



MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO
CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO EM HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS

GABRIEL COUTINHO ALVES SANTOS

**ESTUDO E ANÁLISE DOS EFEITOS DO TSUNAMI DE TONGA NAS REGIÕES DE
IMBITUBA – SC, ARRAIAL DO CABO – RJ E SALVADOR – BA, COM APLICAÇÃO
DE TÉCNICAS DE FILTRAGEM DE DADOS DE NÍVEL DO MAR.**

ORIENTADOR: PROF. M.Sc. GREGÓRIO LUIZ GALVÃO TEIXEIRA
COORIENTADORA: OCEANÓGRAFA EDUARDA PINTO BORBA

Niterói – RJ, Brasil

2023

GABRIEL COUTINHO ALVES SANTOS

**ESTUDO E ANÁLISE DOS EFEITOS DO TSUNAMI DE TONGA NAS REGIÕES DE
IMBITUBA – SC, ARRAIAL DO CABO – RJ E SALVADOR – BA, COM APLICAÇÃO
DE TÉCNICAS DE FILTRAGEM DE DADOS DE NÍVEL DO MAR.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao corpo docente e técnico do Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino da Marinha do Brasil (CIAARA/MB), como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Oficial Hidrógrafo.

Orientador: Prof. M.Sc. Gregório Luiz Galvão Teixeira

Coorientadora: Oceanógrafa Eduarda Pinto Borba

NITERÓI – RJ, BRASIL

OUTUBRO DE 2023

Santos, Gabriel Coutinho Alves.

Estudo e análise dos efeitos do Tsunami de Tonga nas regiões de Imbituba – SC, Arraial do Cabo – RJ e Salvador – BA, através de filtragem e processamento de dados de nível do mar / Gabriel Coutinho Alves Santos – Rio de Janeiro: MB/CIAARA, 2023.

xi, 110 f.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Gregório Luiz Galvão Teixeira.

Coorientadora: Eduarda Pinto Borba.

Monografia – MB/CIAARA Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 96-104

1. Tsunami 2. Processamento 3. Análise,
Teixeira, Gregório Luiz Galvão., et al. II Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, CIAARA, Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais

**ESTUDO E ANÁLISE DOS EFEITOS DO TSUNAMI TONGA NAS REGIÕES DE
IMBITUBA – SC, ARRAIAL DO CABO – RJ E SALVADOR – BA, COM APLICAÇÃO
DE TÉCNICAS DE FILTRAGEM DE DADOS DE NÍVEL DO MAR.**

GABRIEL COUTINHO ALVES SANTOS

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE E TÉCNICO DO CENTRO DE
INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO DA MARINHA
DO BRASIL (CIAARA/MB) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE OFICIAL HIDRÓGRAFO.

Examinada por:

Prof. M.Sc. Gregório Luiz Galvão Teixeira
(CIAARA – DHN)

Oce. Eduarda Pinto Borba
(OCEANOGRAFIA FÍSICA - UERJ)

Prof. D.Sc. Alexandre Luiz Coelho
(CIAARA - DHN)

D.Sc. Teodósio das Neves Milisse Nzualo
Engenharia Oceânica (COPPE/UFRJ)

NITERÓI – RJ, BRASIL

OUTUBRO DE 2023

AGRADECIMENTOS

Neste momento, é com muita gratidão que quero expressar meus agradecimentos a todos que desempenharam um papel fundamental na concretização deste trabalho. Antes de tudo, minha mais profunda gratidão a Deus, que me proporcionou a energia e a sabedoria necessárias para enfrentar os desafios desta jornada.

À minha esposa, que esteve ao meu lado, apoiando-me de maneira inabalável, quero expressar meu apreço sincero. Sua presença constante e seu incentivo foram o alicerce sobre o qual construí este trabalho. Aos meus pais e toda minha família, cujo amor incondicional sempre me impulsionou, meu agradecimento eterno.

Ao meu orientador, o Professor Gregório, minha gratidão pelo seu comprometimento e pelo conhecimento valioso que compartilhou comigo. Sua orientação e experiência foram cruciais para a realização deste trabalho. À Duda, que ofereceu apoio e assistência sempre que necessário, meu profundo agradecimento.

Aos amigos que caminharam comigo ao longo desta jornada, meu agradecimento por sua amizade, encorajamento e suporte constante. Vocês foram uma fonte de inspiração e motivação.

Em resumo, agradeço a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o sucesso deste projeto. Sem a colaboração e o apoio de cada um de vocês, este trabalho não teria se tornado realidade. Muito obrigado!

RESUMO

SANTOS, Gabriel Coutinho Alves. **ESTUDO E ANÁLISE DOS EFEITOS DO TSUNAMI TONGA NAS REGIÕES DE IMBITUBA – SC, ARRAIAL DO CABO – RJ E SALVADOR – BA, COM APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE FILTRAGEM DE DADOS DE NÍVEL DO MAR.** 2023. 106p. Monografia (Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais) – Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, Niterói, Rio de Janeiro. 2023

O presente estudo se propôs a analisar os efeitos do Tsunami Tonga nas costas das regiões de Imbituba, Arraial do Cabo e Salvador, apesar de suas distâncias consideráveis do epicentro. Para a obtenção dos dados de nível do mar necessários a esta investigação, referentes ao mês de janeiro de 2022, contou-se com o Banco Nacional de Dados Oceânicos (BNDO), do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), e a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia, gerenciada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para entender a extensão e a natureza destes efeitos nas três regiões em questão, empregamos uma série de técnicas sofisticadas de análise de dados. Inicialmente, o controle de qualidade dos dados foi realizado utilizando o método QARTOD. Posteriormente, os dados foram submetidos ao Filtro de Thompson, que forneceu uma primeira camada de interpretação sobre o comportamento das ondas, com foco nas frequências do tsunami. Uma das principais técnicas empregadas foi a Decomposição de Modo Empírico (EMD). Através dela, foi possível decompor os sinais em suas Funções de Modo Intrínseco (MFIs). Cada uma destas MFIs foi submetida individualmente à Transformada de Fourier, proporcionando uma análise de frequência detalhada dos efeitos do tsunami. Além disso, para complementar essa análise, foi utilizada a Transformada *Wavelet*. Esta técnica permitiu identificar nuances nas oscilações do nível do mar em resposta ao tsunami. Os resultados obtidos evidenciaram variações significativas de cada região em relação ao tsunami, com período aproximado de 125 minutos. O estudo conclui, além disso, que a geografia submarina e as características da plataforma continental desempenham um papel crucial na forma como diferentes regiões costeiras brasileiras respondem a eventos de tsunami.

Palavras-chave: Tsunami, Controle de Qualidade, Filtro de Thompson, Transformada de Fourier, Decomposição de Modo Empírico, Transformada *Wavelet*, Geografia submarina

ABSTRACT

SANTOS, Gabriel Coutinho Alves. **STUDY AND ANALYSIS OF THE EFFECTS OF THE TONGA TSUNAMI IN THE REGIONS OF IMBITUBA - SC, ARRAIAL DO CABO - RJ, AND SALVADOR - BA THROUGH FILTERING AND PROCESSING OF SEA LEVEL DATA.** 2023. 106p. Monograph (Advanced Course in Hydrography for Officers) - Almirante Radler de Aquino Training and Instruction Center, Niterói, Rio de Janeiro. 2023.

This study aimed to analyze the effects of the Tonga tsunami that occurred in 2022 on the coasts of the regions of Imbituba, Arraial do Cabo, and Salvador, despite their considerable distances from the epicenter. To obtain the necessary data for this investigation, referring to the month of January 2022, the study relied on the National Oceanic Data Bank, from the Navy Hydrography Center, and the Permanent Mareographic Network for Geodesy, managed by the Brazilian Institute of Geography and Statistics. To understand the extent and nature of these effects in the three regions in question, we employed a series of sophisticated data analysis techniques. Initially, data quality control was carried out using the QARTOD method. Subsequently, the data underwent the Thompson filter, which provided an initial layer of interpretation regarding wave behavior, focusing on the frequencies of the tsunami. One of the main techniques used was the Hilbert-Huang Transform. Through it, it was possible to decompose the signals into their Intrinsic Mode Functions (IMFs). Each of these IMFs was individually subjected to the Fourier Transform, offering a detailed frequency analysis of the tsunami effects. In addition, to complement this analysis, the Wavelet Transform was used. This technique allowed the identification of nuances in the oscillations of the sea level in response to the tsunami. The results showed significant variations in the response of each region to the tsunami, with an approximate period between 2 and 3 hours. The study also concludes that underwater geography and the features of the continental shelf play a crucial role in how different Brazilian coastal regions respond to tsunami events.

Keywords: Tsunami, Quality Control, Thompson Filter, Hilbert-Huang Transform, Fourier Transform, Wavelet Transform, Underwater Geography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização de Tonga no Mapa	14
Figura 2: Imagem Satélite da Explosão.....	14
Figura 3: Agitações marcantes no mar brasileiro, documentadas durante a história.....	15
Figura 4: Análise <i>Wavelet</i> : As cores mais quentes, destacadas em tons de vermelho e amarelo, indicam áreas de maior energia nas diferentes escalas e frequências das ondaletas.....	18
Figura 5: Componentes físicas de uma onda.....	21
Figura 6: Comportamento de um tsunami (onda de águas rasas) próximo à costa	22
Figura 7: Ondas geradas pela convergência entre placas tectônicas.....	24
Figura 8: Modelo de tsunami causado por erupção vulcânica.....	25
Figura 9: Imagem de uma erupção do Krakatoa	27
Figura 10: Bifurcação de ilha, em Tonga, antes e após explosão vulcânica	28
Figura 11: Modelo de propagação de onda do Tsunami Tonga.....	30
Figura 12: Propagação global do Tsunami de Tonga	31
Figura 13: Análise dos efeitos do Tsunami de Tonga em Imbituba e Arraial do Cabo	32
Figura 14: Dados simulados do Tsunami gerado pela erupção do Krakatoa	37
Figura 15: Resposta Gráfica de um sinal filtrado pelo Filtro de Thompson	42
Figura 16: Exemplo visual de um Espectro de Energia Wavelet	47
Figura 17: Propagação do Tsunami até o Brasil, com a região oceânica dividida em três área....	54
Figura 18: Representação visual das plataformas continentais em Arraial do Cabo e Imbituba...	56
Figura 19: Curva da Função Resposta em Arraial do Cabo (azul – sinal original; laranja – sinal filtrado)	61
Figura 20: Curva da Função Resposta em Imbituba (azul – sinal original; laranja – sinal filtrado)	61
Figura 21: Curva da Função Resposta em Salvador (azul – sinal original; laranja – sinal filtrado)	62
Figura 22: Representação gráfica do nível do mar observado e resultante em Arraial do Cabo.....	64
Figura 23: Representação gráfica do nível do mar observado e resultante em Imbituba	65

Figura 24: Representação gráfica do nível do mar observado e resultante em Salvador	66
Figura 25: Modos de Funções Intrínsecas geradas pela HHT para o sinal resultante na região de Arraial do Cabo	69
Figura 26: Modos de Funções Intrínsecas geradas pela HHT para o sinal resultante na região de Imbituba	70
Figura 27: Modos de Funções Intrínsecas geradas pela HHT para o sinal resultante na região de Salvador	70
Figura 28: Espectro de Frequência do Sinal em Arraial do Cabo	72
Figura 29: Espectro de Frequência da MFI 1 em Arraial do Cabo	73
Figura 30: Espectro de Frequência da MFI 2 em Arraial do Cabo	73
Figura 31: Espectro de Frequência da MFI 3 em Arraial do Cabo	74
Figura 32: Espectro de Frequência do Sinal em Imbituba	75
Figura 33: Espectro de Frequência da MFI 1 em Imbituba	76
Figura 34: Espectro de Frequência da MFI 2 em Imbituba	76
Figura 35: Espectro de Frequência da MFI 3 em Imbituba	77
Figura 36: Espectro de Frequência do Sinal em Salvador	78
Figura 37: Espectro de Frequência da MFI 1 em Salvador	79
Figura 38: Espectro de Frequência da MFI 2 em Salvador	79
Figura 39: Espectro de Frequência da MFI 3 em Salvador	80
Figura 40: Espectro de Frequência gerado pela Transformada de Fourier com o eixo das abscissas em escala logarítmica, para a região de Arraial do Cabo	83
Figura 41: Espectro de Frequência gerado pela Transformada de Fourier com o eixo das abscissas em escala logarítmica, para a região de Imbituba	84
Figura 42: Espectro de Frequência gerado pela Transformada de Fourier com o eixo das abscissas em escala logarítmica, para a região de Salvador	85
Figura 43: Representação gráfica da análise wavelet para a região de Arraial do Cabo entre os dias 13/01/2022 e 23/01/2022 – período de ocorrência dos efeitos do tsunami	87
Figura 44: Representação gráfica da análise wavelet para a região de Imbituba entre os dias 13/01/2022 e 23/01/2022 – período de ocorrência dos efeitos do tsunami	88

Figura 45: Representação gráfica da análise wavelet para a região de Salvador entre os dias 13/01/2022 e 23/01/2022 – período de ocorrência dos efeitos do tsunami	89
Figura 46: Nível do Mar e Espectro de Frequência – Arraial do Cabo.....	105
Figura 47: Nível do Mar e Espectro de Frequência – Imbituba.....	106
Figura 48: Nível do Mar e Espectro de Frequência – Salvador.....	107

SUMÁRIO

1. Introdução	13
2. Objetivos	19
2.1. Objetivo Geral	19
2.2. Objetivos Específicos	19
3. Base Teórica	20
3.1. O que é Tsunami?	20
3.1.1. Tsunamis provocados por atividades sísmicas	23
3.1.2. Tsunamis provocados por atividades vulcânicas	25
3.2. O Megatsunami de Tonga	27
3.2.1. Formação do Tsunami de Tonga	29
3.2.2. Propagação	31
3.2.3. Características específicas	33
3.3. Método de Monitoramento de tsunamis	34
3.3.1. Radar de Alta Frequência (HF)	34
3.3.2. Taxa de Pressão do Fundo do Mar	35
3.3.3. Dados em Estações Maregráficas	36
3.4. Controle de Qualidade de Dados de Nível do Mar	38
3.5. Filtragem e Processamento de Sinais	41
3.5.1. Filtro de Thompson	41
3.5.2. Transformada de Fourier	43
3.5.3. Decomposição de Modo Empírico	44
3.5.4. Método de Ondaletas	45
4. Dados e Métodos	47
4.1. Aquisição de Dados	48
4.2. Análise de Qualidade dos Dados	49
4.3. Relação entre Ferramentas Utilizadas	50
5. Resultados e Discussões	53
5.1. Propagação do Tsunami desde Tonga até o Brasil.....	53

5.2. Controle de Qualidade de Dados.....	58
5.3. Filtro de Thompson	60
5.4. Decomposição de Modo Empírico	68
5.5. Transformada de Fourier	71
5.5.1 Transformada de Fourier em Escala Logarítmica.....	82
5.6. Transformada <i>Wavelet</i>	86
6. Conclusão	90
7. Referências Bibliográficas	96
Apêndice A.....	105

1. INTRODUÇÃO

Diversas regiões ao redor do mundo enfrentam uma variedade de desastres naturais, decorrentes de fatores geológicos, intervenções humanas ou localizações sujeitas a intensas condições climáticas e temporais. Alguns fenômenos, como furacões, tornados, deslizamentos de terra, terremotos, atividades vulcânicas e tsunamis são classificados como desastres naturais (GUO, 2021).

Entre esses, o tsunami figura como uma calamidade geológica de potencial destrutivo massivo, causando perdas significativas para comunidades e infraestruturas urbanas. Baseado em registros históricos da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), a maioria dos tsunamis é desencadeado por terremotos ou distúrbios sísmicos. Entretanto, eles podem ser provocados por uma variedade de fatores, como alterações climáticas regionais, impacto de objetos celestes próximos à Terra, como asteroides e cometas, deslizamentos de terra e atividade vulcânica (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2018).

Em um exemplo recente, em 15 de janeiro de 2022, o vulcão *Hunga Tonga-Hunga Ha'pai*, localizado próximo ao país polinésio de Tonga, no Pacífico Sul, entrou em erupção. O som da erupção foi tão elevado que foi ouvido até no Alasca, nos Estados Unidos, e produziu uma das maiores colunas de erupção registradas na era dos satélites, alcançando altitudes entre 35 e 54 km (OMIRA *et al.*, 2022). Como resultado, uma ampla nuvem em forma de guarda-chuva, com mais de 650 km de diâmetro em sua maior extensão, foi formada (OMIRA *et al.*, 2022). Em resposta à intensidade da atividade vulcânica, alertas de tsunami foram emitidos em diversos países, incluindo Austrália, Nova Zelândia, Japão, Estados Unidos e Canadá (NARCITY VANCOUVER, 2022; TERRY *et al.*, 2022). A erupção de Tonga desencadeou um megatsunami, descrito por especialistas e mídias internacionais como uma ocorrência única neste milênio devido a suas características e causas (OMIRA *et al.*, 2022; TERRY *et al.*, 2022).

Figura 1: Localização de Tonga no Mapa



Fonte: LYNX DX GROUP (2019).

Figura 2: Imagem de Satélite da Explosão



Fonte: TONGA WEATHER SERVICE (2022).

Em Tonga, a magnitude da destruição causada pelo tsunami foi vasta e marcante, evidenciada na devastação de moradias, estradas e em perdas humanas. Conforme dados fornecidos pelo *United States Tsunami Warning System*, afiliado à NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), efeitos do Megatsunami de Tonga foram observados globalmente. Japão, estados da Califórnia e Alasca nos Estados Unidos, além da Columbia Britânica no Canadá, registraram consequências desta onda gerada no Pacífico.

No contexto brasileiro, estudos conduzidos por Veloso (2011) destacam que o país já registrou cinco ocorrências de tsunamis, algumas de alta magnitude, outras não tão notórias ou registradas devido à época em que aconteceram (Figura 3) (VELOSO, 2011). Além disso, há registros também que indicam que o Brasil foi influenciado por tsunamis ocorridos na Indonésia em 2004 e no Japão em 2011 (CANDELLA, 2014).

Dando continuidade a este padrão, o Megatsunami de Tonga deixou sua marca. Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022), poucas horas após a notificação do tsunami, detectou-se uma variação anômala no nível médio do mar na cidade de Arraial do Cabo, no estado do Rio de Janeiro, desviando da previsão astronômica de maré estabelecida para a região.

Figura 3: Agitações marcantes no mar brasileiro, documentadas durante a história

Data	Localidade		Causa	Magnitude	Efeito local
1541	S. Vicente	SP	meteorológica (?)		ressaca (?)
1666	Salvador	BA	meteorológica (?)		ressaca (?)
1789	Cananeia	SP	terremoto	~4,5	ondas parecidas a tsunamis
1919	Baía de Todos os Santos	BA	terremoto	~4,2	seiche
2006	Arquipélago de São Pedro e São Paulo	Atlântico	metereológica	5,3, 5,9, 6, 5,7	ressaca Obs.: os sismos são anteriores à ressaca

Fonte: VELOSO (2011).

Os registros históricos aqui apresentados, baseados em análises de sismos passados, revelam que o Brasil, embora esteja localizado no interior da Placa Sul-Americana, uma região tipicamente associada a baixa atividade sísmica, não está isento das implicações resultantes de um evento geológico de elevada magnitude, como é o caso do tsunami desencadeado pela erupção do vulcão *Hunga Tonga-Hunga Ha'pai* (ASSUMPCÃO *et al.*, 1997). Portanto, para melhor interpretar este evento singular e suas eventuais ramificações no território brasileiro, é imprescindível uma compreensão aprofundada de suas propriedades distintivas, em relação aos outros eventos similares que já ocorreram ao redor do globo. Além disso, é crucial a clareza e a compreensão dos conceitos físicos que permeiam os tsunamis, pois os dados coletados do evento serão submetidos a análises, processamentos e comparações com o auxílio de ferramentas que serão detalhadas no decorrer deste estudo.

Com o objetivo de confirmar, ou refutar, a influência do tsunami nas regiões costeiras do Brasil, os dados de nível do mar dos marégrafos localizados em Arraial do Cabo, no estado do Rio de Janeiro, em Imbituba, Santa Catarina, e Salvador, no estado da Bahia, serão analisados e processados utilizando o método QARTOD, o Filtro de Thompson, a Decomposição Empírica em Modos (EMD), a Transformada de Fourier e o Método de Ondaletas.

A qualidade dos dados coletados do nível do mar é um aspecto crucial para assegurar a veracidade e a precisão das informações obtidas. Neste contexto, o método QARTOD (Quality Assurance/Quality Control of Real-Time Oceanographic Data) exerce uma função preponderante, estabelecendo diretrizes e procedimentos para a verificação e validação de dados coletados em tempo real (SYSTEM (U.S.), 2021). Ao aplicar o método QARTOD, é possível identificar e corrigir erros, inconsistências e anomalias nos dados do nível do mar, garantindo a integridade dos resultados. Este controle de qualidade é essencial para diversos campos de atuação, como meteorologia, navegação, pesquisa científica e tomada de decisões relativas a eventos extremos, impactos ambientais e gestão costeira.

O Filtro de Thompson se destaca como um filtro passa-faixa altamente adaptável, permitindo ajustes personalizados para as frequências de corte, o que lhe confere uma notável flexibilidade em comparação com outras metodologias convencionais (THOMSON, 1982). Embora a implementação do Filtro de Thompson possa envolver complexidade, ele oferece um tratamento refinado para séries temporais do Nível do Mar, especialmente quando analisadas no domínio do tempo (THOMSON, 1981). Em outras palavras, esse filtro pode ser otimizado pelo usuário, permitindo a definição dos principais parâmetros de cálculo, incluindo o intervalo de amostragem e os períodos, além de permitir a configuração de frequências de corte pré-determinadas (ANSELIN; REY, 2010). Essa abordagem customizável viabiliza um ajuste mais preciso às características específicas dos dados do nível do mar, resultando em um processo de filtragem mais eficaz e rigoroso (PERCIVAL; WALDEN, 2006).

A Decomposição de Modo Empírico (EMD) é um componente fundamental da Transformada de Hilbert-Huang (HHT), uma metodologia avançada de processamento de sinais amplamente reconhecida e utilizada na análise de dados de séries temporais complexas e não estacionárias (HUANG et al., 1998). A EMD é responsável por descompor adaptativamente os dados em Funções de Modo Intrínseco (MFIs), permitindo uma representação mais adequada das diferentes componentes subjacentes do sinal (HUANG et al., 1998). Essa abordagem inovadora, aliada à Análise Espectral de Hilbert (HSA), possibilita uma análise detalhada das características espectrais em tempo real (HUANG; WU, 2008; RATO; ORTIGUEIRA; BATISTA, 2008). Quando aplicada a dados do nível do mar, a EMD desempenha um papel crucial ao desvendar os

múltiplos processos contribuintes para as flutuações do nível do mar, fornecendo informações essenciais para previsões mais precisas e estratégias de gestão costeira (WU et al., 2007; WU; HUANG, 2009). A compreensão aprofundada oferecida pela EMD é de suma importância para aprimorar a precisão das previsões do nível do mar e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de adaptação e mitigação nas áreas costeiras vulneráveis (EZER et al., 2013).

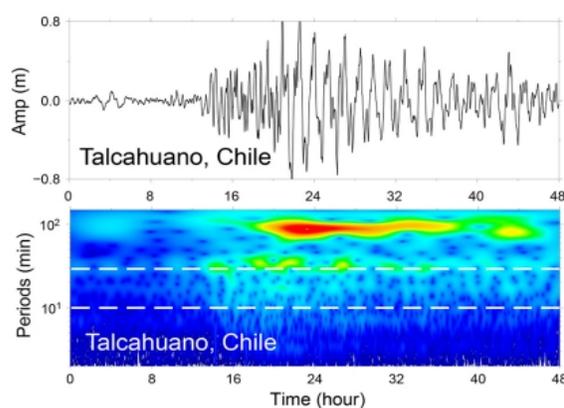
A Transformada de Fourier, desenvolvida pelo matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier, destaca-se como uma ferramenta robusta no âmbito do processamento digital de imagens (BRACEWELL, 1999). Além disso, é frequentemente empregada na análise de séries temporais de dados do nível do mar, simplificando a transição do domínio do tempo ou do espaço para o domínio da frequência, o que facilita o processamento e a interpretação (THOMSON; EMERY, 2001). É notável que a análise espectral de séries temporais de dados do nível do mar permite a identificação de várias frequências e periodicidades inerentes aos dados (NALLEY *et al.*, 2020). A aplicação da Transformada de Fourier começa com o cálculo do espectro de potência, que revela a distribuição de energia associada às diferentes frequências presentes nos dados (PRIESTLEY, 1982).

A aplicação das ondaletas (wavelets) tem ganhado destaque como uma abordagem altamente vantajosa em relação à Transformada de Fourier, especialmente quando se trata da análise de fenômenos não periódicos, localizados e de múltiplas escalas (ADDISON, 2020; MALLAT, 2008). A técnica de análise por ondaletas tem como objetivo resolver desafios relacionados à decomposição de séries temporais unidimensionais em representações bidimensionais, abrangendo simultaneamente os domínios do tempo e da frequência (DAUBECHIES, 1992; PERCIVAL; WALDEN, 2006). Isso proporciona uma compreensão abrangente, permitindo não apenas a identificação da amplitude de sinais periódicos presentes na série, mas também a análise da variação dessa amplitude ao longo do tempo (FARGE, 1992; TORRENCE; COMPO, 1998). As ondaletas são concebidas como funções matemáticas adaptáveis à escala e ao tempo, o que as torna eficazes para a análise de sinais em diferentes frequências. Quando as ondaletas são dilatadas, ocorre uma modificação no componente temporal, resultando em deslocamentos que podem explorar frequências mais altas ou mais baixas, dependendo da dilatação aplicada (GRAPS, 1995; MALLAT; ZHANG, 1993).

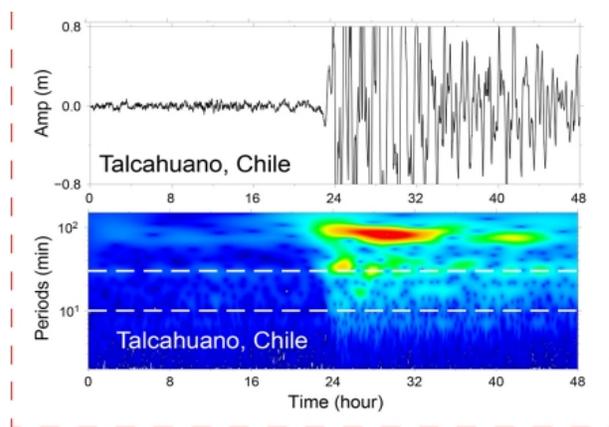
Conforme ilustrado na Figura 4, é possível observar exemplos de imagens provenientes de uma análise de dados de tsunamis por meio do método das ondaletas. Essa análise possibilita a identificação de características específicas desses eventos e suas variações em diferentes escalas temporais, fornecendo uma abordagem mais completa e detalhada para a compreensão desses fenômenos.

Figura 4: Análise *Wavelet*: As cores mais quentes, destacadas em tons de vermelho e amarelo, indicam áreas de maior energia nas diferentes escalas e frequências das ondaletas.

(a) Efeitos Tsunami Tonga, 2022, no Chile



(b) Efeitos Tsunami Tohoku, 2011, no Chile



Fonte: HU *et al.* (2023).

A Figura 4 demonstra uma análise *wavelet* aplicada aos padrões de ondas de tsunami capturados pelo marégrafo localizado em Talcahuano, no Chile, durante os eventos do Tsunami de Tonga de 2022 e do Tsunami Tohoku de 2011. Linhas pontilhadas horizontais em branco foram utilizadas para destacar os períodos referenciais de 10 e 30 minutos, respectivamente (HU *et al.*, 2023)

Dessa forma, os resultados deste estudo são relevantes, visto que podem fornecer dados para o entendimento e reação a eventos de tsunamis, mesmo quando estes ocorrem a distâncias consideráveis. Tais descobertas têm o potencial de propiciar uma resposta mais ágil e eficiente por parte das entidades competentes, objetivando a minimização dos impactos causados por tsunamis futuros.

Essas pesquisas podem se revelar de grande valor tanto para a comunidade científica quanto para as autoridades incumbidas da gestão de riscos e desastres, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre tsunamis e para a melhoria das estratégias de prevenção, alerta e resposta a esses eventos catastróficos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste estudo é analisar e compreender o Tsunami de Tonga, abordando sua gênese, características e seus efeitos na costa do Brasil e através do processamento de dados, buscar confirmar a hipótese de que existe a possibilidade desse evento ter gerado consequências no litoral brasileiro, como o aumento do nível do mar.

2.2 Objetivos específicos

Com o objetivo principal de investigar a possível chegada do Megatsunami de Tonga na costa sudeste do Brasil, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Destacar as características gerais de um Tsunami: Para compreender melhor esse fenômeno natural, será realizada uma análise abrangente das possíveis origens dos tsunamis, incluindo terremotos e erupções vulcânicas. Além disso, serão explorados os diversos danos que esses eventos podem causar em regiões costeiras, abrangendo impactos socioeconômicos, ambientais e humanos;
- Realizar um estudo teórico e comparativo detalhado do Megatsunami de Tonga: Será conduzida uma pesquisa aprofundada sobre o Megatsunami de Tonga, focando em suas características específicas, como sua origem, magnitude, extensão e consequências. Serão analisados dados históricos e pesquisas científicas para obter uma compreensão completa desse evento específico;
- Descrever os principais métodos de monitoramento de tsunamis: Serão abordados os métodos utilizados para monitorar tsunamis, incluindo sistemas de detecção sísmica, boias de medição de pressão e instrumentos de monitoramento remoto;

- Desenvolver um estudo teórico e prático das ferramentas de filtragem e análise de sinais: Serão exploradas diversas técnicas de processamento de sinais, como o Filtro de Thompson, a Decomposição em Modos Empíricos, a Transformada de Fourier e as *Wavelets*. Essas ferramentas serão apresentadas e estudadas em detalhes, buscando compreender suas características, vantagens e limitações, a fim de aplicá-las na análise dos dados coletados; e
- Processar os dados de nível do mar e analisá-los: Será realizado o processamento dos dados coletados, utilizando as ferramentas de filtragem e análise de sinais mencionadas anteriormente. Os dados de nível do mar serão analisados cuidadosamente, levando em consideração os padrões e variações que possam indicar a possível chegada do Megatsunami de Tonga na costa sudeste do Brasil. Essa análise será conduzida com rigor científico, utilizando métodos estatísticos e comparativos para confirmar ou refutar a hipótese proposta.

3. BASE TEÓRICA

3.1 O que é Tsunami?

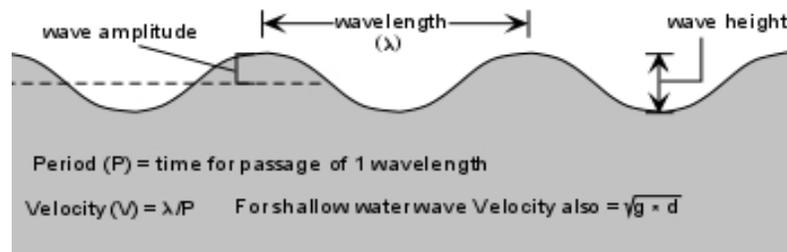
Antes de se aprofundar na análise e estudo das peculiaridades do Megatsunami de Tonga, é crucial entender as características fundamentais de um tsunami, com foco especial naqueles resultantes de atividades sísmicas - os mais comuns - e os provocados por atividades vulcânicas, como o Tsunami de Tonga.

Tsunami é um termo de origem japonesa que significa "onda de porto" (RÖBKE; VÖTT, 2017). Esta nomenclatura reflete o potencial destrutivo dessas ondas em comunidades costeiras ao redor do globo, constituindo-se uma ameaça significativa. Conforme os Centros Nacionais de Informação Ambiental da NOAA, cerca de 290.000 pessoas foram vitimadas nos últimos 100 anos em consequência de tsunamis (NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION, 2022), sendo que aproximadamente 227.000 dessas perdas ocorreram no evento de 2004, nos países banhados pelo Oceano Índico (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2023). Em termos econômicos, o tsunami de 2004 resultou em prejuízos avaliados entre 15 e 80 bilhões de dólares (BRYANT, 2010), enquanto que o tsunami Tōhoku,

ocorrido em 2011 no Japão, acarretou perdas que superaram 335 bilhões de dólares (DANIELL *et al.*, 2011).

As ondas, e claramente incluindo tsunamis, apresentam características distintas, como comprimento de onda, altura de onda, amplitude, frequência ou período e velocidade (HIROSE; LONNGREN, 2010). O comprimento de onda representa a distância entre dois pontos semelhantes em uma onda, geralmente medido entre dois picos ou vales sucessivos (SMITH, 2010). As ondas oceânicas regulares exibem comprimentos de onda na faixa de 100 metros, enquanto tsunamis apresentam comprimentos de onda substancialmente maiores, comuns em quilômetros e podendo alcançar até 200 quilômetros (KNAUSS, 1978). Na Figura 5, a seguir, nota-se a explicação para as características de uma onda, onde o Período é visto como o tempo para passagem de 1 comprimento de onda e a velocidade é dado pela divisão do comprimento pelo período.

Figura 5: Componentes físicas de uma onda



Fonte: LIU *et al.* (2023).

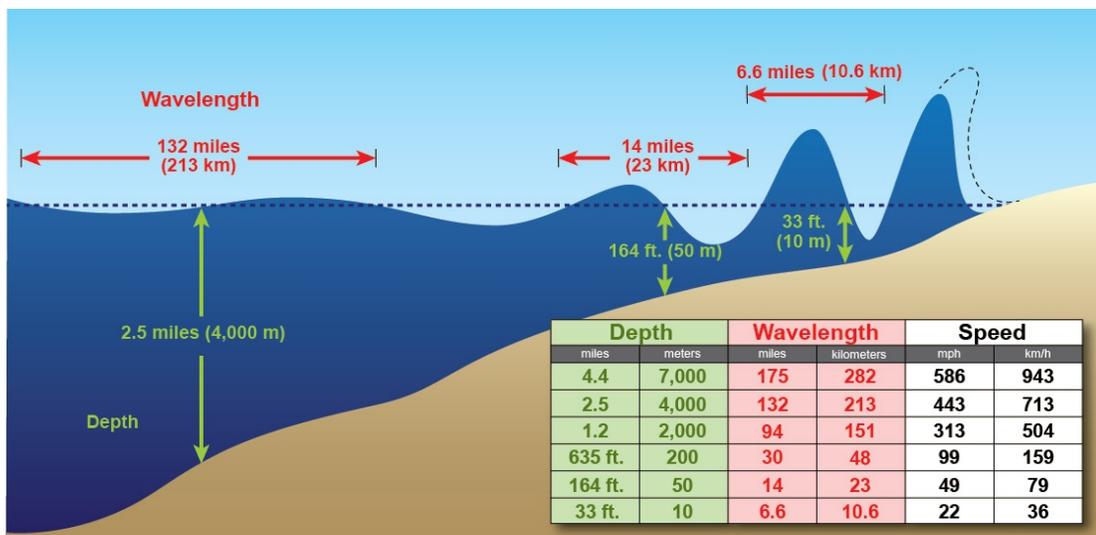
A categorização de um tsunami como uma onda de águas rasas estabelece um conjunto específico de características que governam sua propagação e interação com o fundo do oceano (TANIOKA; SATAKE, 1996). Além disso, a determinação da velocidade de propagação de uma onda de águas rasas envolve um cálculo que inclui a aceleração da gravidade e a profundidade da água. Esses fatores combinados influenciam significativamente a maneira como um tsunami viaja

e se espalha ao longo da costa, afetando potencialmente áreas costeiras densamente povoadas (TANIOKA; SATAKE, 1996).

