



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

TAYSSA RAUANNY SILVA JANSEN

PROPAGAÇÃO DAS MARÉS NO GOLFÃO MARANHENSE E CENÁRIOS DE
INUNDAÇÃO NA ORLA OCEÂNICA DA ILHA DO MARANHÃO - BRASIL

São Luís - MA

2024

TAYSSA RAUANNY SILVA JANSEN

**PROPAGAÇÃO DAS MARÉS NO GOLFÃO MARANHENSE E CENÁRIOS DE
INUNDAÇÃO NA ORLA OCEÂNICA DA ILHA DO MARANHÃO - BRASIL**

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

Orientador: Prof^a. Dr^a. Cláudia Klose Parise

Coorientador: Prof. Dr. João Luiz Baptista de Carvalho

São Luís - MA

2024

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

Jansen, Tayssa Rauanny Silva.

Propagação das Marés No Golfo Maranhense e Cenários de Inundação Na Orla Oceânica da Ilha do Maranhão - Brasil / Tayssa Rauanny Silva Jansen. - 2024.

70 f.

Coorientador(a) 1: João Luiz Baptista de Carvalho.

Orientador(a): Cláudia Klose Parise.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Maranhão, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024.

1. Maré Astronômica. 2. Elevação do Nível do Mar. 3. Golfo Maranhense. 4. Inundação. 5. . I. Baptista de Carvalho, João Luiz. II. Klose Parise, Cláudia. III. Título.

TAYSSA RAUANNY SILVA JANSEN

**PROPAGAÇÃO DAS MARÉS NO GOLFÃO MARANHENSE E CENÁRIOS
DE INUNDAÇÃO NA ORLA OCEÂNICA DA ILHA DO MARANHÃO - BRASIL**

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

Aprovada em 29 de maio de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a Dr^a. Cláudia Klose Parise
Departamento de Oceanografia e Limnologia - DEOLI
Universidade Federal do Maranhão – UFMA
Orientador

Prof^o Dr^o. Leonardo Gonçalves de Lima
Departamento de Oceanografia e Limnologia - DEOLI
Universidade Federal do Maranhão – UFMA
MEMBRO INTERNO

Prof^o Dr^o. Adilson Matheus Borges Machado
Coordenação do Curso de Engenharia de Pesca
Universidade Federal do Maranhão – UFMA
MEMBRO EXTERNO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, aos Orixás, por ter me dado saúde, força e bom ânimo nesses dois anos de trajetória e durante toda a minha vida.

À Universidade Federal do Maranhão, por sempre me oferecer os melhores recursos para conclusão desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)

À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão – FAPEMA e a Empresa Maranhense de Administração Portuária – EMAP pela bolsa concedida, através do edital N° 10, DE 13/06/2022 -PROGRAMA PORTO DO FUTURO – EMAP, termo n° 004276/2022.

Ao alcançar este marco tão significativo na minha jornada acadêmica, não posso deixar de expressar minha gratidão àqueles que tornaram tudo isso possível.

Devo um agradecimento imenso à minha orientadora e amiga, Cláudia Parise, cujo apoio, confiança e vasto conhecimento foram fundamentais para o meu desenvolvimento como pesquisadora. Sua orientação foi essencial para a elaboração deste trabalho, e por isso, sou eternamente grata.

Ao meu coorientador João Luiz Baptista de Carvalho, agradeço por todo o apoio e conhecimento compartilhado, que foram cruciais para meu aprimoramento e sucesso deste trabalho.

Um agradecimento especial à turma 2, a melhor turma que existe e existirá, por compartilhar uma jornada inesquecível e insuperável de aprendizado e camaradagem.

Não poderia esquecer dos meus grandes amigos de mestrado, verdadeiros companheiros de vida: Lúcio, Ludmila, Luan, Alexandre, Emerson, e em especial Fábio (Fabão), cuja amizade, confiança foi vital para tornar esta realidade possível.

Agradeço também a todos os meus colegas do Laboratório de Estudos e Modelagem Climática (Laclima), especialmente Juliana, Saulo, Thainá, Laisa, Michelly, Heitor, Bruno, Babi, Dani, Hugo e Janylle, que estiveram ao meu lado nos momentos de alegria, tristeza e desafios.

Um reconhecimento especial à velha guarda do LACPLAM—Leonardo Serra, Luciana, Dane, Denise, Arkley, Leonardo Soares, e Veronica Santos—por todo apoio, bem como pelos almoços compartilhados, conversas animadas e muitas gargalhadas que coloriram os dias.

À galera da lacração, obrigada por tornarem meus dias mais leves e divertidos, enchendo cada momento com alegria.

Agradeço também imensamente a Adilson Borges, que sempre me incentivou e motivou, oferecendo ajuda e suporte mesmo nos momentos em que estava muito ocupado. Seu encorajamento foi um componente essencial do meu sucesso.

À Júlia, agradeço o incentivo, dado à sua maneira única, que também foi fundamental na minha jornada. Obrigada Tartaruga.

Um agradecimento especial para Samara Eschrique, vulgo Maravilhosa, cuja amizade e palavras de sabedoria foram um farol de inspiração e conforto para mim.

Por fim, sou grata a Yasmin, pela amizade sincera e pelas conversas motivadoras que tanto incentivaram minha jornada.

A todos vocês, meu sincero obrigado por serem parte essencial desta etapa da minha vida.

"After All this time? Always"

Dumbledore and Snape

RESUMO

A propagação da maré astronômica no Golfão Maranhense, destaca a importância das componentes harmônicas para a gestão costeira e a segurança da navegação em águas rasas. A metodologia inclui análises harmônicas detalhadas para identificar os principais componentes das marés e avaliar suas influências nas variações de amplitude e energia das marés. Os resultados indicam a predominância de marés semidiurnas e destacam a influência das marés meteorológicas nas condições locais. Esses resultados auxiliam nas operações portuárias e o planejamento costeiro, oferecendo dados para melhorar o entendimento dos padrões de maré e suas aplicações em atividades econômicas e de preservação ambiental. Além disso a pesquisa foca na simulação de áreas susceptíveis a inundações causadas pela elevação do nível do mar na zona costeira do Golfão Maranhense. Utilizando modelos computacionais, o estudo avalia a identificar áreas susceptíveis a inundações em decorrência à elevação do nível do mar. Ambos os capítulos são interligados na medida em que aprofundam o entendimento da dinâmica costeira e das marés na região, oferecendo subsídios para futuras estratégias de gestão e conservação frente aos desafios impostos pelo avanço do nível do mar. As mudanças climáticas globais afetam todos os ecossistemas da Terra, incluindo o nível do mar, que em condição de elevação, pode causar inundações nas regiões costeiras, resultando em prejuízos ambientais e financeiros significativos. A identificação das áreas de risco é crucial para a implementação de ações de mitigação. O objetivo deste trabalho é identificar áreas suscetíveis a inundações resultantes da elevação do nível do mar devido às mudanças climáticas na Ilha do Maranhão. Este estudo avalia o impacto do aumento do nível do mar sob dois cenários futuros de mudanças climáticas projetados pelo AR6 (IPCC, 2021): os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5, que preveem um aumento do nível do mar de 0,55 m e 1,02 m, respectivamente, até o final do século XXI. Foi utilizado o software Global Mapper para aplicar esses valores acumulados na ferramenta "simulate water level rise/flooding". Através dessa ferramenta foi possível visualizar e analisar as áreas potencialmente inundáveis sob esses cenários combinados. Este método oferece uma abordagem integrada para avaliar riscos de inundações costeiras, considerando tanto as mudanças climáticas antropogênicas quanto fenômenos naturais de variação de nível d'água, permitindo uma melhor compreensão das vulnerabilidades e necessidades de adaptação das regiões costeiras.

Palavras-chaves: Maré Astronômica, Elevação do Nível do Mar. Golfão Maranhense. Inundação.

ABSTRACT

The propagation of the astronomical tide in the Golfão Maranhense highlights the importance of harmonic components for coastal management and navigation safety in shallow waters. The methodology includes detailed harmonic analyzes to identify the main tidal components and evaluate their influence on tidal amplitude and energy variations. The results indicate the predominance of semidiurnal tides and highlight the influence of meteorological tides on local conditions. These results are essential for optimizing port operations and coastal planning, offering crucial data to improve the understanding of tidal patterns and their applications in economic and environmental preservation activities. Furthermore, the research focuses on simulating areas susceptible to flooding caused by rising sea levels in the coastal area of Golfão Maranhense. Using advanced computer models, the study evaluates the identification of areas susceptible to flooding due to rising sea levels. Both chapters are interconnected as they deepen the understanding of coastal and tidal dynamics in the region, offering support for future management and conservation strategies in the face of the challenges posed by rising sea levels. Global climate change affects all ecosystems on Earth, including rising sea levels, which can cause flooding in coastal regions, resulting in significant environmental and financial losses. Identifying risk areas is crucial for implementing mitigation actions. The objective of this work is to identify areas susceptible to flooding resulting from rising sea levels due to climate change on Maranhão Island. This study evaluates the impact of sea level rise under two future climate change scenarios projected by AR6 (IPCC, 2021): scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5, which predict a sea level rise of 0.55m and 1.02m, respectively, by the end of the 21st century. The Global Mapper software was used to apply these accumulated values to the "simulate water level rise/flooding" tool. Using this tool, it was possible to visualize and analyze potentially floodable areas under these combined scenarios. This method offers an integrated approach to assessing coastal flooding risks, considering both anthropogenic climate change and natural phenomena of water level variation, allowing a better understanding of the vulnerabilities and adaptation needs of coastal regions.

Keywords: Astronomical Tide, Sea Level Rise, Maranhense Gulf, Flooding.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I PROPAGAÇÃO DA MARÉ ASTRONÔMICA NO GOLFÃO MARANHENSE – BRASIL

Figura 1 - Amplitudes de maré da costa brasileira. Modificado de Vellozo & Alves (2006)..	21
Figura 2 - Mapa da área de estudo da Ilha do Maranhão, com destaque para a orla oceânica (Jansen, 2023).....	28
Figura 3 - Relação total de harmônicos.	36
Figura 4 - Séries temporais observada (linha azul) e prevista (linha vermelha) da maré obtida pelo SiMCosta para o período de 12 a 31 de maio de 2022.	38
Figura 5 - Série temporal para BSJ: a) Nível do mar; b) Maré Meteorológica.	38
Figura 6 - Série temporal para BSM: a) Nível do mar; b) Maré Meteorológica.	39
Figura 7 - Evolução espaço-temporal das componentes de maré obtidas para São José de Ribamar (azul) e para o Porto do Itaqui (vermelho): a) M2; b) S2; c) O1; d) K1.....	40

CAPÍTULO II: SIMULAÇÃO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À INUNDAÇÃO POR ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NA ZONA COSTEIRA DA ORLA OCEÂNICA DE SÃO LUÍS E GOLFÃO MARANHENSE

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, mostrando o Golfão Maranhense e a Ilha do Maranhão, com destaque para a orla oceânica onde foram obtidos os dados de altimetria com o DGPS (Sousa, 2024).....	49
Figura 2 - a) Imagem do radar SRTM para o Golfão Maranhense e b) Detalhe da orla oceânica da Ilha do Maranhão indicando a delimitação da área simulada.	51
Figura 3 - Diferenças espaciais (entre SRTM-DGPS) obtidas para a região da orla oceânica da Ilha do Maranhão.....	54
Figura 4 -Altitude ortométrica (m) da orla oceânica da Ilha do Maranhão interpolada a partir dos 12 pontos obtidos pelo DGPS.	55
Figura 5 - Mapa com as áreas de inundação simuladas sobre os dados altimétricos do SRTM para o cenário otimista (SSP1-2.6) e pessimista (SSP5- 8.5) do IPCC.	57
Figura 6 - Mapa com as áreas vulneráveis a inundações no Golfão Maranhense nos cenários climáticos otimista (SSP1-2.6) e pessimista (SSP5- 8.5) do IPCC.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Estudos sobre análise de maré astronômica no Estado do Maranhão.	26
Tabela 2 - Constituintes harmônicas estatisticamente significativas para a Baía de São José (cais de São José de Ribamar), Baía de São José, Golfão Maranhense.	33
Tabela 3 - Constituintes harmônicos estatisticamente significativos para São Luís (Berço do Porto do Itaqui), Baía de São Marcos, Golfão Maranhense.	35
Tabela 1 - Configuração das simulações das inundações pelo aumento do nível do mar em cenários futuros projetados pelos modelos do CMIP6/IPCC.	56
Tabela 2- Diferenças entre os dados topográficos medidos pelo DGPS e pelo SRTM.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR6 – Sixth Assessment Report

BSJ - Baía de São José

BSJ – Baía de São Marcos

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Cm - Centímetro

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

DGPS - Differential Global Positioning System

ENM – Elevação do Nível do Mar

FAPEMA – Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão

GPS - Global Positioning System

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW - Inverse Distance Weighting

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

Km – Quilômetro

M – Metro

Mapbiomas – Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil

MAPGEO – Modelo de Geóide Gravimétrico do IBGE

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDT – Modelo Digital de Terreno

Mm – Milímetro

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

ONU – Organização das Nações Unidas

SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

SSP – Shared Socioeconomic Pathways

UTM - Universal Transversa de Mercator

WGS - World Geodetic System

SUMÁRIO

I. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
1. Teoria das marés	16
2. Correntes de maré	18
3. Análise harmônica das marés.....	18
4. Estudos sobre as marés e correntes de maré no Brasil e Golfão Maranhense.....	20
CAPÍTULO I: PROPAGAÇÃO DA MARÉ ASTRONÔMICA NO GOLFÃO MARANHENSE – BRASIL	22
Resumo	22
1. Introdução	23
2. Área de estudo	27
3. Métodos	28
3.1. Dados de nível do mar	28
3.2. Processamento dos dados de nível do mar	29
3.3. Análises	29
4. Resultados e Discussão	31
4.1. Componentes harmônicas da maré no Golfão Maranhense	31
4.2. Previsão de maré no Golfão Maranhense	37
4.3. Componente meteorológica da maré no Golfão Maranhense	38
4.4. Defasagem das principais constituintes de maré entre BSM e BSJ.	39
5. Conclusões	40
Referências	41
CAPÍTULO II: SIMULAÇÃO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À INUNDAÇÃO POR ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NA ZONA COSTEIRA DA ORLA OCEÂNICA DE SÃO LUÍS E GOLFÃO MARANHENSE.....	45
Resumo	45
1. Introdução	46
2. Métodos	48
2.1. Área de Estudo.....	48
2.2. Bases de Dados Topográficos	50
2.3. Processamento dos Dados.....	51

<i>Altitude Ortométrica</i>	51
<i>Interpolação dos Dados de DGPS</i>	52
SSP5-8.5 - Pessimista	53
3. Resultados e Discussão	53
3.2 Validação dos dados de SRTM para o Golfão Maranhense.....	53
4 Conclusões	61
Referências	63
III. CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
IV. REFERÊNCIAS	67
V. APÊNDICES	72
1. <i>Certificados de participações em eventos</i>	72
2. <i>Comprovante de submissão do primeiro CAPÍTULO</i>	73
3. <i>Normas e diretrizes para submissão de manuscrito do capítulo 1</i>	74

I. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma das consequências mais alarmantes do aquecimento global é a elevação do nível do mar, resultado da atuação sinérgica de vários fatores, em diferentes escalas, como o aumento da temperatura da água do mar e a consequente expansão térmica dos oceanos, o derretimento da criosfera e a sobre-elevação do nível por marés meteorológicas.

Este trabalho está estruturado, de forma geral, em Considerações Iniciais, Fundamentação Teórica, Capítulo I, Capítulo II, Considerações Finais, Referências e Anexos. O Capítulo I abordará as defasagens em relação ao marégrafo do SiMCosta, de modo a compor um modelo de propagação da onda de maré ao longo da orla oceânica da Ilha do Maranhão e determinar as características das componentes de maré na Baía de São José e na Baía de São Marcos, suas amplificações e defasagens, bem com as variâncias (ou energias) envolvidas. A metodologia inclui análises harmônicas detalhadas para identificar os principais componentes das marés e avaliar suas influências nas variações de amplitude e energia das marés. O Capítulo II abordará na identificação de regiões na Ilha do Maranhão mais vulneráveis a inundações por elevação do nível do mar projetadas pelos cenários futuros de mudanças climáticas do IPCC. Para tal, foram empregados dados de levantamento geodésico (DGPS) e imagens de radar (SRTM) na criação de um Modelo Digital de Terreno (MDT) para a região do Golfão Maranhense e orla oceânica de São Luís, os resultados obtidos a partir dos níveis, serão confrontados com os aspectos geomorfológicos da linha de costa em ambiente SIG delimitando possíveis cenários de inundação costeira. Para a identificação desses cenários, foi utilizado o software Global Mapper para aplicar esses valores acumulados na ferramenta "simulate water level rise/flooding". Através dessa ferramenta foi possível visualizar e analisar as áreas potencialmente inundáveis sob esses cenários combinados.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. Teoria das marés

A teoria do equilíbrio das marés foi o primeiro modelo teórico para representar o comportamento das marés ao redor do globo ao analisar o efeito de um corpo celeste sobre uma esfera coberta por uma camada de fluido (Harari, 2021). A Lua exerce uma força gravitacional sobre a Terra, puxando a água dos oceanos em direção a ela. O Sol também contribui para as marés, embora em menor grau devido a sua grande distância do centro de massa da Terra. O movimento de rotação da Terra também influencia as marés, criando um ciclo de maré alta e maré baixa ao longo do dia. Essa teoria nos ajuda a entender por que as marés ocorrem regularmente em diferentes partes do mundo.

A teoria da dinâmica das marés, por sua vez, trata da resposta hidrodinâmica do oceano real às forças geradoras de maré, considerando os limites (continentais e de fundo) dos oceanos, a progressão das ondas de maré e a aceleração de Coriolis (Harari, 2021). Essa teoria é uma explicação mais abrangente e detalhada sobre o comportamento das marés, pois leva em consideração não apenas a atração gravitacional da Lua e do Sol sobre a Terra, mas também uma série de fatores complexos e não-astronômicos que influenciam o nível do mar em regiões litorâneas.

Os fatores incluem a topografia e geomorfologia do assoalho oceânico, a forma e tipo de linha de costa, a ressonância das bacias oceânicas, a interação das marés com as correntes oceânicas, o regime sazonal das chuvas e as condições meteorológicas. A teoria dinâmica das marés considera também os efeitos de dissipação de energia, como a fricção e a turbulência, que podem alterar a amplitude e o padrão das marés em diferentes regiões. Essa teoria nos permite compreender melhor a complexidade do estudo das marés e como elas variam de acordo com os elementos específicos de cada localidade oceânica.

Segundo a Brown *et al.* (1989) as marés são ondas longas que fazem com que o nível do mar suba e desça periodicamente ao longo da costa em todo o mundo. A oscilação de maré é a componente horizontal da Força Geradora de Marés que, por sua vez, é resultado da interação da força de atração da Lua (e do Sol) e a força centrífuga do sistema Terra-Lua. A Lua, estando muito mais próxima da Terra, tem mais poder para puxar as marés do que o Sol e, portanto, é a força primária que cria as marés.

A atração gravitacional da Lua representada na equação 1 (Newton, 1687) faz com que a água se expanda tanto no lado da Terra mais próximo da Lua como no lado oposto do planeta.

A gravidade da Lua tem uma atração mais forte no lado da Terra que lhe está mais próximo, o que faz com que a água do oceano se expulse desse lado, enquanto no lado oposto do planeta a força centrífuga criada pela Lua e pela Terra orbitando uma à outra puxa a água do oceano para fora. Assim, as forças de tração resultam no movimento da água para os pontos da Terra. Em outras palavras, um estado de equilíbrio seria alcançado (teoria do equilíbrio), produzindo uma elipsóide com as suas duas protuberâncias dirigidas para a Lua e afastadas dela.

$$FG = \frac{Gm_Lm_T}{d^2} \quad (1)$$

Onde:

G é a constante gravitacional universal de Newton ($6,67408 \times 10^{-11} \text{.N.m}^2.\text{kg}^{-2}$);

m_L é a massa da Lua;

m_T é a massa da Terra;

d é a distância entre os astros de massa m_1 e m_2 .

Segundo Simonetti (2016), os movimentos relativos entre Sol, Terra e Lua produzem variações na força geradora de maré devido às modificações cíclicas das declinações e excentricidades das órbitas da Lua e da Terra em relação ao Sol. Desta forma fazem com que as marés sejam movimentos harmônicos compostos que podem, conseqüentemente, ser decompostos em vários constituintes harmônicos, em que cada componente representa uma mudança periódica ou variação nas posições relativas da Terra, Lua e Sol.

Sendo assim, as forças geradoras formam três classificações principais quanto ao período das marés, são elas: "maré semidiurna" com predominância das componentes M_2 , S_2 e N_2 ; "maré diurna" produzida principalmente pelas componentes M_1 , O_1 e P_1 , resultando em uma preamar e uma baixa-mar em cada dia lunar e ocorrendo principalmente nas proximidades do Equador e Trópicos, mas com marcantes exceções devido à topografia local; e a "maré mista", isto é, quando a Lua cruza o Equador ao longo do mês lunar, a maré é principalmente semidiurna; e quando a declinação da Lua é grande, as constituintes diurnas são suficientemente fortes para produzir uma preamar e uma baixa-mar por dia (SUMICH, 1996; THURMAN, 1994; ROSS, 1995).

2. Correntes de maré

A oscilação vertical das marés próximo à costa faz com que a água se movimente horizontalmente, criando correntes chamadas de correntes de maré, causada pela maré oceânica na entrada do canal (Simonetti, 2016).

De acordo com NOAA (2016), as correntes de maré são influenciadas tanto pela distância entre Sol e Lua quanto pela geometria das baías e estuários, além disso, em águas rasas as amplitudes de maré aumentam e as correntes de maré tornam-se mais intensas, desenvolvendo um papel importante na circulação local. As correntes de maré de superfície podem ser classificadas como rotatórias ou retilíneas. Em alto mar, onde a direção do fluxo não é restringida por barreiras, a corrente de maré é rotatória. Quando rotatória, a velocidade geralmente varia ao longo do ciclo das marés, passando por dois máximos em direções opostas, e dois mínimos. Em rios e estuários, onde a direção do fluxo é parcialmente restrita, normalmente são encontradas correntes de maré retilíneas, que fluem alternadamente em direções opostas com um período curto ou de pouca a nenhuma corrente, em cada inversão da maré (NIMA, 2016).

Segundo Czizeweski (2016) a variação da intensidade das correntes de maré em regiões costeiras é controlada pelos seguintes processos: a mudança do fluxo em canais e a geração de fluxos residuais devido à periodicidade das marés. O fluxo da corrente será um balanço entre o gradiente de pressão gerado dentro do canal e o arrasto de fundo oposto ao fluxo.

3. Análise harmônica das marés

A análise harmônica é outra maneira pela qual as marés podem ser analisadas e previstas. Segundo Franco (1988), a teoria mais aceita para a modelação do comportamento da maré, é o método harmônico que se baseia nas investigações de Laplace, que considera a maré como a soma finita de números de constituintes harmônicas, na qual as velocidades angulares e fases são determinadas a partir de argumentos astronômicos. Através da análise harmônica decompos a onda de maré nas suas componentes (Simonetti, 2016), em que cada uma representa a mudança periódica ou variação nas posições relativas da Terra, Lua e Sol, sendo possível caracterizá-las a partir de técnicas de análise espectral.

