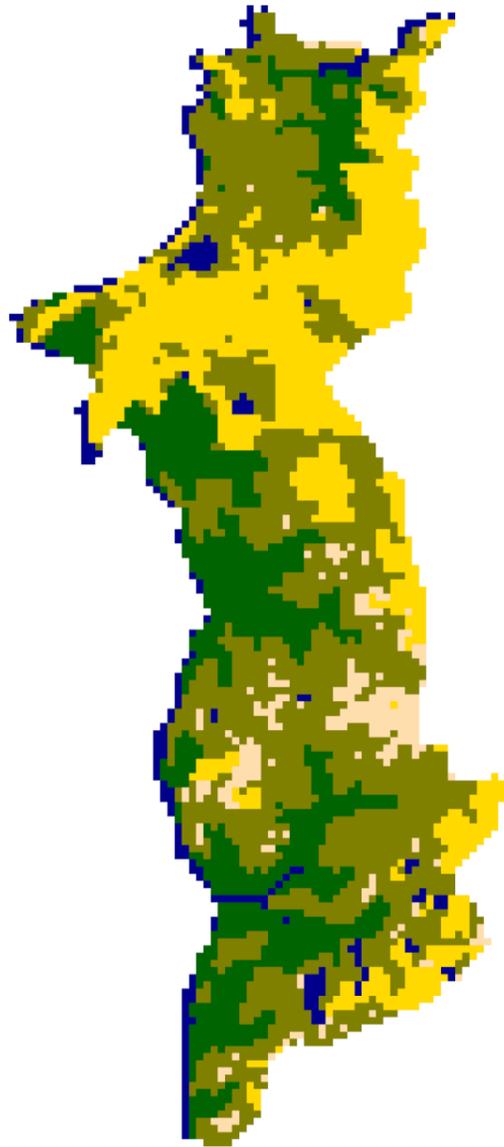


Figura 11 – Dados de análise - Modelo B

Modelo B
(ano de 2100)



Elaboração: Autora, 2024.

5.7 Modelo C

Conforme a interpretação do modelo C, utilizou-se como critério de análise a elevação do nível do mar na ordem de 0,7 metros até o ano de 2100, obtendo-se os seguintes resultados (Tabela 5):

Tabela 5: Dados de análise - Modelo C

Classificação	Condições iniciais para o modelo (ano de 2012)		Modelo C (ano de 2100)	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Mangue Remanescente	1111	21.3	0	0
Vegetação	2250	43.3	177	3.4
Mar	262	5.0	262	5.03
Antropizada	1335	25.7	331	6.36
Solo descoberto	249	4.8	108	2.07
Solo descoberto inundado	0	0.0	141	2.71
Área Antropizada inundada	0	0.0	1004	19.28
Mangue Migrado	0	0.0	0	0
Mangue Inundado	0	0.0	1112	21.36
Vegetação Inundado	0	0.0	2072	39,79
TOTAL	5207	100	5207	100

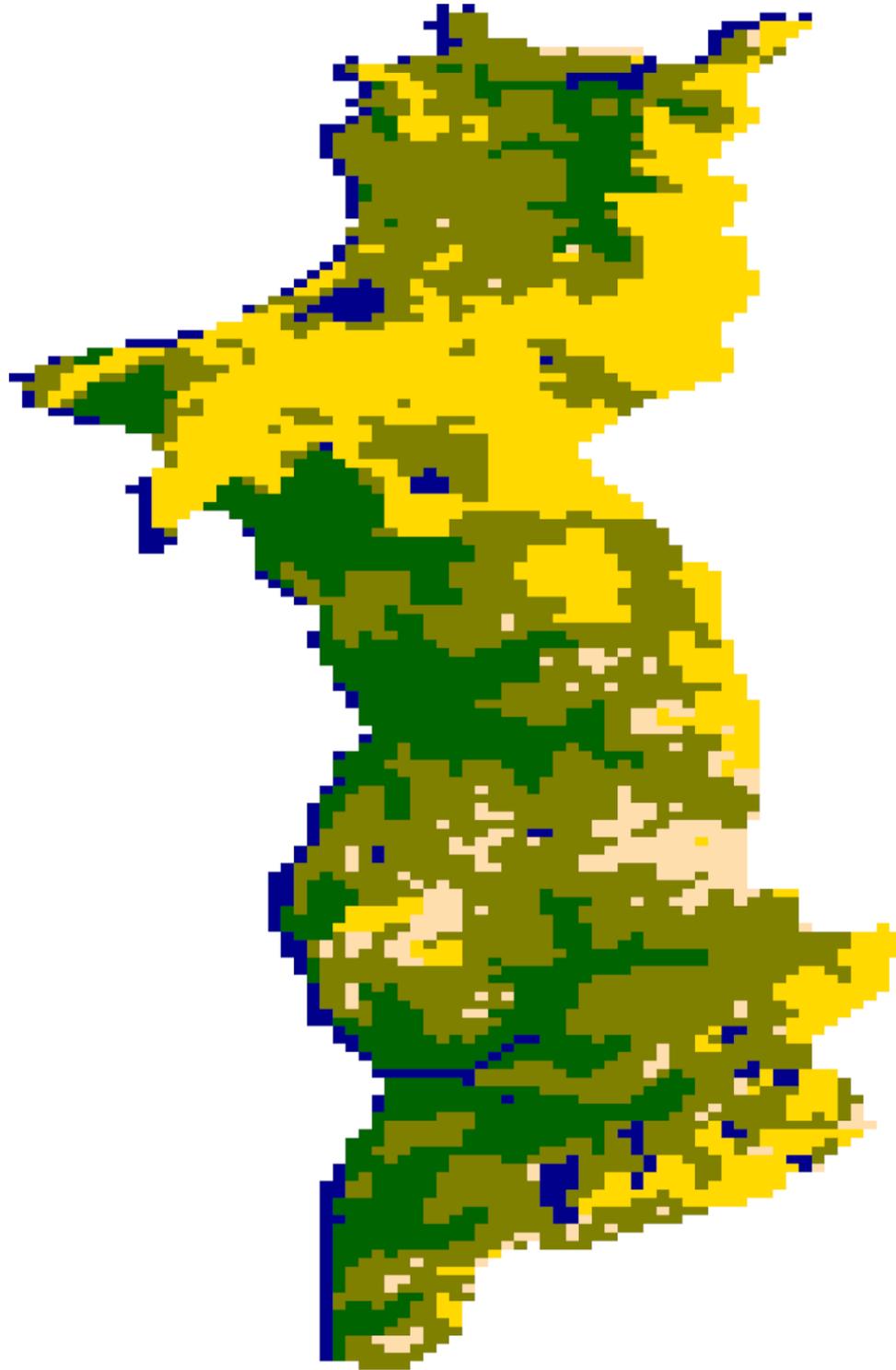
Elaboração: Autora, 2024.