Mediante sua aproximação à costa, os tsunamis exibem um padrão notável de alternância entre cristas, que representam níveis elevados de água, e vales, que denotam níveis mais baixos de água (Fritz et al., 2001). À medida que essas ondas avançam em direção a litorais, baías ou portos, ocorre uma diminuição na velocidade e comprimento de onda, enquanto as alturas das cristas são amplificadas de forma drástica (STEFANAKIS, 2013). Esse fenômeno complexo é de vital importância para avaliar o potencial impacto de tsunamis em áreas costeiras vulneráveis.

A interação entre um tsunami e o fundo do oceano adquire um papel crucial à medida que a onda se aproxima da costa. A medida que a profundidade da água diminui, o fundo do mar começa a sentir a passagem da onda, resultando em um efeito de arrasto que influencia a velocidade do tsunami (TANIOKA; SATAKE, 1996). No entanto, esse efeito também contribui para aumentar a altura da onda à medida que ela se aproxima da costa (SYNOLAKIS, 1987), como pode ser observado na Figura 6. Essa dinâmica complexa pode levar a uma concentração significativa de energia em uma altura de onda maior, transformando um tsunami inicialmente quase imperceptível em alto-mar em uma ameaça devastadora nas áreas costeiras (STEFANAKIS, 2013).

Figura 6: Comportamento de um tsunami (onda de águas rasas) próximo à costa



Fonte: CORENMAN (2018).

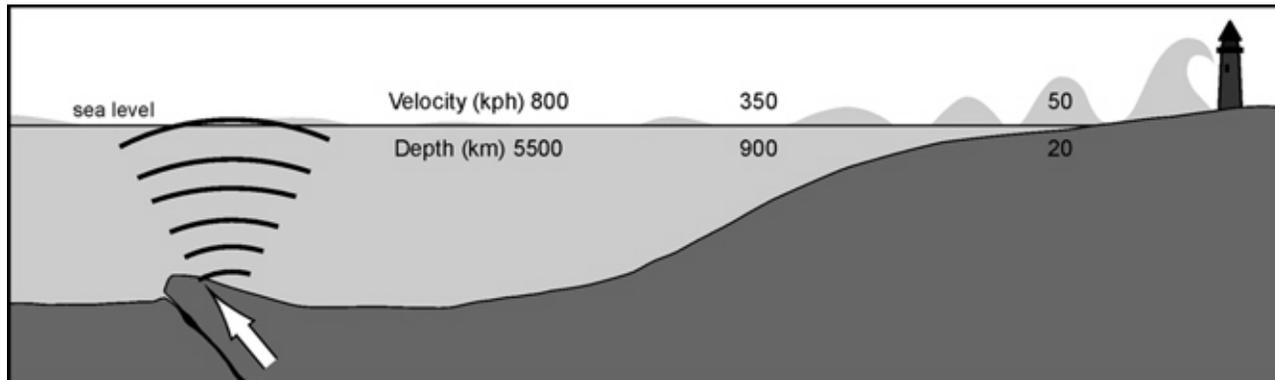
A interação complexa entre a batimetria submarina e a propagação de tsunamis é um campo de pesquisa necessário, como evidenciado por estudos de Satake (1988) sobre o desencadeamento de réplicas de um tsunami após terremotos de falha transformante. Essas investigações demonstram que a natureza do fundo do mar - sua batimetria - desempenha um papel significativo na determinação dos impactos de tsunamis em diferentes regiões costeiras. Em algumas áreas, a topografia submarina pode amplificar a energia do tsunami, aumentando sua altura e potencial destrutivo, enquanto em outras áreas, a batimetria dispersa a energia da onda, reduzindo sua altura e mitigando o impacto na costa.

3.1.1 Tsunamis provocados por atividades sísmicas

Tsunamis originados por atividades sísmicas têm predominado na contagem de eventos desde 2005, computando aproximadamente 1089 ocorrências em um período de dois anos (SCHIELEIN; SCHELLMANN, 2007). Em tais eventos, o movimento relativo entre as placas tectônicas pode induzir um deslocamento vertical abrupto da coluna de água (MURTY, 1977). Tal fenômeno precipita a criação de uma coluna de água de grandes proporções, gerando elevações na superfície oceânica, e com as flutuações e alterações de frequência, múltiplas ondas são produzidas (RÖBKE; VÖTT, 2017). Em outras palavras, a água situada acima da placa tectônica em movimento acompanha essa ascensão ou descensão. Quando a água busca reestabelecer seu equilíbrio, ocorre a gênese de um tsunami.

Ademais, é válido afirmar que a magnitude dos tsunamis possui uma correlação direta com a intensidade do terremoto subjacente, conforme definido pela Escala Richter (DAWSON; STEWART, 2007). A Figura 7 demonstra de forma elucidativa a geração de ondas de tsunami como consequência da convergência das placas tectônicas.

Figura 7: Ondas geradas pela convergência entre placas tectônicas



Fonte: CLAGUE (2001).

A análise da Figura 7 permite identificar que a interação entre as placas tectônicas é capaz de provocar deslocamento do leito oceânico, gerando ondas que se propagam a partir do epicentro. Adicionalmente, constata-se que à medida que a onda se aproxima da costa, sua velocidade diminui enquanto sua altura aumenta (CLAGUE, 2001).

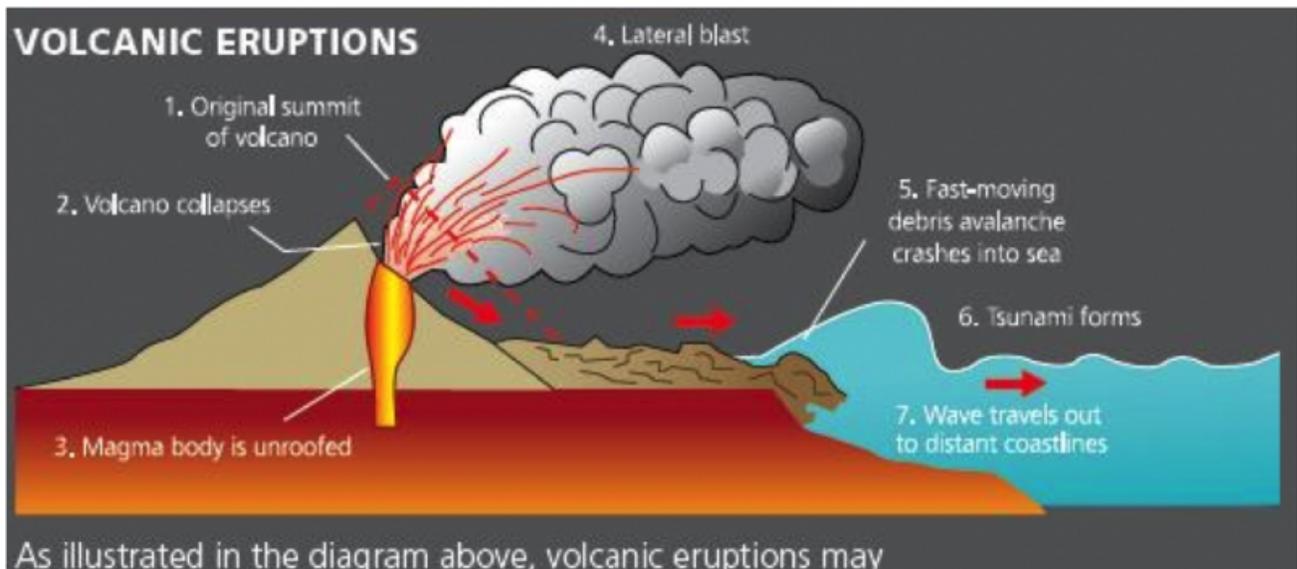
A magnitude e extensão de um tsunami são determinadas por múltiplos fatores, como a magnitude do terremoto, a profundidade do epicentro, a topografia do leito marinho e a distância da costa (BARMAN, 2020). Tsunamis podem alcançar velocidades elevadas, ultrapassando por vezes os 800 km/h (CLAGUE, 2001), o que lhes permite cobrir distâncias extensas antes de atingir a costa (MEINIG, 2005). A maioria dos tsunamis é causada por terremotos com magnitudes superiores a 7.0, ocorrendo no oceano ou em regiões costeiras próximas, a uma profundidade menor que 100 quilômetros abaixo da superfície terrestre (terremotos mais profundos têm menos probabilidade de provocar deslocamento do leito oceânico) (NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION, 2022).

Adicionalmente, a quantidade de deslocamento do leito marinho, a dimensão da área onde ocorre o terremoto e a profundidade da água acima do epicentro são fatores cruciais que determinam a magnitude do tsunami resultante (DANIELL *et al.*, 2011). Esses dados esclarecem como a energia de um terremoto pode desencadear um tsunami, ressaltando os elementos fundamentais para a formação de um tsunami de grande impacto.

3.1.2 Tsunamis provocados por atividades vulcânicas

Os tsunamis desencadeados por atividades vulcânicas são reconhecidos como menos frequentes quando comparados àqueles originados por terremotos, sendo categorizados como eventos atípicos (SCHIELEIN; SCHELLMANN, 2007). Através da Figura 8 percebe-se que os terremotos de origem vulcânica podem ser um dos fatores que contribuem para a formação de tsunamis, em que o mecanismo de geração assemelha-se ao dos tsunamis provocados por atividades sísmicas (RÖBKE; VÖTT, 2017). Uma outra possibilidade envolve os fluxos piroclásticos, com a expulsão de magma para a coluna de água, o que pode resultar em ondas de tsunami (RÖBKE; VÖTT, 2017). Uma instância desse processo foi evidenciada no Monte Tambora, na Indonésia, em 1815, quando deslizamentos de rochas geraram ondas com alturas chegando a 4 metros, que se propagaram por aproximadamente 15 km até alcançar a costa, como descrito na Figura 8 (RÖBKE; VÖTT, 2017).

Figura 8: Modelos de tsunamis causados por erupção vulcânica



Fonte: THE UWI SEISMIC RESEARCH CENTRE (2007).

Adicionalmente, erupções vulcânicas submarinas intensas podem propiciar a formação de ondas típicas de tsunami, particularmente em águas de menor profundidade (PARIS, 2015). Tais ondas podem emergir quando o magma entra em contato direto com a coluna de água,

provocando a evaporação imediata desta e deslocamento da água circundante, gerando oscilações suficientes para a formação de ondas (RÖBKE; VÖTT, 2017). Por fim, durante as erupções vulcânicas, as explosões de elevada pressão atmosférica têm potencial para induzir um tsunami, mesmo a grandes distâncias (PARIS, 2015). Um exemplo desse processo foi observado na erupção do Monte Krakatoa em 1883, quando as ondas de choque resultantes originaram ondas com profundidade de 270 metros, devastando o Estreito de Sunda e causando a morte de mais de 36.000 indivíduos (VERBEEK, 1884). Esse mesmo mecanismo foi evidenciado no tsunami de Tonga e será minuciosamente discutido neste estudo.

De forma geral, enquanto a onda se forma, ela move-se verticalmente e adquire velocidade elevada em águas mais profundas, podendo alcançar velocidades de até 650 milhas por hora (FRANCIS, 1985; RÖBKE; VÖTT, 2017). Em áreas de menor profundidade, ainda pode alcançar velocidades de até 200 mph. Essas ondas atravessam a plataforma continental e colidem com a terra. Entretanto, mesmo ao atingir a costa, a sua força não se reduz, visto que há uma quantidade extremamente elevada de energia quando a água retorna ao seu ponto de origem (FRANCIS, 1985; RÖBKE; VÖTT, 2017).

Os depósitos resultantes dos tsunamis consistem, normalmente, em camadas de areia fina que se estendem bem além da linha original da mar. Esses depósitos de areia são removidos da zona de arrebentação e transportados para o interior durante a ocorrência do tsunami. À medida que a água recua, arrasta consigo sedimentos do interior de volta para a fonte hídrica. Os depósitos apresentam uma classificação pobre e frequentemente contêm grãos de púmice e litoclastos originados da erupção vulcânica (FRANCIS, 1985; TANGUY *et al.*, 1998).

Citando o exemplo da erupção do Krakatoa (Figura 9), como mencionado anteriormente, a formação da onda ocorreu em menos de um minuto após a explosão, seguida, aproximadamente, quinze minutos depois, pela formação de uma potente onda de ar (FRANCIS, 1985; VERBEEK, 1884). Posteriormente, ocorreu uma segunda explosão quando a câmara de magma colapsou, permitindo a invasão da água do mar à câmara e formando um segundo tsunami, de menor magnitude, com aproximadamente 10 metros de altura (VERBEEK, 1884).

Figura 9: Imagem de uma erupção do Krakatoa



Fonte: RYALL (2019).

3.2 O Megatsunami de Tonga

A erupção do vulcão *Hunga Tonga-Hunga Ha'apai* (HTHH), que ocorreu em 15 de janeiro de 2022, foi classificada como uma das mais significativas dos últimos 30 anos (OMIRA *et al.*, 2022). Esta poderosa erupção resultou em um tsunami que afetou o arquipélago de Tonga com ondas que alcançaram até 15 metros de altura e também atingiu diversas nações ao redor do globo (OMIRA *et al.*, 2022). Causou, sobretudo em Tonga, severas consequências estruturais e sociais. A intensidade da erupção foi tal que provocou a bifurcação da ilha após as explosões do vulcão, como se pode observar na Figura 10.

Figura 10: Bifurcação de ilha, em Tonga, antes e após explosão vulcânica

(a) Antes da explosão



(b) Após a explosão



Fonte: AFP (2022).

A erupção do HTHH em Tonga foi categorizada como um evento extremamente incomum, tendo uma estimativa de recorrência de milênios. Estudiosos ponderam se uma potencial futura erupção do HTHH poderia ultrapassar a catástrofe da erupção de Tera no Mediterrâneo Oriental, que aconteceu em 1650 a.C. Entre os aspectos distintivos desta erupção, sobressai-se a geração de tsunamis abrangendo todo o oceano, algo jamais registrado na história instrumental do Pacífico (TERRY *et al.*, 2022).

Ainda que se reconheçam pelo menos oito mecanismos conhecidos para a geração de tsunamis vulcânicos (PARIS *et al.*, 2020), os tsunamis originados por atividade vulcânica ainda configuram uma lacuna no entendimento dos riscos de tsunami (TERRY *et al.*, 2022). Essa carência é particularmente significativa para o Oceano Pacífico em virtude da presença de seu círculo de fogo, ausente nos oceanos Atlântico e Índico.

Atualmente, existe um conhecimento sobre vários processos que podem desencadear tsunamis durante erupções vulcânicas subaquáticas, embora ainda não haja uma compreensão integral desses mecanismos (PARIS *et al.*, 2020; TERRY *et al.*, 2022). Esses processos abrangem: (1) erupção vulcânica violenta que perturba a superfície marinha; (2) falha na encosta do vulcão ou outros deslizamentos submarinos circundantes à estrutura vulcânica; (3) colapso da

caldeira vulcânica na câmara magmática vazia após a erupção; e (4) meteotsunamis desencadeados por ondas de gravidade atmosféricas após explosões vulcânicas acima do nível do mar.

3.2.1 Formação do Tsunami de Tonga

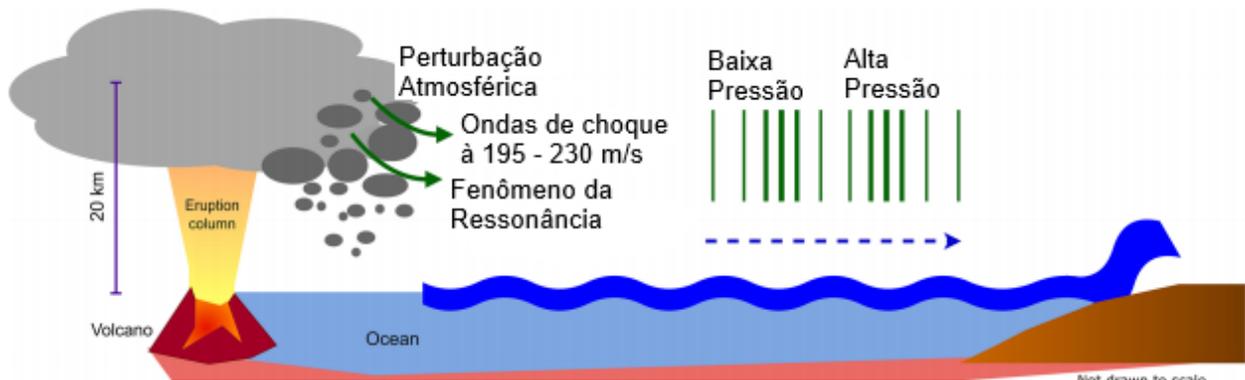
Diversos atributos do tsunami originado pela erupção do *Hunga Tonga-Hunga Ha'apai* apontam que uma junção de mecanismos foi encarregada da produção das ondas. De acordo com Terry *et al.*, (2022), um fator relevante a ser levado em conta é a magnitude das ondas, onde as mesmas, de elevada amplitude (atingindo até 15 metros) documentadas nas ilhas vizinhas de Tongatapu, 'Eua e Mango sugerem que a explosão eruptiva influenciou diretamente as ondas locais ao promover o levantamento da superfície do mar. Ademais, ainda segundo o autor, em localidades distantes ao longo do Oceano Pacífico, as ondas de maior amplitude foram registradas na costa leste do Japão (a noroeste da erupção) e no Peru (a sudeste da erupção), evidenciando uma direção majoritária de noroeste para sudeste. Presume-se que essa orientação possa ser elucidada pela combinação de dois processos: o colapso da caldeira vulcânica e um significativo deslizamento de flanco submarino.

Adicionalmente, a erupção em Tonga gerou tsunamis vulcânicos-atmosféricos, ou meteotsunamis vulcânicos (TERRY *et al.*, 2022). Conforme Vilibić *et al.* (2021), os tsunamis meteorológicos são ondas oceânicas de longa duração, geradas pela atmosfera na faixa de frequência dos tsunamis. Os meteotsunamis são propulsados por mudanças abruptas na pressão atmosférica (RABINOVICH, 1998) e impactam diretamente a superfície do oceano, sem envolver o deslocamento vertical do leito marinho.

Assim, o Megatsunami de Tonga foi caracterizado pela ação direta de mecanismos que acompanharam as ondas durante todo seu extenso percurso de duração, não se restringindo apenas ao epicentro ou à fonte do processo (OMIRA *et al.*, 2022). Esses mecanismos são considerados ondas atmosféricas resultantes das intensas explosões do vulcão HTHH. Portanto, é possível reconhecer que a perturbação da pressão atmosférica provocava também perturbações nas massas de água, fazendo com que o Tsunami de Tonga possa ser interpretado também como

de possível origem atmosférica (OMIRA *et al.*, 2022), ou denominado meteotsunami vulcânico (PELLIKKA *et al.*, 2022). A Figura 11 é capaz de exemplificar a ocorrência desses modelos de tsunami.

Figura 11: Modelo de propagação de onda do Tsunami de Tonga



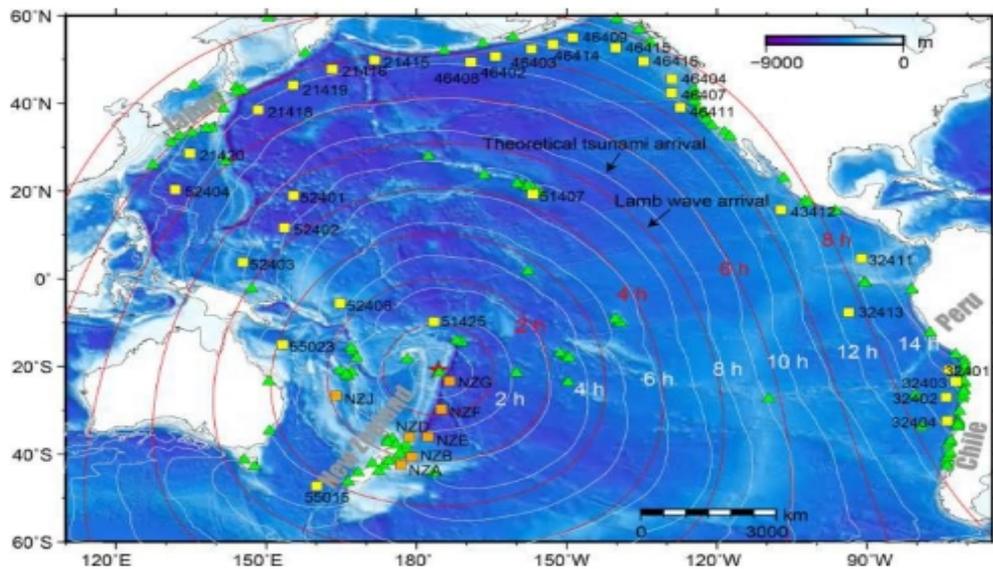
Fonte: ADAPTADO DE TERRY *et al.* (2022).

Um meteotsunami vulcânico, de acordo com Bechle *et al.*, (2016), pode ser desencadeado por diversos mecanismos simultâneos. Em uma explosão subaérea extremamente potente, o rápido movimento para cima de gases em expansão e cinzas aquecidas para a alta atmosfera induz ondas gravitacionais de grande escala. O subsequente desmoronamento da coluna eruptiva pode gerar efeitos análogos. Por meio da Figura 11, observa-se que a formação de ondas de gravidade, originadas no oceano, decorre da poderosa explosão ocorrida no vulcão, onde a expansão rápida dos gases sob altas temperaturas produz distúrbios e pressões atmosféricas elevadas (TERRY *et al.*, 2022). Nessas circunstâncias, quando a velocidade da onda acústico-gravitacional é compatível com a velocidade das ondas oceânicas longas em águas profundas, gerando ondas de maior amplitude, ocorre o fenômeno da ressonância, amplificando-se ainda mais a magnitude dos meteotsunamis vulcânicos (OMIRA *et al.*, 2022; TERRY *et al.*, 2022).

3.2.2 Propagação

Observações com modificações perceptíveis no nível do mar foram identificados tanto por medidores de maré situados na costa quanto por estações de boias do sistema DART nos oceanos Pacífico (Figura 12), Atlântico e Índico (HU *et al.*, 2023). Além disso, foram relatadas ocorrências de tsunamis nas águas do Mar do Caribe e do Mar Mediterrâneo (HU *et al.*, 2023), apesar de as ondas de maior magnitude terem sido primordialmente detectadas no Oceano Pacífico, ao longo das costas da Nova Zelândia, Japão, Califórnia e Chile.

Figura 12: Propagação global do Tsunami de Tonga



Fonte: HU *et al.* (2023).

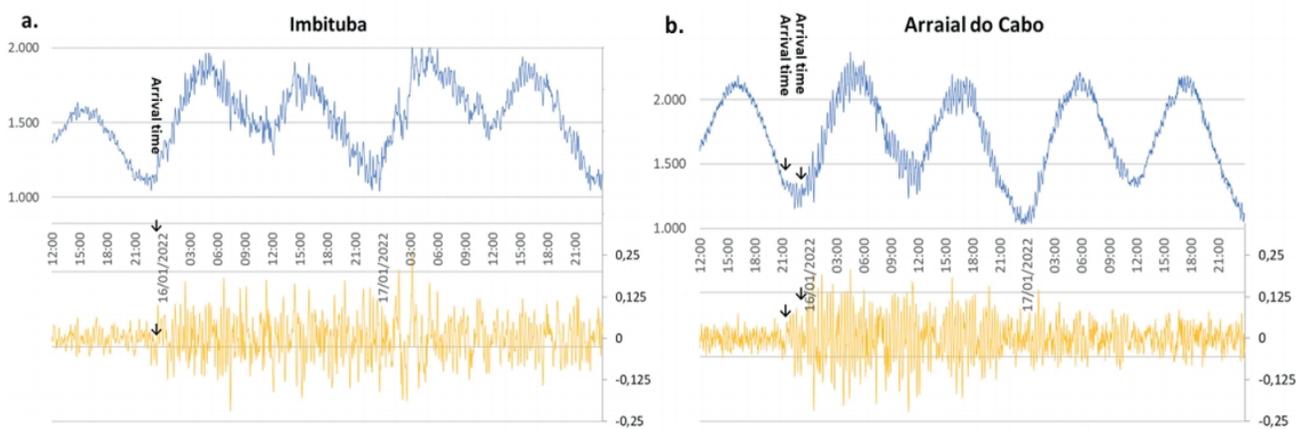
Analisando a figura apresentada, é possível inferir que as linhas em torno da região de Tonga, que coincide com o epicentro do tsunami em questão, podem ser interpretadas como linhas de fases iguais. Esse fenômeno pode ser explicado pela propagação das ondas geradas, as quais se deslocam em direção às áreas costeiras adjacentes. Quando as linhas de fases iguais são delineadas, elas representam as frentes de onda em momentos específicos, denotando regiões de igual fase de movimento das ondas.

Ademais, em relação a uma breve análise voltada para marés, o ponto central da região, que é Tonga, pode ser considerado um ponto anfidrômico. Isso significa que, nesse ponto, as marés possuem amplitude mínima e que as variações de maré são menos acentuadas. As linhas concêntricas que se estendem a partir desse ponto anfidrômico são conhecidas como linhas cotidais ou de igual amplitude de maré. Elas indicam as áreas onde a amplitude da maré é constante, o que é crucial para a compreensão dos padrões de maré em uma determinada região.

Quanto a propagação em si do Tsunami Tonga, no continente sul-americano, o Brasil possui uma das linhas costeiras mais extensas do planeta, englobando cerca de 7.491 km. De acordo com Dourado *et al.*, (2022), a onda do tsunami atingiu várias regiões do país, como em Arraial do Cabo, no estado do Rio de Janeiro, e Imbituba, em Santa Catarina.

A manifestação do sinal do tsunami em cada estação é perceptível ao analisar as sequências de resíduos filtrados nas estações mencionadas, onde foram detectados dois intervalos com picos de energia em torno de 120 minutos (DOURADO *et al.*, 2022), conforme ilustrado na figura subsequente.

Figura 13: Análise dos efeitos do Tsunami de Tonga em Imbituba e Arraial do Cabo



Fonte: DOURADO *et al.* (2022).

Conforme estabelecido por Dourado *et al.*, (2022), a distância entre o sítio de erupção e as flutuações na largura da plataforma continental ao longo do litoral brasileiro exerceram influência no tempo de arribada do tsunami. Antecipava-se que a onda de tsunami chegasse a Imbituba

antes de alcançar Arraial do Cabo. Contudo, a plataforma continental nas proximidades de Imbituba, que se estende por cerca de 124 km, é mais extensa do que a adjacente a Arraial do Cabo, com aproximadamente 75 km de largura. Isso acarreta em uma redução na velocidade da onda de tsunami, postergando assim sua chegada em Imbituba (DOURADO *et al.*, 2022).

3.2.3 Características específicas

Tal como mencionado anteriormente, o tsunami decorrente da erupção do *Hunga Tonga-Hunga Ha'apai* caracterizou-se por sua extensão global, velocidades de propagação atípicas, altitudes de ondas elevadas em locais remotos e um período de duração extenso.

O tsunami registado em diversas regiões do mundo alcançou os locais mais cedo do que seria esperado para um tsunami proveniente de uma fonte singular situada no vulcão HTHH (OMIRA *et al.*, 2022). Ao cotejar os tempos de percurso entre um hipotético tsunami de fonte singular e o tsunami observado, notou-se que este último se movimentou de 1,5 a 2,5 vezes mais rápido, atravessando os oceanos Pacífico, Atlântico e Índico em menos de 20 horas (OMIRA *et al.*, 2022). Esta discrepância na velocidade de propagação foi particularmente saliente em locais remotos.

Por exemplo, ainda de acordo com Omira *et al.*, (2022), o tsunami atingiu as costas do Japão e do Chile em menos de 7 e 10 horas, respectivamente, ultrapassando significativamente o tempo de percurso esperado para um tsunami de fonte singular (que seria de 10,5 a 12,5 horas para o Japão e de 12 a 17 horas para o Chile). No Atlântico e no Oceano Índico, o tsunami foi ainda mais rápido, chegando ao Caribe em 10 a 11 horas, enquanto um tsunami de fonte singular levaria mais de 26 horas para percorrer a distância entre a área de origem e o Caribe, contornando o continente sul-americano (OMIRA *et al.*, 2022).

Segundo Omira *et al.*, (2022), sua análise aponta que o tsunami de Tonga propagou-se a uma velocidade aproximada de 1.000 km/h, sem uma redução substancial na velocidade ao transitar de águas profundas para águas rasas. Esta particularidade se distingue dos tsunamis provocados por sismos ou de fontes singulares, nos quais a velocidade de fase (c) está relacionada à profundidade da água (h), onde c é a raiz quadrada do produto de g e h , sendo g a aceleração da gravidade.

A comparação direta dos registros do nível do mar em diferentes oceanos confirma que não ocorre uma alteração notável na amplitude das ondas do tsunami à medida que a distância em relação ao vulcão aumenta (OMIRA *et al.*, 2022). Ainda de acordo com Omira *et al.*, (2022), cerca de 67 km de distância, o medidor de maré na Ilha Tonga registou uma amplitude máxima de onda de 1,14 m. Todavia, este valor não reflete plenamente o impacto do tsunami na área próxima, pois alturas de ascensão consideráveis (cerca de 15 m) foram observadas na Ilha Tongatapu, no arquipélago de Tonga, sugerindo a contribuição de uma fonte local de tsunami, possivelmente de origem vulcânica ou gravitacional (OMIRA *et al.*, 2022).

É relevante notar que em locais remotos foram registados valores comparáveis ou até mesmo superiores a uma distância de cerca de 10.000 km. Isso denota uma característica peculiar do tsunami observado, pois suas ondas não dissiparam perceptivelmente sua amplitude durante a propagação pelos oceanos.

Quanto ao Brasil, segundo Dourado *et al.*, (2022), a presença do tsunami foi claramente identificada nos medidores de maré localizados na região. Nas estações de Imbituba e Arraial do Cabo, as variações máximas de amplitude do NM atingiram 31 cm e 41,5 cm, respectivamente.

3.3 Métodos de monitoramento de tsunamis

A detecção e monitoramento precoce de tsunamis é essencial para minimizar os danos e salvar vidas em regiões costeiras vulneráveis. Com a rápida disseminação da informação e alertas precisos, as comunidades costeiras podem se preparar e se proteger adequadamente, minimizando os possíveis prejuízos causados. Existem diferentes métodos para monitorar tsunamis, sendo que um deles é o método de monitoramento por alterações de dados em estações maregráficas, foco deste tópico do trabalho.

3.3.1 Monitoramento por Radar de Alta Frequência (HF)

Os radares oceânicos de alta frequência (HF) instalados em regiões costeiras demonstram eficácia no rastreamento de tsunamis quando estes ainda se encontram a uma distância considerável (GRILLI; GROSDIDIER; GUÉRIN, 2016). Recentemente, em específico no dia 14 de outubro de 2016, um radar HF localizado em Tofino (situado na face do Oceano Pacífico da

Ilha de Vancouver) identificou em tempo real um potencial meteotsunami (DZVONKOVSKAYA; PETERSEN; INSUA, 2017).

Os radares de alta frequência são capazes de avaliar características da superfície oceânica, como correntes e altitudes de ondas, abrangendo uma vasta área que se estende para além de 100 km mar adentro (GUÉRIN *et al.*, 2018). Esta habilidade flutua de acordo com a frequência do radar, potência da antena e também a interferência ambiental, porém, de maneira geral, é viável ter um ângulo de abertura de aproximadamente 120 graus ou mais (GUÉRIN *et al.*, 2018).

Para a coleta de dados, os radares de alta frequência empregam uma grelha de células, com dimensões de alguns quilômetros, e mensuram o deslocamento das ondas na superfície do oceano através do fenômeno conhecido como espalhamento de Bragg (GUÉRIN *et al.*, 2018). O espalhamento de Bragg refere-se ao tipo de espalhamento que é formado pela combinação de ondas parcialmente refletidas em planos paralelos e igualmente espaçados, onde a onda resultante é a soma das ondas moduladas através de interferência construtiva e destrutiva (BRAGG *et al.*, 1934).

Este método permite uma leitura de dados relevantes das ondas, como a amplitude e energia, o que torna os radares de alta frequência apropriados para detectar correntes oriundas de um tsunami gerado por fontes não sísmicas, como os meteotsunamis (GUÉRIN *et al.*, 2018).

3.3.2 Monitoramento por Medição da Taxa de Pressão do Fundo do Mar

A premissa central desses tipos de sistemas é a identificação de quaisquer atividades sísmicas subaquáticas não convencionais e a determinação automática se foram provocadas por terremotos ou por outros fatores (CHATURVEDI; SRIVASTAVA; GUVEN, 2017). Um notável exemplo que emprega esse mesmo procedimento é o sistema de Avaliação e Relato de Tsunamis em Mar Profundo (DART), desenvolvido por especialistas da NOAA.

Para facilitar a detecção e o relatório em tempo real de potenciais tsunamis, os sistemas DART utilizam um registrador de pressão subaquática fixado no leito marinho, que se conecta a uma boia de superfície para comunicação em tempo real (GONZALEZ *et al.*, 1998). Esses dois componentes são interconectados por meio de uma conexão acústica, que transmite os dados

capturados pelo registrador de pressão até a boia de superfície (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2021). Os sistemas DART têm conexões de comunicação bidirecionais e, portanto, são capazes de enviar e receber dados do Centro de Alerta de Tsunami e outros através da Internet (MEINIG, 2005).