O principal objetivo da análise harmônica do registro de nível de um local, é o de poder prever a altura da maré naquele ponto do oceano. Para isso, um registro é analisado para componentes de determinadas frequências, usando a análise espectral de Fourier (Franco,

2009). Utilizando-se também da Teoria de Equilíbrio, são determinadas uma amplitude H_j e uma fase G_j para cada componente. H_j e G_j são as chamadas constantes harmônicas de uma onda senoidal naquele local e são características de uma posição no mar. A elevação η naquele ponto do oceano pode então ser prevista para um instante de tempo t qualquer usando a equação 2:

$$\eta = \sum_j f_j H_j \cos(\sigma t + v_{0j} + u_j - G_j) \quad (2)$$

Onde σ_j são as velocidades angulares das componentes de maré, constantes e dadas pela Teoria de Equilíbrio; f_j , v_{0j} e u_j são características de cada componente, funções do tempo t , sendo também determinadas pela Teoria de Equilíbrio; e, finalmente, H_j e G_j são as constantes harmônicas de cada componente, no local das medições; são, portanto, funções da posição do ponto de observação das marés no oceano, sendo fornecidos pela análise harmônica de maré (Godin, 1972; Franco, 1988).

As principais constituintes são a M_2 , constituinte semidiurna lunar principal e a S_2 , constituinte semidiurna solar principal. Para modelar a distância da Lua à Terra são usadas as constituintes N_2 , e L_2 , esta última de menor amplitude. A constituinte K_2 , está relacionada com a declinação da Lua e do Sol em relação à Terra. A constituinte SA , de longo período, modela alterações não uniformes da distância e a declinação do Sol. As constituintes diurnas mais importantes são a K_1 , luni-solar e a O_1 , lunar. As constituintes lunares são afetadas por um ciclo nodal de 18,6 anos, mas apenas algumas são afetadas por um período de 8,85 anos, relacionado ao perigeu da Lua. Estes efeitos são traduzidos na modelação matemática através de correções à amplitude e fase das constituintes lunares, f_i e u_i (Godinho, 2011).

Por meio da análise harmônica também são realizadas as previsões de maré. Para essa finalidade um registro do local é analisado para componentes de determinadas frequências, usando a análise de Fourier. Assim sendo, a Teoria de Equilíbrio fornece os valores das velocidades angulares das constituintes de maré, as características de cada constituinte, funções do tempo, e a análise harmônica da maré de um local. Segundo Czizewski (2019), a região do Golfão Maranhense apresenta maré semidiurna, onde a componente harmônica M_2 é a dominante e mais energética das constituintes de maré. Seguindo a classificação de Davies (1964) para alturas de marés, a região é classificada como macromarés entre 4 e 6 metros, contudo, alturas de 6,2 metros foram encontrados em canais estreitos no Complexo Estuarino de São Marcos, reclassificando o complexo como uma região de hipermarés (Hayes, 1975).

Informações contidas no relatório elaborado em 2018 pelo Projeto Baías do Brasil afirmam que a maré na Baía de São Marcos (BSM), nas proximidades da Ponta da Madeira, varia de 0.4 a 6.0 m acima do zero (NR CN-411) mantido pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), entre a média das baixa-mares de sizígia (MLWS) e a média das preamares de sizígia (MHWS), e de 1.5 a 5.0 m entre a média das baixa-mares de quadratura (MLWN) e a média das preamares de quadratura (MHWN). No entanto, nessa baía, a altura da maré pode atingir mais de 7 m em algumas zonas durante as marés equinociais. De acordo com dados publicados no Catálogo da FEMAR, os principais constituintes harmônicos de maré semidiurno, M_2 e S_2 , no Terminal de Ponta da Madeira, tem amplitudes de 2.12 m e 0.58 m, respectivamente. Por outro lado, os principais constituintes diurnos, K_1 e O_1 , tem amplitudes de cerca de 0.10 m e 0.09 m. O fator de forma (F), razão entre as amplitudes diurnas e as semidiurnas (Pugh, 1987), resulta em um valor de 0.07 e, deste modo, a maré na Baía de São Marcos é classificada como semidiurna.

4. Estudos sobre as marés e correntes de maré no Brasil e Golfão Maranhense

Conforme Vellozo e Alves (2006), a costa brasileira possui um padrão de maré predominantemente semidiurna, com ocorrências esporádicas de maré semidiurna com desigualdades diurnas a partir da região sudeste em direção ao sul. No extremo sul do país, há apenas ocorrência de maré mista, com componente meteorológico significativo. Em quase toda a extensão da costa, prevalece o regime de mesomaré (representado na Figura 1), com a amplitude da maré variando de 0,5 m (micromaré) no Sul a 7 m (macromaré) no Norte. No entanto, houve um registro pontual de ocorrência máxima de 11 m na estação do Igarapé do Inferno (AM) (DHN, 2009).

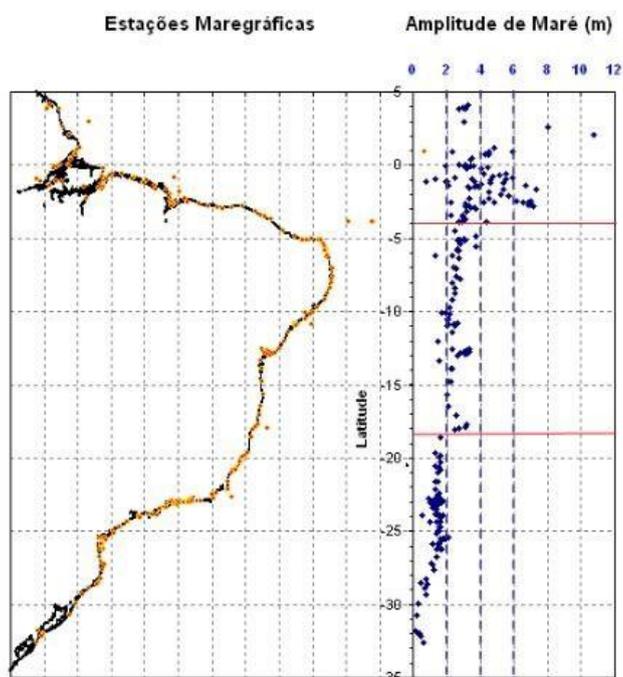


Figura 1 - Amplitudes de maré da costa brasileira. Modificado de Vellozo & Alves (2006).

Alguns estudos de análise de maré para regiões específicas da costa ou para estuários foram desenvolvidos nos últimos anos. Mesquita e Harari (1989) fizeram uma revisão histórica dos estudos de nível do mar no Brasil, atualizada em Mesquita e Harari (2011) e foi percebido que existem poucas séries longas e monitoramentos contínuos, que são importantes para estudos de longo termo. Harari *et.al.* (2007), realizaram um estudo de variabilidade de longo termo de componentes de maré e do nível médio do mar em Recife, Belém, Cananéia e Santos, e encontraram que as componentes M2 e S2 possuem variação decadal, mas não encontraram um padrão para a costa. Ducarme e Venedikov (2007), fizeram um estudo de marés em Cananéia usando dados de 50 anos e encontraram periodicidade das componentes relacionadas ao ciclo solar (10,7 anos) e outras não explicadas (24,2 anos).

Nunes (2007) relacionou as marés meteorológicas na região da baía do Espírito Santo aos ventos e transporte de Ekman, mas ao mesmo tempo verificou a maior importância da maré astronômica para o regime hidrológico local. Nicolite *et.al.* (2009), fizeram um estudo de oscilação de nível de água e co-oscilação de maré astronômica no estuário do Rio Paraíba do Sul (RJ), que ocorre apenas em situações de baixa descarga fluvial. Truccolo & Schettini (2010), fizeram um estudo de marés astronômicas na baía da Babitonga (SC), e determinaram que este estuário é hipersíncrono, amplificando alguns componentes em até sete vezes, e ainda é dominado por efeitos não lineares.

Valentim (2012) verificou que há uma tendência de aumento do nível do mar em Ubatuba (SP) baseado na variação das componentes de maré. Na Tabela 1 são listados os estudos sobre a maré astronômica no Maranhão, os quais concentram-se na sua maioria no Golfão Maranhense e Baía de São Marcos. É possível observar como estudos de maré no Maranhão ainda são poucos em relação a outras localidades do Brasil.

CAPÍTULO I: PROPAGAÇÃO DA MARÉ ASTRONÔMICA NO GOLFO MARANHENSE – BRASIL

Tayssa Rauanny Silva Jansen¹; Cláudia Klose Parise¹; João Luiz Baptista de Carvalho²; Joseph Harari³; Leonardo Gonçalves de Lima⁴; Adilson Matheus Borges Machado⁵; Heitor Perotto⁶

¹*Laboratório de Estudos e Modelagem Climática (LACLIMA), Departamento de Oceanografia e Limnologia (DEOLI), Universidade Federal do Maranhão (UFMA).*

²*Laboratório de Oceanografia Física (LOF), Departamento de Oceanografia e Limnologia (DEOLI), Universidade Federal do Maranhão (UFMA).*

³*Instituto Oceanográfico da USP, Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica (IOUS;/DOF).*

⁴*Laboratório de Estudos em Oceanografia Geológica (LEOG), Departamento de Oceanografia e Limnologia (DEOLI), Universidade Federal do Maranhão (UFMA).*

⁵*Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto (LAGEOS), Coordenação do Curso de Engenharia de Pesca, Universidade Federal do Maranhão (UFMA).*

⁶*Laboratório de Estudos e Modelagem Climática (LACLIMA), Departamento de Oceanografia e Limnologia (DEOLI), Universidade Federal do Maranhão (UFMA).*

**Autor correspondente: Tayssa Rauanny Silva Jansen. Address: dos Portugueses Ave, 1966, São Luís-MA, 65080-805, Brasil. E-mail: tayssa.jansen@discente.ufma.br.*

Resumo

A propagação da maré astronômica no Golfo Maranhense, Brasil, enfatiza a sua importância para a gestão costeira, segurança na navegação em águas rasas e exploração do potencial energético das marés. A metodologia adotada inclui uma análise harmônica detalhada para identificar os constituintes de maré mais significativos e avaliar suas influências nas variações de amplitude e energia das marés, além de examinar as diferenças de fase das marés entre as duas principais baías do Golfo Maranhense a constar a Baía de São José de Ribamar e a Baía de São Marcos. Os resultados revelam a predominância de marés semidiurnas e destacam a influência das marés meteorológicas nas condições locais. Os resultados obtidos são fundamentais para otimizar as operações portuárias e o planejamento costeiro, fornecendo dados essenciais para aprimorar o entendimento dos padrões de maré e sua aplicação em atividades econômicas e de preservação ambiental. A conclusão destaca o preenchimento da lacuna no conhecimento prévio sobre a dinâmica das marés na área de estudo e a necessidade de investigações futuras para explorar plenamente o potencial das marés astronômicas na região, tanto para o desenvolvimento sustentável quanto para a mitigação de riscos associados à variação do nível do mar.

1. Introdução

A maré é uma variação vertical da superfície dos oceanos ou grandes corpos de água na Terra, causada pela influência gravitacional da Lua sobre a Terra e, em menor grau, do Sol, em diferentes partes da superfície terrestre. Este fenômeno ocorre devido à interação da força de tração gravitacional da Lua e da força centrífuga gerada pelo sistema Terra-Lua. A força centrífuga do sistema Terra-Lua é constante em direção e intensidade. Contudo, segundo a lei gravitacional de Newton, a atração entre os dois corpos é diretamente proporcional às suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Portanto, a força gravitacional entre a Terra e a Lua varia conforme a posição relativa da Lua a um ponto da superfície terrestre.

O mesmo acontece no sistema Terra-Sol. A interação entre as forças gravitacionais e centrífugas no sistema Terra-Lua-Sol resulta nas marés. Quando a Terra, o Sol e a Lua estão alinhados (Lua Nova ou Lua Cheia), as marés de sizígia, ou seja, as maiores amplitudes ocorrem, causando uma variação mais acentuada nos níveis das marés. Já quando a Terra, a Lua e o Sol formam um ângulo de aproximadamente 90 graus (Lua crescente ou minguante), ocorrem as marés de quadratura, ocasionando marés menos intensas, isto é, menor amplitude. Nas oscilações do nível do mar, se tem as preamares, que ocorre quando o nível do mar alcança os valores máximos; por outro lado, quando o nível do mar atinge valores mínimos se tem as baixa-mares.

A propagação da onda de maré é responsável por gerar diversos processos oceanográficos, como mistura turbulenta, transporte de sedimentos *onshore-offshore* em zonas costeiras e renovação das águas em sistemas estuarinos (Miyao e Harari, 1989). O conhecimento acerca das componentes harmônicas da maré que atuam em uma região costeira permite a previsão da variação do nível do mar com grande precisão. De fato, a análise e previsão de maré e correntes de maré é de grande importância para o gerenciamento costeiro e para a navegação segura em águas rasas (Bento *et al.* 2006), como por exemplo em canais de acesso em regiões portuárias. O nível do mar pode também ser influenciado por gradientes de densidade, como resultantes vazões fluviais, e por forças meteorológicas, como variações significativas de pressão atmosférica e ventos intensos, duradouros e de direção constante, que geram as marés meteorológicas (Pugh, 1987). Os processos erosivos e deposicionais que ocorrem associados a eventos extremos de marés de sizígia, ondas de tempestade, inundações

costeiras e ausência de planejamento urbano normalmente geram prejuízos milionários em diversas regiões e países (Muehe, 2006).

Embora as marés desempenhem um papel fundamental na dinâmica costeira e na vida das comunidades litorâneas, a ausência de estudos das marés numa região constitui lacuna significativa no conhecimento. Dada a premência em se obter medidas precisas do nível relativo do mar na costa brasileira frente a cenários de mudanças climáticas globais, o Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta) (www.simcosta.furg.br) foi implementado com a finalidade de implantar estações maregráficas automáticas em estruturas portuárias do Brasil, intervaladas por no mínimo 1000 km de linha de costa, visando a obtenção de dados de nível do mar contínuos, em alta frequência e de boa qualidade.

Apesar das grandes alturas de maré (7 m) e das intensas correntes de maré ($2,5 \text{ m s}^{-1}$) observadas no Estado do Maranhão (Femar, 2000), existe carência de pesquisas abordando a dinâmica das marés astronômicas nesta região. Após um levantamento bibliográfico, apenas onze estudos foram identificados até o presente abordando essa temática. O primeiro estudo disponível na literatura é o de Pereira e Harari (1995) que, através de um modelo numérico tridimensional, estudaram a circulação gerada pela maré astronômica (no caso, a componente M_2) e a maré meteorológica. O estudo foi baseado em um modelo numérico de baixa resolução, o que implicou em uma representação limitada da circulação no interior da Baía de São Marcos. Os resultados mostraram que a componente M_2 sofre um processo de amplificação na sua propagação da plataforma continental até o interior da Baía. Mais de uma década depois, Garcia (2007) implementou um modelo hidrodinâmico para caracterizar a circulação de maré e o transporte de sedimentos na área portuária do Itaqui. Este estudo foi baseado no banco de dados da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) e considerou a amplitude da maré de 6,5 m.

Ferreira e Estefen (2009) determinaram as principais componentes harmônicas da maré próximo ao estuário do Bacanga. Esses autores encontraram uma maré de 7 m no terminal da Ponta da Madeira e apontaram o local como favorável à implantação de uma usina marémotriz. Neto (2012) também apresentou um estudo sobre o potencial energético marémotriz no estuário do Bacanga e utilizou como referência o estudo de Ferreira (2009). Para a modelagem da maré para o ano de 2012 o autor utilizou a base de dados do estudo de Ferreira (2009) (maré observada terminal da Ponta da Madeira, 1991-1996). Neste trabalho Neto introduziu uma metodologia para estimar os indicadores energéticos de uma usina marémotriz no estuário do Bacanga, desenvolvendo uma estratégia de programação baseada em algoritmos genéticos, com o objetivo de maximizar a produção total de energia da usina, otimizando o funcionamento das turbinas ao longo do processo de geração.

Dalbone (2014), ao analisar as modificações ocorridas nas marés e correntes de marés durante sua propagação para água rasas, mostrou que as velocidades das correntes de maré e a importância das componentes M_4 e M_6 são alteradas nesse percurso. González-Gorbeña *et al.* (2015), utilizando-se da modelagem matemática e do mecanismo de conversão de energia hidrocínética, identificou áreas com potencial para gerar energia elétrica a partir das correntes de maré da Baía de São Marcos. Três regiões com potencial energético foram identificadas, sendo duas delas localizadas entre as ilhas do Cajual e do Medo, na proximidade do complexo portuário, enquanto a terceira está situada entre Alcântara e a Praia da Ponta da Areia. Bittencourt (2015) fez uma descrição pontual do comportamento hidrodinâmico da maré e indicou contribuições parciais dos harmônicos M_2 , M_4 , M_6 e M_8 no padrão de correntes encontradas.

Vasconcelos (2018), por meio do Projeto Baías do Brasil (www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br), disponibilizou bases de dados e simulações numéricas das marés na Baía de São Marcos. Tal estudo baseou-se nas constantes harmônicas publicadas pela FEMAR (2000) para a geração das condições de contorno, desconsiderou a maré meteorológica e identificou que a maré astronômica na região pode atingir amplitude acima de 7 m.

Czizewski *et al.*, (2020) utilizou um modelo hidrodinâmico 3D para simular o comportamento das marés no Golfão Maranhense, visando estimar o potencial energético associado ao fenômeno. Com base nas simulações, o autor constatou que o Golfão Maranhense é uma região propícia para a produção de energia a partir das marés, dada a extensão do estuário e as variações significativas de fase das ondas de marés. Isso possibilita uma disposição geográfica heterogênea das turbinas, que contribui para reduzir os períodos de inatividade e assegura uma produção de energia mais eficiente. Costa (2022) propôs um modelo computacional para avaliar o potencial das correntes no canal do Boqueirão, localizado na Baía de São Marcos, identificando que a amplitude de maré nesta região atinge 6,5 m.

Paschoaleti (2023), ao caracterizar e simular as variáveis oceanográficas na Baía de São Marcos, e sua importância para operações portuárias do Complexo Portuário do Itaqui, identificou que a amplitude de maré pode ser superior a 7 m. Segundo o autor, a influência dos ventos e ondas são forçantes secundárias para a hidrodinâmica da região. Estes estudos citados estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1- Estudos sobre análise de maré astronômica no Estado do Maranhão.

Autores	Área de estudo	Metodologia	Amplitude (m)
Pereira e Harari (1995)	Plataforma Continental da Região Nordeste	Modelagem numérica hidrodinâmica	7 m
Garcia (2007)	Porto do Itaqui e Terminal Ponta da Madeira	Modelagem numérica hidrodinâmica	6,5 m
Ferreira e Estefen (2009)	Bacanga	Aproveitamento da energia das marés com a usina maremotriz do Bacanga - Maranhão	7 m
Neto (2012)	Bacanga	Modelagem numérica hidrodinâmica	-
Dalbone (2014)	Baía de São Marcos	Análise de correntes de maré	
González-Gorbeña (2015)	Baía de São Marcos	Avaliação da energia das correntes de maré	> 8 m
Bitencourt (2015)	Estuário do Rio Mearim	Avaliação da energia das correntes de maré	6,7 m
Costa (2022)	Canal do Boqueirão	Modelagem numérica hidrodinâmica	-
Projeto Baías do Brasil (2018)	Baía de São Marcos	Modelagem numérica hidrodinâmica	7 m
Czizewski (2020)	Baía de São Marcos	Caracterização da circulação de maré e distribuição de energia no Golfão do Maranhense	>6 m
Paschoaleti (2023)	Complexo portuário na Baía de São Marcos	Modelagem numérica das variáveis oceanográficas de maior importância para as operações portuárias do complexo portuário na Baía de São Marcos	7 m

A relevância das marés para as comunidades litorâneas, atividades de navegação, e o ecossistema marinho no Estado do Maranhão destaca a necessidade de um entendimento aprofundado acerca das características da maré astronômica no Golfão Maranhense.

As previsões de maré, elaboradas no Centro de Hidrografia Marinha, são baseadas nas componentes harmônicas geradas pela FEMAR (2000), cujos dados de nível do mar representam um curto período (3 meses) de 1985. Na época usou-se o que se tinha disponível. Atualmente existem outras fontes de dados disponíveis, oriundas de marégrafos, satélite e previsão de marés.

Os impactos decorrentes da aceleração das mudanças climáticas globais e do desenvolvimento urbano deverão aumentar consideravelmente a vulnerabilidade ambiental e social das comunidades costeiras, especialmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil,

triplicando o número de pessoas expostas a inundações no século 21 (IPCC,2021). É, pois, estratégico e fundamental ampliar a capacidade de resposta aos desafios. Produtos de múltiplas finalidades e ampla variedade de informações podem ser gerados a partir do entendimento da propagação da maré astronômica no Golfão Maranhense, a exemplo da tábua de maré para localidades de interesse.

Tendo em vista a existência de único ponto maregráfico de informações sobre o nível do mar no Golfão Maranhense até então, inicia-se em junho de 2018 o Projeto SiMCosta Maranhão, com a instalação uma estação maregráfica do SiMCosta no município de São José de Ribamar. O presente estudo propõe revisar as bases de dados de nível do mar existentes na Baía de São Marcos (a oeste da Ilha do Maranhão), e analisar suas defasagens em relação ao marégrafo do SiMCosta (a leste da Ilha do Maranhão), de modo a compor um modelo de propagação da onda de maré entre estas localidades e determinar as características das componentes de maré nesses dois locais, suas amplificações e defasagens, bem com as variâncias (ou energias) envolvidas.

2. Área de estudo

A Ilha do Maranhão é parte da zona costeira do Estado (Figura 1), concentra a maior densidade demográfica do Maranhão (população de 1.458,836 habitantes) e possui uma área total de 905 km² (IBGE, 2022). É formada por 4 municípios: São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa (Figura 1). Na região litorânea da Ilha são encontrados sedimentos da Formação Barreiras (Período Terciário), caracterizados por sua composição de sedimentos clásticos com tons avermelhados ou amarelados, esses sedimentos estão representados por tabuleiros, cuja borda se inclina em direção à praia, culminando na formação de falésias (Silva et al., 2006). O Golfão Maranhense, situado no litoral central maranhense, é preenchido pelas águas da Baía de São Marcos - BSM (a oeste) e da Baía de São José - BSJ (a leste). Na vazante, as águas de ambas as baías correm em direção ao Oceano Atlântico. A região apresenta características marcantes de relevo, de áreas baixas e surgimento esporádico de outeiros com cerca de 20 m de altitude.

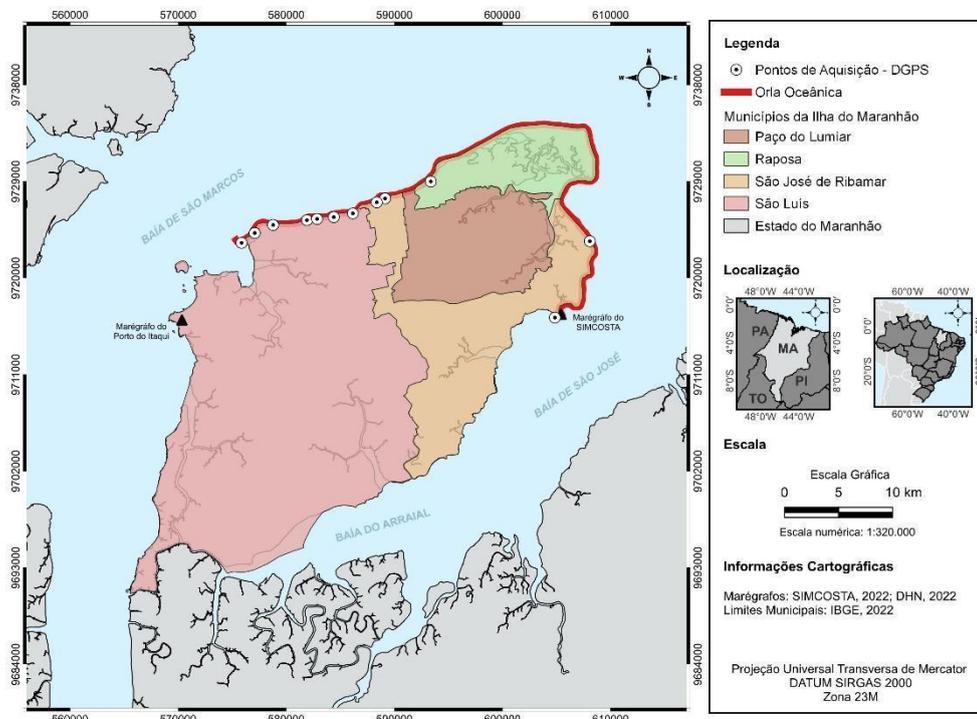


Figura 2 - Mapa da área de estudo da Ilha do Maranhão, com destaque para a orla oceânica (Jansen, 2023).