Considerando o comparativo dos cenários do Modelo C e levando em consideração o aumento progressivo da coluna de água em um quantitativo equivalente a 0,0875 metro por década, culminando em 2100 com o avanço de 0,7 metro da coluna de mar percebe-se aumento de 4329 hectares de área inundada, o que equivale à mais de 83% da área da bacia hidrográfica do Itaqui inundada em 2100 caso seja confirmado o aumento estimado nos cenários mais alarmantes do IPCC.

Os modelos A, B e C apresentaram os mesmos quantitativos de área para as classificações estudadas.

Figura 12 – Dados de análise - Modelo C

Condições iniciais para o modelo
(ano de 2012)



Modelo C
(ano de 2100)



Elaboração: Autora, 2024.

5.8 Modelo D

Conforme a interpretação do modelo D, utilizou-se como critério de análise a elevação do nível do mar na ordem de 0,9 metro até o ano de 2100, obtendo-se os seguintes resultados (Tabela 6):

Tabela 6: Dados de análise - Modelo D

Classificação	Condições iniciais para o modelo (ano de 2012)		Modelo D (ano de 2100)	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Mangue Remanescente	1111	21.3	0	0.0
Vegetação	2250	43.3	177	3.4
Mar	262	5.0	262	5.0
Antropizada	1335	25.7	330	6.3
Solo descoberto	249	4.8	108	2.0
Solo descoberto inundado	0	0.0	141	2.7
Área Antropizada inundada	0	0.0	1005	19.3
Mangue Migrado	0	0.	0	0.0
Mangue Inundado	0	0.0	1112	21.4
Vegetação Inundado	0	0.0	2072	39.8
TOTAL	5207	100	5207	100

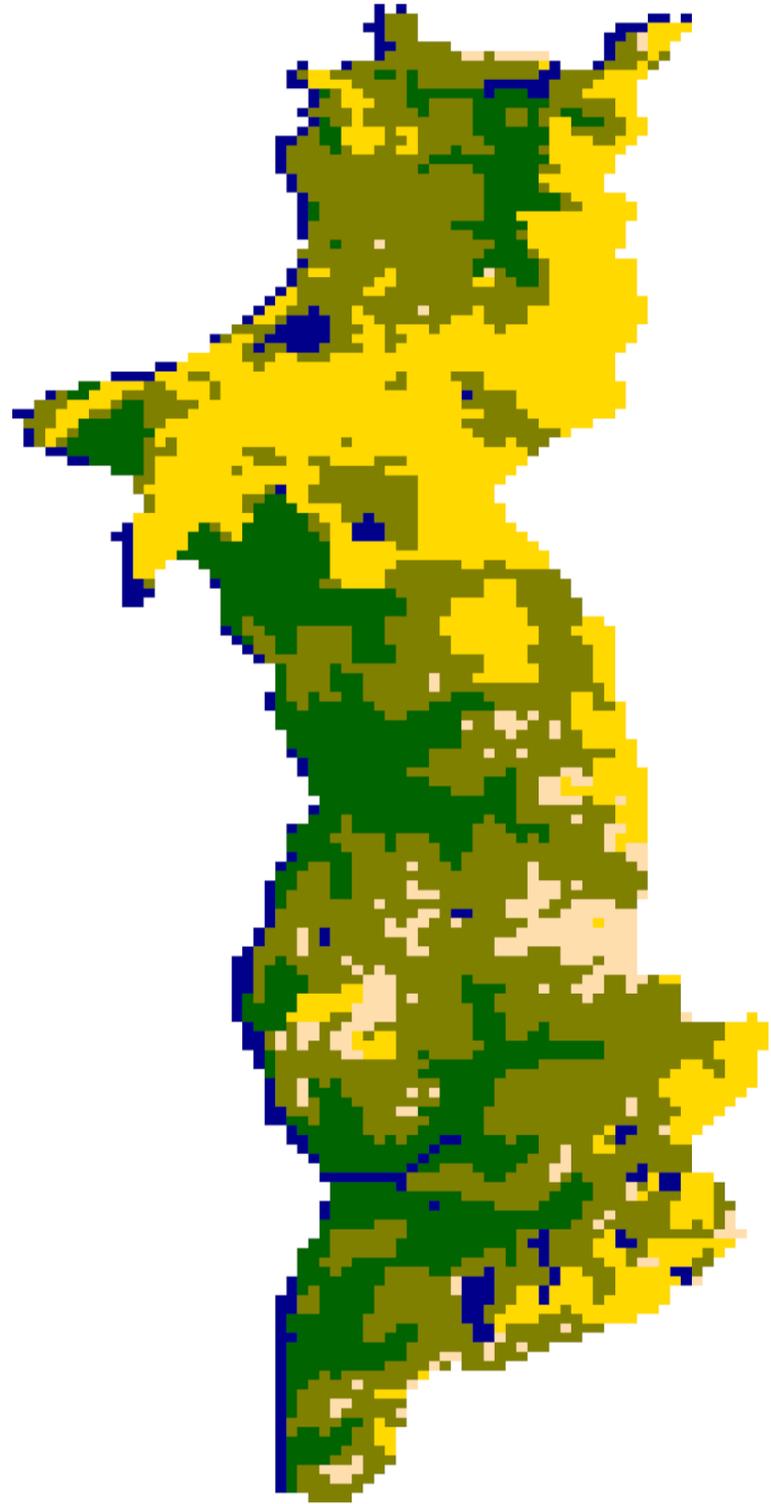
Elaboração: Autora, 2024.

Considerando o comparativo das condições iniciais e o Modelo D propriamente dito, com o avanço de 0,9 metro da coluna de mar percebe-se aumento de 4330 hectares de área inundada, o que equivale à mais de 83% da área da bacia hidrográfica do Itaqui inundada em 2100 caso seja confirmado o aumento estimado nos cenários mais alarmantes do IPCC.

Os modelos A, B, C e D apresentaram os mesmos quantitativos de área para as classificações estudadas, com a ressalva que, neste último modelo a área Antropizada caiu de 331 para 330 e a Área Antropizada inundada subiu de 1004 para 1005 hac. Tais números não são expressivos e não houve, por exemplo, variação no percentual de área calculada sobre essas classificações no Model D em relação aos demais modelos vistos até aqui.

Figura 13 – Dados de análise - Modelo D

Condições iniciais para o modelo
(ano de 2012)



Modelo D
(ano de 2100)



Elaboração: Autora, 2024.

