

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO OCEANOGRÁFICO  
PRÓ-REITORIA DE CULTURA E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO: MEDIÇÃO, ANÁLISE, PREVISÃO E MODELAGEM  
DO NÍVEL DO MAR

EVERTON GOMES DOS SANTOS

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR E CARACTERIZAÇÃO  
DE EVENTOS EXTREMOS EM NITERÓI-RJ: 1989 – 2021**

**São Paulo**

**2023**

EVERTON GOMES DOS SANTOS

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR E CARACTERIZAÇÃO  
DE EVENTOS EXTREMOS EM NITERÓI-RJ: 1989 – 2021**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização “Medição, Análise, Previsão e Modelagem do Nível do Mar” do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Camargo

São Paulo

2023

**Universidade de São Paulo / INSTITUTO OCEANOGRÁFICO / ATA DE DEFESA**

Ata de defesa pública de Trabalho de Conclusão de Curso do Senhor Everton Gomes dos Santos no Curso de Especialização “Medição, Análise, Previsão e Modelagem do Nível do Mar”, do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

Aos 01 de março de 2023, no Instituto Oceanográfico, realizou-se a Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso do Senhor Everton Gomes dos Santos, apresentado para a obtenção do título de Especialista, intitulado:

“ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR E CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS EM NITERÓI-RJ: 1989 - 2021”.

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para a exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca / Função / Sigla / Resultado (nota numérica, 1 casa decimal)

Prof. Dr. Ricardo de Camargo / Presidente / IAG-USP / 9,0 (nove e zero)

Prof. Dr. Joseph Harari / Titular / IOUSP / 9,0 (nove e zero)

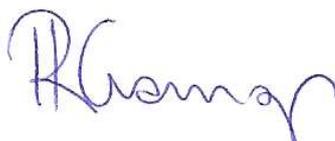
MSc. Salomão Soares / Titular / Fundação IBGE / 9,0 (nove e zero)

**Resultado Final:** 9,0 (nove e zero)

(O resultado final é a média aritmética das notas dos examinadores).

**Parecer da Comissão Julgadora\***

\*Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório. Se a aprovação for unânime, o preenchimento é facultativo.



Assinatura do(a) Presidente da Banca

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me fortalecido e guiado durante a jornada do curso de especialização e por toda a minha vida.

Aos meus pais, Álvaro e Josefina, por sempre acreditarem na educação como agente transformador e ter me direcionado a ela além, do alicerce moral e emocional proporcionados a mim.

À minha esposa Silma por toda dedicação, paciência e apoio incondicional e a minha filha Letícia por iluminar todos os dias a minha vida.

Às minha irmãs, Carla e Fernanda; aos meus irmãos, Flavio e Fábio; aos meus sobrinhos, às minhas cunhadas, aos meus cunhados que fazem de nossa família um lugar de paz.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo de Camargo por toda atenção, cordialidade e amizade prestadas durante o curso.

Ao professor Dr. Joseph Harari por toda dedicação durante o curso de especialização e pela participação na banca deste trabalho.

A Salomão Soares, integrante da banca examinadora, pelas valiosas contribuições.

Ao amigo Rodrigo Tecchio pela amizade, parceria e incentivo durante todo o curso.

A engenheira Maira Lima e ao técnico Daniel de Souza pelo suporte durante a realização do trabalho.

À Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, através da Coordenação de Geodésia, por todo o suporte prestado à realização da pesquisa.

A Universidade de São Paulo – USP pela oportunidade da realização do curso e por toda atenção e profissionalismo no atendimento aos discentes durante todo o período do curso.

À Diretoria de Hidrografia da Marinha – DHN pela colaboração e cessão de dados.