O registrador de pressão subaquática recolhe dados de temperatura e pressão que são posteriormente convertidos em uma estimativa aproximada da altura da superfície do mar (NATIONAL DATA BUOY CENTER, 2021). Utilizando esses dados, o algoritmo de detecção opera, primeiramente, estimando as amplitudes das flutuações de pressão dentro da faixa de frequência do tsunami e, subsequentemente, comparando essas amplitudes com um valor de referência (VOLOVOI; PETERSON, 2011). Caso essas amplitudes ultrapassem o limite estabelecido, as informações detalhadas sobre o tsunami são automaticamente fornecidas (MEINIG, 2005).

3.3.3 Monitoramento por Alteração de Dados em Estações Maregráficas

O monitoramento do nível do mar é uma ferramenta fundamental para a detecção e o rastreamento de tsunamis, que se caracterizam por uma alteração significativa em relação ao nível de maré esperado (ANNUNZIATO, 2022). Com um entendimento aprofundado dos dados de maré no local onde um sensor é colocado, torna-se possível a ativação de um aviso para acompanhar anomalias que possam indicar um tsunami.

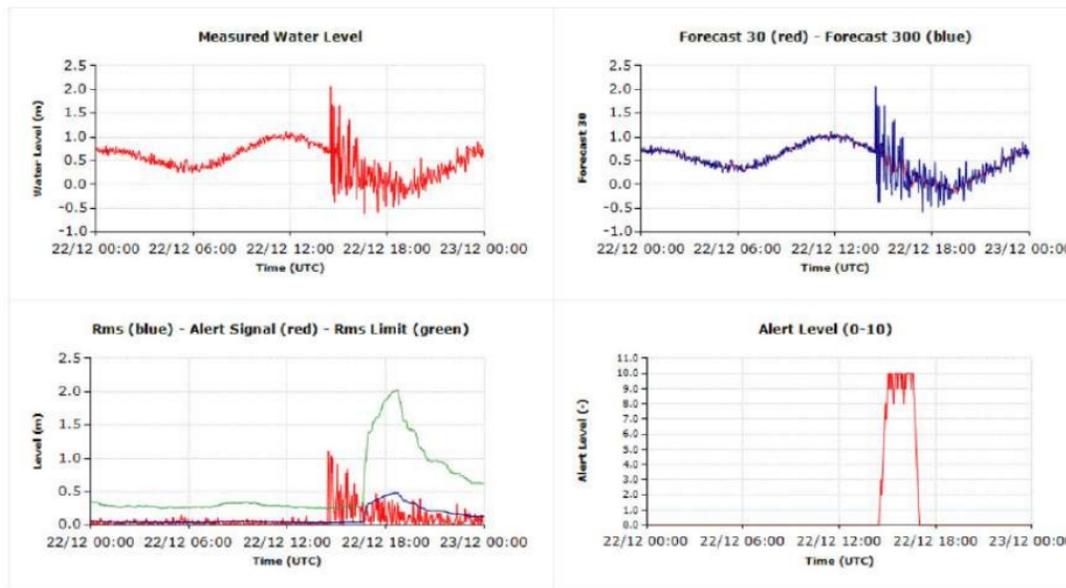
Um exemplo de um detector de tsunamis que se baseia nesse processo, se refere ao Centro de Pesquisa Conjunta (JRC) da União Europeia, que desenvolveu o Dispositivo Econômico para Medição do Nível do Mar, uma solução capaz de adquirir, processar e transmitir dados do nível do mar e emitir alertas para possíveis tsunamis (ANNUNZIATO, 2022). Conforme explicado por Annunziato (2022), o dispositivo utiliza um software que emprega um algoritmo para identificar ondas anômalas em tempo real, disparando um alerta para uma lista de usuários, ou operadores do serviço de tsunami.

O propósito principal do algoritmo é distinguir o sinal de um possível tsunami, do ruído (variações no nível do mar que não são provocadas por um tsunami) a partir dos

dados coletados a cada segundo (ANNUNZIATO, 2022). O sinal de alerta é calculado pela diferença entre o sinal de alta frequência e o sinal de baixa frequência, ambos derivados por métodos estatísticos. Quando essa diferença excede um limite pré-determinado, um alerta de tsunami é emitido. Essa diferença é contrastada com o valor quadrático médio (RMS) do sinal e, quando a diferença supera um número específico de vezes o RMS, o nível de alerta aumenta em uma unidade. Quando cai abaixo do limite, o nível de alerta diminui uma unidade (ANNUNZIATO, 2022).

Um exemplo de aplicação desse algoritmo foi observado a partir dos dados do evento vulcânico de Krakatoa, quando um significativo tsunami atingiu as costas de Sumatra e Java no Estreito de Sunda, com ondas atingindo até 8 metros (VERBEEK, 1884). Os resultados desse processo podem ser vistos na Figura 14.

Figura 14: Dados simulados do Tsunami gerado pela erupção do Krakatoa



Fonte: ANNUNZIATO (2022).

Analisando a figura mencionada, a primeira instrumentação atingida pela onda foi o indicador de nível do mar localizado na Marina Jambu, que é propriedade da *Badan Informasi Geospasial* (BIG) da Indonésia e opera com uma taxa de amostragem de um minuto

(ANNUNZIATO, 2022). A Figura 14 mostra os dados do nível do mar adquiridos por este dispositivo. Se o algoritmo de detecção tivesse sido ativado naquele momento, teria emitido um sinal de alerta em até um minuto após a chegada da onda do tsunami no indicador de maré na Marina Jambu (ANNUNZIATO, 2022).

Além disso, ao analisar a figura acima, torna-se evidente que os sinais provocados pelo tsunami gerado pela erupção do Krakatoa são mais claramente discerníveis. Este fenômeno contrasta com o tsunami Tonga, que, como será observado durante o trabalho, não exibe sinais tão perceptíveis. Essa diferença pode ser atribuída à localização geográfica da região de estudo do tsunami Tonga, que se encontra a uma distância considerável do Brasil, resultando em dados menos puros e, portanto, menos distintos na análise.

3.4 Controle de Qualidade de Dados de Nível do Mar

O controle de qualidade de dados de nível do mar, seguindo padrões como o QARTOD (*Quality Assurance of Real-Time Oceanographic Data*), desempenha um papel crucial na garantia da confiabilidade e utilidade desses dados em diversas aplicações. Esse controle rigoroso pode ser fundamental, por exemplo, para a detecção precisa de sinais de tsunamis. Um exemplo notável é a detecção de "spikes" no nível do mar, que, quando realizado o controle inadequado dos dados, pode ser confundido com o sinal do tsunami. O controle de qualidade apropriado assegura que tais variações não sejam erroneamente interpretadas como erros de medição ou ruído nos dados. Além disso, o controle de qualidade de dados é fundamental para o processamento subsequente, pois dados confiáveis são essenciais na modelagem de tsunamis, na análise de impacto e em estudos científicos relacionados ao comportamento do oceano, proporcionando uma base sólida para a pesquisa e a tomada de decisões informadas em situações de emergência.

Portanto, o QARTOD representa um conjunto de normas e procedimentos estabelecidos pela Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA), destinados à gestão de qualidade de dados oceanográficos em tempo real. O QARTOD proporciona um esquema padronizado para

aferir a qualidade dos dados obtidos de diversos sistemas de observação oceanográfica, incluindo aqueles que se referem às correntes de superfície provenientes de radares de alta frequência.

O Manual QARTOD é especificamente direcionado para a operacionalização dos procedimentos de controle de qualidade para dados de radares de alta frequência. Esses sistemas, que utilizam ondas de rádio para avaliar as correntes de superfície oceânicas em uma vasta região, fornecem informações para a pesquisa costeira e oceanográfica, a navegação e propósitos operacionais.

O manual delinea uma série de testes e verificações para avaliar a qualidade dos dados em tempo real. Esses testes são categorizados em três grupos principais:

- Testes de Faixa Bruta: Esses testes visam identificar e sinalizar pontos de dados que estejam fora da faixa esperada. Por exemplo, eles podem verificar valores irrealistas ou valores discrepantes que não representem as condições atuais esperadas. Os testes de faixa bruta são importantes para detectar falhas nos instrumentos ou erros de transmissão de dados;
- Testes de Consistência Temporal: Esses testes avaliam a consistência temporal dos dados comparando medições em diferentes momentos. Eles ajudam a identificar mudanças repentinas ou discrepâncias nos dados que possam indicar lacunas nos dados, problemas nos sensores ou outros problemas. Os testes de consistência temporal também avaliam a variabilidade dos dados para garantir que estejam dentro das faixas esperadas; e
- Testes de Consistência Espacial: Esses testes examinam a consistência espacial dos dados comparando medições de estações ou células vizinhas. Eles identificam quaisquer diferenças ou descontinuidades significativas nos padrões de corrente, o que pode ser indicativo de erros, características costeiras ou outros fenômenos ambientais. Os testes de consistência espacial garantem que os dados representem com precisão o fluxo de corrente na região monitorada.

Dentro de cada um desses grupos, de acordo com o manual, encontram-se os seguintes testes que serão aplicados aos dados durante o presente trabalho:

➤ ***Gross Range Test (Teste de Intervalo Bruto)***

- Objetivo: Detectar valores que estão fora de um intervalo aceitável predefinido para a variável em questão.
- Método: Valores observados que estão abaixo de um limite mínimo ou acima de um limite máximo são marcados como suspeitos ou falhos.

➤ ***Spike Test (Teste de Pico)***

- Objetivo: Detectar variações súbitas e anormais (picos) nos dados que não representam variações naturais do fenômeno estudado.
- Método: Se a diferença entre uma observação e a média das observações adjacentes excede um limite pré-definido, a observação é marcada como suspeita ou falha.

➤ ***Rate of Change Test (Teste de Taxa de Mudança)***

- Objetivo: Detectar mudanças anormais entre observações consecutivas.
- Método: Calcula a diferença entre observações consecutivas. Se essa diferença excede um limite especificado (indicando uma mudança muito rápida que é improvável de ser natural), a observação é marcada como suspeita ou falha.

➤ ***Flat Line Test (Teste de Linha Reta)***

- Objetivo: Identificar séries de observações onde o valor não muda, o que pode indicar um problema com o sensor ou a transmissão de dados.
- Método: Se um número pré-definido de observações consecutivas tem o mesmo valor (ou variações muito pequenas), então essas observações são marcadas como suspeitas ou falhas. Isso é típico de sensores que pararam de funcionar corretamente.

O manual QARTOD fornece instruções detalhadas sobre como implementar esses testes e interpretar seus resultados. Ele também inclui diretrizes sobre a sinalização e tratamento dos problemas de dados identificados. O objetivo é melhorar a confiabilidade e usabilidade dos dados em tempo real, identificando e mitigando problemas potenciais de qualidade de forma oportuna.

Ao seguir as diretrizes do QARTOD, os provedores e usuários de dados podem ter maior confiança na qualidade e integridade dos dados de correntes superficiais, possibilitando análises, modelagens e tomadas de decisão mais precisas relacionadas a processos costeiros e oceânicos.

3.5 Filtragem e Processamento de Sinais

A filtragem de sinais é um processo crucial para aprimorar a qualidade e a interpretação de dados complexos. Conforme abordado por Oppenheim & Schaffer (1989), a filtragem de sinais envolve a aplicação de filtros projetados para eliminar componentes indesejadas, como ruídos e interferências. Esses filtros, que podem ser projetados com base em algoritmos específicos, têm a finalidade de realçar características importantes no sinal.

Por outro lado, a análise de sinais desempenha um papel vital na extração de informações relevantes e na identificação de padrões. Em consonância com as explicações de Mitra & Kaiser (1993), a análise de sinais se estende por diferentes domínios, como o domínio do tempo e o domínio da frequência. Ao analisar um sinal no domínio do tempo, pode-se obter dados sobre sua evolução temporal, enquanto a decomposição do sinal no domínio da frequência, como detalhado por Oppenheim & Schaffer (1999), permite a identificação de componentes de frequência significativas.

3.5.1 Filtro de Thompson

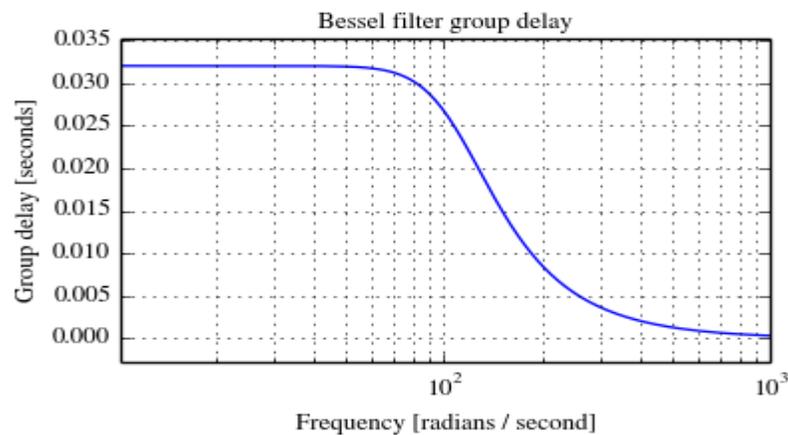
O filtro passa-faixa de Thompson, também conhecido como Filtro de Thomson ou filtro de Bessel-Thomson, é um tipo de filtro amplamente utilizado em processamento de sinais e análise de séries temporais, especialmente para prever variações do nível do mar (THOMPSON, 2014).

O objetivo principal do filtro de Thompson é atenuar componentes ou perturbações de alta frequência em uma série temporal, ao mesmo tempo em que preserva as variações de baixa frequência de interesse. Ele foi projetado para remover perturbações inerciais, gravitacionais e de

alta frequência, como marés diurnas e semidiurnas, dos dados observados do nível do mar, a fim de obter o NMM (THOMSON; EMERY, 2001).

Ao contrário de alguns outros tipos de filtro, o Filtro de Thompson permite ao usuário escolher as frequências de corte, proporcionando maior flexibilidade na personalização do processo de filtragem. Ajustando as frequências de corte, é possível direcionar bandas de frequência específicas para atenuação (Figura 15).

Figura 15: Resposta Gráfica de um sinal filtrado pelo Filtro de Thompson



Fonte: THE SCIPY COMMUNITY (2016).

Como já citado, diferentemente de outros métodos de filtragem, o Filtro de Thompson se sobressai pela capacidade de personalização, permitindo ao usuário escolher as frequências de corte, conforme mencionado por Thomson (1982) e Emery & Thomson (2001). Isso oferece uma flexibilidade única na adaptação do processo de filtragem, possibilitando a atenuação seletiva de bandas de frequência específicas. A eficácia do Filtro de Thompson na análise de séries de NMM é enfatizada, com sua busca por manter uma resposta de atraso de grupo praticamente plana em torno de 0 Hz, resultando em uma resposta de fase quase linear na faixa de passagem. Essa característica é particularmente relevante para analisar dados de marés, pois ajuda a minimizar distorções no domínio do tempo e a preservar as relações temporais entre as componentes de maré.

Embora a implementação do Filtro de Thompson possa envolver operações matemáticas complexas, sua popularidade persiste devido à simplicidade de seu design geral, conforme observado por Thomson (1982) e Emery & Thomson (2001). Apesar da disponibilidade de alternativas, o Filtro de Thompson permanece como uma escolha amplamente utilizada em estudos oceanográficos, graças à sua versatilidade e capacidade eficaz de separar variações de baixa frequência de perturbações de alta frequência.

Adicionalmente, a apreciação pelo Filtro de Thompson abrange sua habilidade de lidar com séries temporais de NMM em cenários com múltiplas componentes de maré coexistentes, conforme discutido por Thomson (1982) e Emery & Thomson (2001). Em situações onde várias componentes de maré com períodos curtos coexistem, o Filtro de Thompson oferece uma abordagem eficaz para eliminar oscilações espúrias causadas pelo efeito de *aliasing*. Através da aplicação de pesos específicos em diferentes frequências, o filtro contribui para a redução desse efeito e a obtenção de estimativas mais precisas do NMM.

Em resumo, o filtro passa-faixa de Thompson, como comprovado por Thomson (1982) e Emery & Thomson (2001), é um método útil na previsão do Nível Médio do Mar, realizando a remoção de perturbações de alta frequência nos dados observados do nível do mar. Suas frequências de corte ajustáveis e otimização no tratamento de séries de NMM consolidam sua popularidade na oceanografia, especialmente para analisar variações de maré e outros componentes de baixa frequência de interesse.

3.5.2 Transformada de Fourier

A análise de dados de nível do mar relacionados às marés é aprimorada significativamente por meio da aplicação da Transformada de Fourier, uma ferramenta matemática amplamente reconhecida na área (SLEPIAN; POLLAK, 1961; THOMSON; EMERY, 2001). Essa técnica desempenha um papel fundamental ao decompor uma série temporal de medições do nível do mar em suas componentes de frequência constituintes, possibilitando uma compreensão detalhada da variabilidade geral do nível do mar.

No contexto específico das marés, a Transformada de Fourier desempenha um papel crítico, como observado por Emery & Thomson (2001) e Slepian & Pollak (1961), uma vez que as marés são fenômenos intrinsecamente periódicos. Elas podem ser representadas como a

sobreposição de múltiplos componentes senoidais com diferentes frequências e amplitudes. Ao empregar a Transformada de Fourier em séries temporais de medições do nível do mar, é possível identificar as frequências dominantes das marés e determinar suas amplitudes correspondentes.

A Transformada de Fourier realiza a conversão da representação temporal dos dados do nível do mar em um domínio de frequência, conforme explicado por Emery & Thomson (2001) e Slepian & Pollak (1961). Nesse domínio, os dados são traduzidos em um espectro que exibe amplitudes e fases das diversas frequências de maré presentes nos dados. Esse espectro permite observar dados sobre os componentes de maré e suas contribuições proporcionais para o nível do mar observado.

Uma característica distintiva e essencial da Transformada de Fourier é a habilidade de isolar os sinais de maré de outros componentes não relacionados, tais como influências meteorológicas ou ruídos, conforme destacado por Emery & Thomson (2001) e Slepian & Pollak (1961). A precisão na separação das frequências de maré é alcançada por meio de técnicas apropriadas de filtragem de frequência.

Resumidamente, a Transformada de Fourier emerge como uma ferramenta fundamental na análise de dados de nível do mar associados às marés, permitindo a identificação das suas frequências predominantes, a segregação dos sinais de maré de outros componentes e informações sobre a complexa dinâmica desses fenômenos (PUGH, 1996).

3.5.3 Decomposição de Modo Empírico

A Decomposição de Modo Empírico (EMD, do inglês Empirical Mode Decomposition) é uma técnica de processamento de sinais amplamente utilizada para analisar séries temporais com características não estacionárias e não lineares, com aplicações que abrangem diversos campos, inclusive na oceanografia (HUANG et al., 1998; WU et al., 2009).

A EMD desempenha um papel fundamental na identificação precisa de diferentes modos oscilatórios presentes nos dados de nível do mar, como marés e ressacas, fornecendo informações detalhadas sobre suas características temporais e escalas de tempo associadas. Além disso, a

técnica é eficaz na detecção e análise de fenômenos não lineares, como ondas internas, contribuindo para uma compreensão mais profunda dos processos costeiros.

A capacidade da EMD de separar eficientemente tendências de longo prazo dos dados de nível do mar de variações de curto prazo é essencial. Isso permite a quantificação das taxas de mudança e a análise detalhada das oscilações interanuais, contribuindo significativamente para estudos de mudanças climáticas e gerenciamento costeiro.

Além disso, a EMD é uma ferramenta valiosa para analisar a variabilidade sazonal nos dados de nível do mar, fornecendo informações sobre periodicidade, amplitudes e fases sazonais.

A aplicação da EMD em dados de nível do mar desempenha um papel fundamental na compreensão dos processos subjacentes às variações do nível do mar, contribuindo para estudos relacionados a mudanças climáticas, gerenciamento costeiro e avaliação de riscos (HUANG et al., 1998; WU et al., 2009). Em resumo, a EMD é uma ferramenta essencial na oceanografia e em estudos relacionados ao nível do mar, permitindo uma análise completa e detalhada de séries temporais complexas.

3.5.4 Método de Ondas (Wavelet)

A transformada *wavelet* é uma ferramenta matemática frequentemente utilizada para analisar sinais e dados em diversos campos, incluindo processamento de sinais, análise de imagens e oceanografia. Ela compartilha semelhanças com a transformada de Fourier, porém apresenta diferenças fundamentais que a tornam altamente adaptativa para a análise localizada de diferentes componentes de frequência em um sinal (DAUBECHIES, 1992; PERCIVAL; WALDEN, 2006).

Enquanto a transformada de Fourier oferece uma representação uniforme no domínio tempo-frequência, a transformada *wavelet* proporciona resolução de alta frequência em baixas frequências e resolução de tempo precisa em altas frequências. Isso é possível devido à natureza localizada das funções *wavelet*, que são limitadas tanto no tempo quanto na frequência, permitindo a captura eficaz de mudanças abruptas e características transitórias em um sinal (DAUBECHIES, 1992; PERCIVAL; WALDEN, 2006).

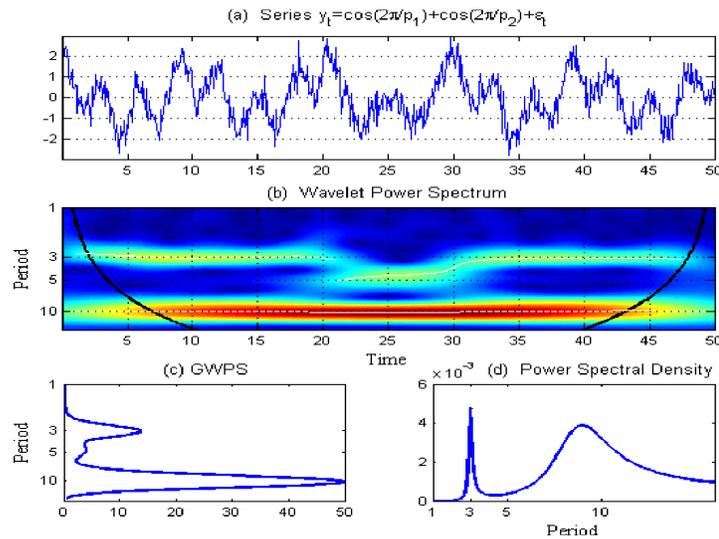
A transformada *wavelet* opera por meio da decomposição multirresolução, onde o sinal é filtrado sucessivamente por filtros passa-alta e passa-baixa. Essa decomposição resulta em coeficientes de aproximação e detalhe em diferentes escalas, oferecendo uma estrutura hierárquica de informações (DAUBECHIES, 1992; PERCIVAL; WALDEN, 2006). Os coeficientes de detalhe capturam o conteúdo de alta frequência, enquanto os coeficientes de aproximação representam o conteúdo de baixa frequência.

Uma das principais vantagens da análise *wavelet* é sua adaptabilidade e capacidade de representar informações localizadas nos domínios do tempo e da frequência. Isso torna a transformada *wavelet* útil para analisar sinais não estacionários, como os encontrados na oceanografia, onde as características das ondas e correntes podem variar ao longo do tempo e espaço (DAUBECHIES, 1992; PERCIVAL; WALDEN, 2006). Além disso, a análise *wavelet* é aplicada na remoção de ruído, extração de características e reconhecimento de padrões, contribuindo para uma compreensão mais precisa e completa dos sinais (DAUBECHIES, 1992; PERCIVAL; WALDEN, 2006).

No que tange às funções bases de ondaletas, segundo Torrence & Compo (1998), a “Morlet” é uma das *wavelets* mais comuns em análises de séries temporais, devido às suas propriedades úteis. Segundo os autores, uma das características distintivas da Morlet é sua capacidade de fornecer uma boa resolução em termos de tempo e frequência simultaneamente, tornando-a adequada para a detecção de eventos que ocorrem em diferentes escalas temporais.

Além disso, de acordo ainda com Torrence & Compo (1998), a Morlet é eficaz na detecção de fenômenos não estacionários, como ondas internas e mudanças abruptas no nível do mar, contribuindo para uma compreensão mais profunda dos processos oceanográficos. Sua capacidade de descrever com eficiência oscilações em diferentes escalas de tempo a torna uma ferramenta essencial na análise de dados de séries temporais em oceanografia e outras disciplinas científicas.

Figura 16: Exemplo visual de um Espectro de Energia *Wavelet*



Fonte: SOARES *et al.* (2018).

Portanto, a transformada *wavelet* desempenha um papel crucial na análise de sinais nos domínios do tempo e da frequência, fornecendo informações detalhadas sobre as características dos sinais que muitas vezes não podem ser obtidas por outras técnicas de processamento de sinais (DAUBECHIES, 1992; PERCIVAL; WALDEN, 2006).

4. DADOS E MÉTODOS

A metodologia deste estudo será estruturada em três etapas sequenciais e interdependentes, com o objetivo de realizar uma análise detalhada dos eventos associados ao tsunami em estudo. Cada etapa será meticulosamente planejada e executada, empregando técnicas específicas para atingir os objetivos do projeto.

A primeira etapa do estudo concentrar-se-á na aquisição e controle de qualidade dos dados de nível do mar das regiões costeiras de Arraial do Cabo, Imbituba e Salvador. Estes dados serão selecionados de acordo com o período exato da ocorrência do tsunami sob investigação. Para assegurar a confiabilidade e integridade dos dados, será aplicado um rigoroso processo de controle de qualidade baseado nas diretrizes estabelecidas pelo Manual for Real-Time Quality

Control of Water Level Data (QARTOD). Esta fase é essencial para garantir que os dados utilizados nas análises subsequentes sejam confiáveis e representativos.

Na segunda etapa, os dados validados serão processados e analisados utilizando a linguagem de programação Python. Para facilitar a manipulação e análise dos dados, serão empregadas bibliotecas científicas, incluindo NumPy, SciPy, Pandas, Pylab e Math. Esta fase envolverá técnicas de análise de séries temporais e espectros. Dentre as abordagens utilizadas, destacam-se o Filtro de Thompson, a Transformada de Hilbert-Huang, a Transformada de Fourier e o Método de Ondaletas. Cada técnica será aplicada com o objetivo de identificar e caracterizar as propriedades e comportamentos da onda associada ao tsunami.

Na terceira e última etapa, será realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos por meio dos diferentes métodos aplicados na etapa anterior. Esta análise comparativa permitirá a determinação das características essenciais do tsunami, tais como amplitude, frequência, duração e outros parâmetros relevantes. Essa comparação entre diferentes abordagens analíticas proporcionará uma compreensão mais completa dos eventos do tsunami nas regiões de Arraial do Cabo, Imbituba e Salvador.

Antes de iniciar a primeira etapa, o estudo abordará um modelo simplificado da propagação do tsunami desde sua geração até sua chegada à costa do Brasil. Nesse contexto, serão consideradas as características físicas da onda e sua interação com o ambiente oceânico, focalizando pontos de interesse onde fenômenos como difração, refração e reflexão podem ter ocorrido e influenciado o comportamento do tsunami antes de sua chegada à costa brasileira.

4.1 Aquisição de Dados de Nível do Mar

Para o estudo e monitoramento dos níveis do mar nas regiões de Arraial do Cabo, Imbituba e Salvador, estão sendo adotadas diversas fontes de dados confiáveis. Uma delas é o Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), que será utilizado em conjunto com o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), a fim de obter informações precisas sobre os níveis do mar nessas localidades. Além disso, a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia, conduzida pelo

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), também será utilizada como uma fonte complementar de dados.

Os registros abrangerão um período específico, compreendido entre os dias 13 de janeiro de 2022, a partir das 00:00 horas, até 23:55 do dia 22 de janeiro de 2022, a cada 5 minutos. Essa escolha de datas é relevante, pois coincide com o período em que o tsunami teve sua origem em Tonga, no Oceano Pacífico, no dia 15 de janeiro de 2022. Com essa abrangência temporal, espera-se capturar informações relevantes sobre possíveis variações nos níveis do mar nas regiões mencionadas, relacionadas a esse evento.

Essa abordagem abrangente na coleta de dados permitirá uma análise mais completa e precisa dos níveis do mar nessas áreas, possibilitando a identificação de quaisquer anomalias ou alterações significativas em relação ao período prévio ao tsunami. Com base nessas informações, será possível avaliar o impacto do evento nas regiões em questão.

4.2 Análise de Qualidade dos Dados de NM

A análise de qualidade dos dados de nível do mar obtidos será realizada por meio do método QARTOD (Quality Assurance of Real-Time Oceanographic Data). Esse método consiste na aplicação de testes específicos para avaliar a confiabilidade e a integridade dos dados coletados.

Dentre os parâmetros utilizados no método QARTOD, destaca-se o "gross range test" (teste de faixa bruta), que verifica se os valores registrados estão dentro de uma faixa aceitável, considerando limites pré-definidos. Espera-se que esse teste identifique e descarte possíveis leituras inválidas ou extremas que possam comprometer a qualidade dos dados.

Outro parâmetro utilizado será o "spike test" (teste de pico), que busca identificar valores abruptos e inconsistentes em relação aos registros anteriores e subsequentes. Esses picos podem ser indicativos de interferências ou erros no processo de medição. A expectativa é que o *spike test* possa identificar e corrigir esses picos, garantindo a integridade dos dados de nível do mar.

Além disso, será aplicado o "rate of change test" (teste de taxa de variação), que analisa a velocidade de mudança dos valores de nível do mar ao longo do tempo. Esse teste é importante para identificar variações anormais ou irrealistas nos dados, que podem ser causadas por problemas técnicos ou condições atmosféricas incomuns. Espera-se que o *rate of change test* detecte essas variações e contribua para a qualidade e confiabilidade dos dados.

Por fim, o "flat line test" (teste de linha plana) será utilizado para verificar se os dados permanecem estáveis em períodos de calma ou quando não são esperadas variações significativas. Esse teste é útil para identificar problemas de instrumentação ou falhas na coleta de dados. A expectativa é que o *flat line test* detecte essas situações e forneça informações sobre a qualidade dos registros de nível do mar.

4.3 Relação entre as Ferramentas Utilizadas

O Filtro de Thompson será utilizado para identificar e selecionar as faixas de frequência de acordo com os dados do Tsunami Tonga. Além disso, espera-se remover valores discrepantes incluídos nos dados de nível do mar. Ele se baseia no cálculo de desvios padrão e limites estatísticos para determinar quais valores são considerados atípicos ou anômalos conforme as frequências pré-determinadas.

Para sua implementação, será utilizado código *Python* (Autor: Mario Grune de Souza e Silva/Adaptada da versão feita pelo Prof. Claudio Freitas Neves em Fortran) que faz uso de diversas bibliotecas, como *NumPy*, *SciPy*, *Pandas* e *Matplotlib*, para realizar operações matemáticas, leitura e manipulação de dados, bem como para a visualização dos resultados. No contexto do código, o Filtro de Thompson será utilizado para determinar os coeficientes do filtro com base nas frequências pré-determinadas, que são configuradas para selecionar ou eliminar faixas de frequência específicas nos dados de nível do mar. As frequências de corte são definidas de acordo com os parâmetros do filtro, e o código realizará cálculos complexos para calcular os coeficientes adequados.

Para avaliação de quais valores serão considerados atípicos ou anômalos, o código calcula desvios padrão e limites estatísticos. Isso ajuda a garantir que apenas os dados relevantes e confiáveis sejam considerados na análise.

Após a aplicação do Filtro de Thompson, os dados filtrados podem ser aplicados à EMD. Através da EMD será capaz analisar as características espectrais instantâneas dos dados, decompondo-os em funções de modo intrínseco (MFIs) que representam os diferentes modos oscilatórios presentes no sinal. Com isso, será realizada uma análise mais precisa e robusta das características temporais e espectrais do sinal. A remoção de *outliers* pelo Filtro de Thompson ajudará a eliminar ruídos ou dados inconsistentes que poderiam interferir na análise da EMD, permitindo uma identificação mais precisa dos modos oscilatórios e das tendências presentes nos dados de interesse.

De igual forma ao Filtro de Thompson, esta etapa da análise será realizada através de código Python. O código utiliza a biblioteca "emd" para implementar a EMD de maneira eficiente. Ele carrega um conjunto de dados de nível do mar e centraliza esses dados em torno da média. A EMD é aplicada aos dados, resultando na geração de Funções de Modo Intrínseco (*Intrinsic Mode Functions* - IMFs), que representam as diferentes componentes oscilatórias presentes nos dados.

Além disso, o código calcula a frequência instantânea, fase e amplitude das MFIs usando o método da Transformada de Hilbert Normalizada. A partir dessas informações, é possível analisar as características espectrais instantâneas de cada MFI. Por fim, o código demonstra a reconstrução de componentes de base a partir das MFIs e aplica suavização. Ele apresenta gráficos que ilustram a decomposição das MFIs e a análise das características espectrais ao longo do tempo.

A Transformada de Fourier irá decompor um sinal de nível do mar em suas componentes de frequência. Ela transformará um sinal no domínio do tempo em um sinal no domínio da frequência, revelando os diferentes componentes oscilatórios presentes nos dados. Ao aplicar a Transformada de Fourier aos dados filtrados pelo Filtro de Thompson, bem como nas funções de

modo intrínsecos geradas, será possível analisar as características espectrais dos sinais de nível do mar e identificar padrões periódicos, como marés e ondas.

Além disso, será abordado em um tópico, a aplicação da Transformada de Fourier configurada com escala logarítmica no eixo das abscissas. Ao empregar a escala logarítmica, é possível destacar tanto as variações de curto prazo quanto as tendências de longo prazo de uma forma mais equilibrada. Isso permite identificar componentes de frequência que podem indicar fenômenos sazonais, oscilações climáticas e eventos extremos, contribuindo para uma compreensão mais abrangente das flutuações do nível do mar e seu potencial impacto ao longo do tempo.

A aplicação da Transformada de Fourier será realizada por código *Python*, onde o *script* que realiza análises de séries temporais de dados de nível do mar utiliza diversas bibliotecas, como *NumPy*, *Pandas* e *Matplotlib*, para processar e visualizar os dados. O código permite ao usuário fornecer o caminho para um arquivo de dados em formato *.txt* e especificar o nome da estação que está sendo analisada, bem como o passo de tempo em minutos dos dados.

As principais características do código incluem a remoção da média dos dados, o cálculo do espectro de Fourier para identificar componentes sazonais, meteorológicas e de tempestade, e a geração de gráficos para visualizar os resultados da análise.

Por fim, a Transformada *Wavelet*, também conhecida como Análise *Wavelet*, é uma técnica que permitirá analisar os sinais de nível do mar em diferentes escalas temporais. Ela divide o sinal em sub-bandas de frequência, permitindo identificar padrões e fenômenos em diferentes resoluções temporais. A aplicação da Transformada *Wavelet* nos dados de nível do mar filtrados pelo Filtro de Thompson poderá revelar informações adicionais sobre variações temporais em diferentes escalas, contribuindo para uma análise mais detalhada e precisa dos fenômenos oceânicos.