5.9 Modelo E

Conforme a interpretação do modelo E, utilizou-se como critério de análise a elevação do nível do mar na ordem de 1,1 metros até o ano de 2100, obtendo-se os seguintes resultados (Tabela 7):

Tabela 7: Dados de análise - Modelo E

Classificação	Condições iniciais para o modelo (ano de 2012)		Modelo E (ano de 2100)	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Mangue Remanescente	1111	21.3	0	0.0
Vegetação	2250	43.3	177	3.4
Mar	262	5.0	262	5.0
Antropizada	1335	25.7	330	6.3
Solo descoberto	249	4.8	108	2.0
Solo descoberto inundado	0	0.0	141	2.7
Área Antropizada inundada	0	0.0	1005	19.3
Mangue Migrado	0	0.0	0	0.0
Mangue Inundado	0	0.0	1112	21.4
Vegetação Inundado	0	0.0	2072	39.8
TOTAL	5207	100	5207	100

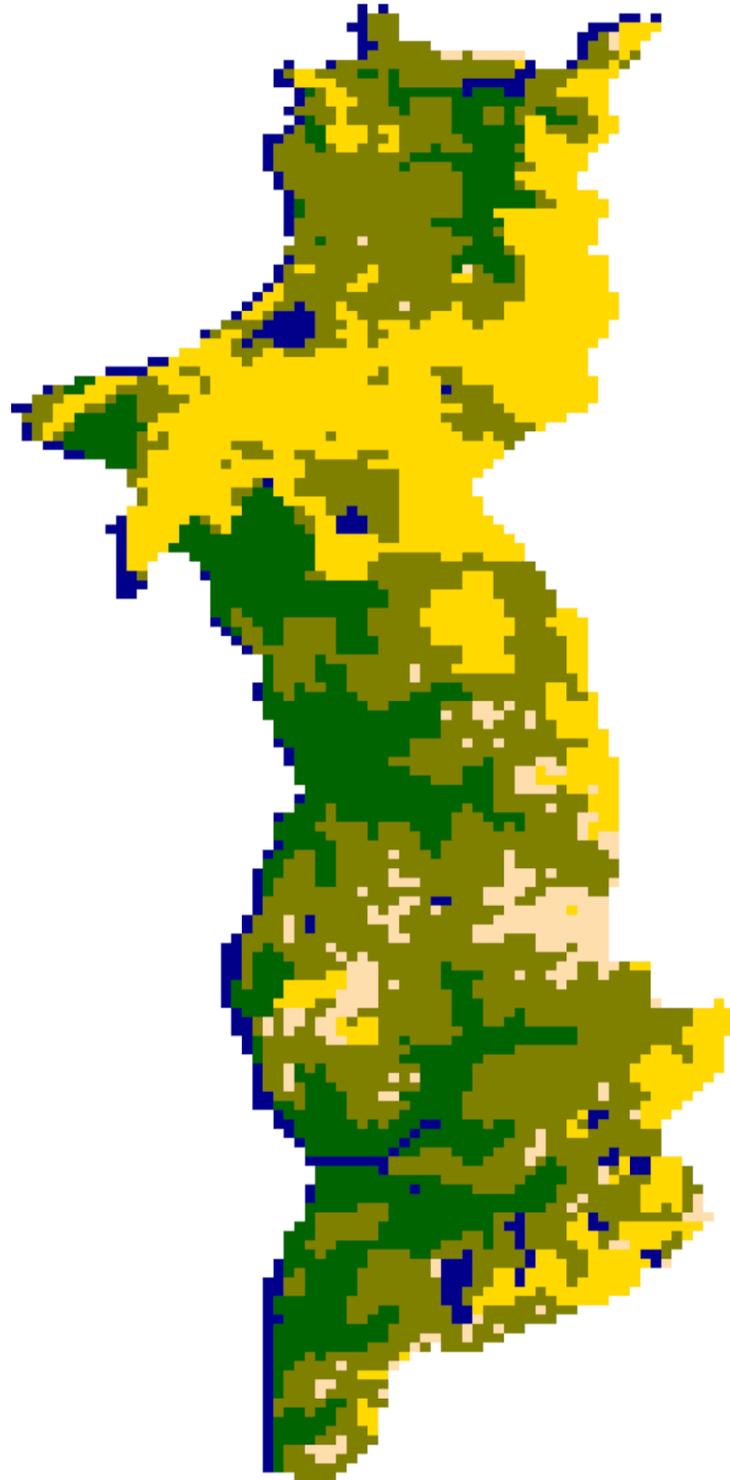
Elaboração: Autora, 2024.

Considerando o comparativo dos cenários das Condições iniciais para o modelo e Modelo E e levando em consideração o aumento progressivo da coluna de água em aumento de 0,1375 metro por década, percebe-se aumento de 4330 hectares de área inundada, o que equivale à mais de 83% da área da bacia hidrográfica do Itaqui inundada em 2100 caso seja confirmado o aumento estimado nos cenários mais alarmantes do IPCC.

Os modelos A, B, C, D e E apresentaram os mesmos quantitativos de área para as classificações estudadas, com a ressalva que, neste último modelo a área Antropizada caiu de 331 para 330 e a Área Antropizada inundada subiu de 1004 para 1005 hac, assim como os dados obtidos para o Modelo C. Tais números não são expressivos, e não houve, por exemplo, variação no percentual de área calculada sobre essas classificações no Model E em relação aos demais modelos.

Figura 14 – Dados de análise - Modelo E

Condições iniciais para o modelo
(ano de 2012)



Modelo D
(ano de 2100)



Elaboração: Autora, 2024.

5.10 Análise Comparativa dos Modelos de Cobertura do Solo (2012 a 2100)

A Tabela 8 a seguir compara as condições de cobertura do solo para o ano de 2012 com cinco modelos projetados para o ano de 2100, sendo eles os modelos A, B, C, D e E.

A completa eliminação dos manguezais remanescentes em todos os modelos indica uma perda significativa desse habitat, isso pode resultar de fatores como urbanização intensa, mudanças climáticas, ou degradação ambiental, mas para a proposta dessa pesquisa, o principal fator estressante para esse resultado é o aumento do nível médio do mar na região.

A ausência de mangues remanescentes em todos os cenários sugere que, independentemente do avanço que o nível do mar venha a acontecer, o impacto no mangue irá acontecer, talvez até com a mesma magnitude. Assim, as políticas de conservação atuais podem ser insuficientes para proteger essas áreas, quer para o aumento do nível do mar em um cenário mais otimista (avanço de 0,3 metro até 2100) ou em um cenário mais pessimista (na ordem de 1,1 metro de avanço do nível do mar até o ano de 2100).

Na análise dos diferentes cenários, a vegetação reduz drasticamente, indicando uma grande transformação do uso do solo. Em todos os modelos, a vegetação é reduzida para aproximadamente 3,4% da área total, evidenciando uma conversão generalizada para outras formas de uso do solo, o que pode refletir uma expansão urbana, conversão para áreas inundadas, ou outras alterações significativas no ambiente. No caso da presente pesquisa, importante impacto acontece em relação ao crescimento expressivo de áreas inundadas.

A área marítima permanece estável em todos os modelos, com pequenas variações nas porcentagens, o que sugere que o nível do mar e outras mudanças associadas ao mar não têm um impacto significativo sobre essa categoria no horizonte de 2100, ou que as mudanças não são grandes o suficiente para alterar a área significativamente. Com esse resultado, entende-se que o contexto portuário, que por essência utiliza do ambiente marítimo para a realização de movimentação de cargas,

não se beneficiaria com novas áreas para fluxo de embarcações no caso de aumento do nível do mar nos cenários propostos.