A Ilha do Maranhão possui clima tropical úmido (Koppen-Geiger, 1928), com temperaturas entre 24° C a 38,5°C, com variações sazonais de 1°C (Silva et al., 2018). Apesar das altas temperaturas do ar, o clima é agradável, amenizado pelos ventos úmidos que vêm do mar. A vegetação é composta predominantemente de manguezais, palmeiras, babaçuais, coco de praia, ariri, juçara, buriti etc.

De acordo com a praticagem do Porto de Itaqui, as condições ambientais e características de fundo da Baía de São Marcos (BSM), bem como as dimensões do canal de acesso e área de manobra, não oferecem grandes restrições à navegação e operacionalidade portuária (EMAP, 2001). Contudo, atenção especial deve ser dada às intensas velocidades das correntes (da ordem de 2 m s⁻¹), provocadas pelas grandes amplitudes das marés (Muehe, 2006).

3. Métodos

3.1. Dados de nível do mar

Foram obtidos dados de nível do mar em dois municípios na orla oceânica da Ilha do Maranhão, São José de Ribamar e São Luís, banhados pelas águas da Baía de São José (BSJ) e da Baía de São Marcos (BSM), respectivamente (Figura 1). Em São José de Ribamar, os dados foram medidos pela estação maregráfica do Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta), enquanto em São Luís os dados foram obtidos e disponibilizados pela EMAP, empresa que gerencia o Porto do Itaqui.

O SiMCosta é uma iniciativa da sub-rede Zonas Costeiras da REDE CLIMA, que envolve a participação de vários pesquisadores de diversas instituições nacionais. A rede maregráfica é composta por uma série de estações autônomas de observação do nível do mar, alocadas em pontos de interesse ao longo da costa brasileira. As estações utilizam as tecnologias de radar de microondas e telemetria. A rede integrada de plataformas flutuantes ou fixas do SiMCosta é dotada de instrumentos e sensores com funcionamento autônomo, com capacidade de medir, salvar e transmitir variáveis meteo-oceanográficas, e encontra-se operante na BSJ (MA) desde junho de 2018.

A Coordenação local do SiMCosta no Maranhão é feita pelo Laboratório de Estudos e Modelagem Climática (LACLIMA) e pelo Laboratório de Estudos em Oceanografia Geológicas (LEOG), por meio de cooperação científica entre pesquisadores da FURG e UFMA.

3.2. Processamento dos dados de nível do mar

Neste estudo, foram utilizadas as séries temporais compreendidas entre maio e julho de 2022, com uma frequência temporal de 15 min para os dados do SiMCosta e de 1 hora para os dados do Porto do Itaqui. Após a obtenção dos dados de nível do mar constatou-se a existência de lacunas nas séries temporais. O período de 12 de maio a 18 de julho de 2022 (67 dias) foi escolhido para a análise da maré, por representar o intervalo com maior continuidade temporal disponível em ambas as séries de dados, uma vez que dados faltantes ou que apresentassem alto desvio padrão poderiam introduzir tendências espúrias na análise temporal.

Para preencher as lacunas na série de dados do SiMCosta foi calculada a média aritmética entre os valores vizinhos mais próximos. Após o preenchimento das lacunas, foi feita a interpolação dos dados de nível do mar através da função *interp1.m* do Matlab (Licença acadêmica 40981746, versão R2022b), com o objetivo de padronizar o intervalo amostral para a frequência horária. Após a análise exploratória dos dados, foram plotadas as séries temporais do nível do mar para São José de Ribamar e para o Porto do Itaqui.

3.3. Análises

A análise harmônica da maré no Golfão Maranhense foi realizada com base no pacote computacional *t_tide*, escrito em linguagem Matlab. A ferramenta foi descrita por Pawlowicz et al. (2002) e atualizada por Ray (2022). Constitui-se de um pacote de rotinas que pode ser usado para análises harmônicas clássicas com correções nodais, previsões de maré e uma

análise completa a partir de dados com qualquer intervalo regular de tempo. O *t_tide* é capaz de identificar um grande número de constituintes harmônicos, incluindo 45 astronômicos e 101 de águas rasas. Utilizando desse pacote foi possível identificar os constituintes harmônicos estatisticamente significativos ao intervalo de confiança de 95% da maré astronômica no Golfão Maranhense.

A importância relativa das constantes diurnas e semidiurnas de maré será avaliada através do Número de Forma (F), proposto por Pugh (1987) como a razão entre a soma das amplitudes dos principais constituintes diurnos e a soma das amplitudes das principais constantes semidiurnas, conforme equação 3.

$$F = \frac{(O_1+K_1)}{(M_2+S_2)} \quad (3)$$

A defasagem de maré é frequentemente usada para descrever o atraso na ocorrência de preamares (ou baixa-mares) de dois pontos geográficos. Neste estudo, essa defasagem da maré entre BSJ e a BSM foi calculada visando otimizar o planejamento e execução das operações portuárias em todo o Golfão Maranhense. Os parâmetros descritores de maré (Defant, 1961) estabelecem que as amplitudes máximas (ou de sizígia) são obtidas pela soma das componentes $(M_2+S_2) + (O_1+K_1)$, enquanto as alturas mínimas (ou de quadratura) são obtidas pela soma da diferença das componentes $(M_2-S_2) + (O_1-K_1)$. O cálculo da evolução das componentes O_1 , K_1 , M_2 e S_2 , envolveu uma transformação das frequências desses harmônicos de ciclos por hora para uma escala angular, multiplicando-as por 360. Este passo para é feito para alinhar as unidades de medida com as funções trigonométricas aplicadas posteriormente. Após essa conversão, o *script* computacional calcula o período de cada componente harmônico, dividindo 360 pela respectiva velocidade angular, agora expressa em graus por hora. Este cálculo fornece o tempo necessário para completar um ciclo completo para cada componente da maré.

Em seguida, o código extrai amplitudes e fases do nível do mar para cada localidade, permitindo a previsão da maré através da aplicação da função cosseno. Além disso, é feita uma comparação entre as amplitudes e fases entre a BSJ e a BSM, calculando as relações de amplitudes e as diferenças de fases em minutos. Este processo resultou num comparativo entre as variações e características das marés em Ribamar e Itaqui, contribuindo para o entendimento das dinâmicas marítimas regionais.

A previsão da maré é uma ferramenta com diversas finalidades, como a programação de atividades marítimas e portuárias com base nas condições desejadas, navegação, pesca, mergulho e atividades de lazer. Saber os horários das marés altas e baixas, assim como a amplitude das marés para o dia, ajuda a determinar os momentos mais adequados para a realização dessas atividades. De acordo com Coelho (2016), também é possível preencher as lacunas de séries temporais de medições com a maré prevista harmonicamente, porém esse método só seria apropriado para lacunas de até 3 dias e para séries que apresentem mais de 3 meses de dados ininterruptos (devido a variações do nível médio do mar associadas a efeitos meteorológicos).

Neste estudo, a previsão de maré foi realizada utilizando a função *t_predic* disponível no pacote *t_tide*. Após obter as componentes harmônicas, a função retorna uma estrutura de dados que contém os coeficientes harmônicos estimados e outras informações relacionadas. A partir desta estrutura, aplicamos a função *t_predic* para gerar a previsão da maré para o intervalo de tempo especificado (12 a 31 de maio de 2022).

Para determinar a contribuição energética na elevação da maré, identificou a amplitude de cada componente e elevou ao quadrado, após o resultado somou-se separadamente cada grupo (diurnas, semidiurnas e águas rasas). Este método proporciona uma estimativa da energia associada a cada categoria de componente refletindo a contribuição proporcional de cada um, baseada na amplitude ao quadrado.

Neste estudo, obteve-se a maré meteorológica (resíduo) utilizando um filtro passa baixa (função *filtfilt* do MATLAB), cujo objetivo é retirar as componentes de alta frequência associadas à maré astronômica. Desta forma, para estimar a influência da maré meteorológica, aplicou-se um filtro passa baixa aos dados do nível do mar. Este filtro foi projetado para atenuar as frequências acima de um limite específico, neste caso, utilizando um filtro Butterworth de segunda ordem com uma frequência de corte ajustada para corresponder ao período de interesse (40 horas), que permitiu a aplicação deste filtro de maneira que não houvesse deslocamento de fase no sinal resultante. Com isso, as componentes de alta frequência, incluindo as variações de curto prazo associadas à maré astronômica, foram eficientemente removidas, restando a componente de maré meteorológica. Esse procedimento foi realizado para cada uma das duas estações maregráficas deste estudo, BSJ e BSM.

4. Resultados e Discussão

4.1. Componentes harmônicas da maré no Golfão Maranhense

As constantes harmônicas da maré da BSJ e da BSM foram determinadas pelo pacote *t_tide* de forma a determinar a defasagem de fase entre os mareógrafos da BSJ e da BSM para os principais harmônicos encontrados. A tabela 2 apresenta os harmônicos estatisticamente significativos para a estação maregráfica do SiMCosta.

A análise para BSJ revelou que, dentre os principais harmônicos diurnos encontrados (Q_1 , O_1 e K_1), a componente K_1 se destaca com maior amplitude, registrando 11,96 cm, sinalizando uma influência marcante nas marés diárias. Em sequência O_1 apresenta uma amplitude de 8,94 cm, enquanto Q_1 , com 2,18 cm exerce menor impacto dentre as mencionadas. Já dentre os principais harmônicos semidiurnos (N_2 , M_2 , L_2 , S_2 e MU_2), a M_2 domina com uma amplitude de 196,98 cm, refletindo a forte atração lunar; a S_2 segue com 38,90 cm representando o principal efeito Sol e a N_2 também apresentando uma influência significativa com 44,60 cm. As componentes L_2 e MU_2 mostram-se menos expressivas, com 12,84 cm e 5,80 cm, respectivamente. Dentre os principais harmônicos de águas rasas (MO_3 , M_3 , MK_3 , SK_3 , MN_4 , M_4 , SN_4 , MS_4 , $2MK_5$, $2MN_6$, M_6 , $2MS_6$, $3MK_7$ e M_8), as componentes $2MK_5$ e M_4 destacam-se. A $2MK_5$ lidera com uma amplitude de 8,82 cm, indicando um impacto notável nas marés dessas áreas, enquanto a M_4 , com uma amplitude de 5,40 cm, representa um harmônico de frequência mais alta resultante de interações não lineares da componente M_2 . Ambas são fundamentais para entender a dinâmica das marés em águas rasas, onde fenômenos como ressonância e amplificação de marés são mais pronunciados.

Para a BSJ os principais harmônicos diurnos encontrados (Q_1 , O_1 e K_1) contribuíram com uma amplitude total de 23,08 cm. Já os principais harmônicos semidiurnos (N_2 , M_2 , L_2 , S_2 e MU_2) apresentaram uma amplitude total de 299,12 cm. Os principais harmônicos de águas rasas tiveram uma amplitude total de 39,97 cm. É importante enfatizar, todavia, que na natureza, esses componentes não se somam, visto que, as mesmas não entram em fase simultaneamente.

Tabela 2 - Constituintes harmônicas estatisticamente significativas para a Baía de São José (cais de São José de Ribamar).

Espécie	São José de Ribamar	
	Amplitude (cm)	Fase (graus)
Diurnas		
Q_1	2,18	190,29
O_1	8,94	212,86

K ₁	11,96	231,73
Subtotal =	23,08 cm	
Semidiurnas		
N ₂	44,60	187,98
M ₂	196,98	193,30
L ₂	12,84	181,94
S ₂	38,90	223,86
MU ₂	5,80	244,04
Subtotal =	299,12 cm	
Águas Rasas		
MO ₃	0,89	331,02
MK ₃	1,38	323,78
SK ₃	0,68	305,51
MN ₄	2,61	171,16
M ₄	5,40	178,31
SN ₄	1,85	299,91
MS ₄	2,32	225,68
2MK ₅	8,82	278,70
2MN ₆	3,07	231,05
M ₆	4,27	243,46
2MS ₆	2,63	271,16
3MK ₇	3,37	8,30
M ₈	1,07	272,92
Subtotal =	38,36 cm	

Em relação ao total de harmônicos encontrados neste estudo, cerca de 63,64% foram classificados como de águas rasas, tornando-os os mais abundantes na série. Os harmônicos diurnos e semidiurnos juntos representaram 36,36%, sendo os diurnos menos frequentes. Em

termos da contribuição para a elevação da maré, os harmônicos semidiurnos se destacaram, sendo responsáveis por aproximadamente 99,07% da energia da maré em São José de Ribamar. Embora os harmônicos de águas rasas tenham ocorrido com maior frequência, eles contribuíram com apenas 0,40% da energia da maré nesta região.

A tabela 3 apresenta os harmônicos estatisticamente significativos obtidos para a Baía de São Marcos (Porto do Itaqui). Os resultados mostraram que os principais harmônicos diurnos encontrados foram O_1 e K_1 a componente diurna K_1 tem a amplitude mais elevada com 11,31cm, seguida pela O_1 com 10,13 cm. As componentes K_1 e O_1 são as mais significativas, influenciando fortemente o padrão das marés diurnas na região. Os principais harmônicos semidiurnos foram N_2 , M_2 , L_2 , S_2 e MU_2 , sendo a componente M_2 dominante com uma amplitude de 220,04 cm, seguida por N_2 e S_2 , com amplitudes de 51,55 cm e 45,42 cm, respectivamente, delineando o padrão das marés semidiurnas na região. Os principais harmônicos de águas rasas foram M_3 , SK_3 , MN_4 , M_4 , MS_4 , $2MK_5$, $2MN_6$, M_6 , $2MS_6$, $3MK_7$, e ETA_2 sendo a componente M_4 com a maior amplitude 7,32 cm, seguida pela ETA_2 com 4,65 cm e $2MS_6$ com 3,08 cm.

Para a BSM os principais harmônicos diurnos O_1 e K_1 somaram uma amplitude de 21,44 cm. Os principais harmônicos semidiurnos N_2 , M_2 , L_2 , S_2 e MU_2 atingiram uma amplitude total de 354,09 cm. A componente astronômica M_3 possui amplitude de 1,31 cm. Os principais harmônicos de águas rasas (de alta frequência) foram SK_3 , MN_4 , M_4 , MS_4 , $2MK_5$, $2MN_6$, M_6 , $2MS_6$, $3MK_7$, NO_1 e ETA_2 que somaram 28,62 cm. É importante enfatizar, todavia, que esses componentes não se somam na natureza, visto que, as mesmas não entram todas em fase simultaneamente.

Cerca de 57,89% do total de harmônicos encontrados são de águas rasas, enquanto os harmônicos diurnos e semidiurnos correspondem juntos a 42,11%. Em relação ao percentual da elevação (cm) dos harmônicos de maré, os harmônicos mais expressivos são de período semidiurno, responsáveis por cerca de 99,33% da energia da maré para a BSM. Apesar dos harmônicos de águas rasas aparecem em maior número, eles são responsáveis por 0,24% da energia da maré nesta região.

Tabela 3 - Constituintes harmônicos estatisticamente significativos para São Luís (Berço 106 do Porto do Itaqui), Baía de São Marcos.

Espécie	Porto do Itaqui	
	Amplitude (cm)	Fase (graus)

Diurnas		
O ₁	10,13	212,40
K ₁	11,31	233,73
Subtotal =	21,44 cm	
Semidiurnas		
N ₂	51,55	203,51
M ₂	220,04	200,90
L ₂	28,08	143,39
S ₂	45,42	242,12
MU ₂	9,00	255,88
Subtotal =	354,09 cm	
Águas Rasas		
NO ₁	5,48	255,66
SK ₃	0,10	46,19
MN ₄	2,23	220,51
M ₄	7,32	178,31
MS ₄	2,90	269,40
2MK ₅	0,03	73,82
2MN ₆	1,08	250,98
M ₆	1,72	273,67
2MS ₆	3,08	293,38
3MK ₇	0,03	73,71
ETA ₂	4,65	198,83
Subtotal =	28,62 cm	

Os Números de Forma (F), usados para caracterizar a distribuição de energia das diferentes componentes harmônicas, (Pugh, 1987) encontrados para BSJ e BSM foram de 0,088 e 0,080, respectivamente, caracterizando o regime de maré do Golfão Maranhense como

semidiurna. Neste estudo, as amplitudes médias das marés de sizígia foram de 2,56 m para a Baía de São José e 2,86 m para a Baía de São Marcos, enquanto as amplitudes médias de quadratura foram de 1,55 m para São José de Ribamar e 1,73 m para o Porto do Itaqui.

Encontrou-se um total de 22 e 19 harmônicos estatisticamente significativos (teste Rayleigh) para as localidades da BSJ e BSM, respectivamente. Os constituintes mais expressivos em ambas as estações foram as semidiurnas M_2 (principal lunar) e S_2 (principal solar). Esses costumam ser os mais influentes na energia das marés (Vasconcelos, 2018). Em relação ao total de harmônicos encontrados neste estudo, são do tipo de água rasa os mais abundantes em ambas as séries analisadas (Figura 3).

Relação Total de Harmônicos

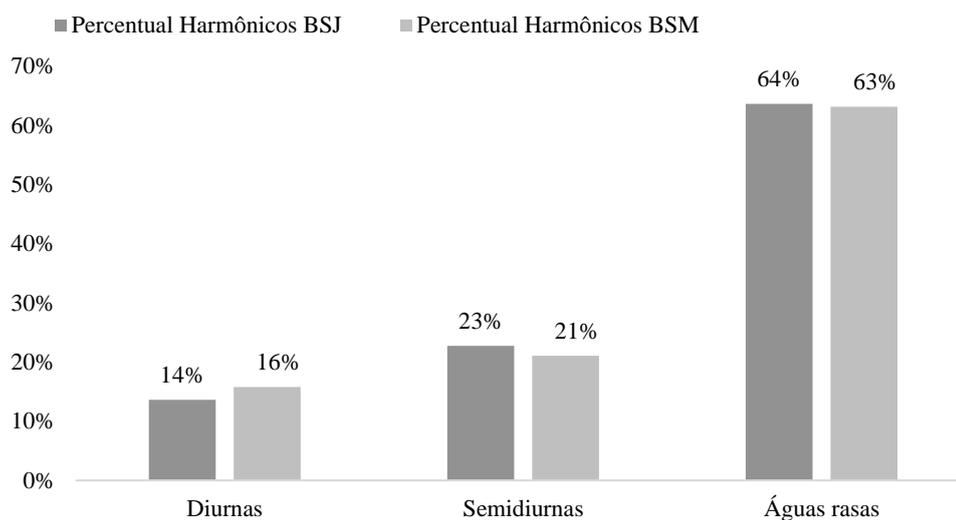


Figura 3 - Relação total de harmônicos.

Dalbone (2014), faz uma análise detalhada das componentes de maré e suas interações com a topografia do Porto do Itaqui, revelando um padrão de marés influenciado pela configuração geográfica e pela batimetria local. Este estudo ressalta a importância das componentes semidiurnas, principalmente M_2 , na geração de marés da BSM, e como estas são moduladas pelas características específicas da área, resultando em padrões de maré que podem variar consideravelmente em relação a outros pontos da costa.

Os estudos detalhados de Dalbone (2014) e Vasconcelos (2018) destacam as principais componentes que atuam na BSM, enfatizando a influência significativa das componentes semidiurnas, principalmente M_2 e S_2 , na modulação das marés. Além disso, o trabalho de Czizewski *et al.*, (2020) aprofunda o entendimento das dinâmicas marítimas ao destacar

especificidades das marés e correntes, sobretudo através da análise das componentes M_2 e S_2 , semelhante aos achados nesta pesquisa para a BSM. O estudo de Paschoaleti (2023) também se concentra nas mesmas componentes semidiurnas, reiterando sua importância fundamental para entender as marés semidiurnas na região, mas vai além ao explorar a dinâmica das marés na BSM com uma atenção especial às variações espaciais e temporais. Isso sugere que as particularidades geomorfológicas e batimétricas da baía exercem uma influência significativa na modulação dessas componentes.

Embora os estudos prévios reconheçam a relevância das marés astronômicas, com ênfase nas componentes M_2 e S_2 , esta pesquisa apresenta uma análise mais abrangente, estendendo o foco para outras componentes, incluindo as diurnas e as de águas rasas, tanto para a BSM quanto para a BSJ. Notavelmente, esta pesquisa incorpora a análise das marés meteorológicas, algo não explorada nos estudos anteriores para a região, o que confere a esta pesquisa uma abordagem mais completa e integrada.

4.2. Previsão de maré no Golfão Maranhense

A previsão de maré na BSJ para o período de 12 a 31 de maio de 2022 foi feita a partir das componentes harmônicas encontradas (Tabela 2). A previsão de maré para o período mostrou-se bastante fiel à série de dados brutos, ainda que tenha subestimado em alguns centímetros (da ordem de 0,25 cm) a amplitude da maré no período de quadratura (Figura 4).

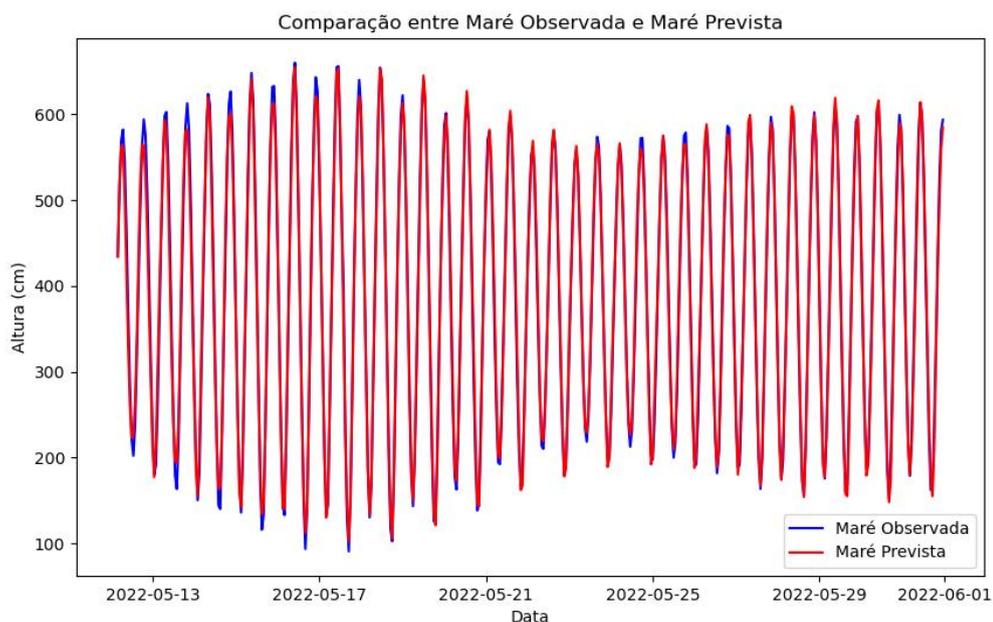


Figura 4 - Séries temporais observada (linha azul) e prevista (linha vermelha) da maré obtida pelo SiMCosta para o período de 12 a 31 de maio de 2022.