Nessa análise, através do *Python*, a *wavelet* escolhida foi a Morlet, uma *wavelet* complexa amplamente utilizada em diversas áreas, como processamento de sinais e análise de séries temporais. A Morlet é uma *wavelet* que possui uma característica única, pois é sensível tanto a componentes de baixa frequência quanto a eventos de alta frequência nas séries temporais. Ela é

capaz de capturar informações tanto na escala do tempo quanto na escala da frequência, tornando-a uma ferramenta versátil para a análise de séries temporais não-estacionárias.

De acordo com Torrence & Compo (1998), a *wavelet* Morlet é uma função complexa, com uma parte real que é uma função oscilatória senoidal amortecida e uma parte imaginária que é uma gaussiana. Isso permite que ela seja eficaz na detecção de eventos transientes, como picos de alta frequência, e também na análise de tendências de longo prazo. Sua capacidade de adaptação a diferentes escalas de tempo e frequência a torna valiosa para a identificação de padrões e comportamentos em séries temporais complexas.

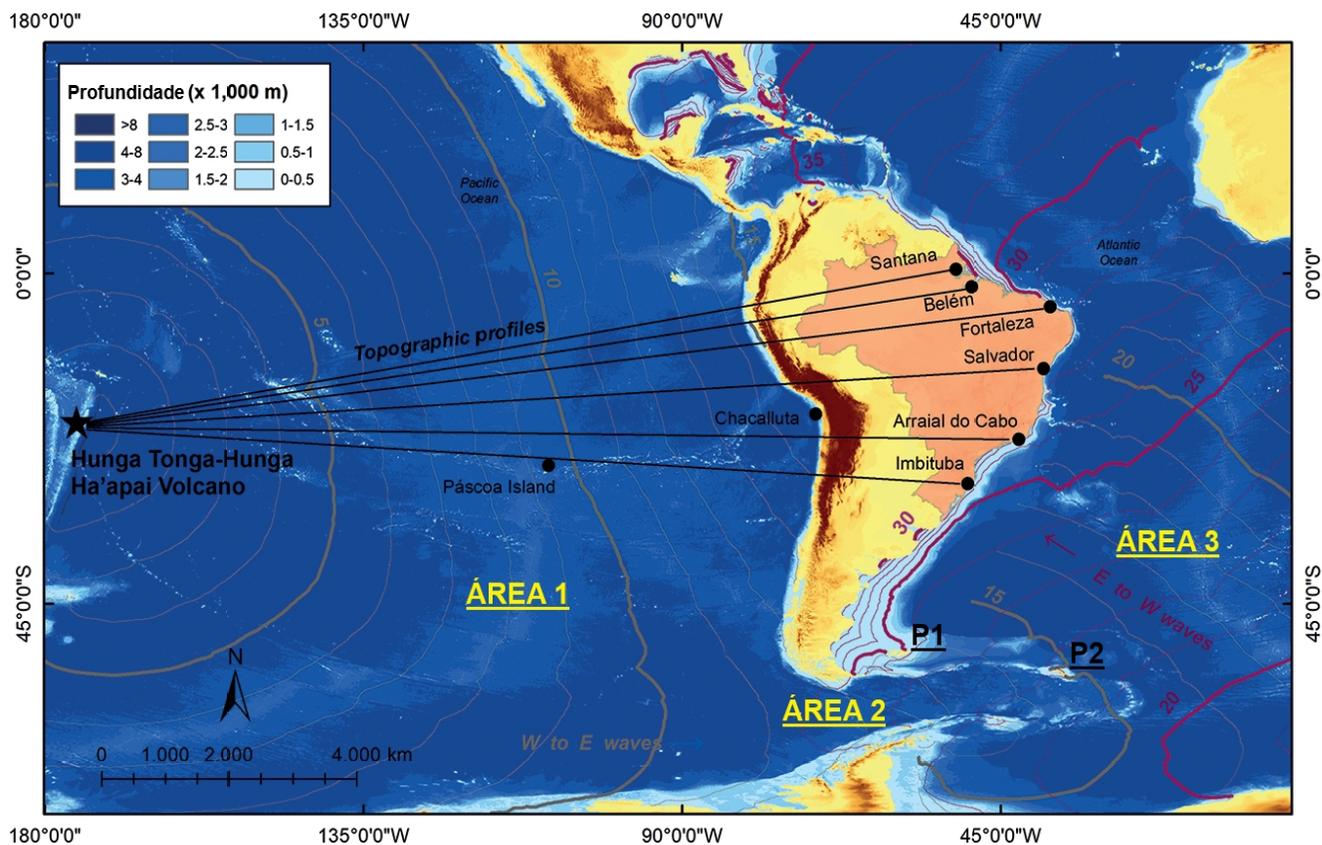
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões que serão apresentados no trabalho serão divididos de acordo com a atividade realizada e separados pela região em estudo. O primeiro tópico explicitará o modelo simples de propagação do tsunami. O segundo tópico versará sobre o resultado dos testes da análise de qualidade dos dados, seguido por uma análise e processamento de dados pelo Filtro de Thompson, EMD, Transformada de Fourier e Transformada *Wavelet*. dos dados de nível do mar e espectros de frequência padrões das regiões (sem as frequências do tsunami). Por fim, encontra-se no Apêndice A uma análise dos dados de nível do mar e espectros de frequência das regiões sem as frequências do tsunami, como forma de colaborar com um estudo comparativo sobre o assunto.

5.1 Propagação do Tsunami desde Tonga até o Brasil

As informações apresentadas a seguir baseiam-se no estudo conduzido por Dourado *et al.* (2022) como referência primordial. O estudo aborda minuciosamente a propagação do tsunami desde seu epicentro, localizado em Tonga, até sua chegada à costa do Brasil, conforme delineado na Figura 17 a seguir:

Figura 17: Propagação do Tsunami até o Brasil, com a região oceânica dividida em três áreas



Fonte: ADAPTADO DE DOURADO *et. al.*, (2022).

A Figura 17 é subdividida em três áreas cruciais, cada uma delas sujeita a influências físicas específicas que moldaram a propagação do tsunami desde sua origem em Tonga até suas repercussões nas regiões costeiras do Brasil.

Na Área 1, que abrange a vastidão do Oceano Pacífico entre Tonga e o continente sul-americano, as profundidades são predominantemente elevadas (média superior à 10.000 m). Tal fato sugere que a onda se comporte de uma forma mais “livre” nessa área, no seu sentido natural de oeste para leste. No entanto, a presença de uma considerável quantidade de ilhas e qualquer massa de terra no Oceano Pacífico é uma variável importante. As ilhas e massas de terra atuam como obstáculos à propagação da onda, causando fenômenos de difração e reflexão, onde partes da energia do tsunami podem ser redirecionadas em diferentes direções. Isso implica que a onda,

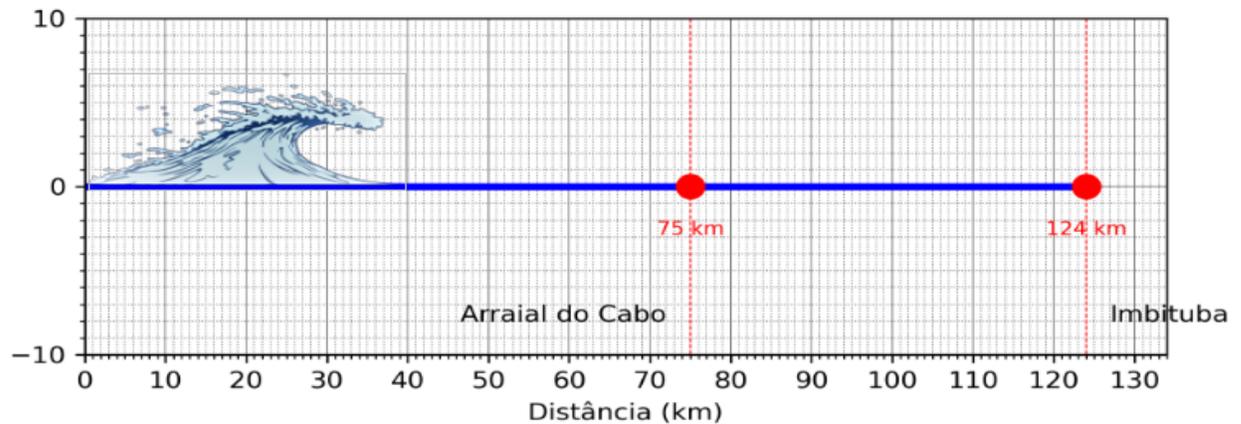
ao se deslocar da Área 1 em direção à Área 2, pode ter sua direção inicial ligeiramente alterada, bem como a intensidade de sua energia devido à essa interação.

Na Área 2, a onda sofre um estreitamento, que ocorre entre o continente sul-americano e a Antártica, e vai de encontro às Ilhas Malvinas (P1) e às Ilhas Geórgia do Sul e *Sandwich* do Sul (P2), além de interagir com os dois continentes mencionados. A passagem do *Drake* e o Mar da Escócia representam canais cruciais que podem direcionar ou refletir a onda, dependendo das condições específicas da interação. A profundidade, embora predominantemente alta (média superior à 4.000 m), reduz consideravelmente devido à plataforma continental na região. Essa variação nas profundidades pode afetar a velocidade e a altura das ondas, influenciando sua capacidade de penetração nas áreas costeiras do Brasil.

Na Área 3, o tsunami já percorreu uma distância considerável e passou por uma série de interações complexas nas áreas 1 e 2. Nessa região, observa-se uma mudança de direção da onda, que se propaga de leste para oeste. Essa mudança de direção pode ser atribuída às influências anteriores, como a topografia submarina e as interações com ilhas, massas de terra e continentes. A onda tende a se curvar e seguir as características do terreno oceânico, resultando em uma trajetória que a direciona rumo às áreas costeiras de Imbituba, Arraial do Cabo e Salvador.

Por fim, como forma de corroborar as informações apresentadas com os estudos realizados por Dourado *et. al.*, (2022), a figura a seguir (Figura 18) demonstra uma simples representação do comprimento das plataformas continentais de Arraial do Cabo (cerca de 75 km) e de Imbituba (cerca de 124 km), a fim de estimar uma perda percentual da velocidade da onda em cada uma dessas regiões, o que fica mais claro ao observar a diferença de tempo de chegada em cada uma dessas áreas.

Figura 18: Representação visual das plataformas continentais em Arraial do Cabo e Imbituba



Fonte: AUTOR (2023).

De acordo com Dourado *et. al.*, (2022) e segundo o IBGE (2022), reflexos do tsunami foram detectados em Arraial do Cabo cerca de 17 horas após sua origem em Tonga (distância de 13.800 km), e em Imbituba cerca de 19 horas depois de iniciado (distância de 13.200 km). Além disso, segundo Omira *et. al.*, (2022), a onda do tsunami obteve uma velocidade aproximada de 1000 km/hr.

A partir desses dados, foram realizados os seguintes cálculos de modo a estimar a perda percentual de velocidade da onda em cada uma das plataformas continentais:

– De Tonga até Arraial do Cabo (com uma plataforma continental de 75 km) em 17 horas:

Velocidade até Arraial do Cabo = (Distância - Plataforma Continental) / Tempo;

Velocidade até Arraial do Cabo = (13800 km - 75 km) / 17 horas \approx 808.24 km/h;

Perda percentual até Arraial do Cabo = [(Velocidade observada - Velocidade até Arraial do Cabo) / Velocidade observada] * 100;

Perda percentual até Arraial do Cabo = [(1000 km/h - 808.24 km/h) / 1000 km/h] * 100 \approx 19.18%

– De Tonga até Imbituba (com uma plataforma continental de 124 km) em 19 horas:

Velocidade até Imbituba = (Distância - Plataforma Continental) / Tempo;

Velocidade até Imbituba = (13200 km - 124 km) / 19 horas \approx 684.21 km/h;

Perda percentual até Imbituba = [(Velocidade média - Velocidade até Imbituba) / Velocidade média] * 100;

Perda percentual até Imbituba = [(1000 km/h - 684.21 km/h) / 1000 km/h] * 100 \approx 31.58%

A perda percentual na velocidade da onda do tsunami ao se aproximar das plataformas continentais é um fenômeno complexo e multifacetado. Vários fatores físicos e geológicos podem ter contribuído para essa diminuição da velocidade. Em águas profundas, a onda do tsunami pode ter viajado a velocidades mais altas devido à maior profundidade, de acordo com o princípio da conservação de energia. No entanto, à medida que essas ondas se aproximam da plataforma continental, a profundidade diminui, o que resulta em uma desaceleração das ondas, já que a velocidade de propagação está diretamente relacionada à profundidade do meio.

Além disso, a refração também desempenha um papel fundamental. Conforme as ondas passam de águas profundas para águas mais rasas, elas se curvam devido à diferença nas velocidades de propagação. Isso faz com que parte da energia das ondas se concentre em áreas de menor profundidade, resultando em uma redução na velocidade.

O atrito com o fundo do oceano também é um fator relevante. À medida que as ondas se aproximam da costa e da plataforma continental, o fundo do oceano exerce uma influência significativa, aumentando o atrito e dissipando parte da energia das ondas. Esse atrito adicional contribui para a desaceleração das ondas.

Além disso, a geometria da costa e a topografia submarina também desempenham um papel importante no comportamento das ondas. A forma específica da costa e as características do fundo do oceano podem influenciar se as ondas são refletidas, refratadas ou dispersas, afetando sua velocidade e altura.

No contexto da costa brasileira, a diferença na perda percentual de velocidade entre Imbituba e Arraial do Cabo pode ser explicada em termos de fenômenos físicos associados às características do ambiente marinho. Em Imbituba, as ondas percorreram uma distância total menor em águas profundas, o que implica que uma parte significativa de seu percurso ocorreu em profundidades maiores, onde as ondas mantêm velocidades mais elevadas devido à relação inversa entre velocidade e profundidade.

No entanto, à medida que essas ondas se aproximam da plataforma continental em Imbituba, a redução abrupta na profundidade causa uma rápida desaceleração devido às interações com o fundo do oceano e ao fenômeno de refração. Essa mudança brusca de profundidade contribui para uma perda percentual significativamente maior na velocidade em Imbituba em comparação com Arraial do Cabo, onde a maior distância em águas mais profundas permitiu uma desaceleração mais gradual das ondas, resultando em uma perda percentual menor em sua velocidade.

5.2 Controle de Qualidade de Dados

Primeiramente, o controle de qualidade foi realizado através de código *Python*, utilizando os parâmetros já apresentados durante o trabalho. Cabe ressaltar que os dados foram coletados entre os dias 13 de janeiro de 2022, às 00:00 horas, e 22 de janeiro de 2022, às 23:55 horas.

Cada região foi cuidadosamente estudada e analisada para compreender os padrões dos dados de maré. O objetivo era identificar e entender as características específicas de cada região, a fim de selecionar os parâmetros adequados do sistema de controle de qualidade dos dados (QARTOD). Através dessa análise minuciosa, foi possível escolher os parâmetros do QARTOD de forma correta, levando em consideração as particularidades e comportamentos dos dados de maré em cada local. Isso permitiu um controle de qualidade eficaz e confiável dos dados, contribuindo para uma melhor compreensão e utilização das informações sobre a maré em cada região, conforme as informações a seguir:

- Arraial do Cabo:
 - Dados de acordo com parâmetros do teste: 3.996
 - Dados que não satisfazem os parâmetros do teste: 324 (8,10%)
 - *Flate Line Test*: 101 (31,17%)
 - *Rate of Change Test*: 33 (10,18%)
 - *Spike Test*: 97 (29,93%)
 - *Gross Range Test*: 93 (28,70%)

➤ Salvador:

- Dados de acordo com parâmetros do teste: 3922
- Dados que não satisfazem os parâmetros do teste: 398 (10,14%)
 - *Flate Line Test*: 95 (23,86%)
 - *Rate of Change Test*: 47 (11,80%)
 - *Spike Test*: 126 (31,65%)
 - *Gross Range Test*: 130 (32,66%)

➤ Imbituba:

- Dados de acordo com parâmetros do teste: 3974
- Dados que não satisfazem os parâmetros do teste: 346 (8,70%)
 - *Flate Line Test*: 120 (34,68%)
 - *Rate of Change Test*: 52 (15,02%)
 - *Spike Test*: 91 (26,30%)
 - *Gross Range Test*: 83 (23,98%)

No geral, é evidente que cada localidade apresenta um perfil distinto de erros detectados pelo sistema de controle de qualidade. Por exemplo, Salvador apresenta a maior porcentagem de erros detectados no *Gross Range Test* (32,66%) indicando que os dados excedem frequentemente o intervalo esperado. Este pode ser um indicativo de condições oceanográficas dinâmicas ou problemas com o equipamento de medição.

Por outro lado, Arraial do Cabo e Imbituba apresentam a maior proporção de erros detectados pelo *Flat Line Test* (31,17% e 34,68%, respectivamente). Isso pode sugerir a possibilidade de falha do sensor ou condições estagnadas no ambiente marinho dessas localidades.

O *Rate of Change Test* mostra menor incidência em todas as regiões, indicando que as variações bruscas e inesperadas nos dados de maré são menos comuns.

Apesar de algumas observações nas três regiões não satisfazerem plenamente as condições dos testes QARTOD, a proporção de dados que não passou nos testes é relativamente

baixa em comparação ao volume total de dados coletados. Portanto, esses resultados não devem prejudicar significativamente a pesquisa em geral.

Na verdade, essa proporção de dados que não passam nos testes QARTOD pode ser vista como uma indicação da eficiência do sistema de controle de qualidade, que é capaz de identificar e excluir dados potencialmente imprecisos ou errôneos. Em concordância com os métodos de análise de dados em oceanografia, essas discrepâncias observadas fornecem uma oportunidade para aprimorar a coleta e o tratamento dos dados. O conhecimento adquirido a partir desses resultados pode ajudar a refinar os parâmetros do QARTOD, melhorando assim a qualidade dos dados futuros. Portanto, longe de ser um impedimento, essas ocorrências representam um passo importante para aprimorar e assegurar a qualidade dos dados de nível do mar.

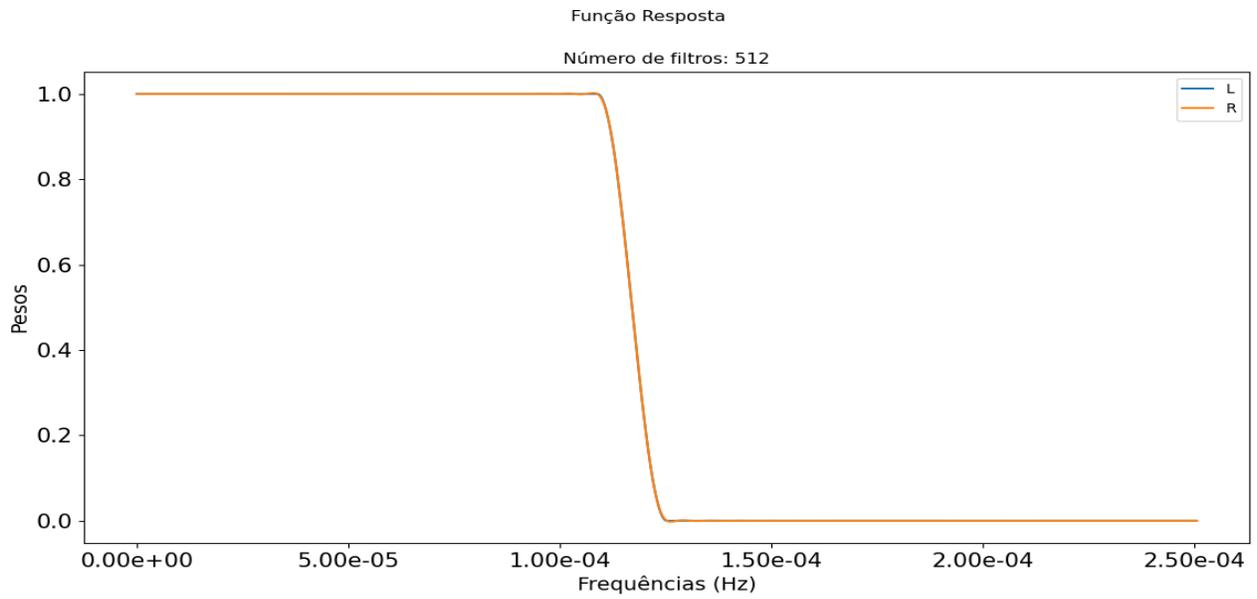
5.3 Filtro de Thompson

Para todas as regiões estudadas, na aplicação do Filtro de Thompson, foram selecionadas duas frequências com base no período do tsunami mencionado na literatura, que é de aproximadamente 2 horas (DOURADO *et al.*, 2022). Com o objetivo de identificar e analisar as componentes de maré relacionadas a esse período específico, foram escolhidos dois períodos: 130 minutos (7.800 segundos) e 110 minutos (6.600 segundos). Além disso, a fim de evitar a perda excessiva de dados, o número de pesos utilizados na filtragem foi de 512.

O Filtro de Thompson, nesse contexto, tem como objetivo detectar e eliminar valores discrepantes ou atípicos nos dados de maré. Espera-se que, ao aplicar o filtro utilizando os períodos de 130 minutos e 110 minutos, as componentes associadas ao tsunami sejam filtradas, reduzindo sua influência nos dados analisados.

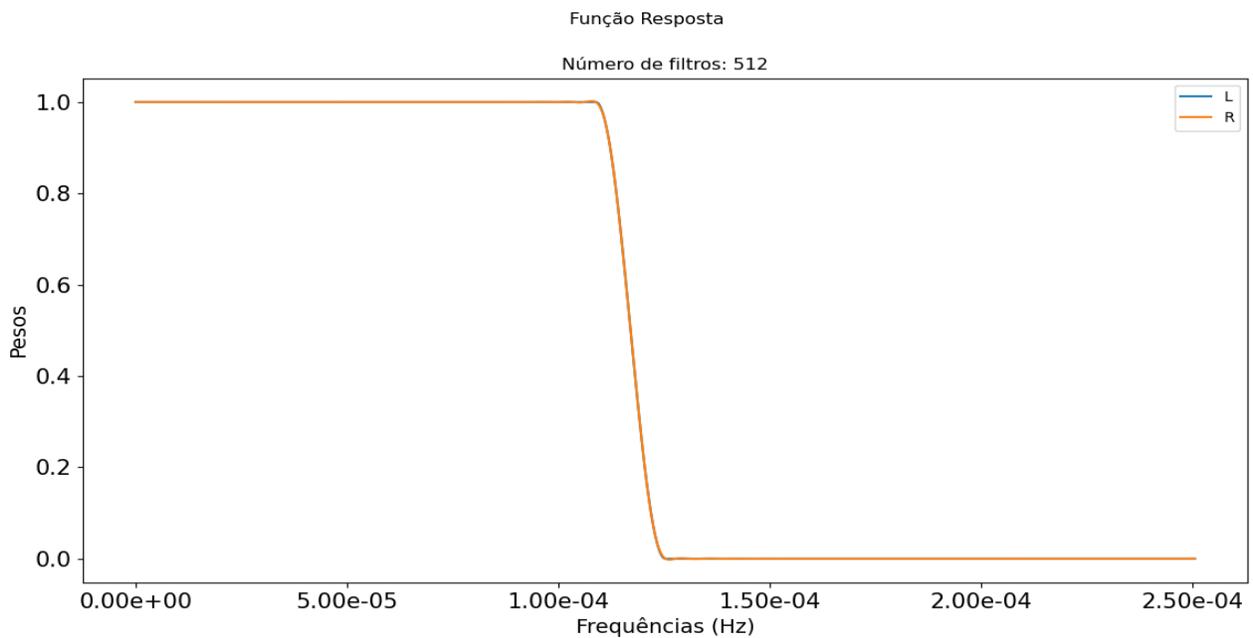
Dessa forma, os gráficos das Funções Resposta do filtro para as regiões de Arraial do Cabo, Imbituba e Salvador são apresentados conforme as figuras 19, 20 e 21, respectivamente.

Figura 19: Curva da Função Resposta em Arraial do Cabo (azul – sinal original; laranja – sinal filtrado)



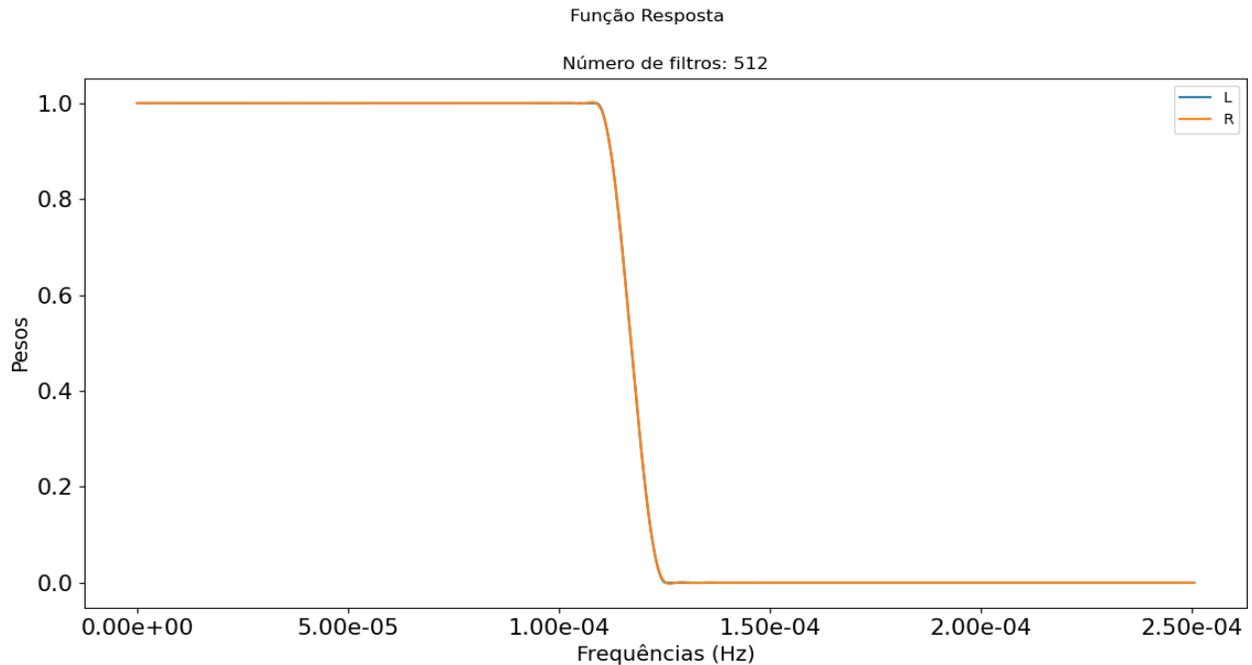
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 20: Curva da Função Resposta em Imbituba (azul – sinal original; laranja – sinal filtrado)



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 21: Curva da Função Resposta em Salvador (azul – sinal original; laranja – sinal filtrado)



Fonte: AUTOR (2023).

As figuras representam a resposta do Filtro de Thompson, fornecendo informações importantes sobre seu funcionamento e eficácia. Nessas figuras, podemos observar o padrão distintivo do Filtro de Thompson, caracterizado pela seleção de duas frequências de corte. Essas frequências, conforme já mencionado, foram escolhidas cuidadosamente para encontrar um equilíbrio entre preservar os recursos essenciais dos dados e minimizar o impacto dos valores discrepantes.

A escolha do número de pesos e frequências é crucial no projeto do Filtro de Thompson para garantir que não haja perda excessiva de dados ao mesmo tempo em que remove efetivamente os valores discrepantes. Esse processo de seleção visa manter a integridade e a fidelidade do sinal subjacente, suprimindo a influência de valores aberrantes.

Além disso, percebe-se nas figuras uma vantagem significativa do Filtro de Thompson, que é sua capacidade de mitigar o efeito “Gibbs” (THOMPSON, 2014). O fenômeno de “Gibbs” refere-se às oscilações que podem ocorrer próximos a transições abruptas em um sinal filtrado (THOMPSON, 2014). Ao selecionar cuidadosamente as frequências de corte, o Filtro de

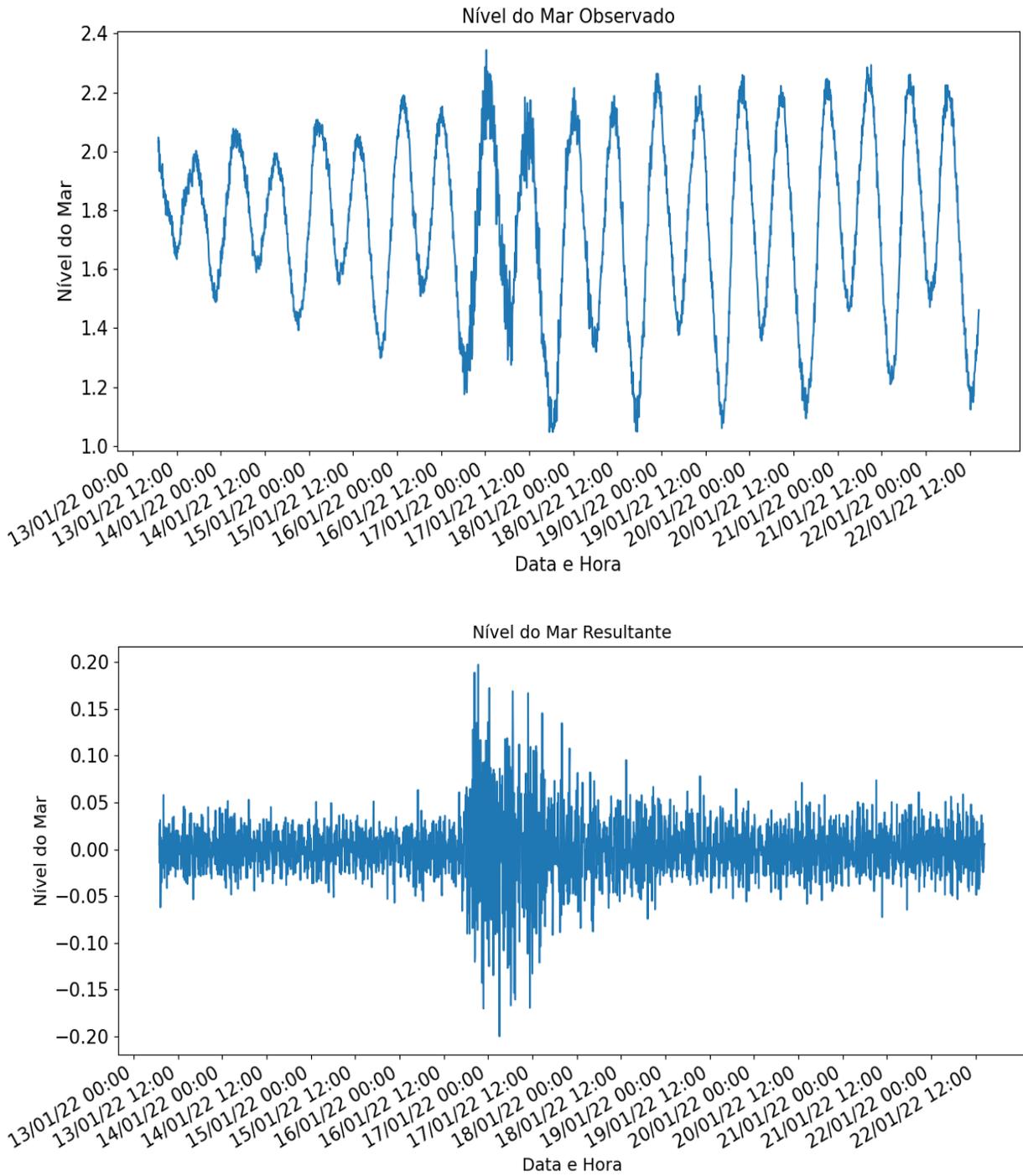
Thompson minimiza essas oscilações, resultando em uma representação mais suave e precisa dos dados filtrados.

Dessa forma, após a análise preliminar das oscilações normais dos níveis do mar e dos espectros de frequências para as regiões e da observação da resposta gerada pelo Filtro de Thompson, a próxima etapa do estudo envolveu uma análise mais aprofundada dos dados filtrados. O objetivo desta fase foi comparar esses dados filtrados com os dados observados, para avaliar como eles se alinham e identificar quaisquer discrepâncias significativas.

Para realizar essa comparação de forma rigorosa, empregou-se o método da subtração, uma operação simples, mas eficaz, que permite identificar as diferenças entre os dois conjuntos de dados. A subtração dos dados observados dos dados filtrados gerou um conjunto de resíduos, representando as variações não explicadas pelo filtro.