A área antropizada diminui significativamente em todos os modelos. Embora isso possa parecer um contrassenso com a expectativa de crescimento urbano, essa redução pode refletir a conversão de áreas urbanas para outras categorias, como áreas inundadas. O fato de a área antropizada ser significativamente menor sugere mudanças importantes no uso do solo, principalmente se for considerada a vocação industrial do DISAL daquela localidade e a presença de grandes e importantes empresas e portos na região.

Nesse contexto de análise, se torna preocupante o impacto do aumento do nível do mar frente à Bacia Hidrográfica do Itaqui no cenário econômico local, considerando a cidade de São Luís; regional, considerando o estado do Maranhão; e mundial, considerando o mercado brasileiro no panorama global.

A área de solo descoberto diminui, indicando que as áreas anteriormente descobertas podem ter sido cobertas por vegetação ou água. Essa redução pode ser um efeito secundário da expansão de áreas inundadas ou da recuperação de áreas anteriormente expostas.

A introdução de solo descoberto inundado nos modelos indica uma nova categoria emergente, possivelmente devido ao aumento do nível das águas. Mas, embora não seja objetivo do modelo BRMangue, há que se considerar como possível incremento ao longo das décadas a possibilidade desta mudança sofrer pressões de novos padrões de precipitação ou de uso do solo, por exemplo. Isso pode refletir a transformação de áreas antes secas em zonas inundáveis.

A criação de áreas antropizadas inundadas é uma característica marcante nos modelos, o que pode sugerir que áreas previamente urbanizadas ou desenvolvidas se tornaram inundáveis, à medida que acontecia o avanço do nível do mar década a década em cada modelo analisado.

A expansão significativa de mangue inundado é observada em todos os modelos, estando relacionado de forma direta às forçantes iniciais de taxa de elevação do nível do mar para cada modelo avaliado. De igual forma, o surgimento e expansão da categoria de vegetação inundada é uma tendência importante, representando uma mudança substancial na cobertura do solo.

Tabela 8: Dados de análise - Modelos A, B, C, D e E

Classificação	Condições iniciais para o modelo (ano de 2012)		Modelo A (ano de 2100)		Modelo B (ano de 2100)		Modelo C (ano de 2100)		Modelo D (ano de 2100)		Modelo E (ano de 2100)	
	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	%								
Mangue Remanescente	1111	0	0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0
Vegetação	2250	177	177	3.4	177	3.4	177	3.4	177	3.4	177	3.4
Mar	262	262	262	5.0	262	5.03	262	5.03	262	5.0	262	5.0
Antropizada	1335	331	331	6.3	331	6.36	331	6.36	330	6.3	330	6.3
Solo descoberto	249	108	108	2.0	108	2.07	108	2.07	108	2.0	108	2.0
Solo descoberto inundado	0	141	141	2.7	141	2.71	141	2.71	141	2.7	141	2.7
Área Antropizada inundada	0	1004	1004	19.3	1004	19.28	1004	19.28	1005	19.3	1005	19.3
Mangue Migrado	0	0	0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0
Mangue Inundado	0	1112	1112	21.4	1112	21.36	1112	21.36	1112	21.4	1112	21.4
Vegetação Inundado	0	2072	2072	39.8	2072	39,79	2072	39,79	2072	39.8	2072	39.8
TOTAL	5207	5207	5207	100								

Elaboração: Autora, 2024.

Os modelos projetados para 2100 mostram uma transformação significativa na cobertura do solo comparada ao ano de 2012, onde as principais mudanças incluíram a eliminação de áreas de mangue e vegetação, a introdução de novas categorias como solo descoberto inundado e área antropizada inundada, e uma expansão notável das áreas inundadas.

Ao longo da pesquisa, esperava-se que, à medida que se aumentasse a taxa de elevação do nível do mar, de forma progressiva e diretamente proporcional, fosse evidenciado em números e imagem, um maior comprometimento e avanço do mar em relação ao continente. Entretanto, a relativa igualdade de resultados para os cinco cenários estudados, levantam algumas importantes ressalvas e considerações sobre a pesquisa que devem ser externadas, sendo elas:

- A) O Uso do algoritmo BRMangue não é o melhor indicado para a análise de uma área geográfica com escala pequena, tal qual é a proposta desse estudo ao se avaliar uma Bacia Hidrográfica de aproximadamente 52 km²;
- B) A altimetria da Bacia Hidrográfica do Itaqui tem fator limitador para o avanço do mar na região;
- C) Os dados de entrada, qual sejam, os dados de altimetria, classes do solo e tipos de uso e ocupação deveriam ter um maior refinamento, de forma a trazer dados e informações mais específicas, que poderiam gerar resultados mais refinados e, portanto, com maior expressividade de diferença entre os modelos A, B, C, D e E estudados;
- D) Os resultados obtidos com a partir do uso do BRMangue poderiam ser confrontados com outras metodologias de análise, o que poderia sugerir refutamento ou corroboração dos dados aqui levantados, e ainda permitiria avaliar mais forçantes de análise dentro dos cenários SSP propostos.

Independente do aumento do nível do mar e de suas consequências diretas e indiretas para a localidade, essas alterações destacam a necessidade de uma gestão adaptativa e de estratégias de conservação eficazes para lidar com os impactos das mudanças climáticas e da urbanização.

Além de trazer alerta sobre o próprio avanço do mar sobre o continente, esses resultados também externam a necessidade de mensuração e planejamento para enfrentamento de possíveis impactos sociais e econômicos associados. Na fase de levantamento de dados da região, se tornou evidente a presença de diversas empresas, de diferentes magnitudes na região, mas com nenhuma, ou quase nenhuma preparação para o enfrentamento no caso do aumento do nível do mar na região.

Considerando a realidade da região, foi realizada análise de diversos estudos ambientais de empreendimentos da localidade, bem como os processos de licenciamento ambiental que permitiram a localidade (processos de licenciamento prévio), instalação (processos de licenciamento de instalação) e operação (processos de licenciamento de operação) de diversos tipos de empresas na região. Em nenhum deles foi evidenciado a solicitação do órgão ambiental, ou a própria avaliação voluntária do empreendedor, dos impactos de eventual nível do mar em seus empreendimentos.

Isto demonstra que, ainda que mundialmente discutido na esfera científica, ainda falta uma aproximação das teorias com a realidade. A permissão de um empreendimento em uma dada localidade, através de estudos ambientais robustos, avalia condições ambientais, sociais e econômicas, mas ainda não traz avaliações de impactos das mudanças climáticas nos mesmos.

Isso é preocupante e alarmante, principalmente quando os relatórios e estudos nacionais e internacionais apontam que é real e inevitável as alterações climáticas no mundo, que trazem consequências diversas.