## RESUMO

A Zona Costeira sofre uma enorme pressão socioeconômica e ambiental, uma vez que inúmeros empreendimentos econômicos estão concentrados nessa área e são responsáveis por 30% do Produto Interno Bruto nacional. Tendo consciência dessa realidade, é fundamental fomentar contribuições importantes que podem auxiliar no entendimento da dinâmica da variação do nível médio do mar nos diferentes pontos da costa. O estudo das séries maregráficas, nesse sentido, possibilita o entendimento do comportamento das tendências e da variação do nível do mar de um determinado local. Tais séries são vulneráveis a fenômenos de curta duração e a sazonalidades que afetam a determinação correta de seu comportamento temporal. O objetivo do presente trabalho é analisar aspectos da variação do nível médio do mar e caracterizar a ocorrência de eventos extremos na série maregráfica da estação de Ponta da Armação em Niterói-RJ no período de 1989 a 2021. A estratégia proposta contou com as seguintes etapas: executar a análise e o controle de qualidade de observações maregráficas e formar uma série horária única e completa do nível do mar para todo o período em seguida, aplicar análises de tendências, de Fourier, da Função Densidade e Probabilidade, de excedência e estatísticas básicas; realizar a quantificação dos eventos de maré meteorológica superiores e inferiores a  $\pm 2$  desvios padrão e  $\pm 3$  desvios padrão; gerar as componentes harmônicas para cada ano e para séries de 19 anos (considerando as datas de referência inicial da série com períodos que compreendem os anos de 1989-2007, 1990-2009 ... 2002-2020, 2003-2021 totalizando 15 períodos) e realizar análises de tendências dos valores de Amplitude e Fase das principais componentes de maré (O1, K1, K2, M2, S2, M4, N2 e Q1); gerar as previsões astronômicas anuais. Os resultados mostraram que o nível médio do mar calculado por meio das médias mensais teve como valor relativo  $2,283 \text{ m} \pm 0,073 \text{ m}$  para o período considerado. A tendência estimada da série foi de  $2,726 \text{ mm/ano} \pm 0,027 \text{ mm}$ . Em relação aos eventos extremos excedentes a  $\pm 2$  desvios padrão ficou evidente que o outono é a estação que concentra a maior quantidade de eventos de sobre-elevação do nível do mar (54,62%) seguido do inverno (34,63%) com maior ocorrência entre os anos de 2018 a 2021. O contrário é visto no inverno com 49,09% de rebaixamento seguido da primavera com 34,08%, sendo que os eventos mais acentuados aconteceram entre os anos de 1990 a 1995. Para os eventos excedentes a  $\pm 3$  desvios padrão, verificou-se eventos positivos no outono (66,20%) e eventos negativos no inverno (44,33%). Em ambos os casos, a maré meteorológica medida ultrapassou  $\pm 0,4 \text{ m}$ . A análise das componentes harmônicas mostrou tendência anual positiva para as amplitudes; já em relação à fase, as constantes K2, N2 e Q1 apresentam tendência positiva e as componentes M2 e S2 apresentaram as maiores tendências negativas. Nas séries de 19 anos, a maior tendência positiva para a amplitude é observada na M2 ( $0,090 \text{ cm/ano}$ ) e na S2 ( $0,049 \text{ cm/ano}$ ). Em contraponto às análises anuais, as séries de 19 anos mostram em sua maioria tendências de amplitude mais acentuadas e positivas. Em relação à fase, estas séries também apresentam tendências mais acentuadas que as anuais. Esses resultados fornecem uma compreensão da dinâmica da variação do nível médio do mar na estação de Ponta da Armação em Niterói-RJ, contribuindo para o conhecimento sobre as tendências e eventos extremos nessa área costeira. Tais informações são cruciais para o planejamento e manejo adequado da zona costeira, considerando os desafios impostos pelas mudanças climáticas e a necessidade de uma abordagem voltada ao planejamento urbano.