4.3 Componente meteorológica da maré no Golfão Maranhense

De acordo com Pugh (2004), eliminando-se variações de alta frequência (diurnas, semidiurnas, quarter-diurnas etc.), obtém-se a componente não-astronômica ou submaré do nível do mar.

De acordo com o percentual de variância para a região da BSJ, 99,4% é predominantemente maré astronômica, os outros 0,6% é maré meteorológica (Figura 5). Enquanto para a região da BSM 99,7% é maré astronômica e 0,3% é maré meteorológica (Figura 6).

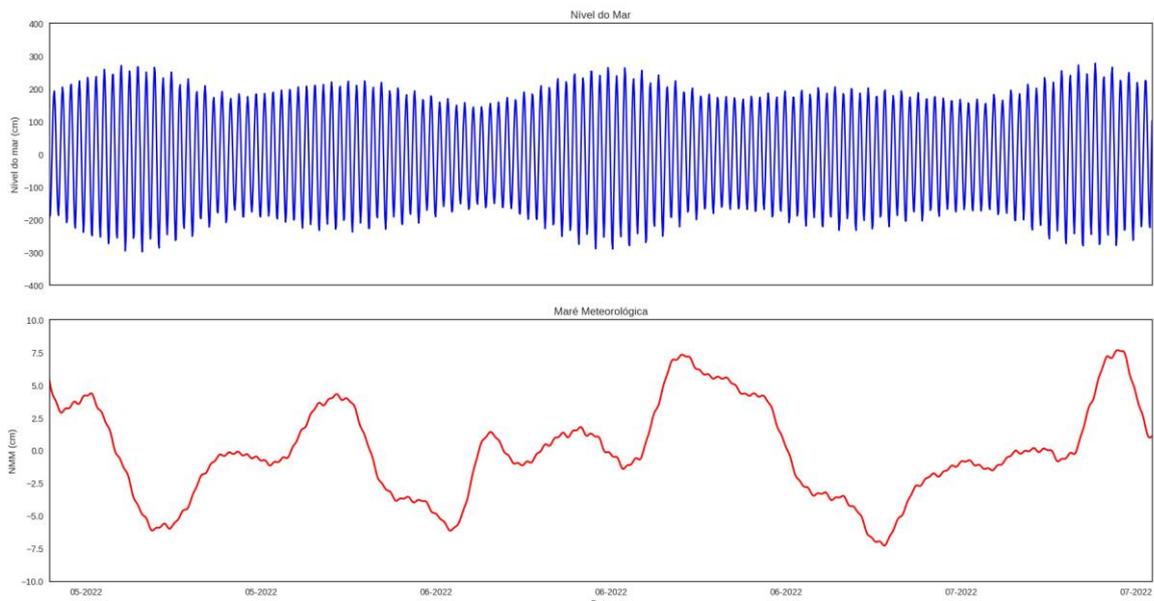


Figura 5 - Série temporal para BSJ: a) Nível do mar; b) Maré Meteorológica.

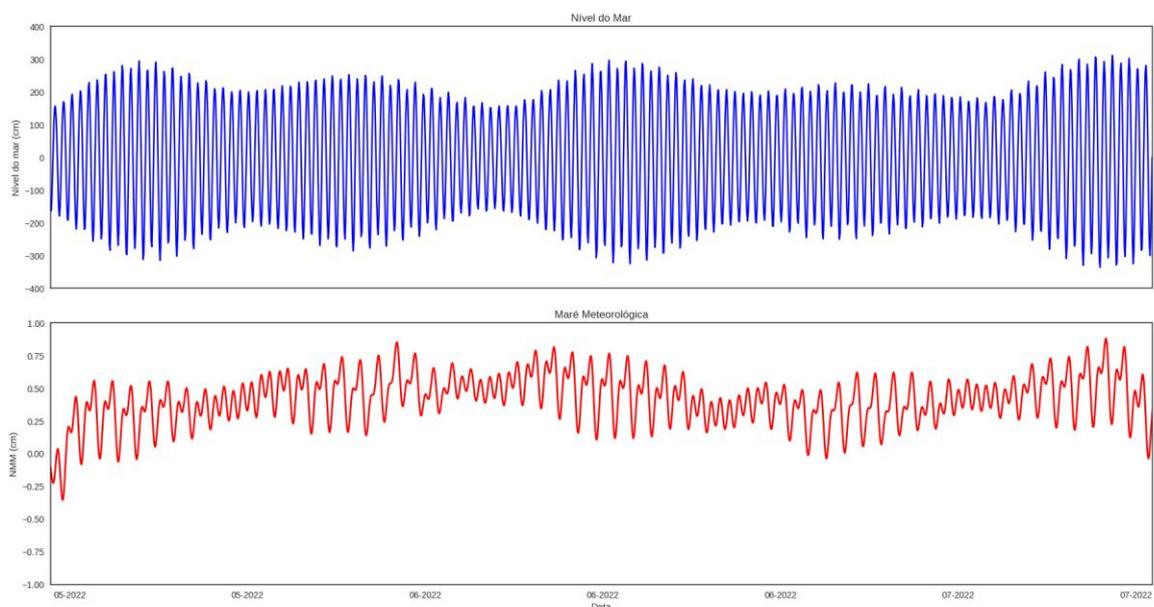


Figura 6 - Série temporal para BSM: a) Nível do mar; b) Maré Meteorológica.

Ao discutir a dinâmica das marés no Golfão Maranhense, especialmente sobre a Baía de São José (BSJ) em comparação com a Baía de São Marcos (BSM), é importante destacar a disparidade existente na quantidade e profundidade dos estudos realizados nestas duas áreas. Enquanto a BSM tem sido objeto de numerosas investigações, que desvendam com detalhes a dinâmica de suas marés, correntes e interações geomorfológicas, a BSJ permanece relativamente menos explorada na literatura científica. Essa lacuna nos estudos não apenas reflete uma oportunidade para futuras pesquisas, mas também impõe desafios na criação de um modelo compreensivo que abarque o Golfão Maranhense como um todo.

4.4. Defasagem das principais constituintes de maré entre BSM e BSJ.

Para compreender a atenuação ou amplificação das constantes harmônicas entre os 2 pontos, no caso P1 (marégrafo BSJ) e P2 (marégrafo BSM), foram comparadas as suas amplitudes e fases obtidas da análise harmônica. Para as componentes semidiurnas (M_2 e S_2) a amplitude é da ordem de 59,16 cm maior na Baía de São Marcos do que na de São José. Para a M_2 , a diferença de fase é de 15,73 min (Figura 7a), enquanto para a S_2 a defasagem de fase é de 36,52 min (Figura 7b).

A amplitude da componente O_1 também é maior no Porto do Itaqui em relação à São José de Ribamar. Esta componente apresentou a menor defasagem de tempo entre as duas baías,

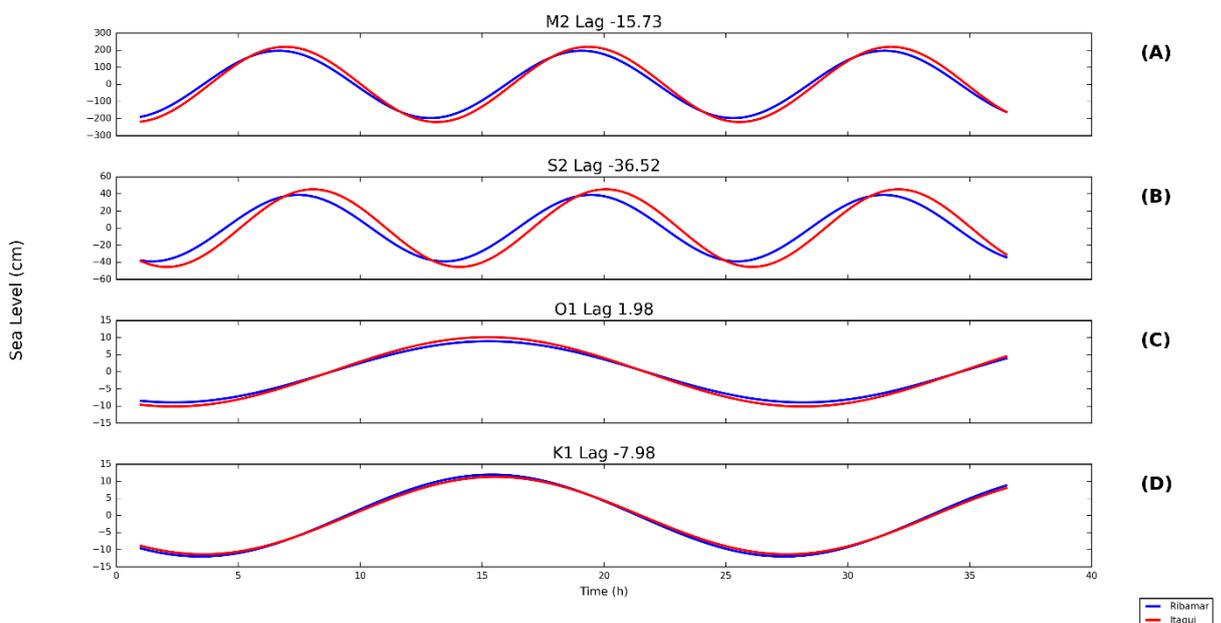


Figura 7 - Evolução espaço-temporal das componentes de maré obtidas para São José de Ribamar (azul) e para o Porto do Itaqui (vermelho): a) M2; b) S2; c) O1; d) K1.

5. Conclusões

Os resultados no presente estudo indicam que a defasagem de fase da onda de maré entre BSJ e BSM é de cerca de 36 min. As séries foram processadas para melhor qualidade dos dados e posteriormente realizadas as análises harmônicas e previsões de maré para cada local proposto.

A análise revelou um total de 22 e 19 harmônicos estatisticamente significativos para a BSJ e a BSM, respectivamente, sendo a maré de período semidiurno a que mais contribui para a elevação de nível por maré astronômica na região do Golfão Maranhense.

Em São José do Ribamar (BSJ), as variâncias das componentes diurnas, semidiurnas e de águas rasas foram respectivamente 0,023 m, 4,25 m e 0,017 m. Para a região do Porto de Itaqui (BSM), as correspondentes variâncias forma de 0,023 m, 5,40 m e 0,013 m. Dessa forma, se observa uma energia de maré bem maior no Porto do Itaqui, em relação a São José do Ribamar.

Os resultados confirmam a predominância das componentes semidiurnas, especialmente M2 e S2, que exercem uma influência marcante na energia das marés nas duas baías. Essas componentes, associadas à atração lunar e solar, influenciam na dinâmica das marés, contribuindo com a maior parte da energia de maré observada nas estações maregráficas estudadas.

Além disso, a análise das previsões de maré demonstra uma boa concordância entre os dados observados e os previstos, embora algumas pequenas discrepâncias tenham sido observadas, principalmente durante o período de quadratura. Isso sugere que o modelo utilizado para prever a maré na região é capaz de capturar com precisão os principais padrões de maré, mas pode precisar de ajustes adicionais para melhorar a precisão durante diferentes condições como a topografia local, a geometria da costa e as condições oceânicas.

A influência da componente meteorológica na elevação do nível do mar, contribui apenas com uma fração muito pequena da variação total do nível do mar, em comparação com a componente astronômica.

Referências

- Almeida, M. S., et al. **Posicionamento por Ponto Preciso e Posicionamento Relativo com GNSS: Qual é o Método mais Acurado Atualmente?** Boletim de Ciências Geodésicas, 22(1), 175-195, 2016.
- Araújo, R. S. **Morfologia do Perfil, Sedimentologia e Evolução Histórica da Linha de Costa das Praias da Enseada do Itapocorói – Santa Catarina.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Itajaí, 2008.
- Bento, C.; Roso, R. Arentz, M. **Aplicação dos dados de maré nas atividades da hidrografia e da navegação.** Anais Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação, Tomo LXIII, 2006.
- Bittencourt, D. M. **Descrição Pontual de maré, perfil de correntes e suas inter-relações em um ponto do estuário do rio Mearim, São Luís - MA.** Dissertação (Programa de Pós - Graduação em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- Brown, J.; Colling, A; Park, D.; Philips, J.; Rothery, D.; Wridht, J. Waves, tides and shallow-water process.: Pergamon Press - Open University, 187 p., Oxford, 1989. Thurman, H.V.. **Introductory Oceanography.** New York, NY: Macmillan. p. 252-276. 1994.
- Castello, P. J.; Krug, L. C; et al. **Introdução às Ciências do Mar.** Pelotas: Ed. Textos, 2017. 602 p.
- Coelho, A. L. **Método de previsão de maré oceânica, utilizando análise harmônica em séries de 18,69 anos - Campinas.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, 2016.
- Costa, A.M.S. **Modelagem Computacional para Avaliação Preliminar do Potencial de Correntes de Maré no Canal do Boqueirão.** 2022. 70 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica/CCET) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.
- Czizeweski, A., Pimenta, F. M., Saavedra, O. R. **Numerical modeling of Maranhão Gulf tidal circulation and power density distribution.** Ocean Dynamics 70, 667–682 2020. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01354-8>.
- Dalbone, R, C. **Análise das Correntes de Maré ao Longo do Canal de Acesso Portuário da Baía de São Marcos: Um Estuário de Macromarés.** 2014. 91p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica/COPPE) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Davies, J. L. **A morphogenic approach to world shorelines.** Zeit. Geomorphologie, v. 8, p. 27 – 42, 1964.

Defant, A. **Physical Oceanography**. Pergamon press Oxford London - New York- Paris, vol 2, pp. viii + 598, 1961.

DHN (2009). **Esclarecimento sobre a relação entre o Datum Vertical do SGB (Imbituba e Santana)**.

EMAP. **Estudo de impacto ambiental**. São Luís - MA, setembro de 2001. 187 p.

Femar. **Catálogo das Estações Maregráficas do Brasil**, 2000.

Ferreira, R. M. S. A. **Aproveitamento da energia das marés estudo de caso: estuário do Bacanga - MA**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação de Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

Ferreira, R. M. S. A.; Estefen, S. F. **Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions**. Renewable Energy, 2009.

Franco, A. S. **Tides: fundamental, analysis and prediction**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT, 1988.

Garcia, P.D. **Caracterização hidrossedimentológica das correntes de maré e do transporte de sedimentos associado à Área Portuária do Maranhão**. 2007. 258 p. Tese (Escola Politécnica) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Godinho, J.R.P. M. **Variação temporal das principais constituintes harmônicas da maré de Cascais**. Lisboa: Faculdade de Ciências, 2011.

González-Gorbeña E, Rosman P.C.C, Qassim R.Y. **Assessment of the tidal current energy resource in São Marcos Bay, Brazil**. J Ocean Eng Mar Energy 1(4):421–433, 2015.

IBGE. **População estimada em 2022: estado do Maranhão**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/panorama>. Acesso em: 02 fev. 2022.

IPCC. 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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896. 2021.

Harari, J. **Noções de Oceanografia**. Instituto Oceanográfico, São Paulo, 2021.

Köppen, W., & Geiger, R. (1928). **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes.

Miyao, S.Y. e Harari, J. 1989. **Estudo preliminar da maré e das correntes de maré da região estuarina de Cananéia**. Boletim do Instituto Oceanográfico, São Paulo, 37(2), p. 107-123.

Muehe, D. (Org.). **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. Brasília: MMA, 2006. 476 p., il. color.; 21x29,7 cm. ISBN 85-7738-028-9.

Neto, P. B. L. **Modelagem e Análise de geração maremotriz no estuário do Bacanga**. Anais do XIX, CBA 2012.

NIMA, National Imagery and Mapping Agency -. **TIDES AND TIDAL CURRENTS**. Disponível em: <<https://tidesandcurrents.noaa.gov/constitu.html>>. Acesso em: 22 jul. 2022. Acesso em: 22 jul. 2022.

NOAA. **Tidal Constituent, also known as a Constituent Tide**. 2016. Disponível em: <<https://tidesandcurrents.noaa.gov/constitu.html>>. Acesso em: 22 jul. 2022.

Paschoaleti, D. M. **Modelagem numérica hidrodinâmica para apoio a operações portuárias: estudo de caso da Baía de São Marcos - MA**. Dissertação (Instituto de Oceanográfico) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Pawlowicz, R.; Beardsley, B. & Lentz, S. **Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE**. Computers & Geosciences, 2002. v. 28, n. 8, p. 929-937.

Pereira, J. E. R.; Harari, J. **Modelo numérico tri-dimensional linear da plataforma continental do Estado do Maranhão**. Bolm Inst. Oceanogr., São Paulo, 43(1):11-26,1995

Portal SimCosta. **Rede Maregráfica**. SiMCosta, 2022. Disponível em: <<https://www.simcosta.furg.br/artigos/maregrafos>>. Acesso em 09 de maio de 2022.

Pugh, D.T. **Tides, surges, and mean sea level**. John Wiley & Son Ltd, 442 pp, 1987.

Pugh, D.T. **Changing Sea levels: Effects of Tides, Weather and Climate**. Cambridge: Univ. Press. 265 p, 2004.

Projeto Baías do Brasil. **Baía de São Marcos, Maranhão** - Relatório Descritivo Programa COPPE: Engenharia Oceânica Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica, 2018.

Ray, R. D.: **Nota técnica: Sobre a variabilidade sazonal do M2 maré**, Ocean Sci., 18, 1073–1079, <https://doi.org/10.5194/os-18-1073-2022>, 2022.

Santos, J. G. (2016) **Observações da Maré ao Redor da Ilha de Santa Catarina – Florianópolis – SC**. 56 F. Trabalho de Conclusão de Curso em Oceanografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2016.

Silva, J. S.; Silva, R. M.; Santos, Celso, A. G. Spatiotemporal impact of land use/land cover changes on urban heat islands: A case study of Paço do Lumiar, Brazil. **Building and Environment**, v. 136, p. 279-292, 2018.

Simó, D.H., Filho, N.O.H. (2004). **Caracterização e distribuição espacial das “ressacas” e áreas de risco na ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**. GRAVEL, ISSN 1678-5975. N2, 93-103. Porto Alegre. Outubro, 2004.

Sumich, J.L. **An Introduction to the Biology of Marine Life**. Dubuque, IA: Wm. C. Brown. pp. 30-35. 1996.

Vasconcelos, S. K. **Projeto Baías do Brasil. Baía de São Marcos, Maranhão - Relatório Descritivo Programa COPPE: Engenharia Oceânica Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica**, 2018.

CAPÍTULO II: SIMULAÇÃO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À INUNDAÇÃO POR ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NA ZONA COSTEIRA DA ORLA OCEÂNICA DE SÃO LUÍS E GOLFÃO MARANHENSE

Tayssa Rauanny Silva Jansen¹; Cláudia Klose Parise¹; João Luiz Baptista de Carvalho²; Leonardo Gonçalves de Lima³; Adilson Matheus Borges Machado⁴; André Luís Silva dos Santos⁵; Luan Victor Pereira de Sousa⁶.

¹Laboratório de Estudos e Modelagem Climática (LACLIMA), Departamento de Oceanografia e Limnologia (DEOLI), Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

²Laboratório de Oceanografia Física (LOF), Departamento de Oceanografia e Limnologia (DEOLI), Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

³Laboratório de Estudos em Oceanografia Geológica (LEOG), Departamento de Oceanografia e Limnologia (DEOLI), Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

⁴Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto (LAGEOS), Coordenação do Curso de Engenharia de Pesca, Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

⁵Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

⁶Departamento de Oceanografia e Limnologia (DEOLI), Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

***Autor correspondente:** Tayssa Rauanny Silva Jansen. Address: dos Portugueses Ave, 1966, São Luís-MA, 65080-805, Brasil. E-mail: tayssa.jansen@discente.ufma.br.

Resumo

As mudanças climáticas globais afetam todos os ecossistemas da Terra, no entanto, os costeiros não só, são afetados, mas totalmente destruídos pela elevação do nível do mar decorrente da mudança climática. A identificação destas áreas inundadas pelo mar são fundamentais para a implementação de ações de mitigação. O objetivo deste trabalho é identificar áreas suscetíveis a inundações resultantes da elevação do nível do mar devido às mudanças climáticas na orla oceânica da Ilha do Maranhão. Este estudo avalia o impacto do aumento do nível do mar sob dois cenários futuros de mudanças climáticas projetados pelo AR6 (IPCC, 2021): os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5, que preveem um aumento do nível do mar de 0,55m e 1,02m, respectivamente, até o final do século XXI. Foi utilizado o software Global Mapper para aplicar esses valores acumulados na ferramenta "simulate water level rise/flooding". Através dessa ferramenta foi possível visualizar e analisar as áreas potencialmente inundáveis sob esses cenários combinados. Os cenários de inundação (0,55 m) e (1,02 m) indicam que algumas regiões das áreas costeiras do estado estão em risco significativo a saber: Raposa, Praia da Ponta d'Areia, Reentrâncias Maranhenses, Avenida Litorânea, Golfão Maranhense e o Porto do Itaqui, especialmente no cenário mais pessimista. A Raposa e Praia da Ponta d'Areia são altamente suscetíveis, dado sua geomorfologia e urbanização crescente.

1 Introdução

Os efeitos das mudanças climáticas tornaram-se recorrentes nos últimos anos, afetando diretamente a maneira como vivemos, trabalhamos e interagimos com o meio ambiente, especialmente em zonas costeiras, onde a maior densidade demográfica potencializa a exposição aos riscos (Manes et al., 2023). A tendência de aquecimento global, intensificado principalmente pelas atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento, tem provocado extremos climáticos mais severos e imprevisíveis. Uma das consequências mais preocupantes das mudanças climáticas é a elevação do nível do mar, resultado da atuação sinérgica de vários fatores, em diferentes escalas, como o aumento da temperatura da água do mar e a consequente expansão térmica dos oceanos, o derretimento da criosfera e a sobrelevação por marés meteorológicas.

De acordo com o sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Assessment Report - AR6* do IPCC), o nível global dos oceanos aumentou 20 cm entre 1901 e 2018, e é muito provável (90% a 100% de probabilidade) que as ações antrópicas sejam a principal forçante da aceleração das mudanças climáticas, principalmente nos últimos 50 anos (IPCC, 2021). A velocidade com que essa elevação está ocorrendo é notavelmente rápida nos últimos 3 mil anos e, mesmo que as emissões de gases do efeito estufa chegue a zero imediatamente, essa elevação continuará em curso por pelo menos mais alguns séculos ou milênios, em função do tempo que o calor leva para ser absorvido e dissipado na interação oceano-atmosfera. Ainda segundo o AR6, estima-se que o nível do mar subirá de 2 a 3 m nos próximos 2 mil anos, se o aquecimento global for limitado a 1,5°C; ou até 6 m, num cenário de 2°C.

Os cenários de clima futuro projetados pelos modelos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) do IPCC representam *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), que são trajetórias desenvolvidas para entender como diferentes fatores socioeconômicos podem impactar as emissões de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas decorrentes. O cenário SSP1-2.6 (o mais otimista) visa limitar o aquecimento global a um nível que possa manter o aumento da temperatura bem abaixo de 2°C, onde o aumento projetado do nível do mar até 2100 é relativamente menor (da ordem de 0,55m). Este cenário assume políticas de mitigação eficazes e uma rápida transição para tecnologias de baixo carbono. O cenário SSP5-8.5 (o mais pessimista), caracterizado por altas emissões de gases de

efeito estufa e um aumento considerável na temperatura global, projeta que o aumento do nível do mar pode ser significativamente maior (da ordem de 1,02m) até o final do século. Este cenário reflete uma continuidade no uso intensivo de combustíveis fósseis e uma falta de políticas efetivas de mitigação climática.

O aumento do nível do mar eleva o risco a inundações catastróficas associadas a tempestades e marés de sizígia, colocando em risco a infraestrutura costeira (i.e. erosão costeira), a segurança habitacional e a economia local de inúmeras regiões. Segundo a ONU (2022), 2 bilhões de pessoas viverão em regiões costeiras nos próximos 30 anos e deverão enfrentar desafios significativos tanto ambientais quanto socioeconômicos (Portner et al., 2022; Nevermann et al., 2023).