Além disso, ainda na esfera dos agentes públicos, considerando a realidade geográfica da São Luís enquanto ilha, a realidade administrativa enquanto capital do estado do Maranhão e a realidade econômica enquanto município, percebe-se uma movimentação sutil em relação a discussão e preparação da Ilha para o enfrentamento às mudanças climáticas.

O setor privado, com uma agilidade maior, ainda está à passos lentos nessa seara. Entretanto, importante ressalva deve ser dada à algumas ações do setor portuário que, pressionados por agências de fiscalização e o próprio mercado, tem pensado em eventuais impactos para a cadeia marítima/portuária no caso de eventos

climáticos passíveis a ocorrerem em áreas costeiras, como é o caso de tempestades, furacões, enchentes, inundações e a própria elevação do nível do mar.

A nível nacional, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) e a agência de fomento alemã GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit) realizaram estudo que mapeou os impactos das mudanças climáticas em 21 portos brasileiros.

À nível local, iniciativas como o Programa Porto do Futuro e a Coordenação da Aliança Brasileira para Descarbonização Portuária, coordenadas pela Empresa Maranhense de Administração Portuária – EMAP tem colocado o assunto de mudanças climáticas em evidência, mas sem uma ligação direta/obrigatória para discussões sobre o aumento do nível do mar na região.

Os outros portos da cidade, localizados na Bacia Hidrográfica do Itaqui dada a vocação natural de grande profundidade da Baía de São Marcos, quais sejam, o Terminal da Alumar e o Terminal da Ponta da Madeira também tem se movimentado e marcado presença em diferentes e importantes fóruns de discussão sobre a temática de mudanças climáticas, alguns capitaneados pelo Ministério de Portos e Aeroportos.

A região em tela, de forma específica, abrange a área do Complexo Portuário do Itaqui, além de abrigar diversas empresas de beneficiamento e armazenamento de cargas comercializadas por aquele porto e a área denominada como Distrito Industrial e Portuário de São Luís e qualquer impacto capaz de afetar total ou parcialmente essa logística pode comprometer a comercialização de diversos produtos a nível local, regional e até mesmo, global.

A área do DISAL, com a presença de empresas de diversas categorias, incluindo a presença do Complexo Portuário do Itaqui, deve ter como foco a possibilidade real do avanço do nível do mar em relação à área costeira de São Luís, independentemente do ritmo ou projeção de avanço esperado.

Por último, mas não de forma menos importante, estudos, discussões e ações relacionadas à mitigação ou adaptação frente ao aumento do nível do mar são necessários para a promoção de qualidade de vida da comunidade local, principalmente considerando o conglomerado social tão relevante como é a área Itaqui Bacanga.

Ressalta-se que os resultados desta pesquisa não pretendem ser uma informação alarmante para tomadas de ação pelos setores público e privado, mas sim um acréscimo no que já vem sendo estudado e discutido, ainda que de forma tímida, isso porque, como diria o inglês George Box em 1976 “todos os modelos estão errados, mas alguns são úteis”, isto é, todo modelo está errado porque é uma simplificação da realidade. Mas é inegável que simplificações da realidade podem ser bastante úteis. Eles podem nos ajudar a explicar, prever e entender o universo e todos os seus vários componentes.

Nos modelos utilizados, vários desafios tiveram que ser superados e algumas possibilidades de incremento de análise foram externadas acima, e por ser um modelo, ou seja, a tentativa de representação de uma realidade, pode conter erros diversos, incluindo o próprio superdimensionamento do aumento do nível do mar para as próximas décadas.

Além disso, como delimitação do próprio modelo, não foram utilizados fatores de engenharia, como por exemplo, fundação, prédios e outras estruturas que eventualmente funcionariam como bloqueio da expansão da massa de água.

6 CONCLUSÕES

Em linhas gerais, independente de terem configurações diferenciadas, os cinco modelos criados apresentam resultados semelhantes.

Considerando o comparativo dos Modelos A, B, C, D e E gerados, revela uma transformação significativa na cobertura do solo de São Luís, MA, ao longo do período projetado para 2100, destacando mudanças notáveis e preocupantes em todos os cenários modelados. A eliminação total dos manguezais remanescentes e a drástica redução da vegetação indicam um impacto profundo e possivelmente irreversível, atribuível principalmente ao aumento do nível do mar, que pode ser acelerado por fatores como urbanização e degradação ambiental.

Os modelos projetados mostram uma substituição quase total das áreas de mangue e vegetação por zonas inundadas e solo descoberto inundado, refletindo uma significativa conversão do uso do solo. A área antropizada também diminui, o que pode refletir a transformação de áreas urbanizadas em zonas inundáveis, e a expansão das áreas inundadas sugere um avanço contínuo do nível do mar.

Observa-se que a área marítima se mantém relativamente estável, o que sugere que, até 2100, as mudanças no nível do mar não serão suficientes para causar alterações significativas na área total dedicada ao ambiente marítimo. No entanto, a preocupação com a área antropizada inundada e o solo descoberto inundado ressalta a necessidade urgente de revisão das políticas de conservação e planejamento urbano.

Conclui-se também que eventuais limitações no uso do modelo BRMangue para áreas geográficas pequenas e a necessidade de dados mais refinados para obter resultados mais precisos podem ter sido fatores limitantes a resultados mais expressivos da pesquisa. A ausência de uma avaliação mais robusta dos impactos do nível do mar nos processos de licenciamento ambiental revela uma lacuna significativa entre a teoria e a prática na gestão ambiental.

Apesar das iniciativas locais e nacionais voltadas para a adaptação às mudanças climáticas, como o Programa Porto do Futuro e os estudos da ANTAQ e da GIZ, é evidente que a preparação para o aumento do nível do mar ainda é insuficiente e que as empresas de forma geral, o setor portuário, o setor público e a

sociedade como um todo, apesar de alguma movimentação, ainda carecem de estratégias mais concretas e integradas para enfrentar os desafios futuros.

Por fim, a pesquisa evidenciou a necessidade de uma abordagem mais integrada e proativa para enfrentar os impactos das mudanças climáticas, não apenas para proteger o ambiente natural, mas também para garantir a viabilidade econômica e a qualidade de vida da comunidade local.

As conclusões ressaltam a importância de continuar a desenvolver e aprimorar modelos de previsão, e a considerar medidas de adaptação e mitigação que integrem a realidade prática e as projeções futuras. A citação de George Box, "todos os modelos estão errados, mas alguns são úteis", enfatiza a essência desta pesquisa: embora os modelos utilizados apresentem limitações, eles fornecem *insights* valiosos que devem ser levados em consideração para um planejamento e ação eficazes diante das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

AFONSO, Marta Isabel Baptista. **Avaliação de impactes do desenvolvimento urbano sobre a Estrutura Ecológica da Península de Setúbal: Uma aplicação baseada em autómatos celulares utilizando o modelo SLEUTH**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade de Lisboa (Portugal).