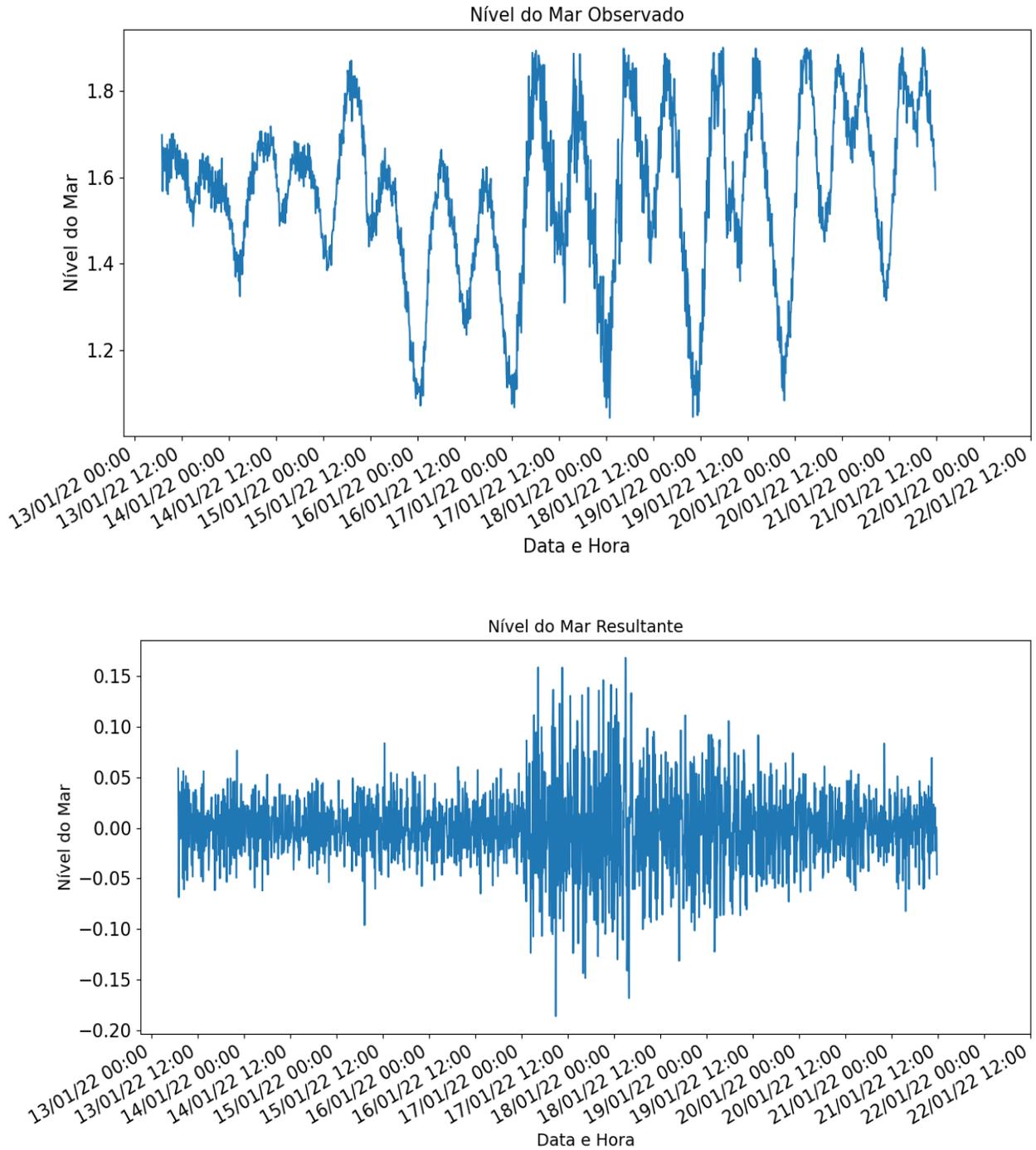
Esses gráficos de diferenças, representados a seguir, são ferramentas extremamente úteis na análise de dados oceanográficos. Eles podem destacar variações sutis que podem não ser facilmente visíveis quando os dados são observados de forma isolada. Além disso, eles podem ajudar a identificar anomalias ou eventos que desviam dos padrões normais, como poderia ser o caso de um tsunami.

Figura 22: Representação gráfica do nível do mar observado e resultante em Arraial do Cabo



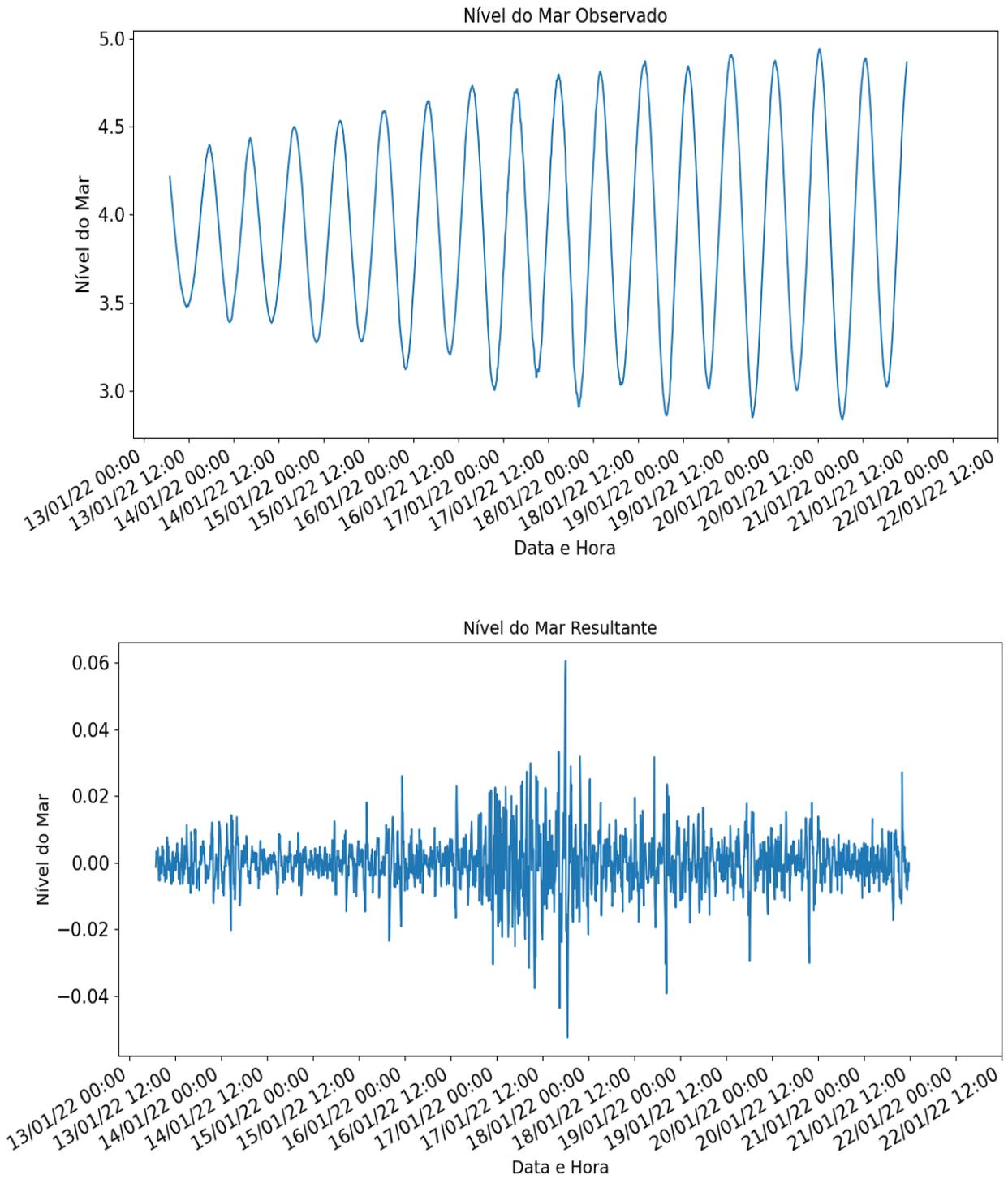
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 23: Representação gráfica do nível do mar observado e resultante em Imbituba



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 24: Representação gráfica do nível do mar observado e resultante em Salvador



Fonte: AUTOR (2023).

A análise comparativa entre os gráficos de nível do mar em período sem influência do tsunami (Figuras 46, 47 e 48 do Apêndice A), com aqueles sob efeitos do tsunami (Figuras 22, 23 e 24), revela diferenças significativas em diversas regiões costeiras. Um exemplo notório ocorre em Arraial do Cabo, onde uma substancial anomalia na amplitude do sinal se manifesta em torno de 16 de janeiro de 2022 (Figura 22). Isso corresponde a aproximadamente 17 horas após o tsunami que afetou Tonga em 15 de janeiro de 2022, como documentado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). A análise também ressalta a capacidade de tsunamis locais propagarem-se globalmente, afetando áreas costeiras remotas.

Além disso, de igual forma, ao comparar os gráficos do nível do mar em Imbituba, observa-se um aumento notório na amplitude dos sinais a partir de 16 e 17 de janeiro de 2022 (Figura 23). Isso pode ser atribuído à influência do tsunami em Tonga, corroborando e sugerindo que eventos distantes, de fato podem afetar regiões costeiras, mesmo a milhares de quilômetros do epicentro. Para esse caso, conforme evidenciado por estudos de Dourado *et. al.*, (2022) e explicado e comprovado no presente trabalho, a velocidade das ondas provocadas pelo tsunami foram afetadas pela largura da plataforma continental, resultando em um atraso na chegada a Imbituba em comparação com Arraial do Cabo.

Salvador, por outro lado, exibe alterações mais sutis no nível do mar a partir de 17 de janeiro de 2022 (Figura 24), com um leve e singelo aumento na amplitude dos sinais. A localização e outras características oceanográficas e geográficas provavelmente amorteceram o impacto dos efeitos do tsunami em Salvador. Isso destaca a complexidade das dinâmicas oceânicas e a influência dos fatores locais.

Em termos de impacto, as variações máximas das amplitudes do nível do mar foram mais acentuadas em Imbituba e Arraial do Cabo, atingindo cerca de 20 cm e 30 cm, respectivamente, em comparação com Salvador, onde as variações foram em torno de 10 cm para menos. Essa análise enfatiza a importância do Filtro de Thompson em remover componentes indesejados e realçar os sinais de interesse.

Por fim, para uma análise mais aprofundada dos dados de nível do mar, após a aplicação do Filtro de Thompson para remover componentes indesejados, pode-se utilizar a Decomposição de Modo Empírico (EMD). A EMD permitirá decompor o sinal em Modos de Funções Intrínsecas (MFI) e analisar sua amplitude instantânea e fase em diferentes escalas de tempo. Isso

pode ser valioso para destacar características específicas dos sinais de tsunamis, como escala de tempo e frequência.

5.4 Decomposição de Modo Empírico

A EMD, conforme já explicitado, uma técnica desenvolvida por Huang et al. (1998), desempenha um papel essencial ao revelar os padrões intrínsecos nos dados que estão relacionados ao comportamento do tsunami. Isso permitiu uma análise mais profunda de sua propagação, intensidade e duração. Além disso, a EMD, por possuir a capacidade de identificar outras características de frequência presentes nos dados filtrados, enriquece nossa compreensão do fenômeno investigado.

Ademais, a aplicação da EMD se tornou particularmente relevante, uma vez que lidamos com sinais não estacionários. Isso se deve à capacidade inerente da EMD de desagregar séries temporais complexas em Modos Intrínsecos (MFIs), que representam componentes de frequência e amplitude variáveis no tempo (HUANG *et al.*, 1998).

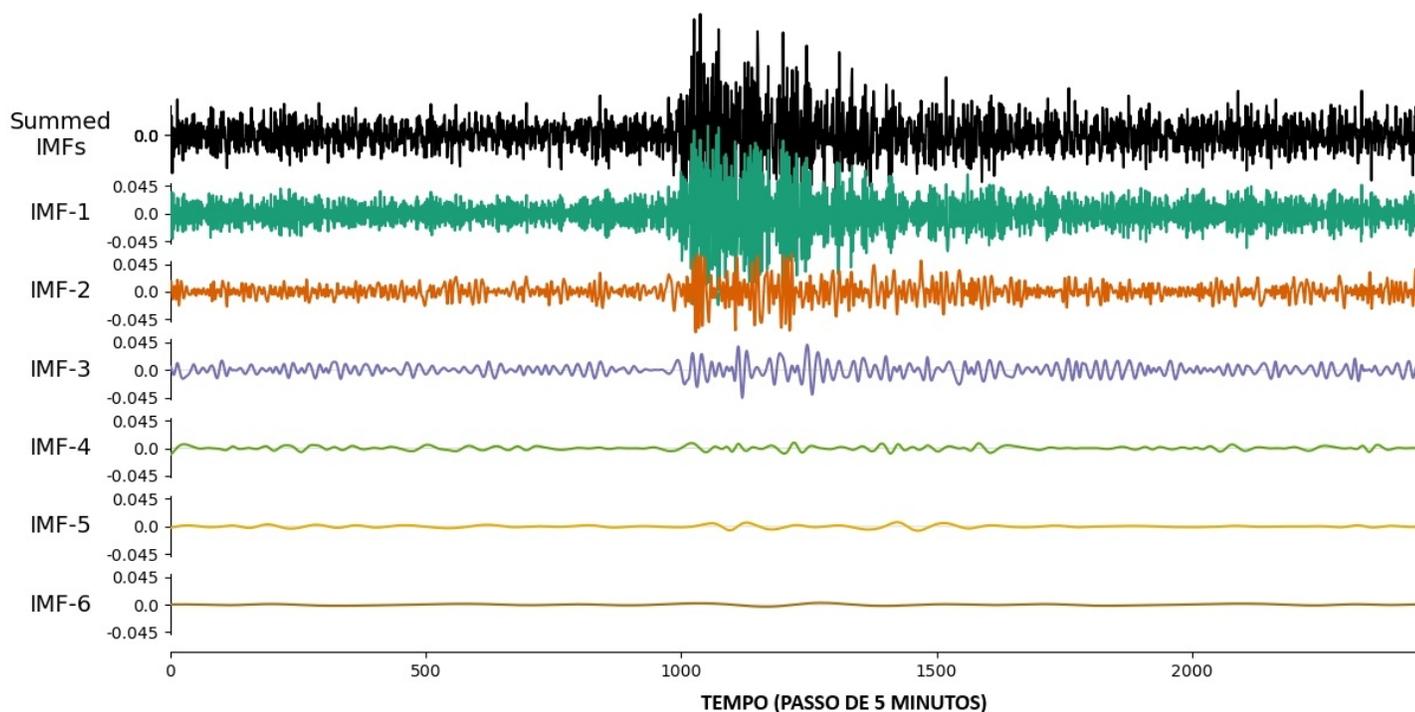
Primordialmente, a MFI é uma componente extraída através da aplicação da Decomposição Empírica de Modo no processo de Transformada de Hilbert-Huang (HHT) (HUANG; WU, 2008). Cada MFI, sendo uma função adaptativa que engloba uma escala de tempo e frequência específica, torna-se um reflexo preciso dos dados analisados. Eles são notáveis por sua capacidade inerente de capturar e exibir padrões distintos e comportamentos variados do sinal em diferentes escalas (HUANG; WU, 2008; MOHAMMED; HARIS, 2022).

As MFIs descrevem de maneira precisa as características intrínsecas e os componentes fundamentais do sinal, fornecendo assim uma representação mais detalhada e cognoscível do fenômeno sob escrutínio (HUANG; WU, 2008). Através da decomposição do sinal original em MFIs, a Transformada de Hilbert-Huang possibilita uma análise mais perspicaz, delineando componentes de importância e auxiliando na detecção de padrões, tendências e oscilações inerentes aos dados. Assim, uma interpretação mais integral e precisa do sinal em questão é assegurada.

Dessa forma, as figuras a seguir representarão os Modos Intrínsecos das regiões em estudo, oferecendo uma análise mais detalhada das características dos sinais senoidais e não lineares presentes. Isso permitirá examinar as diferentes escalas de tempo, frequências e

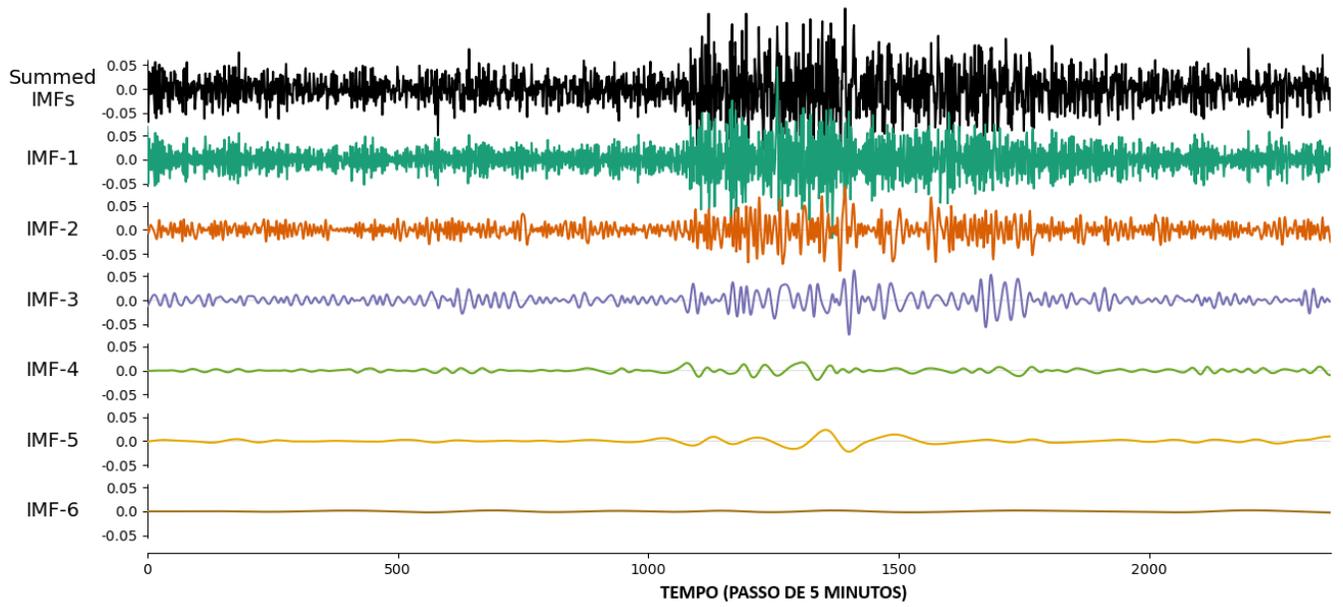
amplitudes dessas componentes e entender a relação entre os sinais dentro do contexto específico das regiões analisadas. Essa abordagem permitirá uma compreensão mais aprofundada da natureza complexa dos dados e sua influência nas características dos fenômenos estudados.

Figura 25: Modos de Funções Intrínsecas geradas pela HHT para o sinal resultante na região de Arraial do Cabo



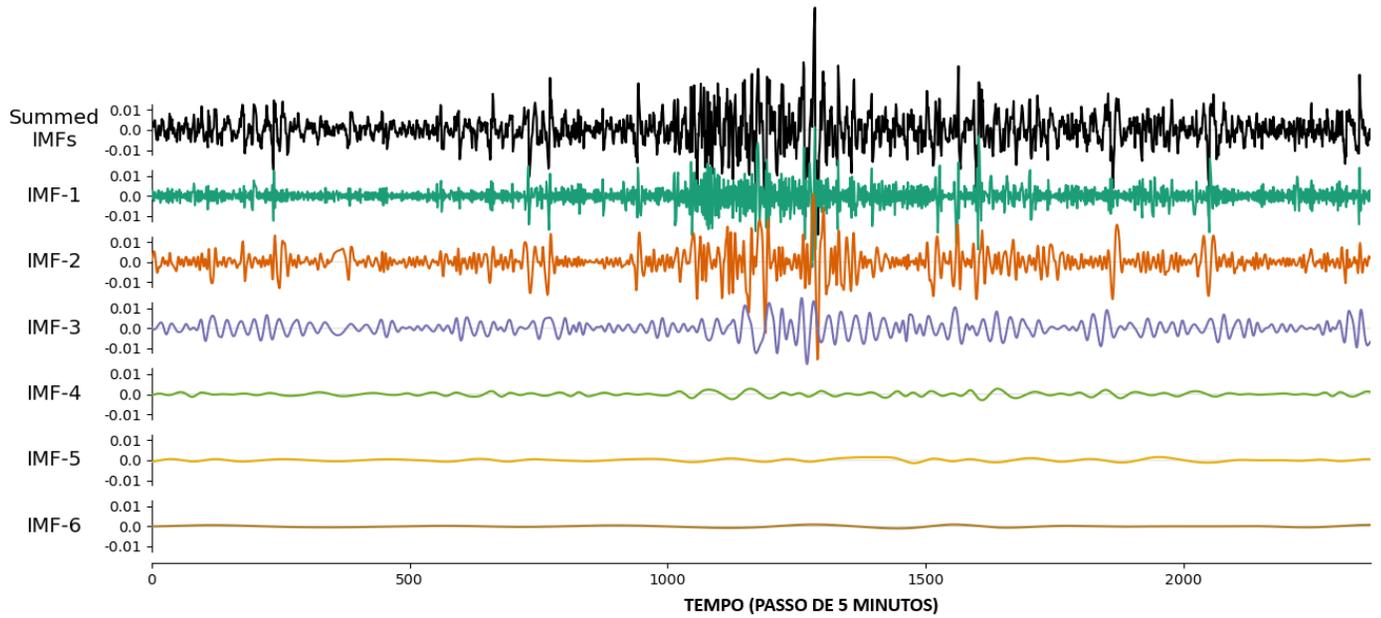
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 26: Modos de Funções Intrínsecas geradas pela HHT para o sinal resultante na região de Imbituba



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 27: Modos de Funções Intrínsecas geradas pela HHT para o sinal resultante na região de Salvador



Fonte: AUTOR (2023).

As figuras acima ilustram os Modos Intrínsecos (MFIs) resultantes da aplicação da Transformada Hilbert-Huang (HHT) a dados do nível do mar previamente filtrados pelo método de Thompson. Foram obtidas seis MFIs que, em conjunto, representam o sinal filtrado. Notavelmente, as MFIs 1, 2 e 3 de cada região exibem uma maior correspondência com o sinal original, enquanto as MFIs subsequentes (4 a 6) apresentam uma tendência gradual à estabilidade.

A Figura 26, por exemplo, oferece uma visualização mostrando as MFIs extraídas para a região de Imbituba. Da mesma forma que em Arraial do Cabo (Figura 25), as seis MFIs compõem o sinal resultante, e as MFIs 1, 2 e 3 também mostram uma notável semelhança com o sinal original.

Para a região de Salvador (Figura 27), em contraste com Arraial do Cabo e Imbituba, as MFIs geradas não revelam, energicamente, reflexos tão significativos do tsunami de Tonga. No entanto, mesmo com um impacto mais sutil, é possível inferir elementos ligados a eventos notáveis nas MFIs, embora esses elementos tenham menor intensidade ou significância em comparação com as outras regiões afetadas.

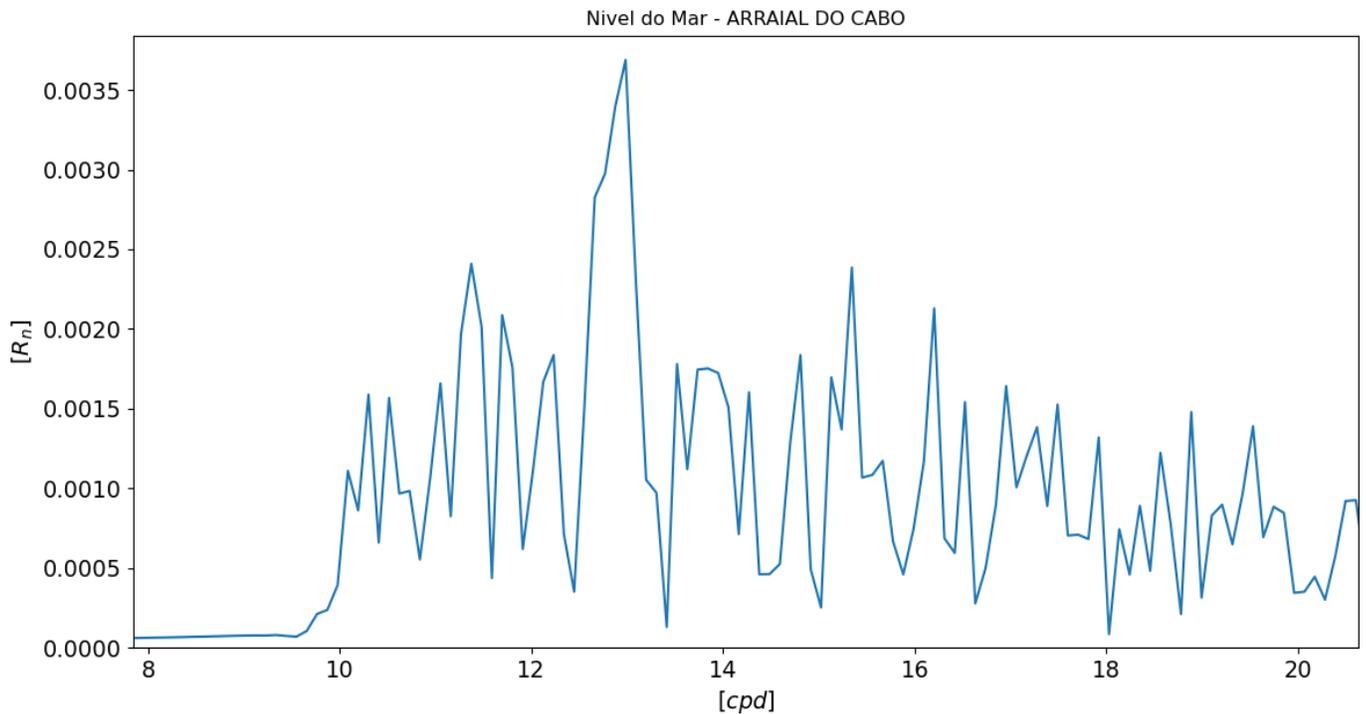
A análise das MFIs em cada região, proporciona uma compreensão mais profunda das características intrínsecas dos sinais do nível do mar e permite uma investigação mais detalhada dos efeitos do tsunami de Tonga. A MFI 1, devido à sua semelhança com o sinal original, tende a nos inferir e indicar consequências mais diretas e notáveis do tsunami, como deslocamentos verticais significativos provocados pelas ondas. No entanto, análises adicionais do espectro de frequência são necessárias para validar essa hipótese. À medida que avançamos para as MFIs subsequentes, a representação do sinal sugere a presença de componentes residuais, oscilações de baixa amplitude ou ruídos associados a fenômenos secundários ou influências locais específicas do sinal do nível do mar.

5.5 Transformada de Fourier

A próxima etapa do estudo envolverá a aplicação da Transformada de Fourier nas MFIs 1, 2 e 3 de cada sinal, bem como no sinal de nível do mar resultante de cada região. Ao aplicá-la nas

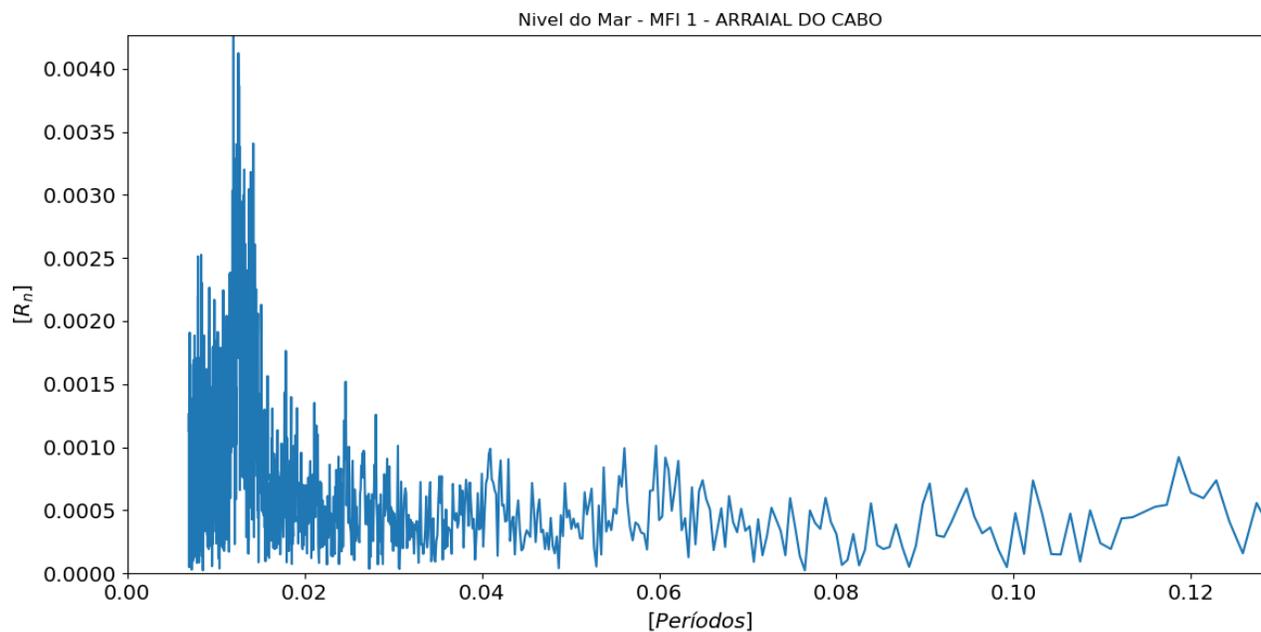
primeiras três MFIs, espera-se revelar as características específicas de frequência desses modos, proporcionando uma visão mais detalhada da natureza das oscilações presentes em cada sinal. Este procedimento, por sua vez, permitirá que seja melhor compreendido os efeitos do tsunami na região respectiva. Além disso, ao aplicar a Transformada de Fourier no sinal representado com frequências do tsunami, ou seja, no sinal observado, espera-se também identificar as componentes que caracterizam o sinal geral em cada localidade. Com essas informações, será possível contrastar e comparar os efeitos do tsunami nas diferentes áreas, aprimorando a compreensão dos mecanismos de interação entre o tsunami e o ambiente costeiro local.

Figura 28: Espectro de Frequência do Sinal em Arraial do Cabo



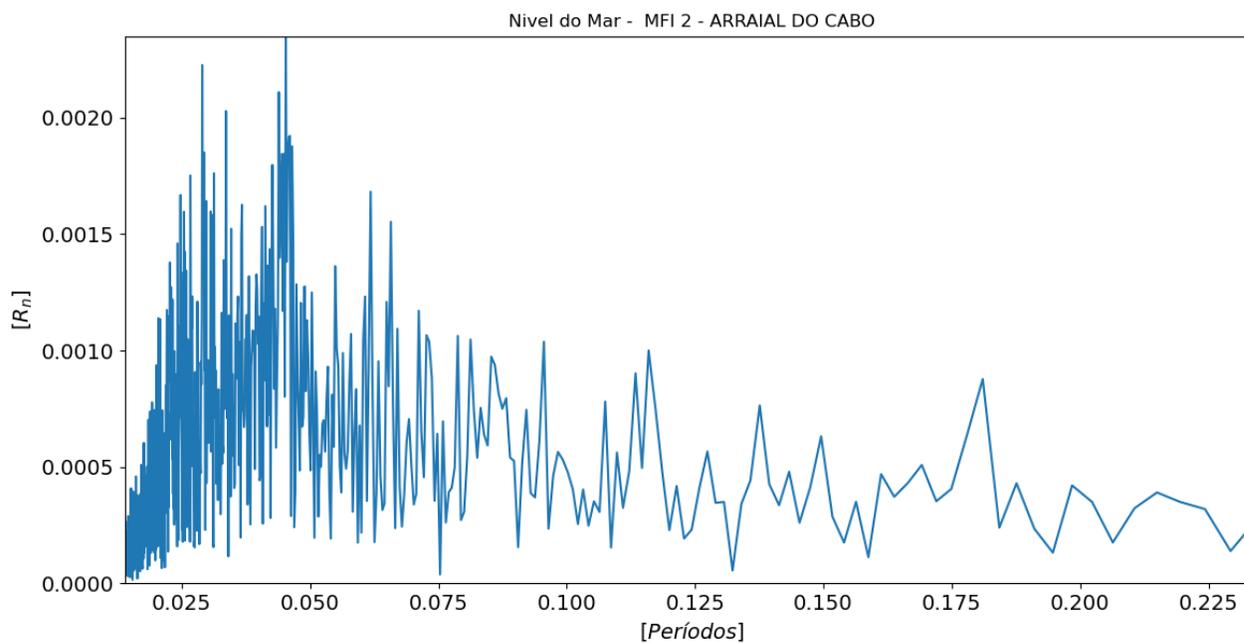
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 29: Espectro de Frequência da MFI 1 em Arraial do Cabo



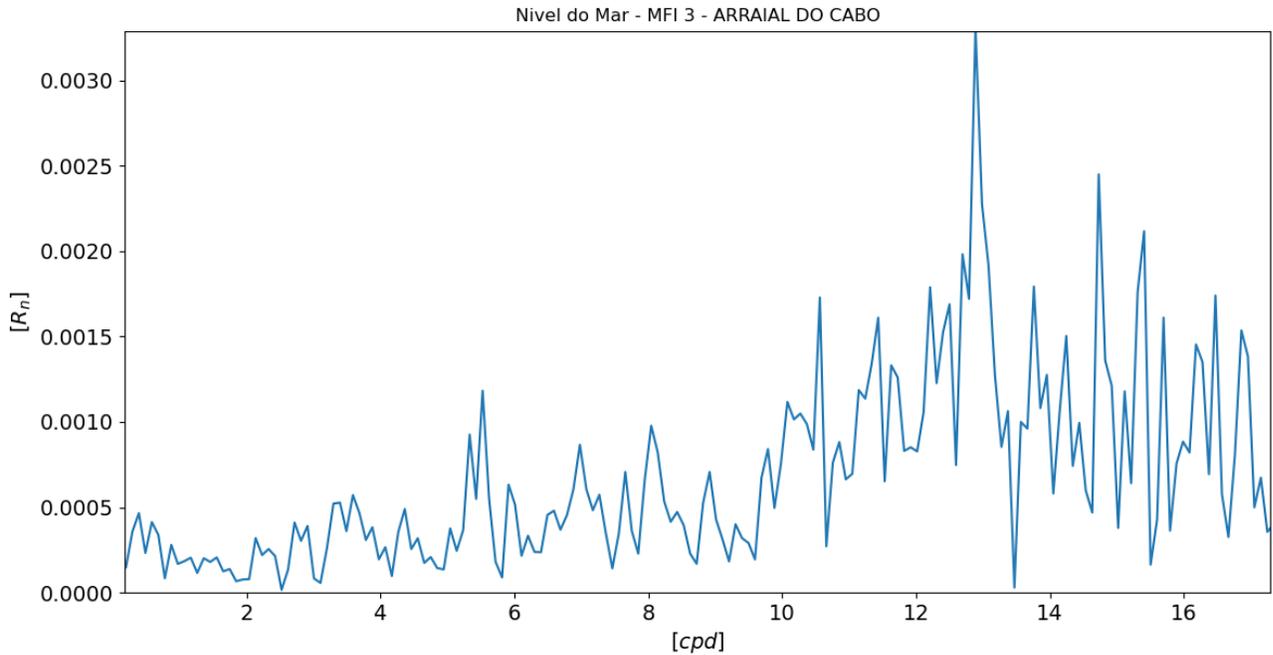
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 30: Espectro de Frequência da MFI 2 em Arraial do Cabo



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 31: Espectro de Frequência da MFI 3 em Arraial do Cabo



Fonte: AUTOR (2023).