Ao longo de praticamente todo o litoral brasileiro são verificados inúmeros pontos de erosão costeira, resultantes de processos costeiros que, em muitos casos, são potencializados por ações humanas que geram interferências na geomorfologia e morfodinâmica (Muehe, 2018). A maior parte das cidades brasileiras não foram planejadas e nem pensadas para situações de inundações por transbordamentos de leitos de rios e lagos. Tais problemas ocorrem devido à ineficiência dos sistemas de drenagem e à impermeabilização das áreas urbanas, que dificultam ainda mais a infiltração no solo e o escoamento da água para as sarjetas e valetas.

A Ilha do Maranhão teve sua ocupação em uma região plana, com pouca variação altimétrica, razão pela qual a ilha pode sofrer com inundações decorrentes das variações de nível d'água (Pontes, 2018). Desde o início do processo de urbanização, a região não parou de sofrer reconfigurações da área urbana, e até os dias atuais vem sendo modificada, a exemplo da extensão da Avenida Litorânea, no município de São Luís, realizada em 2021. Dessa maneira, o mapeamento de alta precisão do relevo visa identificar as áreas sensíveis a eventos de inundações.

Os dados de altimetria do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) são amplamente utilizados em vários estudos de inundações, dada sua capacidade de fornecer dados de alta resolução horizontal (30 m) e resolução vertical (16 m). Wolock e Price (1994) investigaram como a resolução dos dados altimétricos do SRTM podem auxiliar na modelagem de inundações e na delimitação de bacias hidrográficas no Canadá. Bates et al. (2000) utilizaram dados SRTM para simular inundações em áreas ribeirinhas, ajudando a compreender a extensão das inundações em eventos passados e futuros.

Dutta et al. (2000) utilizaram os dados SRTM para entender a dinâmica das inundações nas bacias hidrográficas (modelo foi testado em uma bacia hidrográfica do Japão, de forma a

criar subsídios para a gestão de recursos hídricos. Sanders (2007) avaliou diferentes Modelos Digitais de Elevação (MDE), incluindo o SRTM, para modelagem de inundações, dando destaque para simulações hidrológicas na Califórnia.

No estado do Maranhão, alguns estudos também foram realizados utilizando-se os dados do SRTM. Bezerra et al. (2014) abordaram os impactos da elevação do nível do mar nos ecossistemas de manguezais em áreas antropizadas na Ilha do Maranhão, utilizando modelagem baseada em autômatos celulares, baseando-se no valor mínimo de altimetria do SRTM para cada célula. Pontes (2018) utilizou dados SRTM e ALOS PALSAR com o objetivo de criar um MDE para cada imagem de satélite e identificar áreas de inundação na Ilha do Maranhão para cada modelo e comparando-as.

Pereira (2019) desenvolveu um índice de suscetibilidade à inundação para identificar áreas suscetíveis à inundação na Bacia do Rio Bacanga, um estudo baseado em geoprocessamento e cruzamento de dados obtidos de imagens do SRTM. Santos (2021) criou um MDE com base em dados SRTM para analisar a ocorrência e os impactos das inundações no bairro Alto Formoso, Santo Amaro (MA). Souza et al. (2021), ao comprar dados SRTM com ALOS PALSAR, avaliou as manchas de inundação na cidade de Caxias (MA) associadas a eventos de cheias de diversas magnitudes. Esse estudo foi parte do Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Itapecuru (SAH/Itapecuru), que beneficia várias cidades maranhenses.

Mesmo diante do aumento da temperatura média do planeta e consequente elevação do nível médio do mar, dados e informações acadêmico-científicas das marés astronômicas e meteorológicas no estado do Maranhão são ainda muito incipientes. Ao propor um modelo de propagação da onda de maré para a orla oceânica da Ilha do Maranhão, este estudo visa cobrir esta preocupante lacuna no conhecimento, especialmente para a região do Porto do Itaqui, em São Luís.

O presente estudo, por sua vez, tem como finalidade identificar regiões na orla oceânica da Ilha do Maranhão mais vulneráveis a inundações por elevação do nível do mar projetadas pelos cenários futuros de mudanças climáticas do IPCC. Para tal, foram empregados dados de levantamento geodésico (com o equipamento *Differential Global Positioning System* - DGPS) e imagens de radar (SRTM) na criação de um Modelo Digital de Terreno (MDT) para a região do Golfão Maranhense e orla oceânica de São Luís.

2 Métodos

2.1 Área de Estudo

A Ilha do Maranhão é parte da zona costeira do estado, localizada na região compreendida geomorfologicamente como Golfão Maranhense. A Ilha concentra a maior densidade demográfica do Estado (população de 1.458,836 habitantes), com uma área total de 905 km² (IBGE, 2022), sendo formada por 4 municípios: São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa (Figura 1). Na sua região litorânea são encontrados sedimentos da Formação Barreiras (Período Terciário), caracterizados por sua composição de sedimentos clásticos, esses sedimentos estão representados pelo tabuleiro, cuja borda se inclina em direção à praia, culminando na formação de falésias (Silva, 2006).

A região está sob a influência de um regime de macromarés semidiurnas, com dominância das componentes M₂ e S₂, sendo a M₂ a mais energética (Czizewski et al., 2020). O clima é classificado como tropical úmido, com temperaturas médias em torno de 30° (Barbosa, 2022). Apesar das altas temperaturas do ar, o clima é agradável, amenizado pelos ventos alísios úmidos oceânicos.

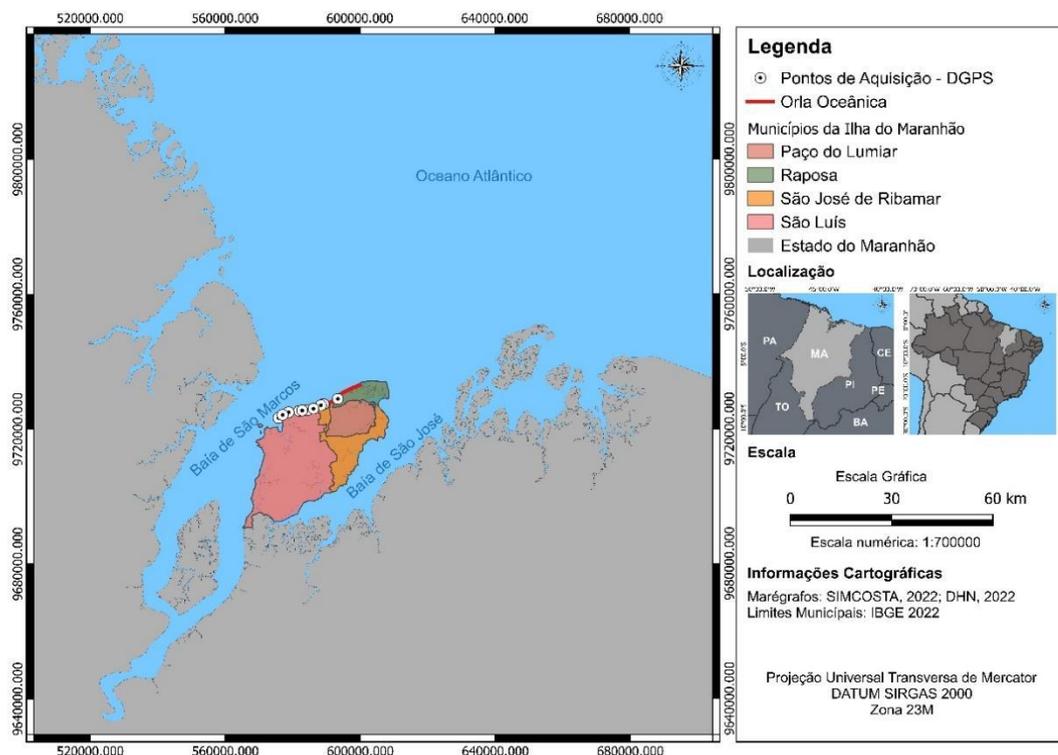


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, mostrando o Golfão Maranhense e a Ilha do Maranhão, com destaque para a orla oceânica onde foram obtidos os dados de altimetria com o DGPS (Sousa, 2024).

2.2 Bases de Dados Topográficos

Neste estudo foi feita a aquisição de níveis de referência (RN) em 12 pontos ao longo da orla oceânica da Ilha do Maranhão (Figuras 2) utilizando-se do equipamento *Differential Global Positioning System* (DGPS – 2 pares *Topcon Hiper V*). O DGPS é amplamente utilizado em aplicações que requerem alta precisão de posicionamento, como navegação marítima, controle de tráfego aéreo, levantamento topográfico, entre outros. Além disso, tem vantagens em relação ao GPS padrão porque permite uma maior precisão nas medições de posição. O GPS é afetado por diversos tipos de erros, como o atraso do sinal devido à atmosfera, e erros orbitais, que podem reduzir a precisão das medições. Já o DGPS usa estações de base terrestre para corrigir esses erros, o que significa que o receptor recebe correções diferenciais em tempo real que são aplicadas às medições de posição do GPS. A metodologia consistiu na instalação da base com tempo de rastreamento superior a 5 horas. Para o *rover*, usou-se o método estático rápido de 15 a 20 min em cada ponto.

Foram utilizadas imagens altimétricas do SRTM (NASA, 2024), uma missão espacial realizada em fevereiro de 2000, durante a qual o ônibus espacial *Endeavour* mediu a topografia da Terra usando um radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar - SAR*). A principal finalidade da missão SRTM era mapear a topografia global da superfície terrestre em três dimensões e com alta precisão (resolução horizontal de 30m). As missões de radar do SRTM foram projetadas para medir a altura da superfície terrestre, fornecendo informações detalhadas sobre a elevação do terreno em todo o mundo. O SAR utilizado na missão era capaz de penetrar através das nuvens e da vegetação, fornecendo dados topográficos precisos, mesmo em áreas cobertas por obstáculos naturais.

A imagem do SRTM (Figura 2a) utilizada neste estudo foi obtida pelo *plugin* (extensões ou complementos que adicionam funcionalidades extras ao *software* QGIS 3.34.4 LTR (software livre gratuito/*open source* multiplataforma de Sistema de Informações Geográficas-SIG, que provê visualização, edição e análise de dados georreferenciados) *OpenTopography*, que possibilita pesquisar e baixar dados topográficos disponíveis para uma área de interesse. Após obter a imagem SRTM 30 metros para a região do Golfão Maranhense, foi feito um recorte para a orla oceânica de São Luís de modo a permitir a validação dos dados medidos pelo DGPS (Figura 2b). A imagem SRTM está georreferenciada no sistema de coordenadas geográficas UTM, utilizando o Datum WGS84.

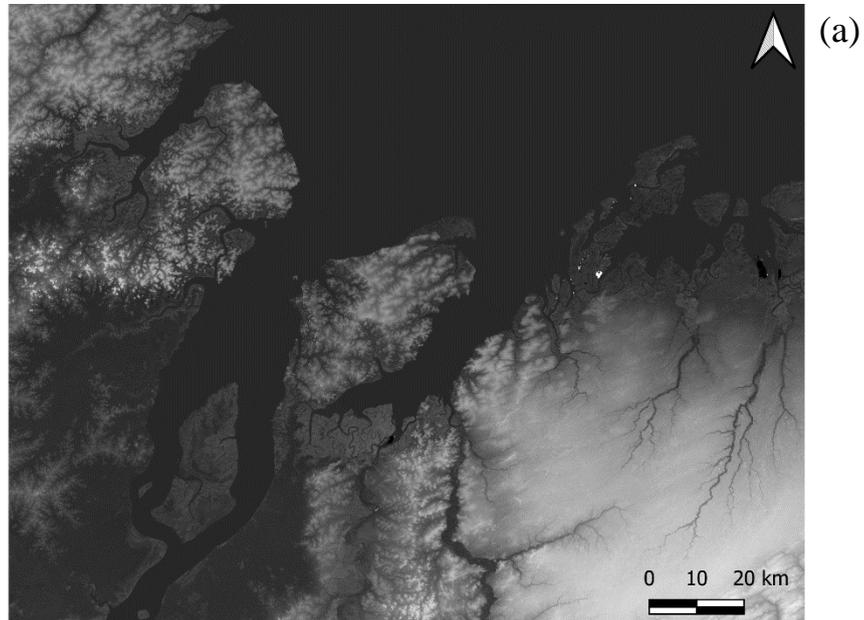


Figura 2 - a) Imagem do radar SRTM para o Golfão Maranhense e b) Detalhe da orla oceânica da Ilha do Maranhão indicando a delimitação da área simulada.

2.3 Processamento dos Dados

Altitude Ortométrica

O cálculo das alturas ortométricas de cada ponto de referência (DGPS) foi determinado por meio da equação 1, cujas alturas geoidais (N) foram obtidas pelo *software* MAPGEO2015. Esse funciona como um modelo digital que fornece os fatores para conversão das altitudes dadas pelos receptores GNSS, resultando em altitudes compatíveis com a gravidade terrestre, mais adequadas para descrever o escoamento superficial (IBGE, 2023). Segundo Blitzkow et al. (2016), este método serve para representar as variações geoidais no Brasil com base nas coordenadas planimétricas. Os pontos de referência, indicados pelas alturas geométricas (h), foram convertidos para o Datum horizontal WGS84, utilizando o sistema de coordenadas UTM na Zona 23. Posteriormente, a rede de dados geodésicos foi convertida em arquivos com a extensão “.csv” utilizando o Microsoft Excel e, em seguida, exportada como *shapefiles* na plataforma QGIS versão 3.34.4 LTR.

$$H = h - N \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

H: Altitude ortométrica, avaliada ao longo da linha do campo da gravidade;
h: Altitude elipsoidal ou geométrica, avaliada ao longo da normal ao elipsoide;
N: Altura geoidal ou ondulação geoidal.

Interpolação dos Dados de DGPS

A coordenada da base nos pontos obtidos com o DGPS foi corrigida através do método de Posicionamento por Pontos Preciso (PPP), utilizando-se da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE. Posteriormente, os pontos foram ajustados no *software TopconTools* de forma que se enquadrassem em solução fixa, ou seja, com precisão centimétrica.

A fim de gerar o MDT a partir dos pontos de elevação obtidos com um dispositivo de DGPS, o método de interpolação de Ponderação Inversa da Distância (*Inverse Distance Weighted* - IDW) (Mitasova, 1999) foi usado para estimar os valores nos locais onde não foram tomadas medidas. Os dados interpolados foram utilizados para validar a base de dados de SRTM para a região de estudo.

2.4 Simulações dos Cenários Futuros de Inundações

Os impactos do aumento do nível do mar sob dois cenários futuros (SSP1-2.6 e SSP5-8.5; Tabela 1) de mudanças climáticas projetados pelo AR6 (IPCC, 2021) foram avaliados. Os valores de nível do mar previstos (0,55 m e 1,02 m, respectivamente) foram aplicados através

da ferramenta *simulate water level rise/flooding* do software *Global Mapper* (produzido pela empresa de desenvolvimento de software especializada em soluções de software *GIS Blue Marble Geographics*), a qual permite simular a cobertura ou área de inundação por água, aumentando o nível da água a uma profundidade especificada sobre uma elevação única fixa (como 0 para o nível do mar) ou a partir de uma área selecionada, como uma área de planície de inundação.

Através dessas análises foi possível constatar as áreas potencialmente inundáveis sob esses cenários combinados. Este método oferece uma abordagem integrada para avaliar riscos de inundação costeira, considerando tanto as mudanças climáticas antropogênicas quanto fenômenos naturais de variação de nível d'água, permitindo uma melhor compreensão das vulnerabilidades e necessidades de adaptação das regiões costeiras.

Tabela 1 - Configuração das simulações das inundações pelo aumento do nível do mar em cenários futuros projetados pelos modelos do CMIP6/IPCC.

Cenário IPCC	Aquecimento global projetado até 2100	Elevação do nível do mar (m)
SSP1-2.6 - Otimista	Até 1,5°	0,55
SSP5-8.5 - Pessimista	Até 2°	1,02

3. Resultados e Discussão

3.2 Validação dos dados de SRTM para o Golfão Maranhense

A validação dos dados do SRTM foi realizada com base na comparação com os dados medidos pelo DGPS para a região da orla oceânica da Ilha do Maranhão. Pelo fato de o DGPS fornecer altimetrias com alta precisão e o SRTM apresenta variações que leva em consideração a cobertura vegetal ou terreno complexo, analisar as diferenças entre esses dados permite identificar e corrigir possíveis erros no SRTM, garantindo maior precisão em aplicações em estudos ambientais e planejamento urbano. As diferenças obtidas entre as duas bases de dados (Figura 4) revela inconsistências locais da ordem de 0,09 m (ponto 1) na Avenida Litorânea em frente ao Hotel Praia Bella e 2,13m (ponto 10) praça do Sol Ponta d'Areia, conforme a tabela 2.

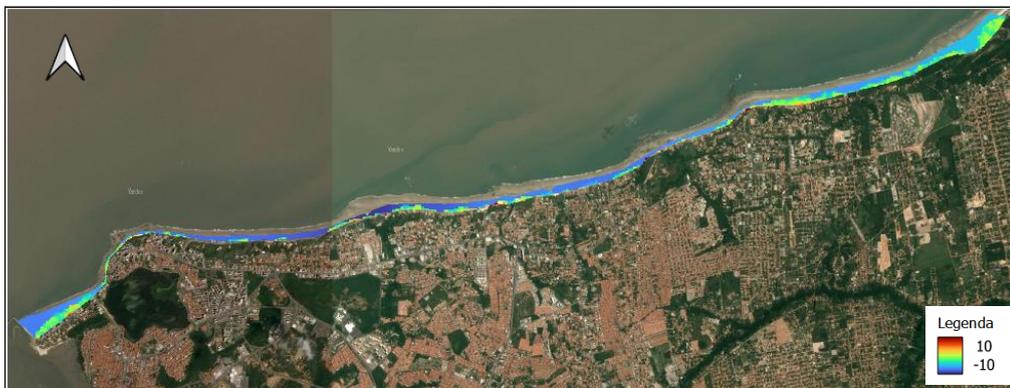


Figura 3 - Diferenças espaciais (entre SRTM-DGPS) obtidas para a região da orla oceânica da Ilha do Maranhão.

Estatisticamente, os dados do SRTM mostram um erro médio de -0,40 m, um desvio padrão de 1,02 m e um coeficiente de correlação de 0,75 em relação aos dados do DGPS. Os resultados apontam que o SRTM pode ser confiável para simulações de cenários de inundação, apesar de algumas variações. No entanto, é preciso levar em consideração possíveis ajustes ou correções sistemáticas ao utilizar esses dados em áreas críticas. É importante ressaltar que os dados SRTM foram coletados em fevereiro do ano 2000, e a Avenida Litorânea teve várias intervenções desde então, como por exemplo, a extensão da Avenida (1.800 m) no ano de 2021 e os dados do DGPS foram coletados em 2022.

Tabela 2- Diferenças entre os dados topográficos medidos pelo DGPS e pelo SRTM.

Pontos	DGPS (m)	SRTM (m)	Diferenças (m)
1	8,02	8,11	-0,09
2	5,25	6,09	-0,84
3	4,8	3,07	1,73
4	5,63	5	0,63
5	5,06	4	1,06
6	5,9	5	0,9
7	6,5	6,09	0,41
8	6,19	7	-0,81
9	5,02	6	-0,98
10	5,13	3	2,13
11	3,78	4,08	-0,3
12	6,9	5,9	1

A Figura 4 mostra a altitude ortométrica da orla oceânica da Ilha do Maranhão obtida a partir da interpolação dos dados do DGPS. Através dessa figura é possível identificar que áreas com altitudes mais baixas, como é o caso de Raposa e do início da Ponta da Areia, que seriam regiões mais susceptíveis a inundações visto que, sob um evento de aumento do nível do mar, essas regiões serão as primeiras a serem afetadas, enquanto as demais estariam relativamente mais seguras devido à sua maior cota de elevação. As áreas onde as cores transitam do verde para o amarelo, por sua vez, indicam uma mudança gradual de altitude. Estas áreas de transição

podem ser de especial interesse para monitoramento, pois pequenas variações no nível do mar podem representar impactos potenciais.

As regiões com alta densidade de construções e infraestrutura urbana (Raposa), que aparecem nas cores azul e verde na figura 4, são mais propensas a sofrer inundações urbanas, o que pode levar a danos materiais e desafios logísticos. As áreas verdes naturais, localizadas em altitudes mais baixas (Olho d'Água), podem funcionar como zonas de amortecimento para inundações, mas também são suscetíveis a alterações ecológicas se inundadas frequentemente. Para as áreas identificadas como vulneráveis, seria importante implementar medidas de planejamento urbano e ambiental, como barreiras naturais de proteção, sistemas de drenagem aprimorados e políticas de construção adaptadas.

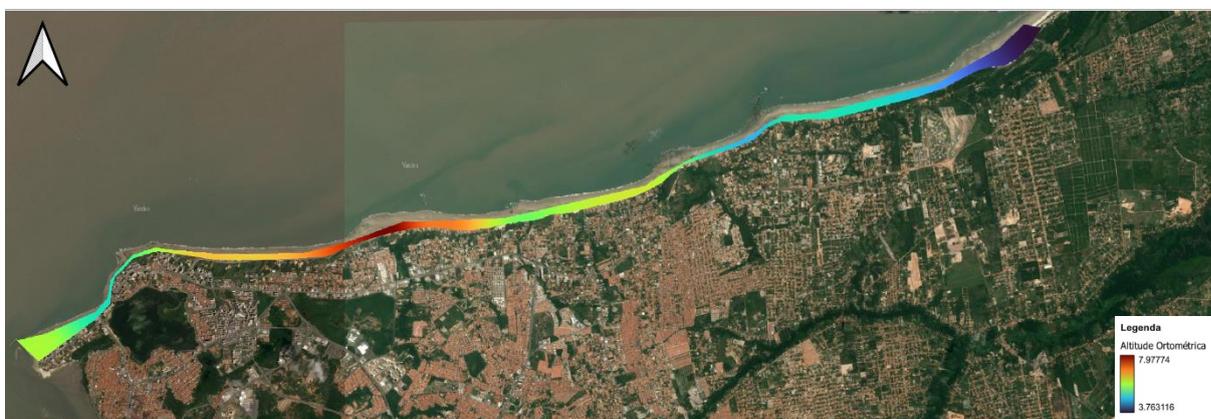


Figura 4 -Altitude ortométrica (m) da orla oceânica da Ilha do Maranhão interpolada a partir dos 12 pontos obtidos pelo DGPS.

3.3 Áreas Vulneráveis a Inundações na Orla Oceânica da Ilha do Maranhão

Ocorrências de inundações dependem de fatores climáticos e ambientais, sendo esses últimos condicionantes da área sujeita à invasão das águas, através das características topográficas locais, como altimetria e declividade. A figura 4 demonstra as áreas com cores mais próximas do azul (como aquelas a leste da região, no município de Raposa) representam as altitudes mais baixas, enquanto as áreas mais próximas do vermelho (como aquelas na região central, próximo ao parquinho da Avenida Litorânea) representam as maiores altitudes. A Figura 5a mostra o cenário otimista de elevação do nível do mar (0,55 m), onde as áreas mais impactadas são as regiões da Ponta d'Areia (à esquerda) e Raposa (à direita).

Na Ponta da Areia, a mancha de inundação é visível, mas contida, indicando impacto moderado na infraestrutura local. Na Raposa, a área de inundação é maior, afetando tanto estruturas antrópicas (como residências) quanto naturais (ecossistemas costeiros de praias, mangues e dunas). Vasconcelos (2020) afirma que a região da Raposa está sujeita a inundação

em diversos pontos e que pode gerar diversos prejuízos econômicos e sociais, corroborando com os resultados mostrados na Figura 5a.