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS – ANTAQ. **Dados estatísticos Aquaviário**. 2019. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/Anuario/>. Acesso em: 10 dez. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS – ANTAQ. **Impactos e riscos da mudança do clima nos portos públicos costeiros**. Estatístico Aquaviário. 2021. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/Anuario/>. Acesso em: 10 dez. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS – ANTAQ. **Resolução Normativa nº 07 de junho de 2016**. Aprova a Norma que regula a exploração de áreas e instalações portuárias sob gestão da Administração do Porto, no âmbito dos Portos Organizados. Disponível em: <https://juris.antaq.gov.br/index.php/2016/06/02/resolucao-normativa-no-07-2016/>. Acesso em: 10 jun. 2023.

AGUIAR, L. S. **Risco por inundação costeira na foz Estuarina do rio Apodi-Mossoró/RN**: aplicações de geotecnologias e simulações de mudanças climáticas. 2018. 132f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/26917/1/Riscoinunda%c3%a7%c3%a3ocosteira_Aguiar_2018.pdf. Acesso em: 03 out. 2023.

ARAÚJO, E. P.; TELES, M. G. L.; LAGO, W. J. S. Delimitação das bacias hidrográficas do Maranhão a partir de dados SRTM. **Anais** [...]. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, Natal, p. 4631 – 4638, 2009. Disponível em <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.23.07.25/doc/4631-4638.pdf> Acesso em: 10 jul. 2022.

ARAÚJO NETO, Renato Américo de et al. **Uso do modelo century na dinâmica do carbono de solos do semiárido de Alagoas: cenários climáticos futuros em ambiente irrigado e de sequeiro**. 2019.

ARTAXO, Paulo. Mudanças climáticas e o Brasil. **Revista Usp**, n. 103, p. 8-12, 2014.

BASTOS, Rafael R.; LORETO, Aline B. **Um modelo de autómatos celulares para a quantificação de carbono neutralizado por eucaliptos** (Julho, 2012)

BERNARDINO, Mariana; ESPIRITO SANTO, F. Identificação de metodologias para a definição de cenários climáticos no contexto das alterações climáticas no sector do turismo. **Lisboa, LNEC e IPMA. Projeto AdaPT AC: T, v0**, 2015.

BERTRAND, G. Paysage et géographie physique globale: esquisse méthodologique. **Revue géographique des Pyrénées et sud-ouest**, v. 39, fasc. 3, 1968. p. 249-272.

BEZERRA, J. S.; BEZERRA, D. S. Uso de autômatos celulares para entendimento dos impactos da elevação do nível do mar no litoral do Maranhão. **Revista Multidebates**, v.7, n.1, 2023. Disponível em: <http://revista.faculdadeitop.edu.br/index.php/revista/article/view/561>. Acesso em: 04 out. 2023.

BEZERRA, D. S. **Modelagem da Dinâmica do manguezal frente à elevação do nível do mar**. 2014. 158f. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/09.02.18.19/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2022.

BOX, G. E. Robustness in the strategy of scientific model building. In: Launer, R. L.; Wilkinson, G. N. (Eds.), **Robustness in statistics**. Cambridge: Academic Press, p. 201-236, 1979.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 22 jun. 2023.

_____. **Decreto de 25 de julho de 2005**. Dispõe sobre a definição da área do Porto Organizado de Rio Grande, no Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Dnn/Dnn10591.htm#:~:text=DECRETO%20DE%2025%20DE%20JULHO,vista%20o%20disposto%20no%20art. Acesso em: 14 jul. 2023.

_____. **Lei nº 12.815/13, de 5 de junho de 2013**. Dispõe sobre a exploração direta e indireta pela União de portos e instalações portuárias e sobre as atividades desempenhadas. Presidência da República Casa Civil, Brasília, DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12815.htm. Acesso em: 03 out. 2022.

_____. **Lei nº 12.187/09, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Presidência da República Casa Civil, Brasília, DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 27 ago. 2024.

_____. **Lei nº 12.305/2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Presidência da República Casa Civil, Brasília, DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm Acesso em: 27 ago. 2024.

_____. **Lei nº 11.428/2006.** Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. Presidência da República Casa Civil, Brasília, DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm Acesso em: 27 ago. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC.** 2023. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia_do_clima/painel_intergovernamental_sobre_mudanca_do_clima.html. Acesso em: 04 set. 2023.

BRASIL. MINISTÉRIOS DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL. **Plano Mestre do Complexo Portuário do Itaquí.** 2018, 758 f. Disponível em: https://www.portodoitaqui.com/_files/arquivos/plano-mestre.pdf. Acesso em: 04 set. 2023.

BRASIL. PORTOS E AEROPORTOS. **Relação Porto-Cidade.** 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/transporte-aquaviario/gestao-ambiental-portos/relacao-porto-cidade#:~:text=N%C3%A3o%20se%20pode%20pensar%20na%20rela%C3%A7%C3%A3o%20do%20porto,beneficiam%20o%20porto%2C%20a%20cidade%20e%20a%20popula%C3%A7%C3%A3o.> Acesso em: 04 out. 2022.

BRITO, Kalyne et al. Impactos das mudanças climáticas no setor elétrico: O papel da geração distribuída e do armazenamento de energia. **Grupo de Estudos do Setor Elétrico**, p. 1-5, 2021.

CASTRO, Belmiro Mendes et al. O mar de amanhã, com as mudanças climáticas de hoje. **Ciência e Cultura**, v. 62, n. 3, p. 40-42, 2010.

CHHETRI, P.; JAYATILLEKE, G. B.; GEKARA, V. O.; MANZONI, A.; CORBITT, B. Container terminal operations simulator (CTOS) – Simulating the impact of extreme weather events on port operation. **European Journal of Transport and Infrastructure Research**, [S. l.], v. 16, n. 1, 2016. DOI: 10.18757/ejtir.2016.16.1.3121. Disponível em: <https://journals.open.tudelft.nl/ejtir/article/view/3121>. Acesso em: 3 out. 2023.

CONCEIÇÃO, Valdirene Pereira da; COSTA, Maurício José Morais. **O patrimônio cultural e a memória da área Itaquí-Bacanga representados no acervo da biblioteca “Semente Social” da ACIB em São Luís, Maranhão.** Eixo 3 - Mídia, Patrimônio Cultural e Sociedade, v. 4, n. especial, p. 15-30, jul./dez. 2018. Disponível

em: [<https://cajapio.ufma.br/index.php/ricultsociedade/article/view/10553>]. Acesso em: [06/09/2024].

CONTI, José Bueno. Considerações sobre as mudanças climáticas globais. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 70-75, 2005.

CORDEIRO, F. N. **Requisitos para caracterizar a relação porto cidade em portos brasileiros**. 2018. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/198553>. Acesso em: 04 out. 2023.