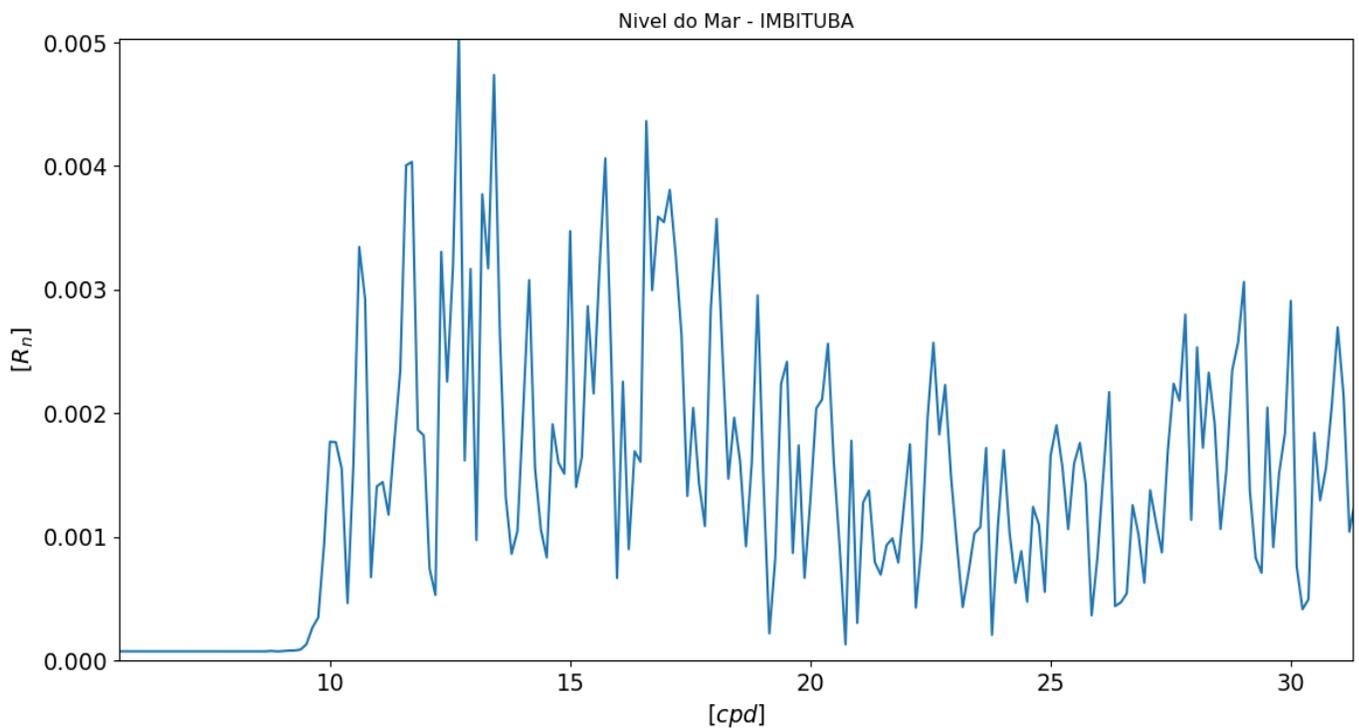
A análise da Figura 28, que representa o espectro de frequência do sinal em Arraial do Cabo, oferece uma perspectiva reveladora sobre possíveis reflexos do tsunami na região. Notavelmente, a análise espectral destaca a presença de um pico proeminente de maior energia, que ocorre em torno de 12.5 a 13 cpd (ciclos por dia). Esse pico indica uma concentração significativa de energia nessa faixa de frequência específica para a região. Tal fenômeno adquire relevância no contexto do estudo dos possíveis impactos do tsunami, uma vez que tsunamis são caracterizados por longos períodos de onda. Dessa forma, a identificação desse pico na faixa de frequência em questão sugere uma associação com as características espectrais do sinal relacionadas à influência potencial do tsunami em Arraial do Cabo.

Já a análise espectral das MFIs 1, 2 e 3 (Figuras 29, 30 e 31), revela que essas MFIs podem fornecer uma representação mais precisa do sinal original em comparação com outras técnicas de filtragem. A MFI 1, possivelmente, representa variações de alta frequência, enquanto a MFI 2 e a MFI 3 parecem capturar variações de baixa frequência. No contexto do tsunami, a análise espectral indica que a influência desse evento em Arraial do Cabo pode estar mais

concentrada em frequências mais baixas, condizentes com a natureza dos tsunamis, caracterizados por longos períodos de onda.

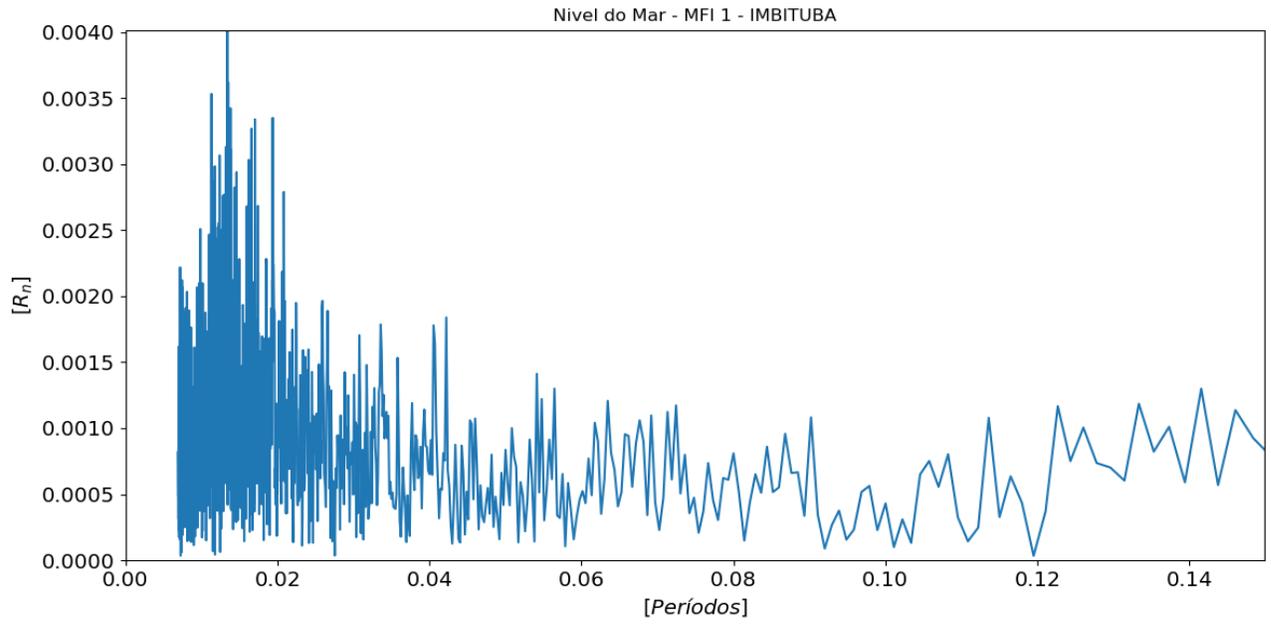
A escolha das MFIs, especialmente a MFI 3, como representantes mais adequados do sinal residual do tsunami em Arraial do Cabo é reforçada pelas suas características intrínsecas, que possuem períodos longos e baixas frequências, pela convergência entre as características espectrais das MFIs e as assinaturas conhecidas dos tsunamis, como evidenciado pela maior amplitude em torno de 11 e 13 cpd na MFI 3, semelhantemente ao espectro do sinal observado em Arraial do Cabo.

Figura 32: Espectro de Frequência do Sinal em Imbituba



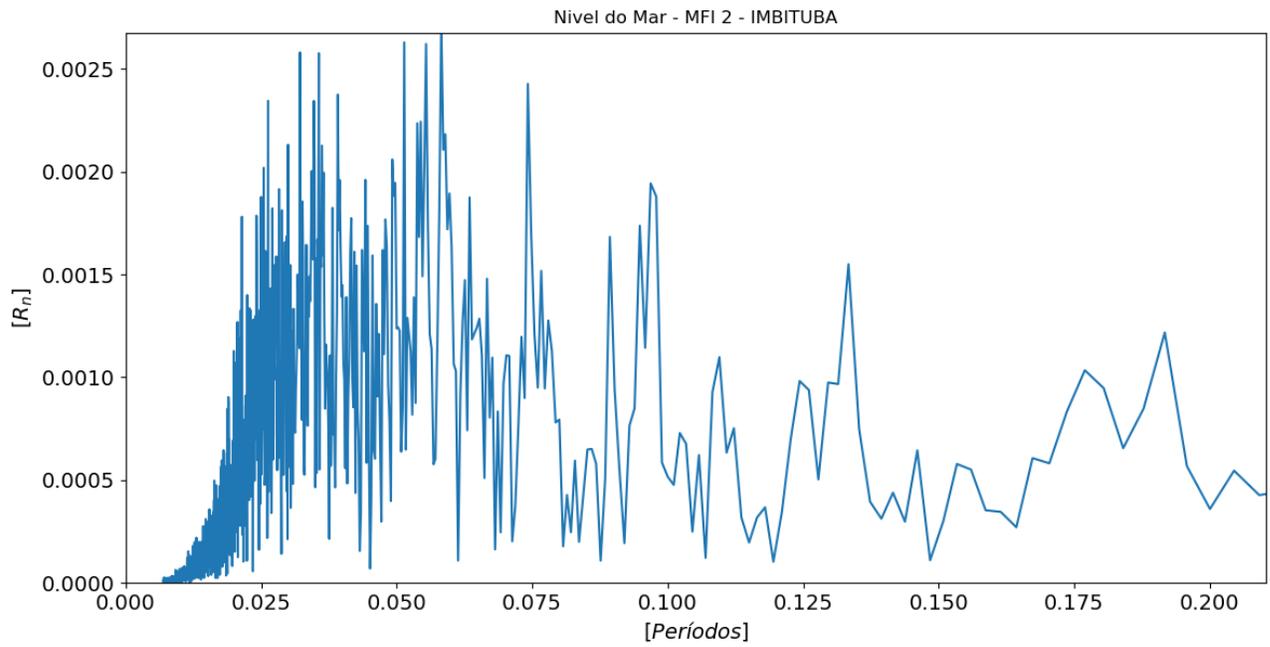
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 33: Espectro de Frequência da MFI 1 em Imituba



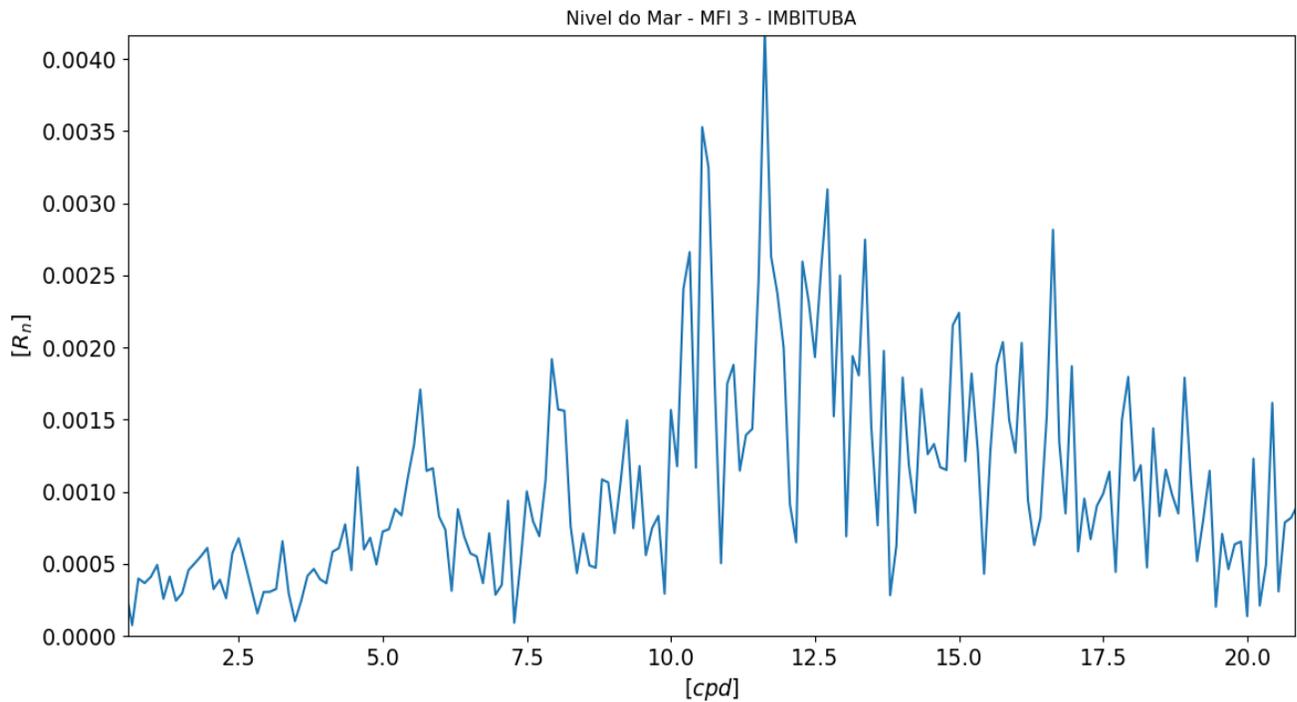
Fonte: AUTOR (203).

Figura 34: Espectro de Frequência da MFI 2 em Imituba



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 35: Espectro de Frequência da MFI 3 em Imbituba



Fonte: AUTOR (2023).

A análise espectral de dados do nível do mar em Imbituba (Figura 32) mostra picos de energia em várias frequências, possivelmente refletindo uma série de processos oceanográficos. O espectro de frequência de um sinal pode ser interpretado como a decomposição deste sinal em várias ondas sinusoidais de diferentes frequências. No contexto dos dados do nível do mar, essas frequências podem representar a influência de marés, correntes oceânicas, ondas internas e, possivelmente, a influência distante de um tsunami.

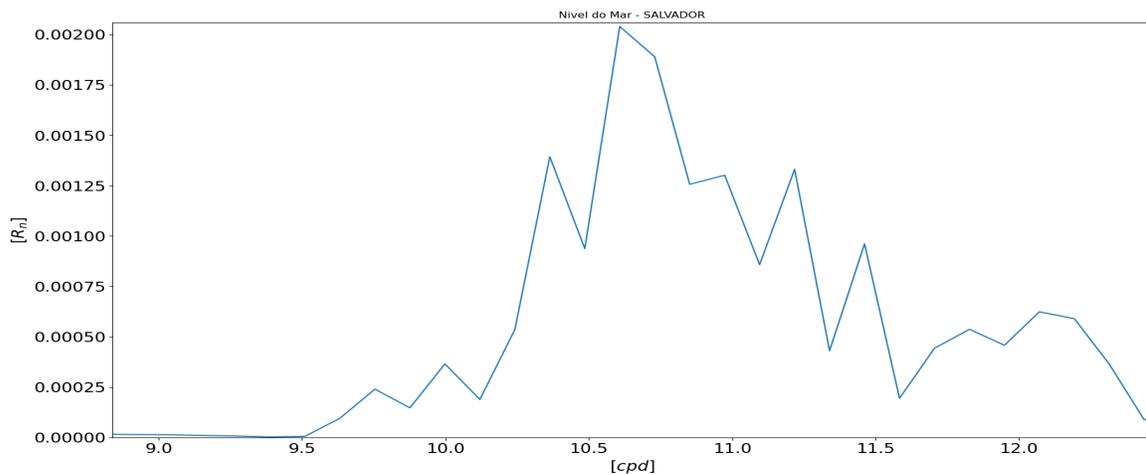
De maneira análoga a Arraial do Cabo, o espectro da Figura 32 revela um pico de maior energia, observado em torno de 11 e 12 cpd (ciclos por dia). Essa observação sugere a presença de uma concentração notável de energia nessa faixa de frequência específica. Essa característica assume relevância significativa no contexto da investigação dos possíveis reflexos do tsunami na região. A rápida ascensão e subsequente queda do sinal nesse período particular pode ser indicativa da presença de um sinal residual do tsunami, associado às oscilações características desse fenômeno.

Em Imbituba, a MFI 1 (Figura 33), que semelhantemente à Arraial do Cabo, reflete oscilações de alta frequência, sugere a predominantemente associação a fenômenos locais, como ondas oceânicas e interações de curto prazo com a atmosfera. Devido à sua sensibilidade a turbulências e ventos de curta duração, essa modalidade de MFI pode não ser a ideal para a detecção de tsunamis, pois esses eventos são caracterizados por uma propagação de longo alcance e baixa frequência, tornando-se praticamente invisíveis nesse nível de resolução.

Por outro lado, a MFI 2 (Figura 34) em Imbituba opera em uma escala temporal mais longa, o que a torna capaz de capturar fenômenos que ocorrem em ritmo mais lento. A MFI 3 (Figura 35), sensível a oscilações de menor frequência, se torna propícia para detectar eventos de longo alcance e longa duração. Nessa modalidade, é possível identificar possíveis assinaturas de eventos significativos, como tsunamis, que se manifestam por meio de oscilações suaves e abrangentes no nível do mar.

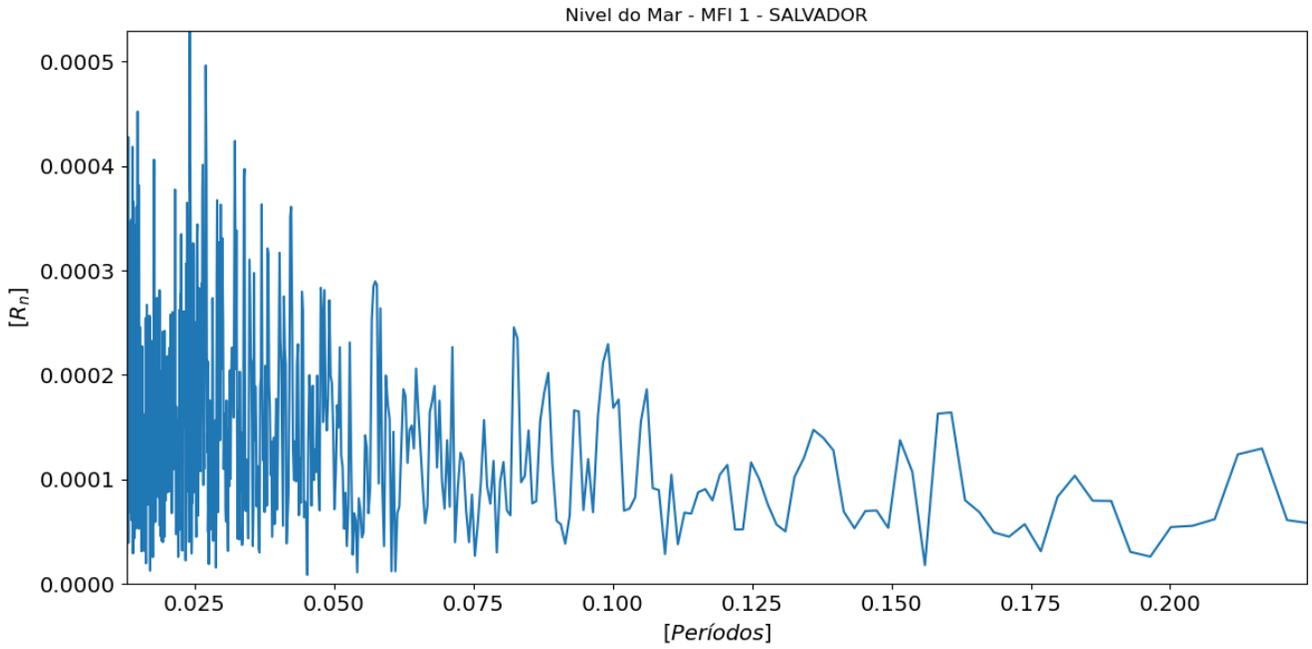
Nesse caso, a convergência entre as características espectrais do MFI 3, com maior energia em torno de 11 e 12.5 cpd, e as assinaturas conhecidas do tsunami, evidenciada pela maior amplitude em torno também de 11 e 13 cpd no espectro do sinal observado, indica que, semelhantemente à Arraial do Cabo, a MFI 3 surge como a mais indicada, em questão, para representar possíveis reflexos do Tsunami de Tonga na região de Imbituba.

Figura 36: Espectro de Frequência do Sinal em Salvador



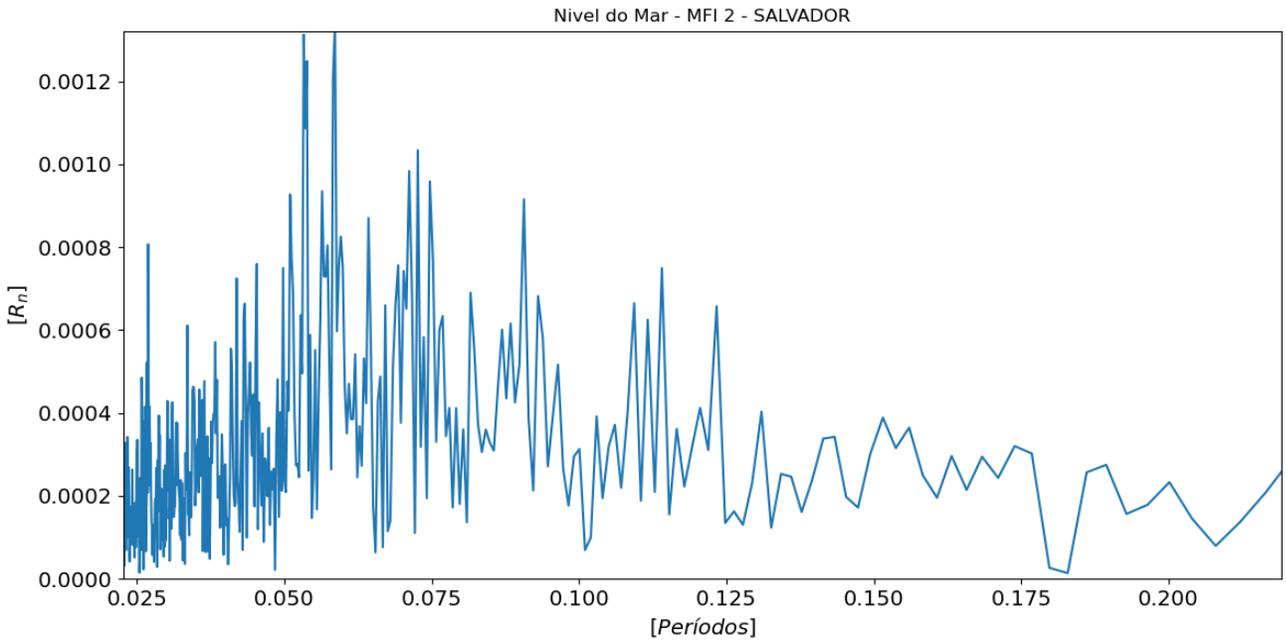
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 37: Espectro de Frequência da MFI 1 em Salvador



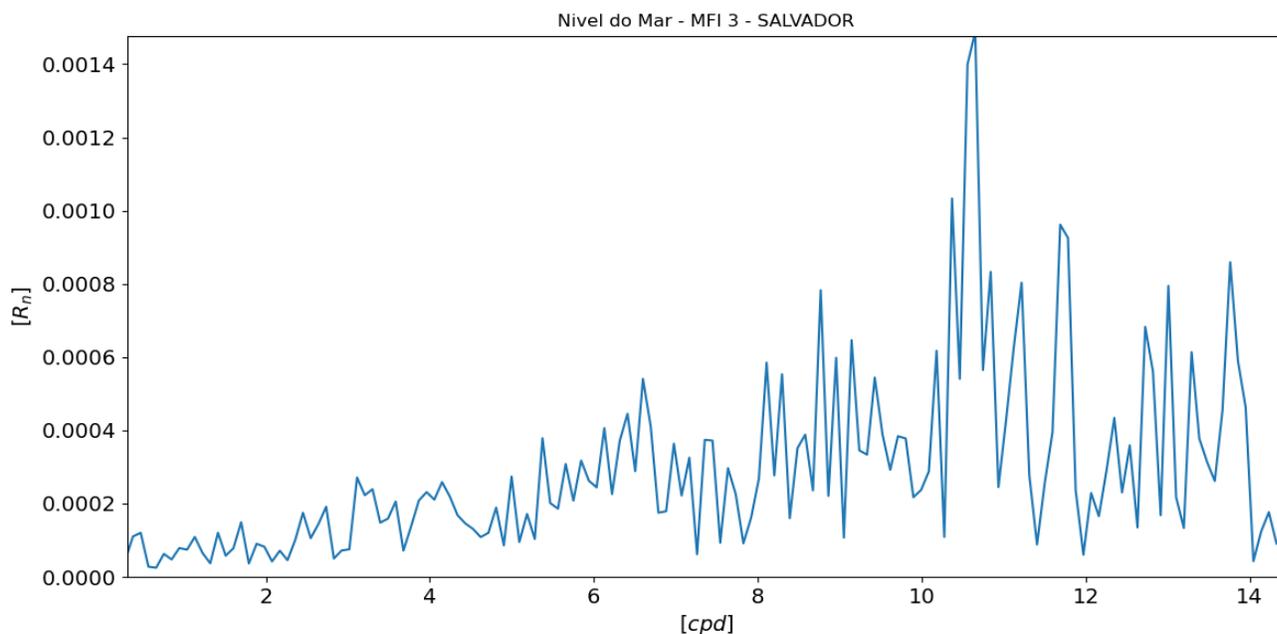
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 38: Espectro de Frequência da MFI 2 em Salvador



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 39: Espectro de Frequência da MFI 3 em Salvador



Fonte: AUTOR (2023).

Ao analisarmos os dados do nível do mar de Salvador utilizando a transformada de Fourier, é possível desagregar o sinal complexo em seus componentes de frequência elementares. Os espectros de frequência obtidos revelam importantes informações sobre os diferentes processos físicos que influenciam as variações do nível do mar nesta região. Neste espectro (Figura 36), observamos picos de energia no período em torno de 10.8 e 11 cpd, mas com amplitudes relativamente baixas em valor.

Em relação a um evento de tsunami, é de se esperar que a influência seja mais evidente em flutuações com maior energia. Nesse sentido, as amplitudes relativamente baixas dos picos observados podem indicar que a influência do tsunami em Salvador foi menos pronunciada do que em outras regiões.

Ainda assim, a presença destes picos no espectro de frequência pode sugerir uma leve alteração no comportamento típico do nível do mar nesta região. Por mais suaves que sejam, essas alterações no espectro de frequência podem demonstrar a possível influência de um fenômeno “anormal”, que é capaz de alterar os padrões de maré. Essa análise ilustra a eficácia e a

precisão da combinação da Transformada de Fourier com a EMD na detecção e análise de eventos geofísicos distantes e de grande magnitude.

Dessa forma, através da análise espectral das funções de modo intrínseco obtidas a partir dos dados do nível do mar, torna-se possível identificar oscilações de diferentes escalas temporais e suas correspondentes frequências. Ao examinar as MFIs 1, 2 e 3 para a região de Salvador, verifica-se que, similarmente às observações de Imbituba e Arraial do Cabo, a MFI 3 (Figura 39) mostra uma correspondência mais próxima ao comportamento esperado da influência dos efeitos do tsunami na região. Nessa modalidade, semelhantemente às outras regiões, observa-se um pico de energia maior em torno de 11 cpd.

Logo, a detecção desse padrão em diferentes regiões ao longo da costa do Brasil, incluindo o sul, o sudeste e o nordeste, pode sugerir a existência de um “modelo” na forma como a energia do tsunami se propagou e interagiu com as costas. Isso infere que, apesar das diferenças geográficas e oceanográficas entre essas regiões, a influência do tsunami pode ter sido sentida de maneira semelhante, marcada por um pico de energia aproximadamente na mesma frequência.

Esta descoberta é importante para a compreensão de como os tsunamis interagem com diferentes paisagens costeiras e como suas ondas de longo alcance se propagam através do oceano. Ao comparar esses padrões entre diferentes locais, poderíamos começar a prever como futuros tsunamis distantes poderiam impactar diferentes partes do litoral brasileiro e, assim, melhorar as estratégias de mitigação e preparação para tais eventos.

Na análise espectral das MFIs, foi evidenciada uma concentração significativa de energia em torno de 11 e 13 ciclos por dia (cpd) em todas as regiões investigadas. Esta frequência é um pouco mais elevada do que a expectativa convencionalmente associada à influência direta de um tsunami local. Todavia, é preciso considerar que as séries temporais de nível do mar que compõem nosso estudo resultam da complexa interação de múltiplas forças físicas, incluindo marés locais, correntes oceânicas, ventos, e potencialmente, ondas do tsunami.

No caso específico do tsunami originado em Tonga, é imprescindível ponderar a distância significativa entre a origem do evento e as regiões de estudo ao longo da costa brasileira. Esse fator de distância, associado ao processo de dispersão inerente à propagação das ondas do tsunami ao longo de grandes extensões oceânicas, pode ter resultado em modificações na energia observada em nossas análises.

Por fim, com base na análise espectral, o período das ondas residuais do tsunami gerado pela erupção vulcânica em Tonga, foi identificado em torno de 125 minutos na costa do Brasil, conforme o cálculo abaixo (considerando uma média de 11.5 cpd):

- Período (em dias) = $1 / \text{Frequência (cpd)}$
- Período (em dias) = $1 / 11.5 = 0.0869$ dias
- Como um dia tem 24 horas e cada hora tem 60 minutos, então 0.0869 dias equivale a:
 $0.0869 \text{ dias} * 24 \text{ horas/dia} * 60 \text{ minutos/hora} = 125 \text{ minutos}$

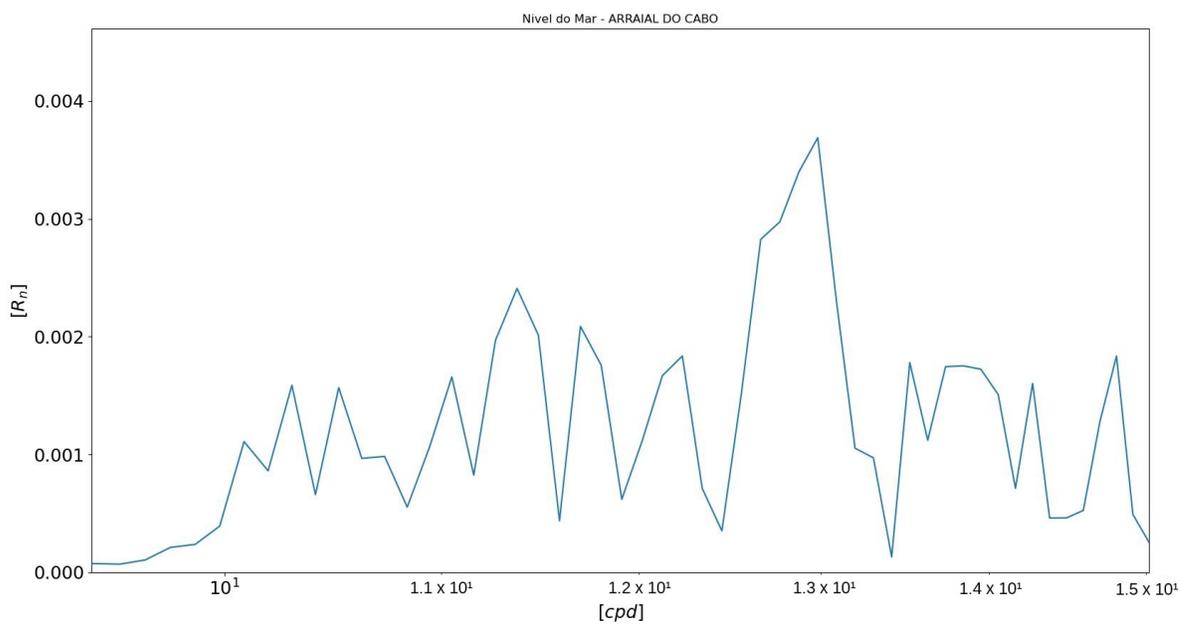
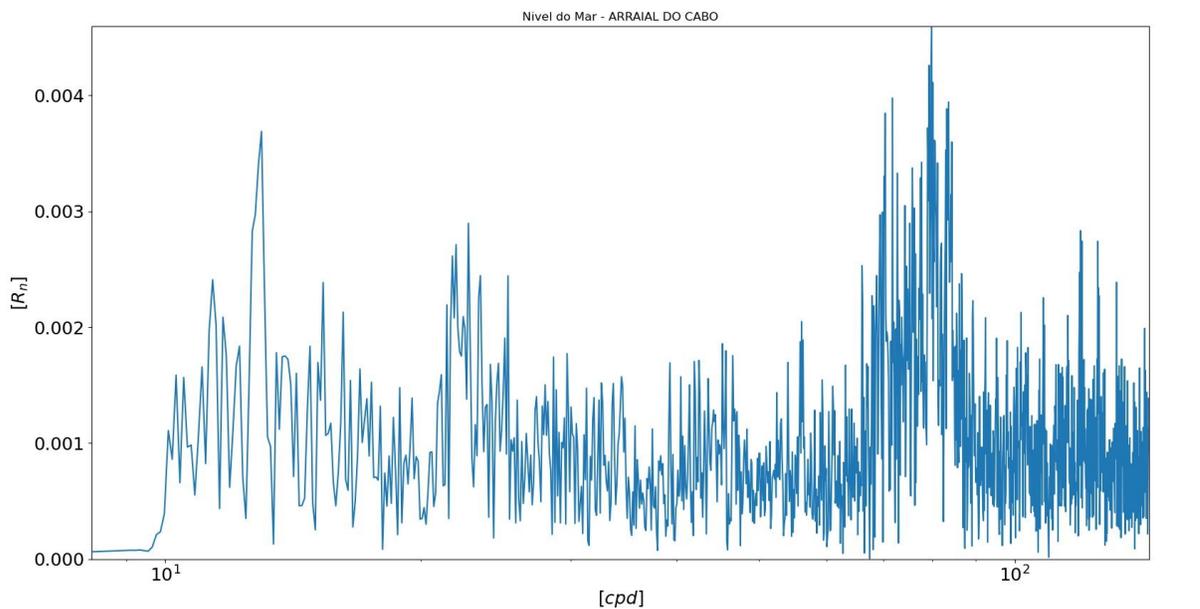
Este intervalo de tempo representa o ciclo de maior energia detectado na série temporal das estações analisadas, o qual foi mapeado para uma frequência de aproximadamente 11.5 ciclos por dia. Esta observação é corroborada por estudos anteriores, como o trabalho de Dourado *et al.* (2022), o qual também identificou um período similar, nas regiões, para o tsunami em questão.

A concordância entre essas descobertas, realizadas independentemente, reforça a precisão da análise e pode fornecer uma possível evidência da influência do tsunami nas regiões analisadas, apesar da vasta distância do epicentro em Tonga.