A região da Litorânea, apesar de algumas manchas de inundação, mostra-se relativamente resiliente, com menor impacto sobre as áreas urbanas, dada sua geomorfologia que oferece maior proteção natural contra a elevação do nível do mar.

Como mencionado anteriormente, a região da Ponta d'Areia e Raposa são as mais vulneráveis às inundações e, conseqüentemente, deverão sofrer os maiores impactos sob o cenário pessimista. A figura 5b representa o cenário pessimista de elevação do nível do mar (1,02 m), onde os impactos de fato foram mais severos. Sobre a Ponta d' Areia, além da a inundação observada na faixa mais litorânea de frente ao calçadão de pedestres, observa-se que ela se estende até a avenida detrás das residências (Av. Nina Rodrigues), indicando impactos significativos para todo o esporão arenoso (*spit*) e a infraestrutura local sobre ele construída.

Na Raposa, a inundação é vasta, com grandes áreas residenciais e ecossistemas costeiros em risco, destacando a vulnerabilidade das formações sedimentares. Vasconcelos (2020) aborda que, além de prejuízos ambientais como contaminação das águas superficiais, alterações nos ecossistemas e comprometimento da saúde da população diante da situação de insalubridade, eventos de inundações afetam significativamente a vida das pessoas que sobrevivem de atividades de subsistências, tendo suas atividades interrompidas. Os resultados encontrados neste estudo mostram que as inundações por elevação do nível médio do mar não trazem somente prejuízos estruturais, mas também sociais. Mesmo sob o cenário pessimista, a região da Avenida Litorânea mostra-se menos impactada ao aumento do nível do mar, com inundações limitadas a áreas relativamente menores em comparação às extremidades da orla oceânica, na região da Ponta d'Areia e Raposa, entretanto, observa-se uma área contínua alagada no cenário SSP5-8.5 (Figura 5b).

(a)



(b)

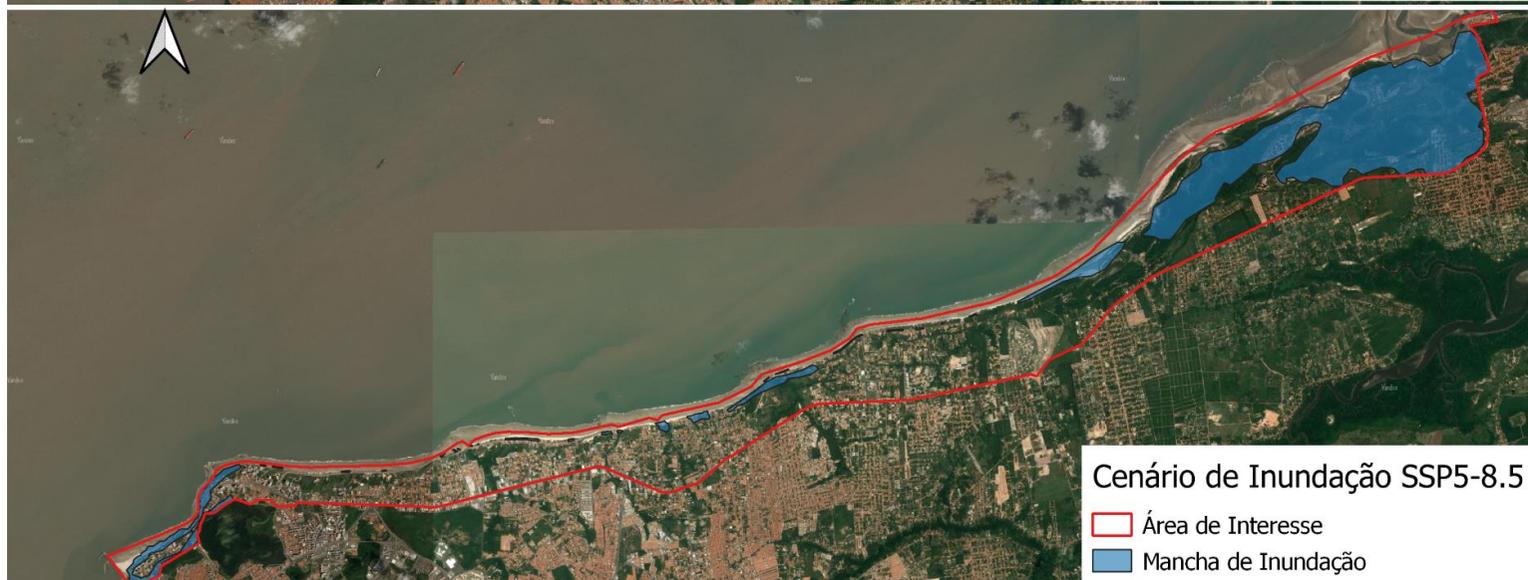


Figura 5 - Mapa com as áreas de inundação simuladas sobre os dados altimétricos do SRTM para o cenário otimista (SSP1-2.6) e pessimista (SSP5- 8.5) do IPCC.

3.4 Áreas Vulneráveis a Inundações no Golfão Maranhense

A figura 6 apresenta os cenários de inundação à elevação do nível do mar (0,55 m e 1,02 m) no Golfão Maranhense. Em geral, observa-se que o Golfão se mostra mais suscetível a eventos de inundações, não apenas por cobrir uma área maior em extensão, mas principalmente devido as suas características geomorfológicas e ambientais espacialmente distintas. As Reentrâncias Maranhenses e o Golfão Maranhense são particularmente as áreas mais vulneráveis ao aumento no nível do mar, dada sua baixa topografia, alta complexidade ecológica e intensa pressão antrópica. A presença de uma densa população na Ilha do Maranhão agrava a situação, pois a urbanização intensa e as atividades antrópicas aumentam sua vulnerabilidade.

Sousa (2024), ao avaliar a vulnerabilidade do Golfão a cenários de inundação, também enfatiza que os ecossistemas costeiros, como os manguezais presentes na região, desempenham um papel vital na proteção da linha de costa contra a erosão e as inundações. Estes ecossistemas funcionam como barreiras naturais que podem absorver o impacto das marés altas e de tempestades, reduzindo os danos às infraestruturas sociais e humanas. No entanto, o aumento do nível do mar ameaça esses ecossistemas, potencialmente degradando sua capacidade de proteção e exacerbando a vulnerabilidade costeira.

Outra região altamente suscetível aos efeitos das mudanças climáticas são as reentrâncias maranhenses localizadas no litoral ocidental do Maranhão. A elevação do nível do mar afetará amplamente as zonas costeiras do Maranhão, com impactos variando conforme a geomorfologia local e a densidade populacional.

A presença de estuários e enseadas complexas, manguezais e elevadas amplitudes de marés, combinado ao intenso desenvolvimento urbano nos municípios, agrava a vulnerabilidade do Golfão Maranhense ao aumento do nível do mar projetado pelo cenário pessimista do IPCC (Figura 6b). O Golfão é de grande importância para a economia local e nacional, pois nesta região está inserido o Porto do Itaqui que juntamente com os terminais privados da Ponta da Madeira (Vale) e o Porto da Alumar, integra o Complexo Portuário do Itaqui, o maior complexo portuário da América Latina em movimentação de cargas EMAP (2024). Contudo, sob o cenário de elevação do nível do mar mais pessimista (1,02 m) o porto enfrentará riscos significativos. A elevação do nível do mar deverá provocar inundações nas áreas portuárias, afetando as operações logísticas e a infraestrutura. As atividades portuárias são extremamente

sensíveis às mudanças ambientais e climáticas, especialmente às variações nos níveis das marés e aos eventos extremos, como enchentes e alagamentos.

Sousa (2024) afirma que área do Porto do Itaqui e seu entorno são consideradas urbanizadas e povoadas, havendo maior exposição às mudanças climáticas e, portanto, a contabilização de pessoas e infraestrutura é fundamental para o planejamento da adaptação. Os ecossistemas costeiros, como os manguezais presentes no Golfão Maranhense, desempenham um papel vital na proteção da linha de costa contra a erosão e as inundações. De acordo com o estudo de Sousa (2024), esses ecossistemas não só mitigam os efeitos adversos da elevação do nível do mar, mas também são cruciais para a adaptação e resiliência das áreas costeiras frente às mudanças climáticas. Estes ecossistemas funcionam como barreiras naturais que podem absorver o impacto das marés altas e tempestades, reduzindo os danos às infraestruturas humanas. No entanto, o aumento do nível do mar ameaça esses ecossistemas, potencialmente degradando sua capacidade de proteção e tornando-se mais intenso a vulnerabilidade costeira.

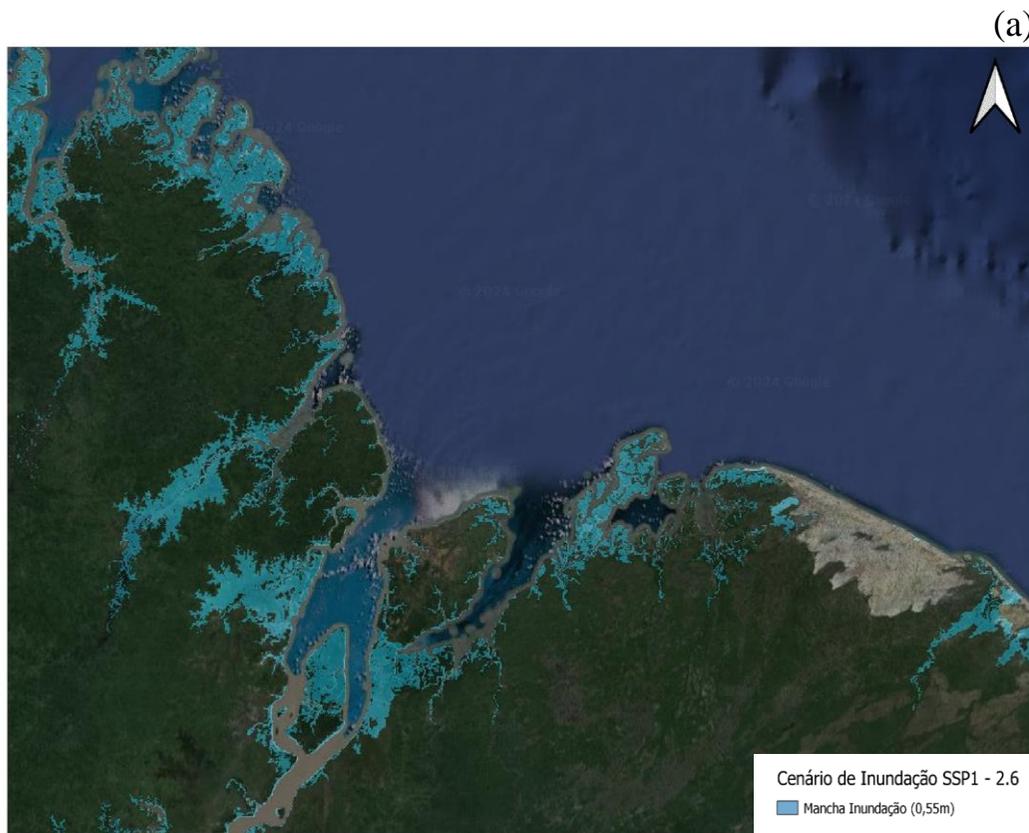


Figura 6 - Mapa com as áreas vulneráveis a inundações no Golfão Maranhense nos cenários climáticos otimista (SSP1-2.6) e pessimista (SSP5-8.5) do IPCC.

A análise dos cenários de inundação na região do Golfão Maranhense e suas implicações para o Porto do Itaqui está fortemente vinculada a vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), dos quais podemos citar a **ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura** - A vulnerabilidade das atividades portuárias do Porto do Itaqui devido à elevação do nível do mar destaca a necessidade de infraestrutura resiliente. Melhorar a infraestrutura portuária para resistir a inundações e outros impactos climáticos é crucial para manter a eficiência operacional e a segurança. **ODS 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis** - O elevado desenvolvimento urbano, em especial na zona costeira, nos municípios de São Luís, Ribamar, Raposa e Paço do Lumiar torna necessário planejar e implementar estratégias para cidades resilientes e sustentáveis. Isso inclui a adaptação da infraestrutura urbana para enfrentar os riscos de inundações e a proteção dos ecossistemas costeiros que atuam como barreiras naturais contra desastres naturais. **ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima** - As análises de cenários de elevação do nível do mar e suas consequências diretas, como inundações, alinham-se diretamente com a ODS 13. A implementação de medidas de mitigação e adaptação para reduzir a vulnerabilidade costeira e a infraestrutura crítica é essencial para enfrentar os desafios das mudanças climáticas. **ODS 14: Vida na Água** - A proteção dos ecossistemas marinhos e costeiros, como os manguezais do Golfão Maranhense, é fundamental para a ODS 14. Esses ecossistemas desempenham um papel crucial na absorção do impacto das marés e na mitigação dos efeitos das inundações, além de serem habitats biodiversos e produtivos. **ODS 15: Vida Terrestre** - Os ecossistemas costeiros também são relevantes para a ODS 15, que visa proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres. A degradação desses ecossistemas devido à elevação do nível do mar e a urbanização não planejada ameaça a biodiversidade e a funcionalidade dos habitats costeiros.

4 Conclusões

A análise dos cenários SSP1-2.6 (0,55 m) e SSP5-8.5 (1,02 m) revelou diversas áreas vulneráveis a inundações no Maranhão, a saber: Raposa, Praia da Ponta d'Areia, Reentrâncias Maranhenses, Avenida Litorânea, Golfão Maranhense e o Porto do Itaqui, especialmente no cenário mais pessimista. A Raposa e Praia da Ponta d'Areia são altamente suscetíveis, dado sua geomorfologia e urbanização crescente. As Reentrâncias Maranhenses enfrentam grandes riscos devido à baixa altitude. A Avenida Litorânea mostra menor impacto devido às barreiras naturais, enquanto a região da Baixada Maranhense na região central do Golfão Maranhense,

com sua baixa declividade, alta densidade populacional e intensas atividades urbanas, mostrou os maiores impactos. O Porto do Itaqui, sensível às variações no nível do mar, pode ter sua operação e infraestrutura impactadas. A análise do impacto do cenário SSP5-8.5 no Porto do Itaqui destaca a necessidade de medidas adaptativas para mitigar os riscos associados à elevação do nível do mar. Estratégias de gestão costeira que envolvem a restauração e a proteção dos ecossistemas naturais, combinadas com a modernização da infraestrutura portuária para resistir a eventos extremos, são essenciais para garantir a resiliência e a sustentabilidade das operações portuárias no Golfão Maranhense.

Para mitigar esses riscos, é essencial implementar programas de reflorestamento e conservação dos manguezais, desenvolver infraestrutura resiliente, e adotar políticas de planejamento urbano que restrinjam construções em áreas de alto risco. Estabelecer sistemas de monitoramento e alerta precoce, promover campanhas de educação e conscientização, e adaptar as atividades portuárias são ações fundamentais. A combinação dessas medidas pode fortalecer a proteção costeira e aumentar a resiliência das comunidades vulneráveis às mudanças climáticas e elevação do nível do mar.

Além disso, essas análises revelam a importância crítica de alinhar as políticas de mitigação e adaptação às diretrizes dos ODS. Esses cenários destacam a necessidade urgente de ações coordenadas que promovam a adaptação das comunidades costeiras e a sustentabilidade ambiental, ou seja, fornece uma base sólida para a criação de políticas públicas que promovam a sustentabilidade das comunidades costeiras do Maranhão. É essencial implementar políticas de zoneamento urbano sustentável, zoneamento costeiro, fortalecer a infraestrutura para resistir aos impactos das mudanças climáticas, e conservar ecossistemas como os manguezais. Além disso, promover a educação e conscientização pública, estabelecer sistemas de monitoramento e alerta precoce, e desenvolver planos de adaptação climática são medidas fundamentais. Essas ações, em colaboração com diferentes níveis de governo, setores privados, ONGs e comunidades locais, garantirão uma abordagem abrangente e eficaz para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e proteger as áreas vulneráveis a inundações por aumento do nível médio do mar.

Referências

Barbosa, W. L. **Sensibilidade da temperatura do ar no Estado do Maranhão a cenários de mudanças climáticas globais**. 2022. 49p.

Bates, P.D., De Roo, A.P.J. (2000). **A simple raster-based model for flood inundation simulation**. *Journal of Hydrology*, 236(1-2), 54-77.

Bezerra, D. da S., Amaral, S., Kampel, M., Andrade, P. R. de. (2014). **Simulating Sea-Level Rise Impacts on Mangrove Ecosystem Adjacent to Anthropic Areas: The Case of Maranhão Island, Brazilian Northeast**. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 9(3), 188-198.

Czizeweski, A., Pimenta, F. M., Saavedra, O. R. **Numerical modeling of Maranhão Gulf tidal circulation and power density distribution**. *Ocean Dynamics* 70, 667–682 2020. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01354-8>.

Souza de D. C., Fernandes, R. J. A. R., Matos, A. J. S. (2021). **Mapeamento de Manchas de Inundação: Caxias/MA. Serviço Geológico do Brasil - CPRM**, Departamento de Hidrologia. Outubro de 2021.

Dutta, D., Herath, S., Musiak, K. (2000). **Flood inundation simulation in a river basin using a physically based distributed hydrologic model**. *Hydrological Processes*, 14(3), 497-519.

EMAP. **EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA**. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/emap/a-emap>. Acesso em: 24 abr. 2024.

IPCC, 2022: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844

IPCC. 2018. Summary for Policymakers. In: **Global Warming of 1.5°C**. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

Manes, S. et al., (2023). **Nature as a solution for shoreline protection against coastal risks associated with ongoing sea-level rise**. *Ocean & Coastal Management*, 235, 106487.

Manes, Stella. (2022a). **Nature-based solutions for climate change adaptation: from global to local scale analysis**. 133f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Mitas, L., Mitasova, H. (1999). Spatial Interpolation. In: P.Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, D.W.Rhind (Eds.), **Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications**, Wiley.

Muehe, D. **A geomorfologia costeira e seu desdobramento para a geografia costeira e marinha**. Revista Brasileira de Geografia, Rio de Janeiro, v. 63, n. 1, p. 29-37, jan-jun. 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327350391_a_geomorfologia_costeira_e_seu_desdobramento_para_a_geografia_costeira_e_marinha>. Acesso em: 24 abr. 2024.

National Aeronautics and Space Administration. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm>. Acesso em: 20 jan. 2024.

ONU, 2022. **Questões globais: População. Nações Unidas**. Disponível em un.org/en/global-problemas/populacao.

Pereira, C. R. P. **Índice de risco de inundação como ferramenta de planejamento urbano**. Dissertação (Universidade Federal do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, 2017.

Pereira, C. R. P. (2019). **Índice de Suscetibilidade à Inundação Aplicado à Bacia do Rio Bacanga, São Luís/MA**. Tese (Programa de Pós-graduação em Geografia na Universidade Federal Fluminense) - CEDERJ/UERJ.

Pinheiro, C. U. B. Palmeiras do Maranhão: **Onde canta o sabiá**. São Luís: Gráfica e Editora Aquarela, 2011.

Pontes, F. T. L. (2018). **Identificação de áreas de inundações por elevação do nível do mar na Ilha do Maranhão**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, São Luís.

Pörtner, H. O. et al., (2021). **IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change**.

Pörtner, H. O. et al., (2022a). **Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability**. IPCC.

Prates, A. P. L., Gonçalves, M. A., Rosa, M. R. (2012). **Panorama da conservação dos ecossistemas costeiros e marinhos no Brasil**.

Prina, B. Z.; Trentin, R. **Uso de três fontes de dados altimétricos para identificação de áreas com perigos à inundação**. Geografia Ensino & Pesquisa, v. 18, n. 2, p. 123-144, 2014.

Sanders, B.F. (2007). **Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling**. Advances in Water Resources, 30(8), 1831-1843.

Santos, I. de L. (2021). **Inundações na região dos Lençóis Maranhenses: Ocorrência e impacto no bairro Alto Formoso, Santo Amaro do Maranhão**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em geografia Universidade Federal do Maranhão, São Luís.

Silva, J. S.; Silva, R. M.; Santos, Celso, A. G. **Spatiotemporal impact of land use/land cover changes on urban heat islands: A case study of Paço do Lumiar, Brazil**. Building and Environment, v. 136, p. 279-292, 2018.

Sousa, L. V. P. de. **Avaliação do grau de vulnerabilidade da zona costeira do Maranhão às mudanças climáticas**. 2024. 70 f.

Tate, E., Muñoz, E., Just, C. (2015). **Uncertainty and sensitivity analysis of the HAZUS-MH flood model**. Natural Hazards Review, 16(3), 04014030.

Vasconcelos, T. R.; FUSHIMI, M.; PINHEIRO, S. Y. A.; SILVA, Q. D. **Risco de inundação costeira no município de Raposa (MA)**. v. 27, n. 51, p. 159-176, 2020

Wolock, D.M., Price, C.V. (1994). **Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model**. Water Resources Research, 30(11), 3041-3052.

III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A propagação da maré astronômica nas Baías de São José e São Marcos, que compõem o Golfão Maranhense, possui uma das maiores amplitudes de maré do Brasil, enfatiza a importância das componentes harmônicas para a gestão costeira e a segurança da navegação em águas rasas. A análise das componentes harmônicas da maré no Golfão Maranhense revela uma complexidade significativa no comportamento das marés nessa região. Os resultados obtidos neste estudo indicam uma predominância das componentes semidiurnas, especialmente M2 e S2, que exercem uma influência marcante na energia das marés. A influência da componente meteorológica na elevação do nível do mar, contribui com uma fração muito pequena na variação total do nível do mar na região, em comparação com a componente astronômica. A dinâmica das marés juntamente com os cenários de inundação pode influenciar significativamente na dinâmica costeira.

Os cenários de inundação SSP1-2.6 (0,55 m) e SSP5-8.5 (1,02 m) indicam que algumas regiões das áreas costeiras do estado estão em risco significativo. Nossos resultados destacam a importância de ecossistemas naturais costeiros na proteção costeira, especialmente os manguezais, cuja perda contínua acarreta graves consequências. A proteção proporcionada por esses ecossistemas é crucial para propor soluções baseadas na natureza para combater os impactos das mudanças climáticas.

A implementação de políticas públicas voltadas para a conservação dos ecossistemas costeiros e a adaptação às mudanças climáticas é urgente. Isso inclui a criação de sistemas de alerta, o fortalecimento da infraestrutura costeira, e o planejamento urbano. A contabilização de pessoas e infraestrutura em risco é fundamental para o planejamento de adaptação e a delimitação de Zonas de Vulnerabilidade bem definidas ao longo da costa maranhense. Assim, ações de preservação e uso sustentável dos ecossistemas costeiros são necessárias para garantir a adaptação climática contra os perigos costeiros e salvaguardar as populações humanas.

É essencial que entidades públicas e privadas desenvolvam e aumentem as iniciativas de proteção desses ecossistemas, considerando a relação vital entre as pessoas e a natureza. Além disso, a relação entre as análises de cenários de inundação, a vulnerabilidade costeira, e os ODS reforça a importância de integrar os princípios de sustentabilidade nas políticas e práticas de desenvolvimento urbano e regional. Planejar e adaptar as infraestruturas críticas e os ecossistemas naturais é fundamental para alcançar os objetivos de um desenvolvimento mais sustentável para a zona costeira do estado do Maranhão.