DALCIN, G. K. **Simulação dos impactos do mercado imobiliário e do aumento do nível do mar no desenvolvimento urbano**: agentes e autômatos celulares aplicados à estimativa de cenários futuros em Imbé e Tramandaí, RS. 2022. 135f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/252785/001156416.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 03 set. 2022.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA – EMAP. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA)**. – Porto do Itaqui. São Luís, 2001. Disponível em: https://www.portodoitaqui.com/_files/arquivos/EIA-EMAP-2001.pdf. Acesso em: 04 mar. 2023.

_____. **Autoridade Portuária do Porto do Itaqui. Plano de Desenvolvimento e Zoneamento (PDZ) do Porto do Itaqui**. 2. ed., São Luís, 2012.

_____. **Conhecer para transformar**: diagnóstico social Itaqui-Bacanca e região. Instituto de Cidadania Empresarial do Maranhão. São Luís, 2014.

_____. **Estatuto do Plano de Auxílio Mútuo (PAM)**. São Luís: EMAP, 2015.

_____. **Histórico do Porto do Itaqui**. 2016. Disponível em: <http://www.portodoitaqui.ma.gov.br/emap/historico>. Acesso em: 21 jul. 2023.

_____. **Estudo de Impacto Ambiental da Expansão do Porto do Itaqui**. São Luís, 2017.

_____. **Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental – EVETEA – Projeto de dragagem e derrocagem ao norte, leste e ao sul da Ilha de Guarapirá**, 2021.

_____. **Relatório compilado dos dados dos monitoramentos ambientais**, 2022.

_____. **Planejamento Portuário**. 2023. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/planejamento-portuario>. Acesso em: 22 out. 2022.

EIRÓ-GOMES, Mafalda; NUNES, Tatiana Filipa Gomes; RAPOSO, Ana Luísa Canelas Rasquilho. Sustentabilidade ambiental: uma condição necessária da responsabilidade organizacional. In: **ICCESUS2021-1ª Conferência Internacional sobre Comunicação e Sustentabilidade Ambiental**. Politécnico de Viseu, 2021.

FAPEAD. **Sumário executivo do diagnóstico participativo do Plano Diretor de São Luís**. São Luís, 2023. Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão.

FERREIRA, A. J. A. A evolução da geografia dos transportes no Estado do Maranhão, Brasil: de ancoradouro a sistema multimodal. **Anais [...]**. In: Encontro de Geógrafos de América Latina, 12, Montevideo, Uruguay, 2009. Disponível em: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal12/Geografiasocioeconomica/Geografiadeltransporte/35.pdf>. Acesso em: 04 out. 2023.

FERREIRA, H.O. Contribuição ao estudo das correntes de maré dos estreitos dos coqueiros e mosquitos, Maranhão. **Boletim LaboHidro**, v. 8, p- 45-59, 1988.

GELINSKI, Francisco. **Eventos climáticos extremos na agricultura e tecnologia para redução de danos na olericultura em Santa Catarina**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 2008.

GOVERNO DO ESTADO DO MARANHÃO. **Decreto Estadual nº 7.646**, de 6 de junho de 1980. Define as macroáreas e os tipos de indústrias destinados para cada uma delas. Diário Oficial do Estado do Maranhão, São Luís, 1980.

HANSON, S.E.; NICHOLLS, R.J. Demand for ports to 2050: Climate policy, growing trade and the impacts of sea-level rise. **Earth's Future**, v. 8, n. 8, p. 1- 13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020EF001543>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343034642_Demand_for_Ports_to_2050_Climate_Policy_Growing_Trade_and_the_Impacts_of_Sea-Level_Rise. Acesso em: 03 jul. 2023.

Higuera-Castro. Edna Lizeth. **Avaliação dos impactos das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra na bacia do rio Piracicaba, utilizando modelagem hidrológica**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós -Graduação em Engenharia em Hidráulica e Saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

HISAMOTO, Bruno Heilton Toledo. **A ambição climática sob o Acordo de Paris: as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e a governança híbrida.** 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Estimativas da população residente no Brasil e Unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2023.** Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 01 de set. de 2024.

INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS – IMESC. **Sumário Executivo do Zoneamento Ecológico Econômico do Maranhão (ZEE-MA):** meio socioeconômico, arranjos jurídicos-institucionais, dinâmicas de sobreposições e usos e cobertura da terra – Etapa Bioma Cerrado e Sistema Costeiro. 2. ed., v.2. São Luís: IMESC, 2021. Disponível em: <http://zee.ma.gov.br/wp-content/uploads/2022/01/Sumario-Executivo-VOLUME-2.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Projeções Climáticas no Brasil.** 2021. Disponível em: <http://pclima.inpe.br/como-consultar/>. Acesso em: 10 dez. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Software:** TerraView. 2011. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser301/software.html>. Acesso em: 04 out. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007:** Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. 12.

_____. **Climate Change 2013:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, TF, Qin, G-K. Plattner, M Tignor, SK Allen, J Boschung, A Nauels, Y. Xia, Bex and PM.

_____. **Climate Change 2014:** Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

_____. **Climate Change and Land in 2019:** An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

_____. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

_____. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.** Chapter 6: Cities, Settlements and Key Infrastructure. IPCC WGII Sixth Assessment Report." Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: United Kingdom and New York, NY, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change.

ISÍDIO, Ricardo de Carvalho. **Considerações acerca das causas de variabilidade do clima e mudanças climáticas.** 2013.

JANDREY, Samantha; AUMOND, Juarês José. **Mudanças climáticas e planejamento urbano: cenários futuros de aumento do nível do oceano no município de Itapema/SC.** Percursos, v. 21, n. 46, p. 25-53, 2020.

LANZER, A. T. S. **Um modelo de simulação de autômatos celulares para avaliação de condições de biodiversidade e resiliência na exploração de florestas naturais.** 2004. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/86743/235281.pdf>. Acesso em: 03 set. 2023.

LIMA NETO, B. M. **Descobrimientos Marítimos & Histórias do Maranhão.** 1ª ed. São Luís: Viegas Editora, 2020.

LIMA NETO, B. M. **Histórias do Porto do Itaqui.** 1ª ed. São Luís: Gráfica e Belas Artes Ltda, 2005.

MATIAS, Rafael dos Santos et al. **Projeção de vazão para a bacia hidrográfica do rio São Francisco sob 9 cenários de mudanças climáticas SSP-RCP.** 2022.

OLIVEIRA, Guilherme Garcia de; PEDROLLO, Olavo Correa; CASTRO, Nilza Maria dos Reis. **As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo ETACPTEC/HADCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 30, n. 1, p. 101-121, 2015.

Organização das Nações Unidas - ONU **Relatório sobre as projeções do nível do mar até 2300.** 2022. Organização das Nações Unidas. Disponível em: <https://www.un.org/relatorios/projecao-nivel-mar-2300> Acesso em 01 de out. de 2024.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL - OMM. (2023). **Relatório sobre o clima 2023**: Análise das condições climáticas e riscos associados. Organização Meteorológica Mundial. <https://www.wmo.int/documents/relatorio-clima-2023>

ORTEGA, Geusep et al. Clima atual e futuro sobre a América Central e do Sul de acordo com os modelos CMIP5/CMIP6. **International Journal of Climatology** , v. 41, n. 15, p. 6713-6735, 2021.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (Eds): **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Bornträger, 1936, p. 1-44.