**Palavras-Chave:** Maré, Nível Médio do Mar, Eventos Extremos, Análise Harmônica.

## ABSTRACT

The Coastal Zone suffers enormous socioeconomic and environmental pressure since numerous economic enterprises are concentrated in this area, responsible for 30% of the national Gross Domestic Product. Being aware of this reality, it is essential to foster significant contributions that can help understand the dynamics of the variation of the mean sea level in different points along the coast. In this sense, the study of tide gauge series enables the understanding of the behavior of trends as well as the variation of the sea level for a given location. Such time series are vulnerable to phenomena of short duration and seasonality that affect the correct determination of their temporal behavior. The present work aims to analyze aspects of the mean sea level variation as well as to characterize the occurrence of extreme events in the tide gauge series of the Ponta da Armação station, in Niterói-RJ for the period 1989 to 2021. The proposed strategy consisted of the following steps: performing analysis and quality control of tidal observations and creating a unique and comprehensive hourly sea level series for the entire period; applying trend analysis, Fourier analysis, Density and Probability Function analysis, exceedance analysis, and basic statistics; quantifying meteorological tide events exceeding  $\pm 2$  standard deviations and  $\pm 3$  standard deviations; generating harmonic components for each year and for 19-year series (considering the initial reference dates of the series encompassing the years 1989-2007, 1990-2009...2002-2020, 2003-2021, totaling 15 periods) and conducting trend analyses of the Amplitude and Phase values of the main tidal components (O1, K1, K2, M2, S2, M4, N2, and Q1); generating annual astronomical predictions. The results showed that the mean sea level calculated by the monthly averages had a relative value of  $2.283 \text{ m} \pm 0.073 \text{ m}$  for the considered period. The estimated trend of the series was  $2.726 \text{ mm/year} \pm 0.027 \text{ mm}$ . Regarding the extreme events exceeding  $\pm 2$  standard deviations, it became evident that autumn is the season with the highest concentration of sea level elevation events (54.62%), followed by winter (34.63%), with the highest occurrence between the years 2018 and 2021. The opposite is observed in winter with a 49.09% decrease, followed by spring with 34.08%, and the most pronounced events occurred between 1990 and 1995.. For events exceeding  $\pm 3$  standard deviations, there were positive events in the fall (66.20%) and negative events in the winter (44.33%). In both cases, the measured storm surge exceeded  $\pm 0.4 \text{ m}$ . The analysis of the harmonic components showed a positive annual trend for the amplitude; concerning the phase, the constituents K2, S2, and Q1 presented a positive trend. The components M2 and S2 showed the most significant negative trends. In the 19-year series, the most oversized positive trend for the amplitude is observed in M2 ( $0.090 \text{ cm/year}$ ), and S2 ( $0.049 \text{ cm/year}$ ). In contrast to the annual analysis, the 19-year series show mostly more pronounced and positive amplitude trends. About the phase, they also show more pronounced trends than the annual series. These results provide an understanding of the dynamics of sea level variation at Ponta da Armação station in Niterói-RJ, contributing to the knowledge of trends and extreme events in this coastal area. Such information is crucial for the planning and proper management of the coastal zone, considering the challenges posed by climate change and the need for an urban planning-oriented approach.