5.5.1 Transformada de Fourier em Escala Logarítmica

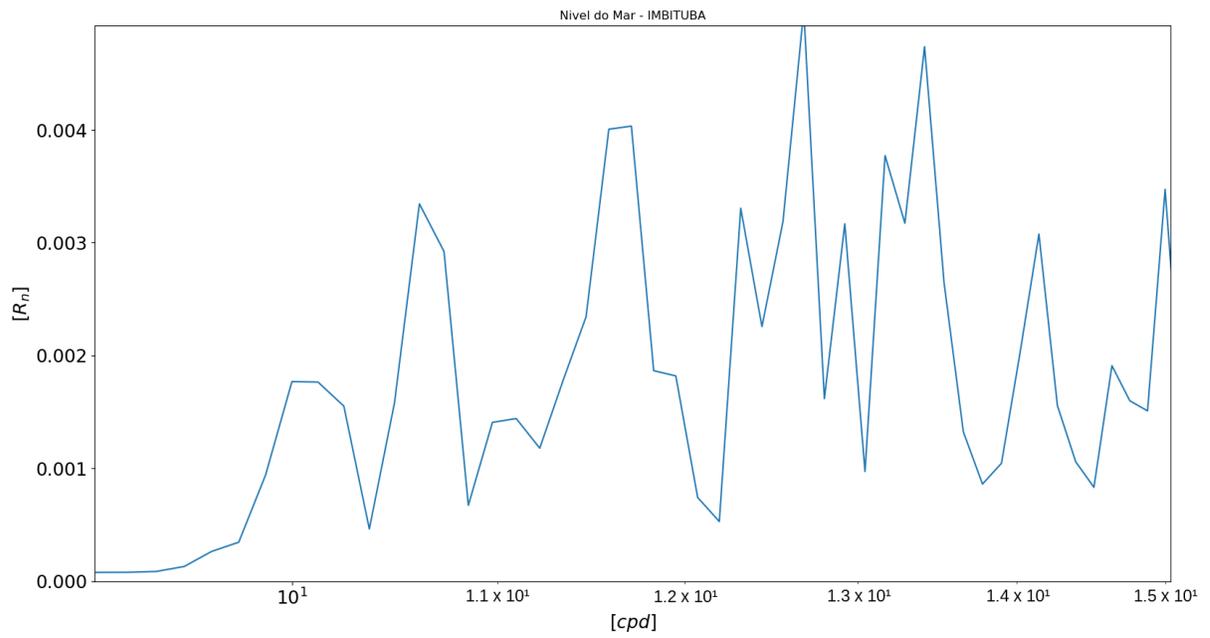
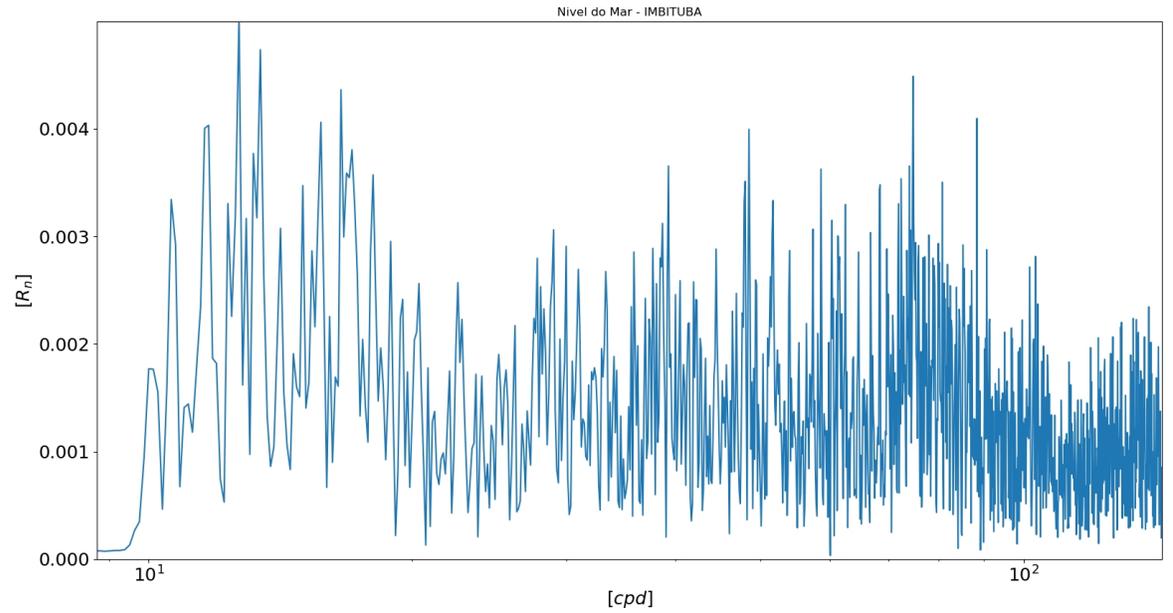
A aplicação da transformada de Fourier com o eixo das abscissas em uma escala logarítmica pode ser uma técnica útil na análise de sinais e séries temporais. Essa abordagem pode ser utilizada quando se lida com dados que abrangem uma ampla gama de frequências, como no caso de análise de dados de nível do mar. A escala logarítmica permite uma representação mais detalhada das frequências mais baixas, que podem ser facilmente perdidas em uma escala linear, enquanto ainda mostra de forma clara as frequências mais altas. Isso é crucial para identificar padrões de longo prazo e comportamentos cíclicos, bem como para detectar eventos de curta duração ou picos de alta frequência.

Figura 40: Espectro de Frequência gerado pela Transformada de Fourier com o eixo das abscissas em escala logarítmica, para a região de Arraial do Cabo



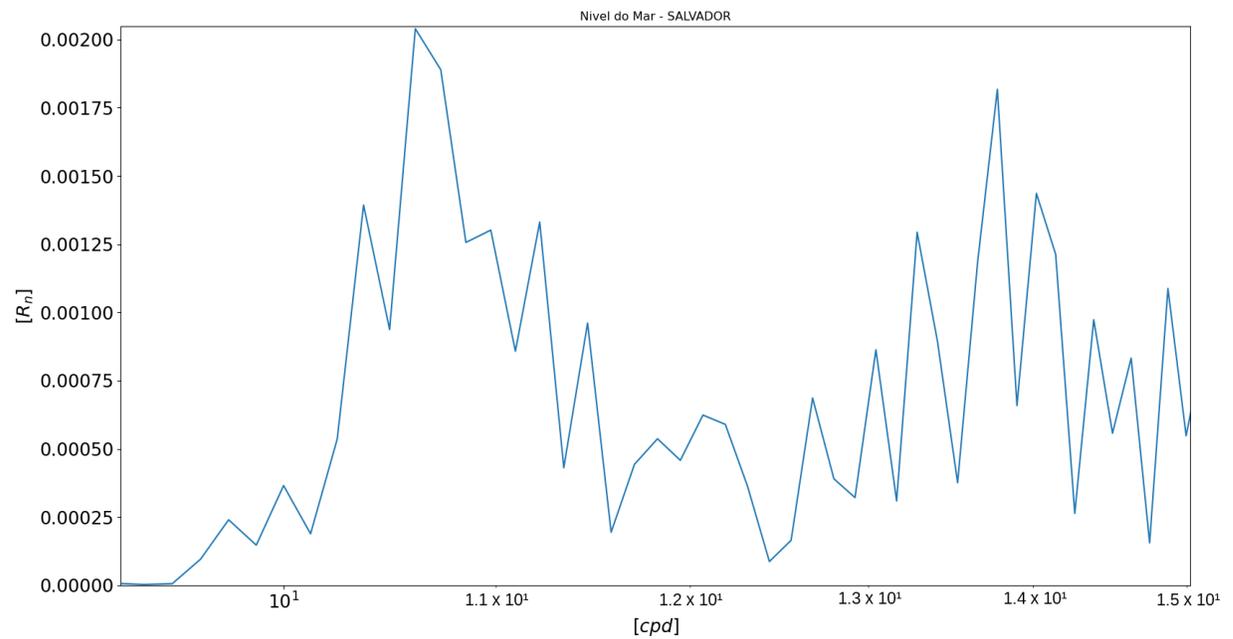
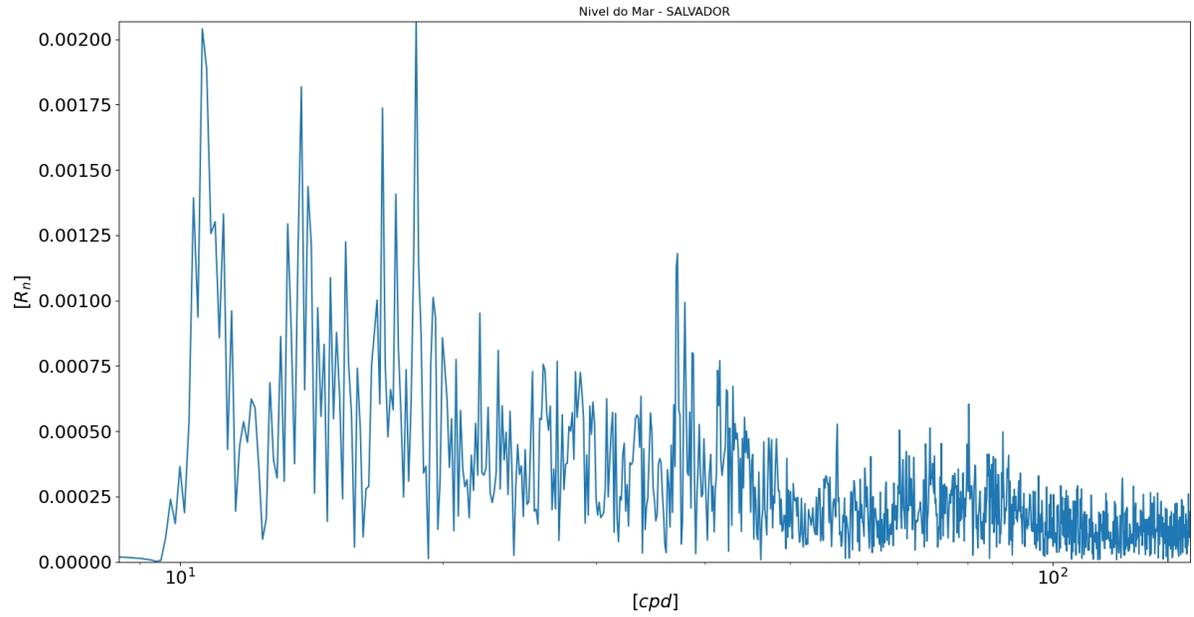
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 41: Espectro de Frequência gerado pela Transformada de Fourier com o eixo das abscissas em escala logarítmica, para a região de Imbituba



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 42: Espectro de Frequência gerado pela Transformada de Fourier com o eixo das abcissas em escala logarítmica, para a região de Salvador



Fonte: AUTOR (2023).

A análise do espectro das variações do nível do mar em Arraial do Cabo (Figura 40) e Imbituba (Figura 41) revela informações importantes sobre as possíveis influências do tsunami nessas regiões costeiras. Em Arraial do Cabo, notamos um pico de energia notável em torno de 1.3×10 ciclos por dia, que está de acordo com análises anteriores conduzidas com diferentes técnicas analíticas. Esse pico sugere uma frequência energética nas variações do nível do mar, possivelmente relacionada ao tsunami em questão. A coerência entre os resultados da análise de Fourier e as conclusões anteriores reforça a confiabilidade dessas descobertas.

Ao observar as variações do nível do mar em Imbituba, notamos que o pico de energia se estende por uma faixa ligeiramente mais ampla, entre 1.25×10 ciclos por dia, em comparação com Arraial do Cabo. Essa descoberta também está alinhada com análises anteriores conduzidas na região e sugere a possibilidade de uma influência específica que afeta as variações do nível do mar em Imbituba. Ao considerar Salvador (Figura 42), a análise espectral revela um pico de energia em torno de 1.0×10 e 1.1×10 ciclos por dia, conforme também já encontrada por outras análises.

Dessa forma, percebe-se que esta abordagem logarítmica permite uma representação mais equilibrada das frequências, abrangendo tanto as frequências de alta como de baixa amplitude. Com a escala logarítmica, as variações de frequência de grande magnitude não dominam a análise, tornando-a mais sensível às características sutis do sinal. Assim, essa abordagem logarítmica melhora a capacidade de detecção de picos e permite identificar com mais precisão os elementos espectrais de interesse.

5.6 Transformada Wavelet

A próxima etapa de nossa análise envolverá a aplicação da Transformada *Wavelet*, utilizando o sinal que foi observado e filtrado por Thompson. A Transformada *Wavelet* é uma ferramenta matemática que nos permite analisar sinais não estacionários, como é o caso do sinal do tsunami, com variabilidade de energia ao longo do tempo (MASSEL, 2001). Esta análise fornecerá uma visão mais detalhada da variação da energia do sinal em diferentes escalas temporais e frequências.

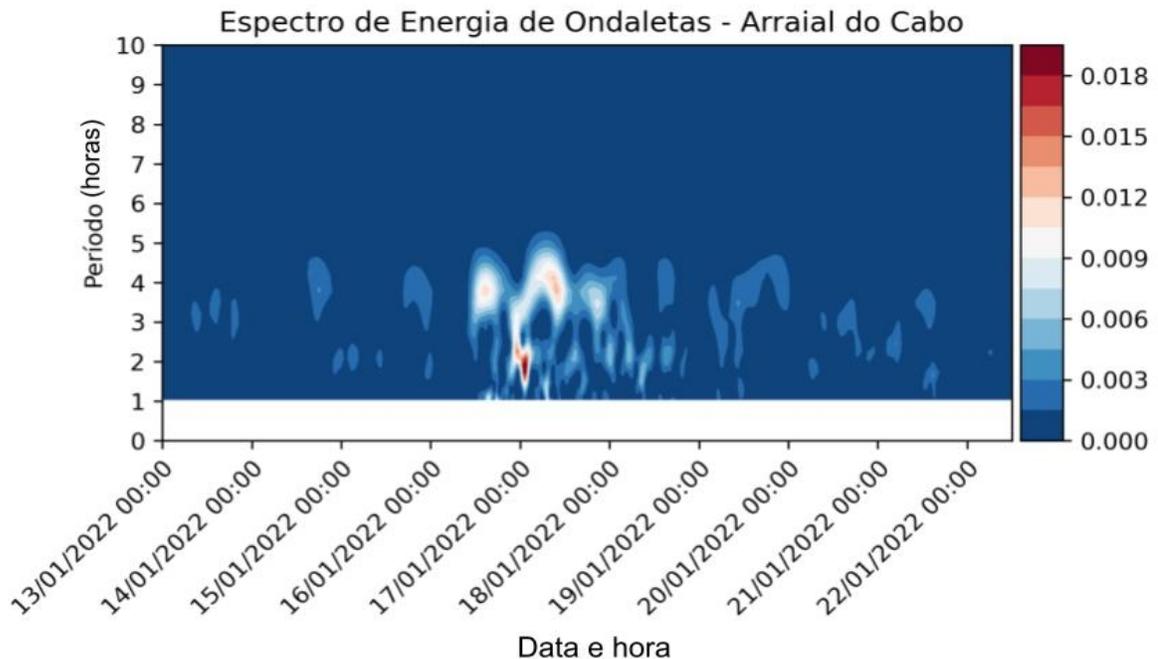
Espera-se que a Transformada *Wavelet* revele estruturas temporais e frequenciais no sinal que podem não ser imediatamente aparentes na análise espectral de Fourier. Especificamente,

estamos interessados em identificar períodos de tempo durante os quais a energia em frequências específicas seja particularmente intensa. Este conhecimento poderia permitir caracterizar melhor a dinâmica do tsunami e sua influência na região de estudo.

A análise de ondaletas, e especificamente a utilização da transformada de Morlet, como já mencionado durante este trabalho, oferece facilidades significativas na identificação de períodos de maior energia em séries temporais. Uma das principais vantagens reside na sua capacidade de adaptar a resolução tanto no domínio do tempo quanto da frequência, o que permite a detecção precisa de eventos de diferentes escalas temporais e frequências.

Dessa forma, as figuras abaixo representam os resultados obtidos ao passar os dados de cada região pela Transformada *Wavelet*:

Figura 43: Representação gráfica da análise *wavelet* para a região de Arraial do Cabo entre os dias 13/01/2022 e 23/01/2022 – período de ocorrência dos efeitos do tsunami

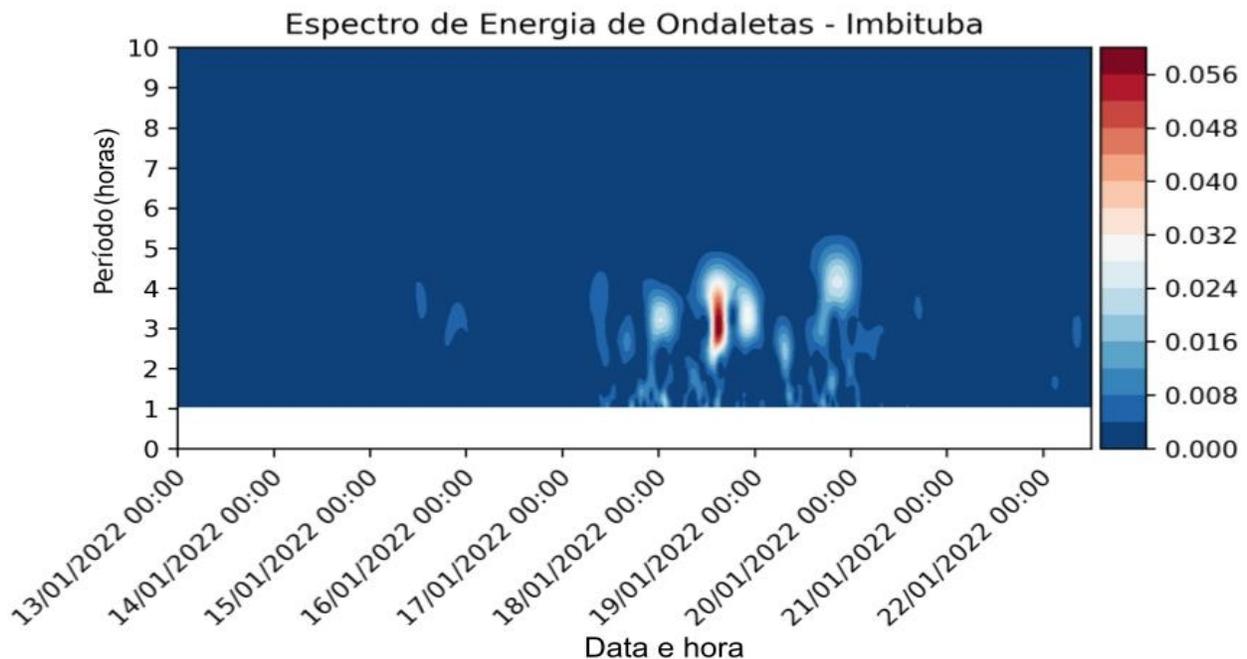


Fonte: AUTOR (2023).

A análise dos espectros de energia de ondaletas para as regiões em estudo, a seguir, desempenha um papel de grande importância na compreensão das oscilações do nível do mar em resposta a eventos de grande magnitude, como no caso de tsunamis. Esses espectros, complementados pelo conhecimento das características geográficas submarinas, podem proporcionar uma visão abrangente das implicações desse fenômeno natural nas distintas regiões do Brasil.

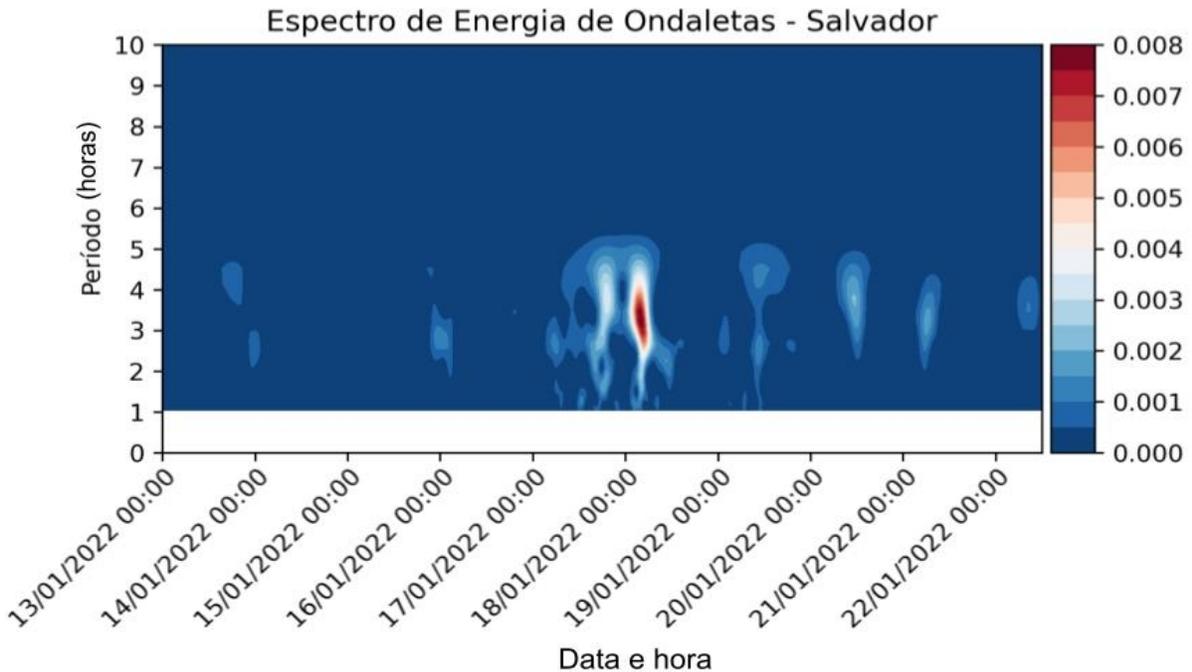
No contexto da Figura 43, o espectro de energia gerado pela transformada de ondaletas revela uma significativa concentração de energia a partir do dia 16/01/2022, seguida por uma rápida elevação e subsequente queda. Essa observação sugere uma perturbação temporal que pode estar relacionada à possível influência do tsunami na região. A transformada de ondaletas, ao destacar essa variação de energia em diferentes escalas de tempo e frequência, fornece dados relevantes sobre a natureza e a duração desse evento anômalo.

Figura 44: Representação gráfica da análise *wavelet* para a região de Imbituba entre os dias 13/01/2022 e 23/01/2022 – período de ocorrência dos efeitos do tsunami



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 45: Representação gráfica da análise *wavelet* para a região de Salvador entre os dias 13/01/2022 e 23/01/2022 – período de ocorrência dos efeitos do tsunami



Fonte: AUTOR (2023).

Por outro lado, Imbituba (Figura 44) e Salvador (Figura 45) exibem picos de energia em um período subsequente, especificamente a partir de 17/01/2022, sugerindo uma possível propagação do evento que inicialmente afetou Arraial do Cabo para essas duas regiões. No entanto, uma observação crucial decorrente da análise reside na disparidade das magnitudes de energia observadas entre as três localidades.

Imbituba, com seu pico de energia mais proeminente, está localizada em uma posição geográfica que favorece a amplificação da onda, possivelmente devido à sua maior proximidade com o epicentro do evento ou interações singulares com as características submarinas. Por conseguinte, a maior concentração de energia registrada pode ser atribuída a esses fatores favoráveis.

Arraial do Cabo, embora tenha sido impactada de forma significativa, apresenta uma magnitude intermediária de energia. Isso sugere a existência de interações diferenciadas ou amortecimento da energia do tsunami. Essa variação pode ser uma consequência de uma maior distância em relação ao epicentro, agregado a particularidades da plataforma continental ou outros elementos geográficos que influenciam a propagação e intensidade das ondas.

Por fim, Salvador exibe a menor magnitude de energia entre as três regiões, em consonância com os efeitos menos perceptíveis do tsunami nessa área (DOURADO *et. al.*, 2022). Isso é claramente refletido em seu espectro de energia e pode ser atribuído à maior distância em relação ao epicentro, barreiras geográficas naturais, características específicas da plataforma continental ou outras singularidades costeiras que dissipam ou desviam a onda, resultando na atenuação de sua energia.

Em resumo, a análise de ondaletas destaca-se como uma ferramenta fundamental para a identificação e caracterização de eventos de alta energia em séries temporais complexas, como as variações do nível do mar associadas aos resíduos de um tsunami. Ao combinar as vantagens dos domínios de tempo e frequência, essa técnica permite uma compreensão mais profunda das interações geofísicas e ambientais em diferentes localidades afetadas por tais eventos.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como principal objetivo a análise e compreensão a respeito do Tsunami de Tonga, abordando desde sua gênese e características, até seus efeitos na costa do Brasil, que seriam estudados através do processamento e análise de dados de nível do mar.

Dessa forma, ao fim deste trabalho, foi possível alcançar os resultados esperados, com base nos objetivos específicos traçados para realização da pesquisa, destacando-se as seguintes conclusões:

- Em média, um tsunami pode resultar em perdas econômicas que variam de dezenas a centenas de bilhões de dólares para um país afetado, acompanhado por uma média de 290.000 vítimas nos últimos 100 anos. As principais características desses eventos incluem velocidades que podem exceder 800 km/h em águas mais profundas, alturas de onda amplificadas dramaticamente à medida que se aproximam da costa e normalmente

requerem terremotos com magnitude superior a 8.0 como principal causa, seguidos, em menor frequência, por erupções vulcânicas;

- O Megatsunami Tonga está relacionado à erupção do vulcão Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, ocorrida em janeiro de 2022, classificada como uma das mais significativas em décadas. Esse evento, de natureza vulcânica, gerou ondas que atingiram até 15 metros de altura, com uma velocidade de propagação incomum de cerca de 1.000 km/h. Este fenômeno foi classificado como um meteotsunami vulcânico, devido à interação das ondas de choque provocadas pela explosão com as ondas na superfície do mar, formando a ressonância. No Brasil, conforme relatado pelas mídias nacionais e instituições como o IBGE, o tsunami causou variações significativas na amplitude das do nível do mar em cidades como Imbituba e Arraial do Cabo;
- Os métodos de monitoramento de tsunamis atuais desempenham um papel fundamental na prevenção e resposta a esses eventos devastadores. Os radares oceânicos de alta frequência (HF) se destacam ao rastrear tsunamis a grandes distâncias, avaliando amplitudes e energia das ondas. Além disso, sistemas como o DART utilizam registradores de pressão subaquáticos conectados a boias de superfície, permitindo a detecção precoce por meio da análise das flutuações de pressão. Complementarmente, o monitoramento baseado em alterações de dados em estações maregráficas é essencial para identificar anomalias no nível do mar e emitir alertas em tempo real, contribuindo para a proteção de áreas costeiras contra tsunamis;
- A análise detalhada da propagação do Tsunami de Tonga permitiu a compreensão das interações complexas entre a onda e o ambiente marinho. A região em análise foi dividida em três áreas distintas. Na primeira área, situada entre Tonga e o continente sul-americano, observou-se que a presença de ilhas e massas de terra provocou significativas difração e reflexão na onda, resultando em alterações em sua direção e intensidade. Na segunda área, que abrange o continente sul-americano, a Antártica e ilhas como as Malvinas e Geórgia do Sul, a onda se estreitou e interagiu com canais cruciais, como o Drake e o Mar da Escócia. Além disso, a profundidade reduzida na plataforma continental afetou tanto a velocidade quanto a altura das ondas nessa região. Por fim, na terceira área,

observou-se uma mudança na direção da onda, com uma curva de leste para oeste, influenciada por interações anteriores e pela topografia submarina circundante;

- A análise acima foi complementada neste trabalho a partir de estudos já realizados por Dourado *et. al.*, (2022) e Omira *et. al.*, (2022), estimando-se as perdas percentuais de velocidade das ondas do tsunami ao se aproximarem das plataformas continentais de Arraial do Cabo e Imbituba. Na região sul, onde as ondas percorreram uma distância menor em águas profundas, a perda percentual foi maior, de cerca de 31,58%, devido à rápida desaceleração causada pela mudança abrupta de profundidade. Em contrapartida, Arraial do Cabo, com uma maior distância em águas profundas, apresentou uma perda percentual menor de aproximadamente 19,18%. Essas perdas percentuais de velocidade podem ser atribuídas a diversos fatores físicos e geológicos, como a interação física da onda com o fundo do oceano e massas de terra (refração, atrito, difração);
- A aplicação de parâmetros do sistema de controle de qualidade de dados (QARTOD) possibilitou a identificação de padrões e características específicas de cada região, resultando em uma melhor compreensão dos dados e uma seleção precisa dos parâmetros do QARTOD. Durante o período de coleta de dados, que ocorreu entre 13 de janeiro de 2022 e 22 de janeiro de 2022, cada região apresentou um perfil distinto de erros detectados pelo sistema de controle de qualidade, com Arraial do Cabo e Imbituba tendo a maior proporção de erros detectados no teste de *Flate Line*, enquanto Salvador exibiu a maior porcentagem de erros no teste de *Gross Range*. No entanto, é importante ressaltar que a proporção de dados que não passou nos testes QARTOD foi relativamente baixa em comparação ao volume total de dados coletados;
- A aplicação do Filtro de Thompson revelou sua eficácia na detecção e remoção de valores discrepantes nos dados de nível do mar. A escolha cuidadosa das frequências de corte e o número de pesos contribuíram para a preservação dos recursos essenciais dos dados, minimizando o impacto dos valores aberrantes. Além disso, o Filtro de Thompson foi capaz de mitigar o efeito "Gibbs", resultando em uma representação suave e precisa dos dados.
- A análise comparativa dos dados filtrados por Thompson com os dados observados, por meio da subtração, destacou variações significativas nas regiões costeiras de Arraial do

Cabo e Imbituba após o tsunami originado em Tonga. Salvador, por outro lado, mostrou alterações mais sutis no nível do mar, indicando a possível influência de fatores locais;

- A EMD se destacou como uma ferramenta fundamental para desvendar padrões intrínsecos nos dados não estacionários, enriquecendo a compreensão do fenômeno investigado. Sua capacidade de decompor séries temporais complexas em Modos Intrínsecos (MFIs) proporcionou uma representação precisa e detalhada dos dados, capturando componentes de frequência e amplitude variáveis no tempo.
- As MFIs 1, 2 e 3 de cada região mostraram uma notável semelhança com o sinal original, indicando reflexos diretos e notáveis do tsunami, como deslocamentos verticais significativos causados pelas ondas. A Figura 26, que representa as MFIs para a região de Imbituba, é um exemplo de como as seis MFIs geradas compõem o sinal resultante, com as MFIs 1, 2 e 3 mostrando uma notável semelhança com o sinal original;
- A aplicação da Transformada de Fourier às séries temporais de nível do mar nas diferentes regiões costeiras do Brasil afetadas pelo tsunami originado em Tonga, revelaram informações valiosas sobre as características espectrais desses sinais. Observou-se que todas as regiões analisadas apresentaram um pico proeminente de energia em torno de 11 a 13 ciclos por dia (cpd) nas análises espectrais. Além disso, foi notório que a MFI 3 de cada região, após aplicação na Transformada de Fourier, representou de forma mais similar o espectro de frequência do sinal original observado. Nas análises realizadas, percebeu-se que os picos de maior energia, tanto na MFI 3 quanto no sinal original, se concentravam, em média, em torno de 11.5 ciclos por dia, o que implicaria um período de cerca de 125 minutos para as ondas, resultado similar ao apresentando por Dourado *et. al.*, (2022);
- Ao aplicar a Transformada de Fourier em escalas logarítmicas, identificou-se padrões de frequência em diferentes escalas temporais, permitindo a detecção de oscilações de longo prazo, bem como eventos de curta duração, que podem não ser visíveis em uma escala linear. Em Arraial do Cabo, a presença de um proeminente pico de energia em torno de 1.3×10 ciclos por dia, alinhado com análises prévias, sugeriu uma possível associação com o tsunami. Em Imbituba, o pico de energia entre 1.25×10 e 1.3×10 ciclos por dia, também em conformidade com análises anteriores, apontou para influências específicas

que impactam as variações do nível do mar. Já em Salvador, embora não tão evidente, um pico em torno de 1.0×10 ciclos por dia pode revelar informações sobre padrões locais;

- Como uma última ferramenta, a aplicação da Transformada *Wavelet* para analisar as séries temporais de nível do mar nas regiões costeiras afetadas pelo tsunami, nos permitiu obter uma visão mais detalhada das variações de energia do sinal em diferentes escalas temporais e de frequência. No contexto de Arraial do Cabo, a transformada de ondaletas revelou uma concentração significativa de energia a partir de uma data específica (16/01/2022), seguida por uma rápida elevação e subsequente queda. Em Imbituba e Salvador, observamos picos de energia em um período subsequente, indicando uma possível propagação do evento que inicialmente afetou Arraial do Cabo. No entanto, notamos uma disparidade nas magnitudes de energia entre as três localidades. Imbituba exibiu o pico de energia mais proeminente, sugerindo que sua posição geográfica pode ter favorecido a amplificação da onda, possivelmente devido à proximidade com o epicentro do evento ou interações singulares com as características submarinas;
- Este trabalho se baseou em uma série de outros já realizados sobre os efeitos do tsunami de Tonga, mas com foco principal na pesquisa de Dourado *et. al.*, (2022). Como uma abordagem comparativa, o presente estudo incorporou ferramentas adicionais, como a EMD, que não estavam contempladas no estudo de Dourado *et al.*, (2022), mas demonstrou resultados satisfatórios e concordantes com as análises anteriormente realizadas por aquele trabalho; e
- Com base nas ferramentas empregadas neste trabalho, resultados discutidos e em estudos já realizados anteriormente, é possível concluir, através de respostas satisfatórias e comprovadas, que as regiões de Arraial do Cabo e Imbituba foram mais claramente afetadas pelos efeitos do tsunami de Tonga, ocorrido em janeiro de 2022. Na região de Salvador, porém, os efeitos foram observados com menos evidências.

Com esta pesquisa, espera-se contribuir com conhecimentos existentes sobre tsunamis, ao aprofundar nossa compreensão dos complexos processos que governam esses eventos extremos. Além disso, espera-se também que este estudo possa promover informações sobre as respostas a estes eventos naturais adversos. Os resultados, análises e metodologias apresentados podem

informar aprimoramentos nas estratégias de alerta e gestão de desastres costeiros do país, melhorando a preparação e a mitigação de riscos. Adicionalmente, este trabalho pode contribuir para futuras investigações sobre tsunamis, expandindo nosso conhecimento sobre esse fenômeno e incentivando a aplicação de técnicas de análise de dados, como a EMD e a Transformada de Fourier, em estudos similares.

Para pesquisas futuras, é recomendável que se aprofunde a análise das interações entre tsunamis e a topografia submarina, considerando uma variedade de cenários sísmicos e vulcânicos. Além disso, investigações adicionais podem explorar a aplicabilidade da EMD em diferentes contextos de análise de dados de nível do mar e sua eficácia em desvendar padrões intrínsecos. Adicionalmente, a pesquisa interdisciplinar que pode envolver geologia, oceanografia, meteorologia e engenharia costeira e oceânica, pode enriquecer ainda mais o entendimento desses fenômenos complexos. Por fim, é importante que esforços futuros se concentrem também na melhoria contínua da análise de dados de nível do mar, dando especial atenção ao controle de qualidade, com o intuito de auxiliar na detecção de possíveis reflexos de eventos de grande magnitude, como o caso de um tsunami.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISON, P. S. **The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance, Second Edition**. 2nd edition ed. Boca Raton: CRC Press, 2020.