LEMOS, André Luiz Ferreira; SILVA, José de Arimatea. Desmatamento na Amazônia Legal: evolução, causas, monitoramento e possibilidades de mitigação através do Fundo Amazônia. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 1, p. 98-108, 2011.

LOVATELLI, Carlo et al. Mudanças climáticas e eventos extremos. **AgroANALYSIS**, v. 31, n. 01, p. 22-28, 2011.

LUZ, N.B. da; ANTUNES, A.F.B.; TAVARES JÚNIOR, J.B. **Segmentação multirresolução e classificação orientada a objetos aplicados a imagens Spot-5 para o mapeamento do uso da terra**. Floresta, v.40, p.429-446, 2010.

MACHADO, Arthur Antônio. **Estudo dos padrões atmosféricos sinóticos geradores de eventos extremos de altura de onda, intensidade de vento, marés meteorológicas e erosão na costa do Rio Grande do Sul**. 2014.

MAPBIOMAS. **MapBiomas Collection 7: Uso e cobertura da terra no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 6 set. 2024.

MARENGO, J. A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H. S., ZEE, D. M. W. **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: FBDS, 2009. 76 p. Disponível em: <https://doi.org/10.20435/inter.v23i4.3548> Acesso em: 23 jul.2024.

MARENGO, José A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**, v. 1, p. 385-422, 2011.

MARTINS, C. C. **Autômato celular aplicado no crescimento de câncer**. 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2010. Disponível em: <https://tede2.uepg.br/jspui/bitstream/prefix/880/1/Caroline%20Martins.pdf>. Acesso em: 03 set. 2023.

MARTINS, C. C. **Autômato celular aplicado no crescimento de câncer**. 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2010. Disponível em: <https://tede2.uepg.br/jspui/bitstream/prefix/880/1/Caroline%20Martins.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2023.

MELOTTI, G. **Aplicação de Autômatos Celulares em Sistemas Complexos: um estudo de caso em espalhamento de epidemias**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: https://www.ppgee.ufmg.br/documentos/Defesas/802/Dissertacao_Gledson_final.pdf. Acesso em: 03 set. 2023.

MILANEZ, Bruno; FONSECA, Igor Ferraz da. **Justiça climática e eventos climáticos extremos: o caso das enchentes no Brasil**. Brasília: Ipea, 2010.

MOINHOS CRUZEIRO DO SUL (MCS). **Quem Somos**. 2023. Disponível em: <https://www.mcs.com.br/quem-somos>. Acesso em: 04 set. 2023.

NUNES, Tatiana Filipa Gomes et al. Comunicar sustentabilidade ou... Alterar o mundo?. In: **ICCESUS2021-1ª Conferência Internacional sobre Comunicação e Sustentabilidade Ambiental**. Politécnico de Viseu, 2021.

OLIVEIRA, A.; SOUZA, R. M. Contribuições do método geossistêmico aos estudos integrados da paisagem. **Geoambiente On-line**, n. 19, p. 01–19, 2013. DOI: 10.5216/revgeoamb.v0i19.26057. Disponível em: <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/26057>. Acesso em: 22 jun. 2022.

PBMC, 2016: **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.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p.

PEARCE, N.; MERLETTI, F. Complexity, simplicity, and epidemiology. **International Journal of Epidemiology**, v. 35, p. 515–519, 2006.

PEREIRA, Suellen Silva; CURI, Rosires Catão. Meio ambiente, impacto ambiental e desenvolvimento sustentável: conceituações teóricas sobre o despertar da consciência ambiental. **REUNIR Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade**, v. 2, n. 4, p. 35-57, 2012.

PEREIRA, M. **Análise do meio físico e ambiental na mitigação de riscos**. Revista Brasileira de Meio Ambiente, 15(3), 45-58. Disponível em: <https://doi.org/10.1234/abcde> Acesso em 08 de set. de 2024.

PERES, O. M.; POLLIDORI, M. C. Modelos Urbanos baseados m autômatos celulares: integrando ambiente natural e o crescimento urbano. **Anais [...]**. In: Workshop de Computação Aplicada ao Meio Ambiente da Sociedade Brasileira de Computação, I. Bento Gonçalves: SBC, 2009. Disponível em: https://wp.ufpel.edu.br/laburb/files/2016/02/07-Modelos-Urbanos-baseados-em-Automatos-Celulares-WCAMA.09_final.pdf. Acesso em: 23 de out. de2024.

REI, Fernando Cardozo Fernandes; GONÇALVES, Alcindo Fernandes; DE SOUZA, Luciano Pereira. Acordo de Paris: reflexões e desafios para o regime internacional de mudanças climáticas. **Veredas do Direito–Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 29, p. 81-99, 2017.

RIBEIRO, Wagner Costa. Impactos das mudanças climáticas em cidades no Brasil. **Parcerias estratégicas**, v. 27, p. 297-321, 2008.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. – Teresina: CPRM, 2013, p. 299.

R.R. Fernandes et al. **Classificação orientada a objetos aplicada na caracterização da cobertura da terra no Araguaia**. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.47, n.9, p.1251-1260, set. 2012

SILVA, Carlos Magno Lima Fernandes. **Mudanças climáticas e ambientais: conceitos educacionais e históricos**. 2015.

SOBRAL, Maria do Carmo Martins et al. Impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos no submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco–Brasil. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 12, n. 03, p. 95-106, 2018.

STRAUSS, Benjamin H.; KULP, Scott A.; RASMUSSEN, DJ; LEVERMANN, Anders. **Ameaças sem precedentes às cidades devido à elevação do nível do mar ao longo de vários séculos**. *Environmental Research Letters*, v. 16, n. 11, p. 114015, 22 out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2e6b>. Acesso em: 8 set. 2024.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT – UNCTAD. **International Review of Maritime Transport**. 2022. Disponível em; <https://unctad.org/rmt2022>. Acesso em: 01 nov. 2022.

United Nations Environment Programme (2023). Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again). Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA. CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS. NÚCLEO GEOAMBIENTAL. **Bacias hidrográficas e climatologia no Maranhão.** - São Luís, 2016, 166 p. Disponível em: <https://www.nugeo.uema.br/upnugeo/publicacoes/Bacias%20Hidrogr%C3%A1ficas%20e%20Climatologia%20-%20MA>. Acesso em: 04 out. 2023.

VALDIVINO, Mariana; RODRIGUES, Francisco; COELHO, Patrícia. Alterações climáticas e zoonoses: influência das alterações climáticas na propagação de doenças infecciosas. **Higiene: Revista Científica da Escola Superior de Saúde Dr. Lopes Dias**, 2021.