**Keywords:** Tide, Mean Sea Level, Extreme Events, Harmonic Analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1:	Esquemático da preamar, baixamar, range e amplitude de maré.....	13
Figura 2.2:	Sensor tipo radar (a) e tipo boia e contrapeso (b) .....	17
Figura 2.3:	Tipos de maré em função dos períodos dominantes de oscilação.....	20
Figura 2.4:	Exemplo de periodograma.....	23
Figura 3.1:	Posição geográfica da estação maregráfica da Ponta da Armação em Niterói -RJ.....	24
Figura 3.2:	Composição da série para correção de saltos. Série 1988 a 2009 na posição do sensor boia e contrapeso e plataforma 256 (azul); série 2008 a 2013 na posição do sensor radar e plataforma 400 (laranja); série 2009 a 2022 na posição do sensor radar e plataforma 415 (verde); série 2017 a 2018 na posição do sensor boia e contrapeso e plataforma 257 e série 2011 a 2021 com ajustes de correção aplicados (amarelo) .....	29
Figura 4.1:	Resíduos homogêneos da série temporal na referência do ano 2009.....	32
Figura 4.2:	Níveis médios mensais e linha de tendência.....	32
Figura 4.3:	Série de altura do nível do mar e do nível médio do mar.....	34
Figura 4.4:	Histograma e função densidade probabilidade da altura do nível do mar e do nível médio do mar.....	35
Figura 4.5:	Período de retorno e probabilidade de excedência e não excedência do nível médio do mar.....	36
Figura 4.6:	Análise de Fourier para a série de nível médio do mar.....	37
Figura 4.7:	Excedência além de $\pm 2$ desvios padrão (linha vermelha) e de $\pm 3$ desvios padrão (linha azul).....	39
Figura 4.8:	Histograma da excedência além de $\pm 2$ desvios padrão (linha vermelha) e $\pm 3$ desvios padrão (linha azul).....	40
Figura 4.9:	Médias mensais e desvio padrão da série.....	41
Figura 4.10:	Nível médio do mar sazonal para o período da primavera (setembro, outubro e novembro).....	42
Figura 4.11:	Nível médio do mar sazonal para o período do verão (dezembro, janeiro e fevereiro).....	42
Figura 4.12:	Nível médio do mar sazonal para o período do outono (março abril e maio).....	43
Figura 4.13:	Nível médio do mar sazonal para o período do inverno (junho, julho e agosto)	43

Figura 4.14: Tendência da amplitude e da fase considerando as séries anuais de variação do nível do mar..... 45

Figura 4.15: Tendência da amplitude e da fase considerando as séries de 19 anos de variação do nível do mar..... 50

## LISTA DE TABELAS

Tabela. 2.1:	Principais componentes astronômicas de maré, com seus símbolos, frequências angulares, períodos e amplitudes de equilíbrio (referentes à M2, de amplitude genérica = 100).....	19
Tabela. 4.1:	Testes do cálculo das tendências conforme o período considerado.....	33
Tabela. 4.2:	Quantificação dos eventos excedentes de $\pm 2DP$ e $\pm 3 DP$ .....	39
Tabela. 4.3:	Principais componentes astronômicas de maré, com seus símbolos, frequências angulares, amplitudes e fase.....	45
Tabela. 4.4:	Tendência da série anual para amplitude e fase das principais componentes harmônicas.....	48
Tabela. 4.5:	Tendência da série de 19 anos para amplitude e fase.....	52

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1:	Descrições dos sensores, plataformas, tipo, resolução temporal e períodos das séries.....	27
-------------	---	----

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1	Contextualização .....	10
1.2	Objetivo.....	11
1.3	Justificativa.....	12
2	<b>ASPECTOS CONCEITUAIS SOBRE MARÉS E O NÍVEL MÉDIO DO MAR</b> .....	13
2.1	Conceitos fundamentais sobre marés .....	13
2.2	Observação do nível do mar .....	15
2.3	Análise Harmônica das marés .....	18
2.4	Efeitos não astronômicos do nível do mar .....	20
2.5	Análise espectral de séries discretas.....	22
3	<b>ESTRATÉGIAS PARA DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR E CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS</b> ....	24
3.1	Estação Maregráfica da Ponta da Armação .....	24
3.2	Fonte de dados e ferramentas computacionais empregadas .....	25
3.3	Etapas da metodologia .....	26
3.4	Tratamento e análise preliminar das observações.....	26
3.5	Preparação para o estudo de maré e quantificação de eventos extremos.....	29
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	31
4.1	Estimação da tendência e do nível médio do mar local.....	31
4.2	Análise e quantificação dos eventos extremos .....	38
4.3	Análise harmônica da série temporal.....	44
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	53
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	55

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A preocupação acerca do monitoramento, gestão e conservação da linha de costa e da Zona Costeira tem se intensificado nos últimos anos no Brasil. Nessa perspectiva, o Governo Federal lançou o Programa Nacional de Conservação da Linha de Costa – Procosta – criado pela Portaria Nº 76, de 26 de março de 2018 (BRASIL, 2018). Este programa tem como objetivo promover o planejamento a longo prazo de ações que aperfeiçoem o gerenciamento costeiro no Brasil, isto é, fomentar ações que garantam o gerenciamento estratégico para o enfrentamento dos efeitos da mudança do clima considerando análises de riscos, vulnerabilidades e impactos associados a cenários atuais e futuros (MMA, 2018).