IV. REFERÊNCIAS

- Albert et al. (2016) Simon Albert, Javier X Leon, Alistair R Grinham, John A Church, Badin R Gibbes e Colin D Woodroffe. **Interactions between sea-level rise and wave exposure on reef island dynamics in the solomon islands**. *Environmental Research Letters*, 11(5): 054011. doi: 10.1088/1748-9326/11/5/054011.
- Aquino, AFONSO R. de et al. **Vulnerabilidade ambiental**. 2017
- Balica, Stefania F.; WRIGHT, Nigel George; VAN DER MEULEN, Frank. A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. **Natural hazards**, v. 64, p. 73-105, 2012.
- Becker, Austin et al. Climate change impacts on international seaports: knowledge, perceptions, and planning efforts among port administrators. **Climatic change**, v. 110, n. 1-2, p. 5-29, 2012.
- Becker, Austin; INOUE, Satoshi; FISCHER, Martin; SCHWEGLER, Ben. Climate change impacts on international seaports: knowledge, perceptions, and planning efforts among port administrators. **Climatic Change**, [S.L.], v. 110, n. 1-2, p. 5-29, 5 mar. 2011. Springer Science and Business Media LLC.
- Brooks, Mary R.; FAUST, Peter. **50 years of review of maritime transport, 1968-2018: Reflecting on the past, exploring the future**. 2018.
- Camargo, Suzana J. *et al.* Global and Regional Aspects of Tropical Cyclone Activity in the CMIP5 Models. **Journal Of Climate**, [S.L.], v. 26, n. 24, p. 9880-9902, 2 dez. 2013. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-12-00549.1>.
- Chausson, A., et al., 2020: **Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation**. *Glob. Change Biol.*, **26**(11), 6134–6155, doi:10.1111/gcb.15310.
- CHAUSSON, Alexandre et al. Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. **Global Change Biology**, v. 26, n. 11, p. 6134-6155, 2020.
- Ciclones extratropicais sobre o sudoeste do oceano atlântico sul: projeções HadGEM2-ES e RegCM4 Int. *J. Climatol.* 38 (6) (2018) , pp . 2866-2879,10.1002/joc.5468
- Czizeweski, A. C. **Correntes e energia de marés no Golfão Maranhense, Brasil**. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemática, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2019.
- Davtalab, Rahman *et al.* Sea Level Rise Effect on Groundwater Rise and Stormwater Retention Pond Reliability. **Water**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 1129, 15 abr. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12041129>.
- Donato, D., Kauffman, J.B., Murdiyarto, D., Kurnianto, S., Stidham, M., Kanninen, M., 2011. **Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics**. *Nat. Geosci.* <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>.
- Barbier, E.B. **Climate change impacts on rural poverty in low-elevation coastal zones**. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 165 (2015), pp. A1-A13
- Eisenack, K. et al. Adaptation to climate change in the transport sector: a review of actions and actors. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 17, p. 451-469, 2012.

Ewel, K.C., Twilley, R.R., Ong, J.E., Ecology, G., Letters, B., Mangrove, F., 1998. **Different Kinds of Mangrove Forests Provide Different Goods and Services**. *Glob. Ecol. Biogeogr. Lett.* 7, 83–94.

Ferreira, H. O. (1988) **Contribuição ao Estudo das Correntes de Maré dos Estreitos dos Coqueiros e Mosquitos, Maranhão, Brasil**. “Trabalho realizado em decorrência de contrato de prestação de serviços entre a Universidade Federal do Maranhão e a Alumar (Alcoa Alumínio S/A e Billiton Metais S/A), Relatório Técnico, São Luís – MA.

Hanson, Susan E.; Nicholls, Robert 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. e2020EF001543, 2020.

Hauer, Mathew E. et al. Sea-level rise and human migration. **Nature Reviews Earth & Environment**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 28-39, jan. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s43017-019-0002-9>.

Hossain, Babul *et al.* Climate change induced extreme flood disaster in Bangladesh: implications on people's livelihoods in the char village and their coping mechanisms. **Progress In Disaster Science**, [S.L.], v. 6, p. 100079, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100079.htm>. Acesso em fevereiro/2023.

Hurk, Bart van Den *et al.* Living with sea-level rise in North-West Europe: science-policy challenges across scales. **Climate Risk Management**, [S.L.], v. 35, p. 100403, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crm.2022.100403>.

IPCC (2018) Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, et al. (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp., doi:10.1017/9781009157940.001.

IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

Izaguirre, C. et al. Climate change risk to global port operations. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 1, p. 14-20, 2021.

Kabisch, Nadja et al. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. **Ecology and society**, v. 21, n. 2, 2016.

Kreienkamp, Frank et al. **Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021**. 2021.

Lee, S.Y., 2008. Mangrove macrobenthos: Assemblages, services, and linkages. *J. Sea Res.* 59, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2007.05.002>

- Lee, S.Y., Primavera, J.H., Dahdouh-Guebas, F., Mckee, K., Bosire, J.O., Cannicci, S., Diele, K., Fromard, F., Koedam, N., Marchand, C., Mendelssohn, I., Mukherjee, N., Record, S., 2014. **Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: Areassessment.** *Glob. Ecol. Biogeogr.* 23, 726–743. <https://doi.org/10.1111/geb.12155>)
- Lima, F. A da V.; Souza, D. C. de. Climate change, seaports, and coastal management in Brazil: an overview of the policy framework. **Regional Studies In Marine Science**, [S.L.], v. 52, p. 102365, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102365>.
- Ling, S.D. and A.J. Hobday, 2019: National research planning accelerates relevance and immediacy of climate-adaptation science. *Mar. Freshw. Res.*, **70**(1), 62–70, doi:10.1071/MF17330.
- M. Montgomery **United Nations Population Fund: State of World Population 2007: Unleashing the Potential of Urban Growth** *Popul. Dev. Rev.*, 33 (3) (2007), pp. 639-641
- Manes, Stella *et al.* Nature as a solution for shoreline protection against coastal risks associated with ongoing sea-level rise. **Ocean & Coastal Management**, [S.L.], v. 235, p. 106487, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106487>
- Martyr-Koller, Rosanne *et al.* Loss and damage implications of sea-level rise on Small Island Developing States. **Current Opinion In Environmental Sustainability**, [S.L.], v. 50, p. 245-259, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2021.05.001>.
- Masson-Delmotte, Valérie *et al.* Climate change 2021: the physical science basis. **Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**, v. 2, 2021.
- Mcgranahan, Gordon *et al.* The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. **Environment And Urbanization**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 17-37, abr. 2007. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0956247807076960>.
- Medeiros, M. D.; Pereira, V. H. C.; Almeida, L. Q. **Áreas de Vulnerabilidade Ambiental na Zona Oeste de Natal/ RN/ Brasil.** *Revista GEONORTE, Edição Especial*, v. 1, n. 4, p. 474-486. 2012.
- Mohammed, R., Scholz, M., 2018. **Critical review of salinity intrusion in rivers and estuaries.** *J. Water Clim. Chang.* 9, 1–16. <https://doi.org/10.2166/wcc.2017.334>.
- Muehe, D. (2001). **Crítérios morfodinâmicos para o estabelecimento de limites da orla costeira para fins de gerenciamento.** *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2(1):35-44. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v2i1.6>
- Muehe, Dieter *et al.* Avaliação da vulnerabilidade física da orla costeira em nível local, tomando como exemplo o arco praial entre Rio das Ostras e o Cabo Búzios/RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 2, 2011.
- Nascimento, D. M. C.; Dominguez, J. M. L. **Avaliação da vulnerabilidade ambiental como instrumento de gestão costeira nos municípios de Belmonte e Canavieiras, Bahia.** *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, n. 3, p. 395-408. 2009.
- Nevermann, H. *et al.* Land loss implications of sea level rise along the coastline of Colombia under different climate change scenarios. **Climate Risk Management**, [S.L.], v. 39, p. 100470, 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crm.2022.100470>.

Nicholls, R.; Cazenave, A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, 328(5985): 1517–1520. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1185782>

Nicholls, R. J. *et al.* Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, [S.L.], v. 328, n. 5985, p. 1517-1520, 18 jun. 2010. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1185782>.

Nóbrega, M. R. R. *et al.* Impacto das Mudanças Climáticas na Aridez da Bacia Estendida do rio São Francisco, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2022. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786371003>.

Oswald, M. Literature Review: Transportation Adaptation in Response to Climate Change. **University of Delaware, University Transportation Center: Washington, DC, USA**, 2009.

Perez, E. C. de *et al.* Adapting to climate change through anticipatory action: the potential use of weather-based early warnings. *Weather And Climate Extremes*, [S.L.], v. 38, p. 100508, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2022.100508>.

Pinheiro, J. M. **Análise do Sistema Costeiro da Ilha do Maranhão**. Anais do IV Simpósio Nacional de Geomorfologia. São Luís-MA, 2002.

Philip, S. Y. *et al.* Rapid attribution analysis of the extraordinary heat wave on the Pacific coast of the US and Canada in June 2021. *Earth System Dynamics*, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 1689-1713, 8 dez. 2022. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/esd-13-1689-2022>.

Prandle, D., Lane, A., 2015. Sensitivity of estuaries to sea level rise: Vulnerability indices. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 160, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.04.001>

Relatório Ambiental – eco portos na mira 2019. Disponível em: <https://www.espo.be/media/EnvironmentalReport-2019FINAL.pdf>

Relatório de sustentabilidade dos portos mundiais 2020. Disponível em: <https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/WORLD-PORTS-SUSTAINABILITY-REPORT-2020-FIN.pdf>

Robins, P.E., Skov, M.W., Lewis, M.J., Giménez, L., Davies, A.G., Malham, S.K., Neill, S.P., McDonald, J.E., Whitton, T.A., Jackson, S.E., Jago, C.F., 2016. Impact of climate change on UK estuaries: A review of past trends and potential projections. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 169, 119–135. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.016>

Roy, P. *et al.* Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations. *Journal Of Environmental Management*, [S.L.], v. 330, p. 117187, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117187>.

Roy, P. *et al.* Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations. *Journal Of Environmental Management*, [S.L.], v. 330, p. 117187, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117187>.

S. Fagherazzi, G. Mariotti, N. Leonardi, A. Canestrelli, W. Nardin, W.S. Kearney **Salt Marsh Dynamics in a Period of Accelerated Sea Level Rise** *J. Geophys. Res. - Earth Surf.*, 125 (8) (2020), [10.1029/2019JF005200](https://doi.org/10.1029/2019JF005200)

Seddon, N., et al., 2020: **Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges**. *Philos. Trans. Royal Soc. B Biol. Sci.*, **375**(1794), 20190120, doi:10.1098/rstb.2019.0120.

The Open University, 1999. **Waves, Tides and Shallow Water Processes, second edition**. Butterworth-Heinemann, Oxford, 227 pp.

Thurman, H.V. **Introductory Oceanography**. New York, NY: Macmillan. p. 252-276. 1994.

Van Oldenborgh, Geert Jan *et al.* Attribution of extreme rainfall from Hurricane Harvey, August 2017. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 12, n. 12, p. 124009, 1 dez. 2017. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa9ef2>.

Van Oldenborgh, Geert Jan *et al.* Attribution of the Australian bushfire risk to anthropogenic climate change. **Natural Hazards And Earth System Sciences**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 941-960, 11 mar. 2021. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-21-941-2021>.

Vousdoukas et al.(2020) Michalis I. Vousdoukas, Roshanka Ranasinghe, Lorenzo Men-taschi, Theocharis A. Plomaritis, Panagiotis Athanasiou, Arjen Luijendijk e Luc Feyen. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*,10(3):260–263. doi: 10.1038/s41558-020-0697-0. URL <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>. Citado na pág. 3

WALTON, M.E.M.; SAMONTE-TAN, G.P.B.; PRIMAVERA, J. H.; EDWARDS-JONES, G.; LE VAY, L. Are mangroves worth replanting? The direct economic benefits of a community-based reforestation. *Environmental Conservation* 33 (4): 335–343, 2006.

Wilson, R.S., A. Herziger, M. Hamilton and J.S. Brooks, 2020b: From incremental to transformative adaptation in individual responses to climate-exacerbated hazards. *Nat. Clim. Change*, **10**(3), 200–208, doi:10.1038/s41558-020-0691-6.

WORTLEY, L.; HERO, J.M.; HOWES, M. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restoration Ecology*, vol. 21, n. 5, 537- 543, 2014.

V. APÊNDICES

1. CERTIFICADOS DE PARTICIPAÇÕES EM EVENTOS



Certificado

XV OMARSAT

Certifico que TAYSSA RAUANNY SILVA JANSEN apresentou o trabalho intitulado “*Comportamento e Defasagem da Maré Astronômica no Golfão Maranhense – Brasil*” na modalidade pôster durante o XV Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite, no período de 28 a 30 de novembro de 2023.





CC(RM3-1) Marcos TONELLI
Enc. Divisão de Oceanografia Física - IEAPM

XV Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite



Rede Nacional de Observação e Monitoramento Oceânico

CERTIFICADO

Certificamos que **Tayssa Rauanny Silva Jansen**, portador(a) do CPF 045.822.643-28, participou da **Escola de Verão ReNOMO 2024** com o curso de '**Análises de Séries Temporais em Oceanografia**' com carga horária de 60h. O evento foi promovido pela ReNOMO (Rede Nacional de Observação e Monitoramento Oceânico) no período de 26 de fevereiro a 1º de março de 2024, no Labomar-UFC, em Fortaleza-CE. O curso teve como ministrantes os professores André Belém (UFF) e Carlos Teixeira (UFC).



André Belém
Universidade Federal Fluminense (UFF)
Prof. Ministrante do Curso



Carlos A. E. Garcia
Coordenador da ReNOMO



Carlos Teixeira
Universidade Federal do Ceará (UFC)
Prof. Ministrante do Curso



Rede Nacional de Observação e Monitoramento Oceânico

Ementa do curso: Análise de Séries Temporais em Oceanografia

Módulo 1: Fundamentos

- Escalas de tempo e espaço de processos oceanográficos.
- Estatística no domínio do tempo: média, variância, desvio padrão, autocovariância, autocorrelação.
- Erros de amostragem e técnicas de extração de dados de diferentes fontes (SIMCosta, PNBOIA, PIRATA, National Data Buoy Center) para um dataframe.
- Manipulação de dados com Pandas, Geopandas e Xarray.

Módulo 2: Manipulação Avançada de Dados

- Tipos de variáveis, módulos, sequências, listas e Booleans.
- Fatiamento de dados 3D e 4D usando Xarray e NetCDF.

Módulo 4: Análise de Sinal e Ruído

- Aplicação de filtros de controle de qualidade de dados.
- Domínio do tempo versus domínio da frequência (transformada de Fourier).
- Introdução à análise de séries temporais usando wavelets, cross-wavelets e EOF (Empirical Orthogonal Functions).

Módulo 5: Análise Avançada de Séries Temporais

- Prática de análise de dados combinados.
- Combinação de séries temporais sobre dados espaciais.
- Estatística Bayesiana e Hidden Markov Chains para modelos autoregressivos.

2. COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO PRIMEIRO CAPÍTULO

RSMA-D-24-00717 - Confirming your submission to Regional Studies in Marine Science > Caixa de entrada x



Regional Studies in Marine Science <em@editorialmanager.com>

para mim ▾



Traduza para o português



This is an automated message.

ASTRONOMICAL TIDE PROPAGATION IN THE MARANHENSE GULF – BRAZIL

Dear MSc Jansen,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Regional Studies in Marine Science. It has been assigned the following manuscript number: **RSMA-D-24-00717**.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/rsma/>, and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Regional Studies in Marine Science

FAQ: How can I reset a forgotten password?

https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/28452/supporthub/publishing/

For further assistance, please visit our customer service site: <https://service.elsevier.com/app/home/supporthub/publishing/>

Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about Editorial Manager via interactive tutorials. You can also talk 24/7 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email

This journal uses the Elsevier Article Transfer Service. This means that if an editor feels your manuscript is more suitable for an alternative journal, then you might be asked to consider transferring the manuscript to such a journal. The recommendation might be provided by a Journal Editor, a dedicated Scientific Managing Editor, a tool assisted recommendation, or a combination. For more details see the journal guide for authors.

At Elsevier, we want to help all our authors to stay safe when publishing. Please be aware of fraudulent messages requesting money in return for the publication of your paper. If you are publishing open access with Elsevier, bear in mind that we will never request payment before the paper has been accepted. We have prepared some guidelines (<https://www.elsevier.com/connect/authors-update/seven-top-tips-on-stopping-apc-scams>) that you may find helpful, including a short video on Identifying fake acceptance letters (<https://www.youtube.com/watch?v=o5l8thD9XtE>). Please remember that you can contact Elsevier's Researcher Support team (<https://service.elsevier.com/app/home/supporthub/publishing/>) at any time if you have questions about your manuscript, and you can log into Editorial Manager to check the status of your manuscript (https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/29155/c/10530/supporthub/publishing/kw/status/) #AU_RSMA#

To ensure this email reaches the intended recipient, please do not delete the above code

3. NORMAS E DIRETRIZES PARA SUBMISSÃO DE MANUSCRITO DO CAPÍTULO 1

Submission checklist

You can use this list to carry out a final check of your submission before you send it to the journal for review. Please check the relevant section in this Guide for Authors for more details.

Ensure that the following items are present:

One author has been designated as the corresponding author with contact details:

- E-mail address
- Full postal address

All necessary files have been uploaded:

Manuscript:

- Include keywords
- All figures (include relevant captions)
- All tables (including titles, description, footnotes)
- Ensure all figure and table citations in the text match the files provided
- Indicate clearly if color should be used for any figures in print

Graphical Abstracts / Highlights files (where applicable)

Supplemental files (where applicable)

Further considerations

- Manuscript has been 'spell checked' and 'grammar checked'
- All references mentioned in the Reference List are cited in the text, and vice versa
- Permission has been obtained for use of copyrighted material from other sources (including the Internet)
- A competing interests statement is provided, even if the authors have no competing interests to declare
- Journal policies detailed in this guide have been reviewed
- Referee suggestions and contact details provided, based on journal requirements

For further information, visit our [Support Center](#).

Disclosure instructions

Authors must disclose the use of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process by adding a statement at the end of their manuscript in the core manuscript file, before the References list. The statement should be placed in a new section entitled 'Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process'.

Statement: During the preparation of this work the author(s) used [NAME TOOL / SERVICE] in order to [REASON]. After using this tool/service, the author(s) reviewed and edited the content as needed and take(s) full responsibility for the content of the publication.

This declaration does not apply to the use of basic tools for checking grammar, spelling, references etc. If there is nothing to disclose, there is no need to add a statement.

Submission declaration and verification

Submission of an article implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract, a published lecture or academic thesis, see 'Multiple, redundant or concurrent publication' for more information), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. To verify compliance, your article may be checked by Crossref Similarity Check and other originality or duplicate checking software.

Preprints

Please note that preprints can be shared anywhere at any time, in line with Elsevier's [sharing policy](#). Sharing your preprints e.g. on a preprint server will not count as prior publication (see 'Multiple, redundant or concurrent publication' for more information).

Preprint posting on SSRN

In support of [Open Science](#), this journal offers its authors a free preprint posting service. Preprints provide early registration and dissemination of your research, which facilitates early citations and collaboration.

Before you begin

Ethics in publishing

Please see our information on [Ethics in publishing](#).

Declaration of competing interest

Corresponding authors, on behalf of all the authors of a submission, must disclose any financial and personal relationships with other people or organizations that could inappropriately influence (bias) their work. Examples of potential conflicts of interest include employment, consultancies, stock ownership, honoraria, paid expert testimony, patent applications/registrations, and grants or other funding. All authors, including those *without* competing interests to declare, should provide the relevant information to the corresponding author (which, where relevant, may specify they have nothing to declare). Corresponding authors should then use [this tool](#) to create a shared statement and upload to the submission system at the Attach Files step.

Please do not convert the .docx template to another file type. Author signatures are not required.

Declaration of generative AI in scientific writing

The below guidance only refers to the writing process, and not to the use of AI tools to analyse and draw insights from data as part of the research process.

Where authors use generative artificial intelligence (AI) and AI-assisted technologies in the writing process, authors should only use these technologies to improve readability and language. Applying the technology should be done with human oversight and control, and authors should carefully review and edit the result, as AI can generate authoritative-sounding output that can be incorrect, incomplete or biased. AI and AI-assisted technologies should not be listed as an author or co-author, or be cited as an author. Authorship implies responsibilities and tasks that can only be attributed to and performed by humans, as outlined in Elsevier's [AI policy for authors](#).

Authors should disclose in their manuscript the use of AI and AI-assisted technologies in the writing process by following the instructions below. A statement will appear in the published work. Please note that authors are ultimately responsible and accountable for the contents of the work.

During submission to Editorial Manager, you can choose to release your manuscript publicly as a preprint on the preprint server SSRN. Your choice will have no effect on the editorial process or outcome with the journal. Please note that the corresponding author is expected to seek approval from all co-authors before agreeing to release the manuscript publicly on SSRN.

You will be notified via email when your preprint is posted online and a Digital Object Identifier (DOI) is assigned. Your preprint will remain globally available free to read whether the journal accepts or rejects your manuscript.

For more information about posting to SSRN, please consult the [SSRN Terms of Use](#) and [FAQs](#).

Use of inclusive language

Inclusive language acknowledges diversity, conveys respect to all people, is sensitive to differences, and promotes equal opportunities. Content should make no assumptions about the beliefs or commitments of any reader; contain nothing which might imply that one individual is superior to another on the grounds of age, gender, race, ethnicity, culture, sexual orientation, disability or health condition; and use inclusive language throughout. Authors should ensure that writing is free from bias, stereotypes, slang, reference to dominant culture and/or cultural assumptions. We advise to seek gender neutrality by using plural nouns ("clinicians, patients/clients") as default/wherever possible to avoid using "he, she," or "he/she." We recommend avoiding the use of descriptors that refer to personal attributes such as age, gender, race, ethnicity, culture, sexual orientation, disability or health condition unless they are relevant and valid. When coding terminology is used, we recommend to avoid offensive or exclusionary terms such as "master", "slave", "blacklist" and "whitelist". We suggest using alternatives that are more appropriate and (self-) explanatory such as "primary", "secondary", "blocklist" and "allowlist". These guidelines are meant as a point of reference to help identify appropriate language but are by no means exhaustive or definitive.

Reporting sex- and gender-based analyses

Reporting guidance

For research involving or pertaining to humans, animals or eukaryotic cells, investigators should integrate sex and gender-based analyses (SGBA) into their research design according to funder/sponsor requirements and best practices within a field. Authors should address the sex and/or gender dimensions of their research in

their article. In cases where they cannot, they should discuss this as a limitation to their research's generalizability. Importantly, authors should explicitly state what definitions of sex and/or gender they are applying to enhance the precision, rigor and reproducibility of their research and to avoid ambiguity or conflation of terms and the constructs to which they refer (see Definitions section below). Authors can refer to the [Sex and Gender Equity in Research \(SAGER\) guidelines](#) and the [SAGER guidelines checklist](#). These offer systematic approaches to the use and editorial review of sex and gender information in study design, data analysis, outcome reporting and research interpretation - however, please note there is no single, universally agreed-upon set of guidelines for defining sex and gender.

Definitions

Sex generally refers to a set of biological attributes that are associated with physical and physiological features (e.g., chromosomal genotype, hormonal levels, internal and external anatomy). A binary sex categorization (male/female) is usually designated at birth ("sex assigned at birth"), most often based solely on the visible external anatomy of a newborn. Gender generally refers to socially constructed roles, behaviors, and identities of women, men and gender-diverse people that occur in a historical and cultural context and may vary across societies and over time. Gender influences how people view themselves and each other, how they behave and interact and how power is distributed in society. Sex and gender are often incorrectly portrayed as binary (female/male or woman/man) and unchanging whereas these constructs actually exist along a spectrum and include additional sex categorizations and gender identities such as people who are intersex/have differences of sex development (DSD) or identify as non-binary. Moreover, the terms "sex" and "gender" can be ambiguous—thus it is important for authors to define the manner in which they are used. In addition to this definition guidance and the SAGER guidelines, the [resources on this page](#) offer further insight around sex and gender in research studies.