AFP. **Imagens de Tonga mostram devastação após erupção seguida por tsunami** | O TEMPO. Disponível em: <<https://www.otempo.com.br/mundo/imagens-de-tonga-mostram-devastacao-apos-erupcao-seguida-por-tsunami-1.2597496>>. Acesso em: 14 ago. 2023.

ANNUNZIATO, A. **Tsunami Detection Model for Sea Level Measurement Devices**. *Geosciences*, v. 12, p. 386, 18 out. 2022.

ANSELIN, L.; REY, S. **Properties of Tests of Spatial Dependence in Linear Regression Models**. *Geographical Analysis*, v. 23, p. 112–131, 3 set. 2010.

ASSUMPCÃO, M. et al. **Seismicity patterns and focal mechanisms in southeastern Brazil**. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 15, p. 119–132, jul. 1997.

BARMAN, S. **Physics of Tsunami: Generation, Propagation and Rise of the Ocean**. *International Journal of Oceans and Oceanography*, v. 14, p. 169, 10 jun. 2020.

BECHLE, A. J. et al. **Meteotsunamis in the Laurentian Great Lakes**. *Scientific Reports*, v. 6, n. 1, p. 37832, 24 nov. 2016.

BRACEWELL, R. **The Fourier Transform & Its Applications**. 3rd edition ed. Boston: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1999.

BRAGG, W. H. et al. **The crystalline state**. New York: Macmillan, 1934.

BRYANT, E. **Tsunami: The Underrated Hazard**. 2nd ed. edição ed. [s.l.] Springer, 2010.

CANDELLA, R. **Statistical and spectral characteristics of the 2011 east Japan tsunami signal in arraial do cabo, RJ, Brazil**. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 32, p. 1–6, 1 jun. 2014.

CHATURVEDI, S. K.; SRIVASTAVA, P. K.; GUVEN, U. **A brief review on tsunami early warning detection using BPR approach and post analysis by SAR satellite dataset.** Journal of Ocean Engineering and Science, v. 2, n. 2, p. 83–89, 1 jun. 2017.

CLAGUE, J. J. **A synthesis of geological hazards in Canada.** [s.l.: s.n.].

CORENMAN, J. **Ocean Wave Basics - BoatUS Magazine.** page. Disponível em: <<https://www.boatus.com/magazine/2018/december/ocean-wave-basics.asp>>. Acesso em: 14 ago. 2023.

DANIELL, J. E. et al. **The CATDAT damaging earthquakes database.** Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 11, n. 8, p. 2235–2251, 18 ago. 2011.

DAUBECHIES, I. **Ten Lectures on Wavelets: 61.** Philadelphia, Pa: Society for Industrial and Applied Mathematic, 1992.

DAWSON, A.; STEWART, I. **Tsunami deposits in the Geological Record.** Sedimentary Geology, v. 200, p. 166–183, 1 ago. 2007.

DOURADO, F. et al. **The January 15th, 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption recorded in Brazil.** Ocean and Coastal Research, v. 70, 22 nov. 2022.

DZVONKOVSKAYA, A.; PETERSEN, L.; INSUA, T. L. **Real-time capability of meteotsunami detection by WERA ocean radar system.** 2017 18th International Radar Symposium (IRS), p. 1–10, jun. 2017.

EDITORES EXAME. **IBGE detecta elevação no nível do mar brasileiro após Tsunami em Tonga.** Disponível em: <<https://exame.com/brasil/ibge-detecta-elevacao-no-nivel-do-mar-brasileiro-apos-tsunami-em-tonga/>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

EZER, T. et al. **Gulf Stream’s induced sea level rise and variability along the U.S. mid-Atlantic coast.** Journal of Geophysical Research: Oceans, v. 118, n. 2, p. 685–697, 2013.

FARGE, M. **Wavelet Transforms and Their Applications to Turbulence**. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 24, n. 1, p. 395–458, 1992.

FRANCIS, P. W. **The origin of the 1883 Krakatau tsunamis**. Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 25, n. 3, p. 349–363, 1 jul. 1985.

FRANCO, D. S. **Marés: Fundamentos, Análise e Previsão**. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1997.

GALVÃO, R. et al. **Estudo comparativo sobre filtragem de sinais instrumentais usando transformadas de Fourier e Wavelet (Comparative study on instrumental signal denoising using Fourier and wavelet transforms)**. Química Nova, v. 24, p. 874–884, 1 nov. 2001.

GONZALEZ ET AL. **NDBC - Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART)**. Disponível em: <<https://www.ndbc.noaa.gov/dart/brief.shtml>>. Acesso em: 13 mar. 2023.

GRAPS, A. **An introduction to wavelets**. IEEE Computational Science and Engineering, v. 2, n. 2, p. 50–61, 1995.

GRILLI, S.; GROSDIDIER, S.; GUÉRIN, C.-A. **Tsunami Detection by High-Frequency Radar Beyond the Continental Shelf**. Pure and Applied Geophysics, v. 173, 1 dez. 2016.

GUÉRIN, C.-A. et al. **Tsunami detection by high-frequency radar in British Columbia: performance assessment of the time-correlation algorithm for synthetic and real events**. Ocean Dynamics, v. 68, n. 4–5, p. 423–438, maio 2018.

GUO, R. 12 - **Cross-border natural disaster and crisis management**. Em: GUO, R. (Ed.). Cross-Border Resource Management (Fourth Edition). [s.l.] Elsevier, 2021. p. 371–400.

HIROSE, A.; LONNGREN, K. E. **Fundamentals of Wave Phenomena**. 2nd ed. edição ed. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2010.

HU, G. et al. **The characteristics of the 2022 Tonga volcanic tsunami in the Pacific Ocean**. Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 23, n. 2, p. 675–691, 14 fev. 2023.

HUANG, N. E. et al. **The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis**. Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 454, n. 1971, p. 903–995, 1998.

HUANG, N.; WU, Z. **A Review on Hilbert-Hung Transform Method and Its Applications to Geophysical Studies**. Reviews of Geophysics, v. 46, p. RG2006, 6 jun. 2008.

KNAUSS, J. A. **Introduction to Physical Oceanography**. Englewood Cliffs, N.J: Longman Higher Education, 1978.

LIU, J. et al. **A high-resolution wave energy assessment of south-east Australia based on a 40-year hindcast**. Renewable Energy, v. 215, p. 118943, 1 out. 2023.

LYNX DX GROUP. **A35AG – Tonga**, 2019. Disponível em: <<https://www.lynxdxg.com/a35ag-tonga/>>. Acesso em: 18 mar. 2023

MALLAT, S. **A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way**. 3rd edition ed. Amsterdam ; Boston: Academic Press, 2008.

MALLAT, S. G.; ZHANG, Z. **Matching pursuits with time-frequency dictionaries**. IEEE Transactions on Signal Processing, v. 41, n. 12, p. 3397–3415, dez. 1993.

MASSEL, S. R. **Wavelet analysis for processing of ocean surface wave records**. Ocean Engineering, v. 28, n. 8, p. 957–987, 1 ago. 2001.

MEINIG, C. **Real-Time Deep-Ocean Tsunami Measuring, Monitoring, and Reporting System: The NOAA DART II Description and Disclosure**. 2005.

MITRA, S. K.; KAISER, J. F. (EDS.). **Handbook for Digital Signal Processing**. New York: Wiley-Interscience, 1993.

MOHAMMED, A. A.; HARIS, S. M. Author Correction: **Using energy time–frequency of Hilbert Huang transform to analyze the performance of the variable valve timing engine**. Scientific Reports, v. 12, n. 1, p. 7114, 2 maio 2022.

MURTY, T. S. **Seismic Sea Waves Tsunamis**. 1st edition ed. [s.l.] Supply and Services Canada, 1977.

NALLEY, D. et al. **A comparison of conventional and wavelet transform based methods for streamflow record extension**. *Journal of Hydrology*, v. 582, p. 124503, 1 mar. 2020.

NARCITY VANCOUVER. **A Tsunami Advisory Was Issued For BC After A Volcano Erupted In Tonga - Narcity**. Disponível em: <<https://www.narcity.com/vancouver/tsunami-advisory-has-just-been-issued-for-bc-after-a-volcano-erupted-in-tonga>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

NATIONAL DATA BUOY CENTER. **Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART®) Description**. Disponível em: <<https://www.ndbc.noaa.gov/dart/dart.shtml>>. Acesso em: 13 mar. 2023.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Tsunamis**. Disponível em: <<https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/tsunamis>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART®) Description**. Disponível em: <<https://www.ndbc.noaa.gov/dart/dart.shtml>>. Acesso em: 13 mar. 2023.

NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. **Tsunamis in History: Using Data to Improve Public Safety**. Disponível em: <<https://storymaps.arcgis.com/stories/0d38da09a47e42729ddb86a6910617b>>. Acesso em: 18 mar. 2023.

OMIRA, R. et al. **Global Tonga tsunami explained by a fast-moving atmospheric source**. *Nature*, v. 609, n. 7928, p. 734–740, set. 2022.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1989.

PARIS, R. **Source mechanisms of volcanic tsunamis.** Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, v. 373, 22 set. 2015.

PARIS, R. et al. **Advances in the study of mega-tsunamis in the geological record.** Earth-Science Reviews, v. 210, p. 103381, 1 nov. 2020.

PELLIKKA, H. et al. **Meteotsunamis in the northern Baltic Sea and their relation to synoptic patterns.** Weather and Climate Extremes, v. 38, p. 100527, 1 dez. 2022.

PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. **Wavelet Methods for Time Series Analysis.** Illustrated edition ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

PICCO et al. **Detection and Characterization of Meteotsunamis in the Gulf of Genoa.** Journal of Marine Science and Engineering, v. 7, n. 8, p. 275, 2019.

PRIESTLEY, M. B. **Spectral Analysis and Time Series, Two-Volume Set: Volumes I and II: Volume 1-2.** 1ª edição ed. Amsterdam Heidelberg: Academic Press Inc, 1982.

PUGH, D. T. **Tides, surges and mean sea-level (reprinted with corrections).** [s.l.] John Wiley & Sons, Ltd., 1996.

RABINOVICH, A. **Generation of Meteorological Tsunamis (Large Amplitude Seiches) Near the Balearic and Kuril Islands | SpringerLink.** Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008096627047>>. Acesso em: 14 ago. 2023.

RATO, R. T.; ORTIGUEIRA, M. D.; BATISTA, A. G. **On the HHT, its problems, and some solutions.** Mechanical Systems and Signal Processing, Special Issue: Mechatronics. v. 22, n. 6, p. 1374–1394, 1 ago. 2008.

RÖBKE, B. R.; VÖTT, A. **The tsunami phenomenon.** Progress in Oceanography, v. 159, p. 296–322, 1 dez. 2017.

RYALL, J. **Anak Krakatoa tsunami was 100 metres high, say scientists**. Disponível em: <<https://www.scmp.com/week-asia/health-environment/article/3043065/tsunami-anak-krakatoa-eruption-indonesia-was-100>>. Acesso em: 14 ago. 2023.

SATAKE, K. **Effects of bathymetry on tsunami propagation: Application of ray tracing to tsunamis**. pure and applied geophysics, v. 126, n. 1, p. 27–36, 1 mar. 1988.

SCHIELEIN, P.; SCHELLMANN, G. **Tsunamigefährdung im Mittelmeer - Eine Analyse geomorphologischer und historischer Zeugnisse**. 1 jan. 2007.

SLEPIAN, D.; POLLAK, H. O. **Prolate spheroidal wave functions, fourier analysis and uncertainty** — I. The Bell System Technical Journal, v. 40, n. 1, p. 43–63, jan. 1961.

SMITH, W. F. **Waves and Oscillations: A Prelude to Quantum Mechanics**. 1st edition ed. New York: Oxford University Press, 2010.

STEFANAKIS, T. **Tsunami amplification phenomena**. 30 set. 2013.

SYNOLAKIS, C. E. **The runup of solitary waves**. Journal of Fluid Mechanics, v. 185, p. 523–545, dez. 1987.

SYSTEM (U.S.), I. O. O. **Manual for Real-Time Quality Control of Water Level Data: A Guide to Quality Control and Quality Assurance for Water Level Observations. Version 2.1**. [s.l.] U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Integrated Ocean Observing System, 2021. Disponível em: <<https://repository.oceanbestpractices.org/handle/11329/1547>>. Acesso em: 21 ago. 2023.

TANG, S.; YANG, Y.; ZHU, L. **Directing Shallow-Water Waves Using Fixed Varying Bathymetry Designed by Recurrent Neural Networks**. Water, v. 15, n. 13, p. 2414, jan. 2023.

TANGUY, J.-C. et al. **Victims from volcanic eruptions: a revised database**. Bulletin of Volcanology, v. 60, n. 2, p. 137–144, 1 ago. 1998.

TANIOKA, Y.; SATAKE, K. **Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom**. Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT, v. 23, p. 861–864, 15 abr. 1996.

TERRY, J. P. et al. **Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau**. Geoscience Letters, v. 9, n. 1, p. 24, 28 jun. 2022.

THE SCIPY COMMUNITY. **scipy.signal.bessel — SciPy v0.17.1 Reference Guide**. Disponível em: <<https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.17.1/reference/generated/scipy.signal.bessel.html>>. Acesso em: 14 ago. 2023.

THE UWI SEISMIC RESEARCH CENTRE. **Tsunamis 101 | The UWI Seismic Research Centre**. Disponível em: <<https://uwiseismic.com/tsunamis/tsunamis-101/>>. Acesso em: 14 ago. 2023.

THOMPSON, M. T. **Bessel Filter - an overview | ScienceDirect Topics**. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bessel-filter>>. Acesso em: 14 ago. 2023.

THOMSON, D. J. **Spectrum estimation and harmonic analysis**. Proceedings of the IEEE, v. 70, n. 9, p. 1055–1096, set. 1982.

THOMSON, R. E. **Oceanography of the British Columbia Coast**. First Canadian edition ed. Ottawa: Gordon Soules Book Pub, 1981.

THOMSON, R. E.; EMERY, W. J. **Data Analysis Methods in Physical Oceanography**. 2nd Revised edition ed. Amsterdam ; New York: Elsevier Science, 2001.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. **A Practical Guide to Wavelet Analysis**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 79, n. 1, p. 61–78, 1 jan. 1998.

VELOSO, J. A. V. **TSUNAMIS NO BRASIL**. Revista USP, n. 91, p. 40–55, 30 nov. 2011.

VERBEEK, R. D. M. **The Krakatoa Eruption 1**. Nature, v. 30, n. 757, p. 10–15, 1 maio 1884.

VILIBIĆ, I.; RABINOVICH, A. B.; ANDERSON, E. J. **Special issue on the global perspective on meteotsunami science**: editorial. *Natural Hazards*, v. 106, n. 2, p. 1087–1104, 1 mar. 2021.

VOLOVOI, V.; PETERSON, D. **Coupling reliability and logistical considerations for complex system of systems using Stochastic Petri Nets**. . Em: PROCEEDINGS - WINTER SIMULATION CONFERENCE. 1 dez. 2011.

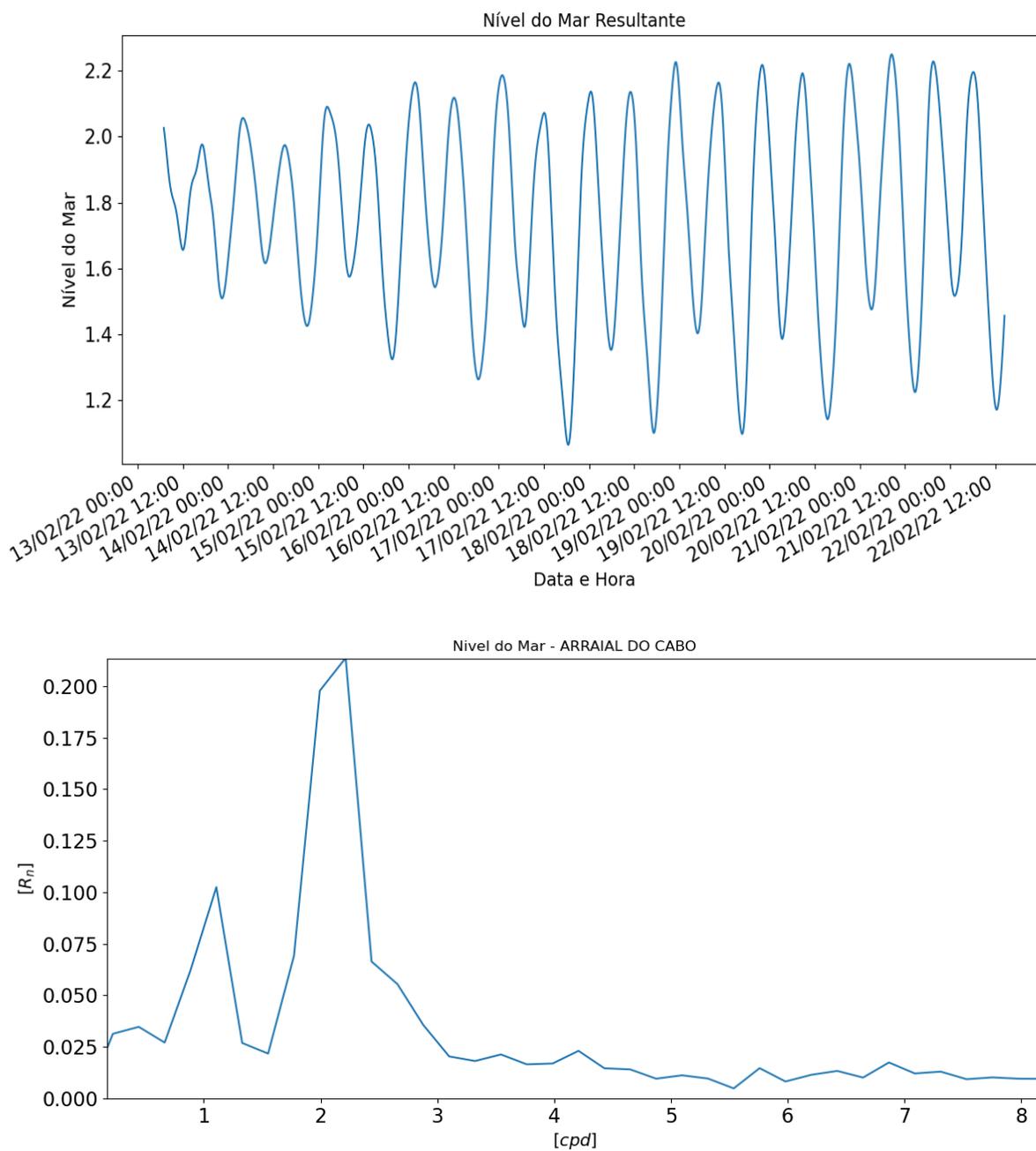
WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Tsunamis**. Disponível em: <<https://www.who.int/health-topics/tsunamis>>. Acesso em: 4 mar. 2023.

WU, Z. et al. **On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 104, n. 38, p. 14889–14894, 18 set. 2007.

WU, Z.; HUANG, N. **Ensemble Empirical Mode Decomposition: a Noise-Assisted Data Analysis Method**. *Advances in Adaptive Data Analysis*, v. 1, p. 1–41, 1 jan. 2009.

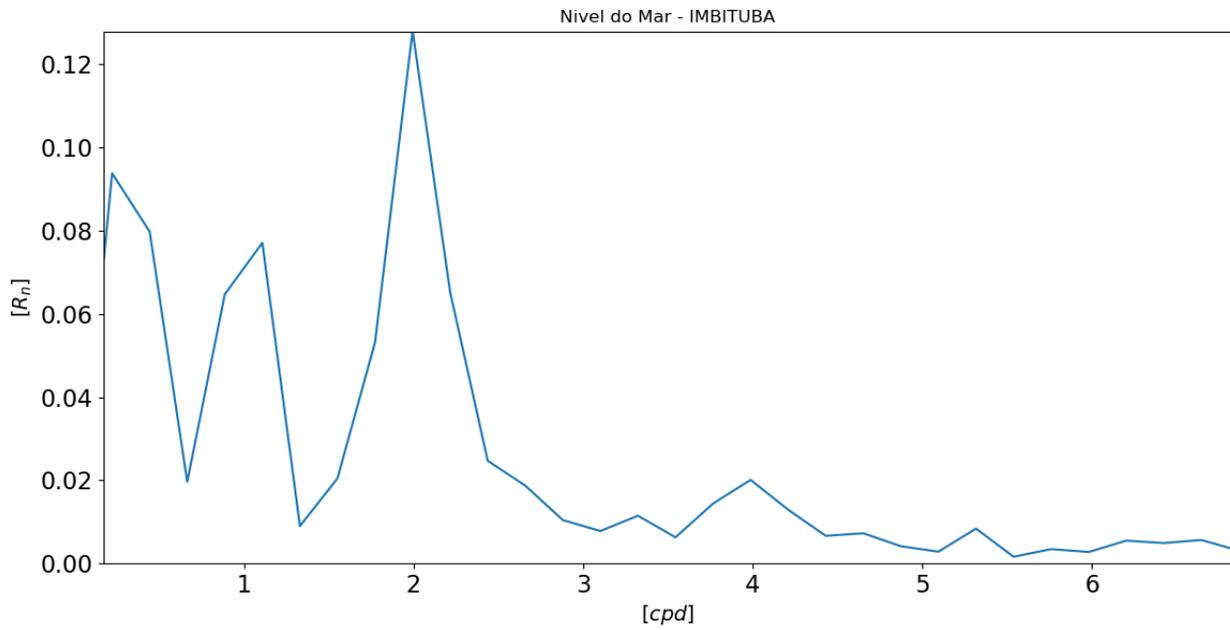
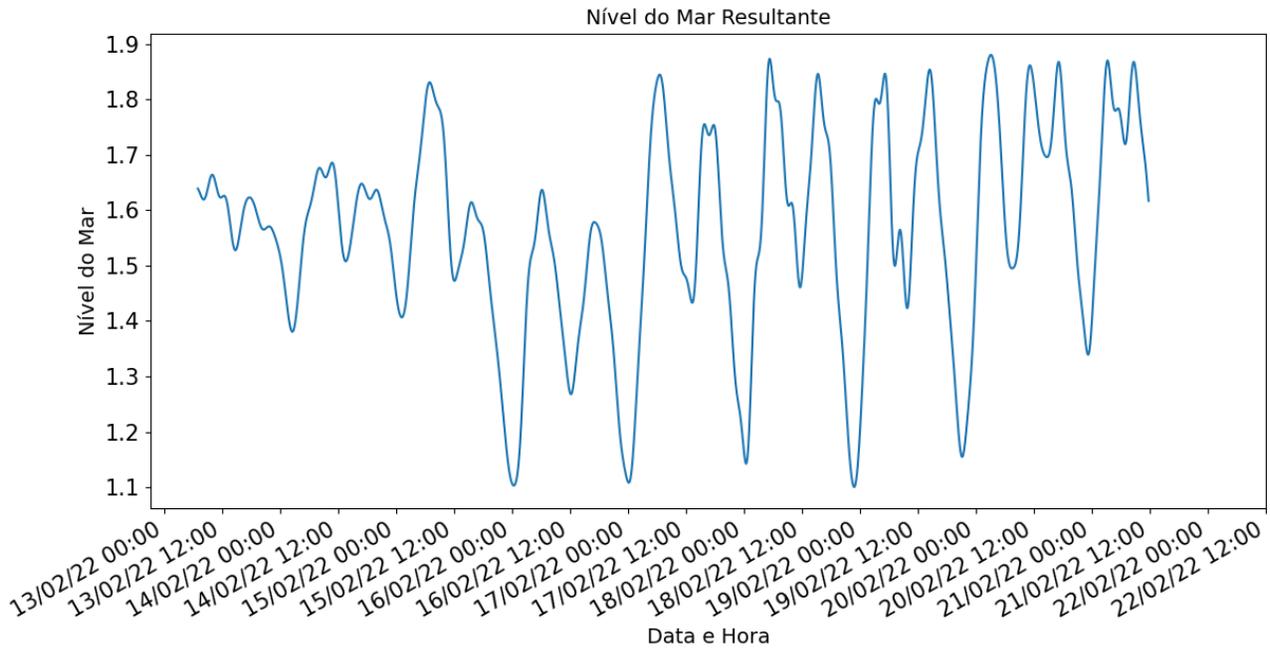
APÊNDICE A – Gráficos referentes ao nível do mar e espectro de frequência de cada região em período sem a influência do tsunami.

Figura 46: Nível do Mar e Espectro de Frequência – Arraiial do Cabo



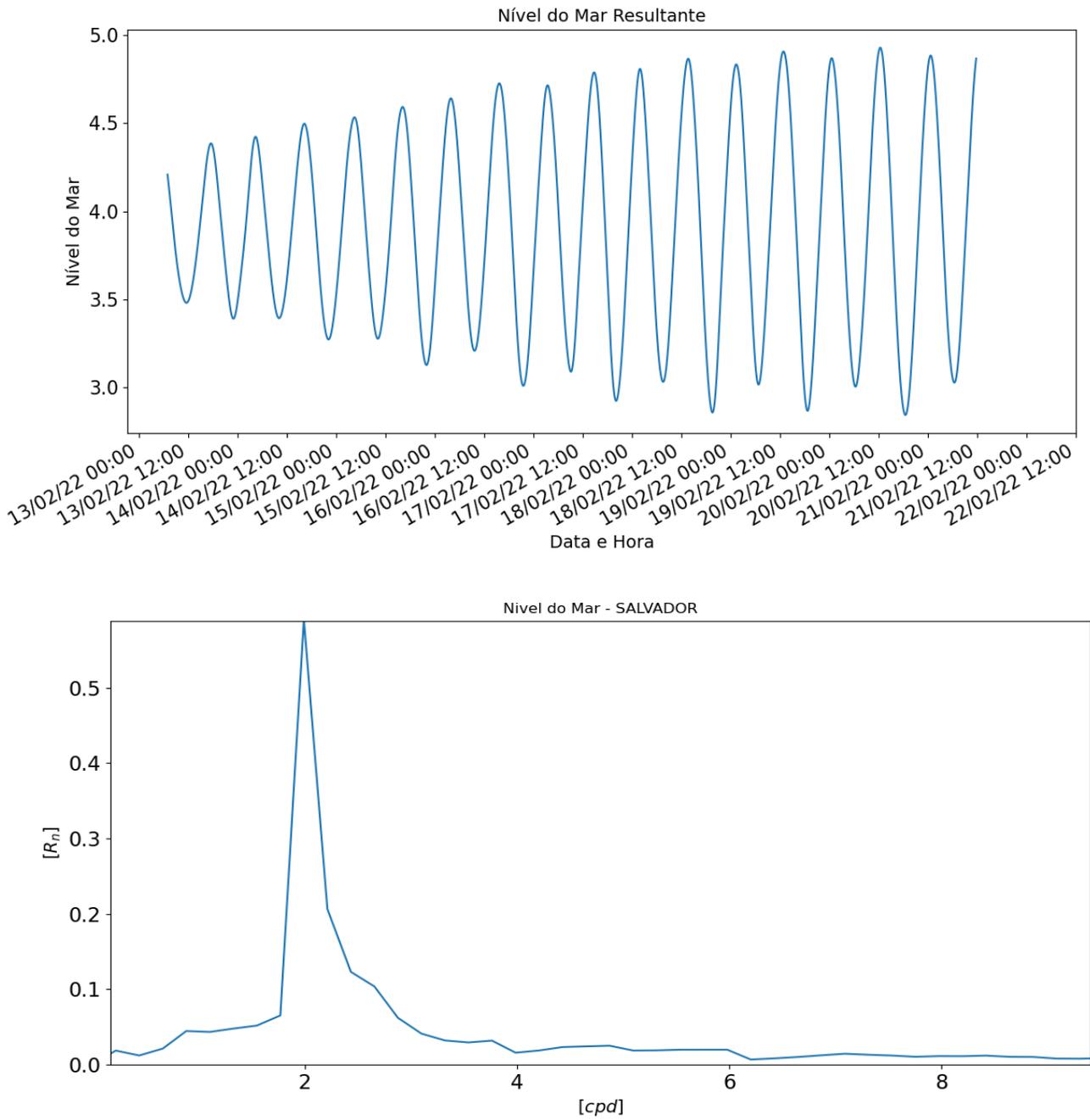
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 47: Nível do Mar e Espectro de Frequência – Imbituba



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 48: Nível do Mar e Espectro de Frequência – Salvador



Fonte: AUTOR (2023).

A análise dos dados de nível do mar e espectros de frequência desempenha um papel crucial na compreensão das condições oceânicas normais em diferentes regiões. Essa compreensão é fundamental para a avaliação precisa do impacto de eventos excepcionais, como tsunamis, que têm o potencial de causar alterações dramáticas no nível do mar e nas frequências das ondas. Ao estabelecer uma base sólida do que é considerado "normal" nas condições oceânicas, torna-se mais viável a detecção e resposta eficiente a eventos que fogem ao padrão e podem ser potencialmente devastadores.

No caso de Arraial do Cabo, observamos uma variação moderada no nível do mar e no espectro de frequência (Figura 46) devido à sua localização na confluência de várias correntes oceânicas importantes. As ondas de maré e as variações de frequência sazonais podem ser evidentes, mas se mostram dentro dos limites considerados normais para esta região.

No gráfico do espectro de frequência para Arraial do Cabo (Figura 46) podemos discernir notáveis picos de energia em 1 ciclo por dia e 2 ciclos por dia, que sugerem a presença marcante de marés diurnas e semidiurnas, respectivamente. A maré diurna, representada pelo pico de energia em 1 ciclo por dia, é um fenômeno que resulta em uma oscilação do nível do mar em um período de 24 horas (PUGH, 1996). O segundo pico, observado em 2 ciclos por dia, é característico das marés semidiurnas, que englobam duas marés altas e duas marés baixas a cada ciclo de aproximadamente 12 horas (PUGH, 1996).

As oscilações sazonais, provavelmente resultantes de mudanças climáticas e de correntes oceânicas, são sutilmente notáveis. Essa constatação apoia a compreensão de que, apesar da influência de correntes oceânicas, a região de Arraial do Cabo mantém um regime de marés e frequências relativamente estável e previsível.

No gráfico de nível do mar de Imbituba (Figura 47), é perceptível a ocorrência de oscilações mais instáveis. Essas oscilações, que se apresentam com uma certa irregularidade, indicam variações mais acentuadas e menos previsíveis no nível do mar. Esta instabilidade pode ser consequência de uma combinação de fatores, incluindo a influência de correntes oceânicas, condições meteorológicas variáveis e possivelmente a presença de fenômenos geofísicos locais (PUGH, 1996).

No caso de Imbituba, a análise do gráfico do espectro de frequências (Figura 47) revela picos proeminentes de energia em 0 ciclos por dia, 0,5 ciclos por dia, 1 ciclo por dia, 2 ciclos por dia e, por fim, 4 ciclos por dia, de forma menos acentuada. Estes picos sugerem uma dinâmica de maré complexa e variada, que pode ser explicada por fatores geográficos, astronômicos e meteorológicos.

O pico de energia observado em 0 ciclos por dia é notável e sugere um nível do mar geralmente estável, sem oscilações significativas em um ciclo diário. Este fenômeno pode ser atribuído à localização geográfica de Imbituba e à presença de características geológicas, como baías e estuários, que podem atenuar as oscilações do nível do mar.

Já o pico de energia em 0,5 ciclos por dia pode estar associado a marés de longo período, também conhecidas como marés deprimais (FRANCO, 1997; PUGH, 1996). Essas marés, que têm um ciclo de aproximadamente 24 horas e 50 minutos, são causadas principalmente pela influência da lua sobre a Terra.

Os picos de energia em 1 ciclo por dia e 2 ciclos por dia são indicativos das marés diurnas e semidiurnas, respectivamente. Como já mencionado anteriormente, as marés diurnas são caracterizadas por uma oscilação do nível do mar em um período de 24 horas, enquanto as marés semidiurnas apresentam duas marés altas e duas marés baixas em um ciclo de cerca de 12 horas.

As marés de quatro ciclos por dia, também conhecidas como marés semi-diurnas mistas, são um fenômeno costeiro complexo que ocorre em algumas regiões do mundo (FRANCO, 1997; PUGH, 1996). Nesse tipo de padrão de maré, ocorrem duas marés altas e duas marés baixas por dia, mas a altura dessas marés varia a cada ciclo (FRANCO, 1997; PUGH, 1996). Isto é, uma maré alta pode ser significativamente mais elevada que a outra, e o mesmo pode ocorrer com as marés baixas. Essa variação é causada pela interação de várias forças gravitacionais, principalmente a atração gravitacional da Lua e do Sol sobre a Terra, e como essas forças interagem com a topografia do fundo do oceano e a rotação da Terra (FRANCO, 1997; PUGH, 1996).

A presença desses picos de energia em frequências tão variadas reflete a complexidade do sistema de marés em Imbituba. É provável que essa complexidade seja o resultado da interação

entre influências astronômicas (gravidade da lua e do sol), características geográficas locais e condições meteorológicas.

Para Salvador (Figura 48), observamos um nível do mar relativamente estável e espectro de frequências menos variáveis. A localização desta cidade, protegida pela baía de Todos os Santos, tende a amortecer as variações mais extremas no nível do mar e nas frequências das ondas.

A análise do gráfico de espectro de frequências evidencia uma situação única: um pico de energia mais notável ocorrendo em 2 ciclos por dia. Essa predominância sugere uma forte presença de marés semidiurnas nessa região, para o período específico.

As marés semidiurnas são caracterizadas por dois períodos de maré alta e dois períodos de maré baixa ocorrendo em um ciclo diário de cerca de 24 horas. Essa observação sugere que a região de Salvador é mais influenciada por forças astronômicas, especificamente a interação gravitacional entre a Terra, a Lua e o Sol, que induz um ritmo semidiurno na oscilação das marés.

A ausência de outros picos significativos no espectro de frequências, como poderíamos esperar para marés diurnas ou marés de longo período, sugere que esses fenômenos podem ter uma influência menor na dinâmica do nível do mar em Salvador.

No entanto, a predominância de marés semidiurnas não implica necessariamente uma estabilidade completa no nível do mar. Fatores ambientais locais, como condições climáticas e características geográficas, também podem introduzir variações e complexidade adicionais ao padrão de marés.