A Zona Costeira abriga 4 regiões dos país, 17 estados costeiros e 274 municípios. É habitada por cerca de 26,6% da população brasileira (IBGE, 2011, p. 117). Em consequência disso, essa região sofre uma enorme pressão socioeconômica e ambiental uma vez que inúmeros empreendimentos econômicos estão concentrados nessa área responsáveis por 30% do Produto Interno Bruto nacional (MMA,2018).

A elevação do nível do mar e seus efeitos na costa consistem em importantes indicadores relacionados às mudanças climáticas no médio e longo prazo (Sea Level Research Group, 2021). Vale pontuar que estudos recentes têm indicado uma crescente taxa de elevação do nível médio do mar, a qual se encontra em torno de  $3,3 \pm 0,4$  mm/ano, considerando a série temporal proveniente de satélites altimétricos desde 1993 (NEREM et al., 2018; Univ.Colorado, 2021).

No curto prazo, uma mera coincidência de fatores, como maré meteorológica, maré astronômica de sizígia e uma forte ressaca (associada às ondas de gravidade superficiais), quando combinados, podem gerar transtornos imediatos, como inundação costeira, destruição de orlas, erosão costeira entre outros eventos (IBGE, 2021). Por outro lado, estiagens severas no Rio Amazonas também promovem prejuízos, como, por exemplo, a redução na capacidade de carga e o desabastecimento regional. Um exemplo desse tipo de fenômeno de inundação extremo de curto período foi observado pela Estação Meteomaregráfica de Imbituba (SC) operada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A ocorrência de um ciclone extratropical elevou o nível do mar entre os

dias 28 e 29 de outubro de 2016 a níveis totalmente incomuns (IBGE, 2021). Ao considerar os referidos aspectos, é fundamental que o país disponha de informações consistentes que auxiliem no planejamento e na preparação para os possíveis panoramas climáticos futuros, principalmente pelo fato de os desastres naturais terem se intensificado nas últimas décadas, afetando a realidade das populações costeiras e ribeirinhas no Brasil.

O estudo das séries maregráficas, nesse sentido, possibilita o entendimento do comportamento das tendências e da variação do nível do mar de um determinado local. Tais séries são vulneráveis a fenômenos de curta duração e a sazonalidades que afetam a determinação correta de seu comportamento temporal. Agentes como a maré meteorológica, que possui períodos da ordem de poucas dezenas de horas têm fundamental influência nas diferenças entre a maré astronômica prevista e a maré observada. Adicionalmente, fatores como a fricção do vento na superfície do mar, variações espaciais de pressão atmosférica, variações espaciais da densidade da água do mar e descargas fluviais provocam acelerações e correntes que afetam a distribuição do nível do mar, nas mais variadas escalas espaço-temporais (HARARI; MESQUITA; CAMARGO, 2021).

A efetividade das ações de adaptação aos eventos naturais extremos deve contemplar um planejamento que considere o longo prazo. Posto isso, é fundamental entender as características de cada local para poder dimensionar os impactos causados por tais eventos de maneira mais assertiva possível. Diante das considerações apresentadas, esse trabalho visa analisar o comportamento de uma série temporal de altura do nível do mar e caracterizar os possíveis eventos extremos com foco nas variações sazonais e sua evolução.