Author contributions

For transparency, we require corresponding authors to provide co-author contributions to the manuscript using the relevant CRediT roles. The [CRediT taxonomy](#) includes 14 different roles describing each contributor's specific contribution to the scholarly output. The roles are: Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Funding acquisition; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing - original draft; and Writing - review & editing. Note that not all roles may apply to every manuscript, and authors may have contributed through multiple

Subscribers may reproduce tables of contents or prepare lists of articles including abstracts for internal circulation within their institutions. [Permission](#) of the Publisher is required for resale or distribution outside the institution and for all other derivative works, including compilations and translations. If excerpts from other copyrighted works are included, the author(s) must obtain written permission from the copyright owners and credit the source(s) in the article. Elsevier has [preprinted forms](#) for use by authors in these cases.

For gold open access articles: Upon acceptance of an article, authors will be asked to complete a 'License Agreement' ([more information](#)). Permitted third party reuse of gold open access articles is determined by the author's choice of [user license](#).

Author rights

As an author you (or your employer or institution) have certain rights to reuse your work. [More information](#).

Elsevier supports responsible sharing

Find out how you can [share your research](#) published in Elsevier journals.

Role of the funding source

You are requested to identify who provided financial support for the conduct of the research and/or preparation of the article and to briefly describe the role of the sponsor(s), if any, in study design; in the collection, analysis and interpretation of data; in the writing of the report; and in the decision to submit the article for publication. If the funding source(s) had no such involvement, it is recommended to state this.

Open access

Please visit our [Open Access page](#) for more information about open access publishing in this journal.

Elsevier Researcher Academy

[Researcher Academy](#) is a free e-learning platform designed to support early and mid-career researchers throughout their research journey. The "Learn" environment at Researcher Academy offers several interactive modules, webinars, downloadable guides and resources to guide you through the process of writing for research and going through peer review. Feel free to use these free resources to improve your submission and navigate the publication process with ease.

may apply to every manuscript, and authors may have contributed through multiple roles. [More details and an example](#).

Changes to authorship

Authors are expected to consider carefully the list and order of authors **before** submitting their manuscript and provide the definitive list of authors at the time of the original submission. Any addition, deletion or rearrangement of author names in the authorship list should be made **only before** the manuscript has been accepted and only if approved by the journal Editor. To request such a change, the Editor must receive the following from the **corresponding author**: (a) the reason for the change in author list and (b) written confirmation (e-mail, letter) from all authors that they agree with the addition, removal or rearrangement. In the case of addition or removal of authors, this includes confirmation from the author being added or removed.

Only in exceptional circumstances will the Editor consider the addition, deletion or rearrangement of authors **after** the manuscript has been accepted. While the Editor considers the request, publication of the manuscript will be suspended. If the manuscript has already been published in an online issue, any requests approved by the Editor will result in a corrigendum.

Article transfer service

This journal uses the Elsevier Article Transfer Service to find the best home for your manuscript. This means that if an editor feels your manuscript is more suitable for an alternative journal, you might be asked to consider transferring the manuscript to such a journal. The recommendation might be provided by a Journal Editor, a dedicated [Scientific Managing Editor](#), a tool assisted recommendation, or a combination. If you agree, your manuscript will be transferred, though you will have the opportunity to make changes to the manuscript before the submission is complete. Please note that your manuscript will be independently reviewed by the new journal. [More information](#).

Copyright

Upon acceptance of an article, authors will be asked to complete a 'Journal Publishing Agreement' (see [more information](#) on this). An e-mail will be sent to the corresponding author confirming receipt of the manuscript together with a 'Journal Publishing Agreement' form or a link to the online version of this agreement.

Language (usage and editing services)

Please write your text in good English (American or British usage is accepted, but not a mixture of these). Authors who feel their English language manuscript may require editing to eliminate possible grammatical or spelling errors and to conform to correct scientific English may wish to use the [Language Editing service](#) available from Elsevier's Language Services.

Submission

Our online submission system guides you stepwise through the process of entering your article details and uploading your files. The system converts your article files to a single PDF file used in the peer-review process. Editable files (e.g., Word, LaTeX) are required to typeset your article for final publication. All correspondence, including notification of the Editor's decision and requests for revision, is sent by e-mail.

Submit your article

Please submit your article via <https://www.editorialmanager.com/rsma/default.aspx>.

Suggesting reviewers

Please submit the names and institutional e-mail addresses of several potential reviewers.

You should not suggest reviewers who are colleagues, or who have co-authored or collaborated with you during the last three years. Editors do not invite reviewers who have potential competing interests with the authors. Further, in order to provide a broad and balanced assessment of the work, and ensure scientific rigor, please suggest diverse candidate reviewers who are located in different countries/regions from the author group. Also consider other diversity attributes e.g. gender, race and ethnicity, career stage, etc. Finally, you should not include existing members of the journal's editorial team, of whom the journal are already aware.

Note: the editor decides whether or not to invite your suggested reviewers.

Preparation

Queries

For questions about the editorial process (including the status of manuscripts under review) or for technical support on submissions, please visit our [Support Center](#).

Peer review

This journal operates a single anonymized review process. All contributions will be initially assessed by the editor for suitability for the journal. Papers deemed suitable are then typically sent to a minimum of two independent expert reviewers to assess the scientific quality of the paper. The Editor is responsible for the final decision regarding acceptance or rejection of articles. The Editor's decision is final. Editors are not involved in decisions about papers which they have written themselves or have been written by family members or colleagues or which relate to products or services in which the editor has an interest. Any such submission is subject to all of the journal's usual procedures, with peer review handled independently of the relevant editor and their research groups. [More information on types of peer review.](#)

Use of word processing software

It is important that the file be saved in the native format of the word processor used. The text should be in single-column format. Keep the layout of the text as simple as possible. Most formatting codes will be removed and replaced on processing the article. In particular, do not use the word processor's options to justify text or to hyphenate words. However, do use bold face, italics, subscripts, superscripts etc. When preparing tables, if you are using a table grid, use only one grid for each individual table and not a grid for each row. If no grid is used, use tabs, not spaces, to align columns. The electronic text should be prepared in a way very similar to that of conventional manuscripts (see also the [Guide to Publishing with Elsevier](#)). Note that source files of figures, tables and text graphics will be required whether or not you embed your figures in the text. See also the section on Electronic artwork. To avoid unnecessary errors you are strongly advised to use the 'spell-check' and 'grammar-check' functions of your word processor.

Article structure

Subdivision - numbered sections

Divide your article into clearly defined and numbered sections. Subsections should be numbered 1.1 (then 1.1.1, 1.1.2, ...), 1.2, etc. (the abstract is not included in section numbering). Use this numbering also for internal cross-referencing: do not just refer to 'the text'. Any subsection may be given a brief heading. Each heading should appear on its own separate line.

- **Author names and affiliations.** Please clearly indicate the given name(s) and family name(s) of each author and check that all names are accurately spelled. You can add your name between parentheses in your own script behind the English transliteration. Present the authors' affiliation addresses (where the actual work was done) below the names. Indicate all affiliations with a lower-case superscript letter immediately after the author's name and in front of the appropriate address. Provide the full postal address of each affiliation, including the country name and, if available, the e-mail address of each author.
- **Corresponding author.** Clearly indicate who will handle correspondence at all stages of refereeing and publication, also post-publication. This responsibility includes answering any future queries about Methodology and Materials. **Ensure that the e-mail address is given and that contact details are kept up to date by the corresponding author.**
- **Present/permanent address.** If an author has moved since the work described in the article was done, or was visiting at the time, a 'Present address' (or 'Permanent address') may be indicated as a footnote to that author's name. The address at which the author actually did the work must be retained as the main, affiliation address. Superscript Arabic numerals are used for such footnotes.

Highlights

Highlights are optional yet highly encouraged for this journal, as they increase the discoverability of your article via search engines. They consist of a short collection of bullet points that capture the novel results of your research as well as new methods that were used during the study (if any). Please have a look at the [example Highlights](#).

Highlights should be submitted in a separate editable file in the online submission system. Please use 'Highlights' in the file name and include 3 to 5 bullet points (maximum 85 characters, including spaces, per bullet point).

Abstract

A concise and factual abstract is required. The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions. An abstract is often presented separately from the article, so it must be able to stand alone. For this reason, References should be avoided, but if essential, then cite the author(s) and year(s). Also, non-standard or uncommon abbreviations should be avoided, but if essential they must be defined at their first mention in the abstract itself.

Introduction

State the objectives of the work and provide an adequate background, avoiding a detailed literature survey or a summary of the results.

Material and methods

Provide sufficient details to allow the work to be reproduced by an independent researcher. Methods that are already published should be summarized, and indicated by a reference. If quoting directly from a previously published method, use quotation marks and also cite the source. Any modifications to existing methods should also be described.

Theory/calculation

A Theory section should extend, not repeat, the background to the article already dealt with in the Introduction and lay the foundation for further work. In contrast, a Calculation section represents a practical development from a theoretical basis.

Results

Results should be clear and concise.

Discussion

This should explore the significance of the results of the work, not repeat them. A combined Results and Discussion section is often appropriate. Avoid extensive citations and discussion of published literature.

Conclusions

The main conclusions of the study may be presented in a short Conclusions section, which may stand alone or form a subsection of a Discussion or Results and Discussion section.

Appendices

If there is more than one appendix, they should be identified as A, B, etc. Formulae and equations in appendices should be given separate numbering: Eq. (A.1), Eq. (A.2), etc.; in a subsequent appendix, Eq. (B.1) and so on. Similarly for tables and figures: Table A.1; Fig. A.1, etc.

Essential title page information

- **Title.** Concise and informative. Titles are often used in information-retrieval systems. Avoid abbreviations and formulae where possible.
- **Author names and affiliations.** Please clearly indicate the given name(s) and family

Keywords

Immediately after the abstract, provide a maximum of 6 keywords, using American spelling and avoiding general and plural terms and multiple concepts (avoid, for example, 'and', 'of'). Be sparing with abbreviations: only abbreviations firmly established in the field may be eligible. These keywords will be used for indexing purposes.

Abbreviations

Define abbreviations that are not standard in this field in a footnote to be placed on the first page of the article. Such abbreviations that are unavoidable in the abstract must be defined at their first mention there, as well as in the footnote. Ensure consistency of abbreviations throughout the article.

Acknowledgements

Collate acknowledgements in a separate section at the end of the article before the references and do not, therefore, include them on the title page, as a footnote to the title or otherwise. List here those individuals who provided help during the research (e.g., providing language help, writing assistance or proof reading the article, etc.).

Formatting of funding sources

List funding sources in this standard way to facilitate compliance to funder's requirements:

Funding: This work was supported by the National Institutes of Health [grant numbers xxxx, yyyy]; the Bill & Melinda Gates Foundation, Seattle, WA [grant number zzzz]; and the United States Institutes of Peace [grant number aaaa].

It is not necessary to include detailed descriptions on the program or type of grants and awards. When funding is from a block grant or other resources available to a university, college, or other research institution, submit the name of the institute or organization that provided the funding.

If no funding has been provided for the research, it is recommended to include the following sentence:

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Units

Follow internationally accepted rules and conventions: use the international system of units (SI). If other units are mentioned, please give their equivalent in SI.

Math formulae

Please submit math equations as editable text and not as images. Present simple formulae in line with normal text where possible and use the solidus (/) instead of a horizontal line for small fractional terms, e.g., X/Y. In principle, variables are to be presented in italics. Powers of e are often more conveniently denoted by exp. Number consecutively any equations that have to be displayed separately from the text (if referred to explicitly in the text).

Footnotes

Footnotes should be used sparingly. Number them consecutively throughout the article. Many word processors can build footnotes into the text, and this feature may be used. Otherwise, please indicate the position of footnotes in the text and list the footnotes themselves separately at the end of the article. Do not include footnotes in the Reference list.

Artwork

Electronic artwork

General points

- Make sure you use uniform lettering and sizing of your original artwork.
- Embed the used fonts if the application provides that option.
- Aim to use the following fonts in your illustrations: Arial, Courier, Times New Roman, Symbol, or use fonts that look similar.
- Number the illustrations according to their sequence in the text.
- Use a logical naming convention for your artwork files.
- Provide captions to illustrations separately.
- Size the illustrations close to the desired dimensions of the published version.
- Submit each illustration as a separate file.
- Ensure that color images are accessible to all, including those with impaired color vision.

A detailed [guide on electronic artwork](#) is available.

You are urged to visit this site; some excerpts from the detailed information are given here.

Formats

If your electronic artwork is created in a Microsoft Office application (Word,

Tables

Please submit tables as editable text and not as images. Tables can be placed either next to the relevant text in the article, or on separate page(s) at the end. Number tables consecutively in accordance with their appearance in the text and place any table notes below the table body. Be sparing in the use of tables and ensure that the data presented in them do not duplicate results described elsewhere in the article. Please avoid using vertical rules and shading in table cells.

References

Citation in text

Please ensure that every reference cited in the text is also present in the reference list (and vice versa). Any references cited in the abstract must be given in full. Unpublished results and personal communications are not recommended in the reference list, but may be mentioned in the text. If these references are included in the reference list they should follow the standard reference style of the journal and should include a substitution of the publication date with either 'Unpublished results' or 'Personal communication'. Citation of a reference as 'in press' implies that the item has been accepted for publication.

Reference links

Increased discoverability of research and high quality peer review are ensured by online links to the sources cited. In order to allow us to create links to abstracting and indexing services, such as Scopus, Crossref and PubMed, please ensure that data provided in the references are correct. Please note that incorrect surnames, journal/book titles, publication year and pagination may prevent link creation. When copying references, please be careful as they may already contain errors. Use of the DOI is highly encouraged.

A DOI is guaranteed never to change, so you can use it as a permanent link to any electronic article. An example of a citation using DOI for an article not yet in an issue is: VanDecar J.C., Russo R.M., James D.E., Ambeh W.B., Franke M. (2003). Aseismic continuation of the Lesser Antilles slab beneath northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research*, <https://doi.org/10.1029/2001JB000884>. Please note the format of such citations should be in the same style as all other references in the paper.

Web references

As a minimum, the full URL should be given and the date when the reference was last accessed. Any further information, if known (DOI, author names, dates, reference to a

A detailed [guide on electronic artwork](#) is available.

You are urged to visit this site; some excerpts from the detailed information are given here.

Formats

If your electronic artwork is created in a Microsoft Office application (Word, PowerPoint, Excel) then please supply 'as is' in the native document format. Regardless of the application used other than Microsoft Office, when your electronic artwork is finalized, please 'Save as' or convert the images to one of the following formats (note the resolution requirements for line drawings, halftones, and line/halftone combinations given below):

EPS (or PDF): Vector drawings, embed all used fonts.

TIFF (or JPEG): Color or grayscale photographs (halftones), keep to a minimum of 300 dpi.

TIFF (or JPEG): Bitmapped (pure black & white pixels) line drawings, keep to a minimum of 1000 dpi.

TIFF (or JPEG): Combinations bitmapped line/half-tone (color or grayscale), keep to a minimum of 500 dpi.

Please do not:

- Supply files that are optimized for screen use (e.g., GIF, BMP, PICT, WPG); these typically have a low number of pixels and limited set of colors;
- Supply files that are too low in resolution;
- Submit graphics that are disproportionately large for the content.

Color artwork

Please make sure that artwork files are in an acceptable format (TIFF (or JPEG), EPS (or PDF), or MS Office files) and with the correct resolution. If, together with your accepted article, you submit usable color figures then Elsevier will ensure, at no additional charge, that these figures will appear in color online (e.g., ScienceDirect and other sites) regardless of whether or not these illustrations are reproduced in color in the printed version. **For color reproduction in print, you will receive information regarding the costs from Elsevier after receipt of your accepted article.** Please indicate your preference for color: in print or online only.

[Further information on the preparation of electronic artwork.](#)

Figure captions

Ensure that each illustration has a caption. Supply captions separately, not attached to the figure. A caption should comprise a brief title (**not** on the figure itself) and a description of the illustration. Keep text in the illustrations themselves to a minimum but explain all symbols and abbreviations used.

Data references

This journal encourages you to cite underlying or relevant datasets in your manuscript by citing them in your text and including a data reference in your Reference List. Data references should include the following elements: author name(s), dataset title, data repository, version (where available), year, and global persistent identifier. Add [dataset] immediately before the reference so we can properly identify it as a data reference. The [dataset] identifier will not appear in your published article.

Preprint references

Where a preprint has subsequently become available as a peer-reviewed publication, the formal publication should be used as the reference. If there are preprints that are central to your work or that cover crucial developments in the topic, but are not yet formally published, these may be referenced. Preprints should be clearly marked as such, for example by including the word preprint, or the name of the preprint server, as part of the reference. The preprint DOI should also be provided.

References in a special issue

Please ensure that the words 'this issue' are added to any references in the list (and any citations in the text) to other articles in the same Special Issue.

Reference management software

Most Elsevier journals have their reference template available in many of the most popular reference management software products. These include all products that support Citation Style Language styles, such as Mendeley. Using citation plug-ins from these products, authors only need to select the appropriate journal template when preparing their article, after which citations and bibliographies will be automatically formatted in the journal's style. If no template is yet available for this journal, please follow the format of the sample references and citations as shown in this Guide. If you use reference management software, please ensure that you remove all field codes before submitting the electronic manuscript.

[More information on how to remove field codes from different reference management software](#)

.

Reference formatting

There are no strict requirements on reference formatting at submission. References can be in any style or format as long as the style is consistent. Where applicable, author(s) name(s), journal title/book title, chapter title/article title, year of publication, volume number/book chapter and the article number or pagination must be present. Use of DOI is highly encouraged. The reference style used by the journal will be applied to the accepted article by Elsevier at the proof stage. Note that missing data will be highlighted at proof stage for the author to correct. If you do wish to format the references yourself they should be arranged according to the following examples:

Reference style

Text: All citations in the text should refer to:

1. *Single author*: the author's name (without initials, unless there is ambiguity) and the year of publication;
2. *Two authors*: both authors' names and the year of publication;
3. *Three or more authors*: first author's name followed by 'et al.' and the year of publication.

Citations may be made directly (or parenthetically). Groups of references can be listed either first alphabetically, then chronologically, or vice versa.

Examples: 'as demonstrated (Allan, 2000a, 2000b, 1999; Allan and Jones, 1999).... Or, as demonstrated (Jones, 1999; Allan, 2000)... Kramer et al. (2010) have recently shown ...'

List: References should be arranged first alphabetically and then further sorted chronologically if necessary. More than one reference from the same author(s) in the same year must be identified by the letters 'a', 'b', 'c', etc., placed after the year of publication.

Examples:

Reference to a journal publication:

Van der Geer, J., Hanraads, J.A.J., Lupton, R.A., 2010. The art of writing a scientific article. *J. Sci. Commun.* 163, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.Sc.2010.00372>.

Reference to a journal publication with an article number:

Van der Geer, J., Hanraads, J.A.J., Lupton, R.A., 2018. The art of writing a scientific article. *Heliyon*. 19, e00205. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00205>.

Reference to a book:

Strunk Jr., W., White, E.B., 2000. *The Elements of Style*, fourth ed. Longman, New York.

Reference to a chapter in an edited book:

Mettam, G.R., Adams, L.B., 2009. How to prepare an electronic version of your article, in: Jones, B.S., Smith, R.Z. (Eds.), *Introduction to the Electronic Age*. E-Publishing Inc., New York, pp. 281–304.

Reference to a website:

Cancer Research UK, 1975. *Cancer statistics reports for the UK*.

<http://www.cancerresearchuk.org/aboutcancer/statistics/cancerstatsreport/> (accessed 13 March 2003).

Reference to a dataset:

[dataset] Oguro, M., Imahiro, S., Saito, S., Nakashizuka, T., 2015. Mortality data for Japanese oak wilt disease and surrounding forest compositions. *Mendeley Data*, v1. <https://doi.org/10.17632/kw98nb39r1>.

Reference to software:

Coon, E., Berndt, M., Jan, A., Svystsky, D., Atchley, A., Kikinzon, E., Harp, D., Manzini, G., Shelef, E., Lipnikov, K., Garimella, R., Xu, C., Moulton, D., Karra, S., Painter, S., Jafarov, E., & Molins, S., 2020. *Advanced Terrestrial Simulator (ATS) v0.88* (Version 0.88).

Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3727209>.

Journal abbreviations source

Journal names should be abbreviated according to the

Video

Elsevier accepts video material and animation sequences to support and enhance your scientific research. Authors who have video or animation files that they wish to submit with their article are strongly encouraged to include links to these within the body of the article. This can be done in the same way as a figure or table by referring to the video or animation content and noting in the body text where it should be placed. All submitted files should be properly labeled so that they directly relate to the video file's content. In order to ensure that your video or animation material is directly usable, please provide the file in one of our recommended file formats with a preferred maximum size of 150 MB per file, 1 GB in total. Video and animation files supplied will be published online in the electronic version of your article in Elsevier Web products, including ScienceDirect. Please supply 'stills' with your files: you can choose any frame from the video or animation or make a separate image. These will be used instead of standard icons and will personalize the link to your video data. For more detailed instructions please visit our video instruction pages. Note: since video and animation cannot be embedded in the print version of the journal, please provide text for both the electronic and the print version for the portions of the article that refer to this content.

Supplementary material

Supplementary material such as applications, images and sound clips, can be published with your article to enhance it. Submitted supplementary items are published exactly as they are received (Excel or PowerPoint files will appear as such online). Please submit your material together with the article and supply a concise, descriptive caption for each supplementary file. If you wish to make changes to supplementary material during any stage of the process, please make sure to provide an updated file. Do not annotate any corrections on a previous version. Please switch off the 'Track Changes' option in Microsoft Office files as these will appear in the published version.

Research data

This journal requires and enables you to share data that supports your research publication where appropriate, and enables you to interlink the data with your published articles. Research data refers to the results of observations or experimentation that validate research findings, which may also include software, code, models, algorithms, protocols, methods and other useful materials related to the project.

Below are a number of ways in which you can associate data with your article or make a statement about the availability of your data when submitting your manuscript. When sharing data in one of these ways, you are expected to cite the data in your manuscript and reference list. Please refer to the "References" section for

After acceptance

Online proof correction

To ensure a fast publication process of the article, we kindly ask authors to provide us with their proof corrections within two days. Corresponding authors will receive an e-mail with a link to our online proofing system, allowing annotation and correction of proofs online. The environment is similar to MS Word: in addition to editing text, you can also comment on figures/tables and answer questions from the Copy Editor. Web-based proofing provides a faster and less error-prone process by allowing you to directly type your corrections, eliminating the potential introduction of errors. If preferred, you can still choose to annotate and upload your edits on the PDF version. All instructions for proofing will be given in the e-mail we send to authors, including alternative methods to the online version and PDF. We will do everything possible to get your article published quickly and accurately. Please use this proof only for checking the typesetting, editing, completeness and correctness of the text, tables and figures. Significant changes to the article as accepted for publication will only be considered at this stage with permission from the Editor. It is important to ensure that all corrections are sent back to us in one communication. Please check carefully before replying, as inclusion of any subsequent corrections cannot be guaranteed. Proofreading is solely your responsibility.

Offprints

The corresponding author will, at no cost, receive a customized Share Link providing 50 days free access to the final published version of the article on ScienceDirect. The Share Link can be used for sharing the article via any communication channel, including email and social media. For an extra charge, paper offprints can be ordered via the offprint order form which is sent once the article is accepted for publication. Corresponding authors who have published their article gold open access do not receive a Share Link as their final published version of the article is available open access on ScienceDirect and can be shared through the article DOI link.

Author inquiries

Visit the [Elsevier Support Center](#) to find the answers you need. Here you will find everything from [Frequently Asked Questions](#) to ways to get in touch. You can also [check the status of your submitted article](#) or find out [when your accepted article will be published](#).