## 1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é analisar aspectos da variação do nível médio do mar e caracterizar a ocorrência de eventos extremos na série maregráfica da estação de Ponta da Armação em Niterói-RJ no período de 1989 a 2021. Especificamente, pretende-se:

- a) estimar os valores de nível médio do mar local e sua tendência, através da organização e cálculo da série temporal, utilizando pacote de *softwares* específico;
- b) quantificar e analisar a ocorrência de eventos positivos e negativos de maré meteorológica, com foco nas variações sazonais;

- c) estudar as componentes O1, K1, K2, M2, S2, M4, N2 e Q1 por meio de análise harmônica e, assim, estimar sua evolução.

### 1.3 Justificativa

O estado atual das mudanças climáticas exige ações transformadoras que os governos devem fomentar a fim de evitar um futuro calamitoso. Em especial, o aumento da temperatura global associada a outros fatores contribuem para alteração da dinâmica costeira de forma direta, notadamente em face das previsões de aumento do nível do mar para o cenário até 2100 (cerca de 0,6 a 1,1m) de acordo com o relatório AR6\_WGIII do IPCC (2022). Associado a essa questão, existem outros fatores meteorológicos que combinados com o citado aumento podem favorecer, de forma significativa, a geração de danos tanto na fauna e na flora quanto na economia de locais vulneráveis a esses efeitos.

O Procosta fomenta quatro projetos lógicos e independentes que visam discutir e elaborar ferramentas para o correto planejamento e intervenções na Zona Costeira, são eles: (i) Alt-Bat; (ii) Projeção de linhas de costa futuras e identificação de perigos; (iii) Riscos costeiros e estratégias de adaptação e (iv) Monitoramento e gestão para a conservação da linha de costa. Todas essas iniciativas estão cada vez mais amparadas por estudos específicos para cada local do litoral brasileiro (MMA, 2018). Em virtude disso, entender o comportamento do nível do mar e sua interação com agentes meteorológicos é um subsídio fundamental. No entanto, apenas poucos estudos nessa diretriz são desenvolvidos com direcionamento à da costa brasileira e, especificamente, para o entorno da Baía de Guanabara, Estado do Rio de Janeiro. Nessa perspectiva, cabe destaque para os estudos de Tecchio (2022) com importantes contribuições sobre a vertente meteorológica associada ao nível do mar para a Baía de Guanabara, além de Santana (2022) que aborda uma metodologia voltada ao cálculo da incerteza do Nível de Redução na região tendo como base o período e a época de observação do nível do mar.

Tendo consciência dessa realidade, este trabalho se justifica por trazer contribuições importantes que podem auxiliar no entendimento da dinâmica da variação do nível médio do mar da região de Niterói (RJ), com perspectiva de servir como subsídio às discussões acerca de eventos extremos que ocorreram na região e que exerceram influência nas condições oceanográficas ao longo do tempo.

## 2 ASPECTOS CONCEITUAIS SOBRE MARÉS E O NÍVEL MÉDIO DO MAR

Nesta seção é vista uma sintética revisão de conceitos fundamentais sobre a dinâmica das marés e os níveis de referência, bem como os aspectos básicos sobre as técnicas de observações do nível do mar e dos efeitos não astronômicos atuantes no nível do mar. Adicionalmente, são discutidos os fundamentos básicos do desenvolvimento harmônico das marés e, finalmente, é abordada, brevemente, a análise espectral de séries discretas do nível do mar.

### 2.1 Conceitos fundamentais sobre marés

O fenômeno das marés é definido como movimentos periódicos que acontecem no oceano, na atmosfera e na terra sólida devido à rotação da Terra e seu movimento de translação em torno do Sol, bem como a existência da Lua (GREGORY et al., 2019). Nos oceanos, as marés fazem com que a superfície da água suba e desça; as elevações máximas e mínimas atingidas nesse processo são chamadas de preamar e baixa-mar, respectivamente. Ocorrem normalmente duas vezes ao dia, isto é, duas preamares e duas baixa-mares. Chama-se de range de maré a diferença em elevação entre a preamar e a baixa-mar. A metade do range de maré consiste na amplitude de maré (HARARI, MESQUITA e CAMARGO, 2021). A figura 2.1 esquematiza as elevações ocorridas em decorrência dos movimentos da maré.

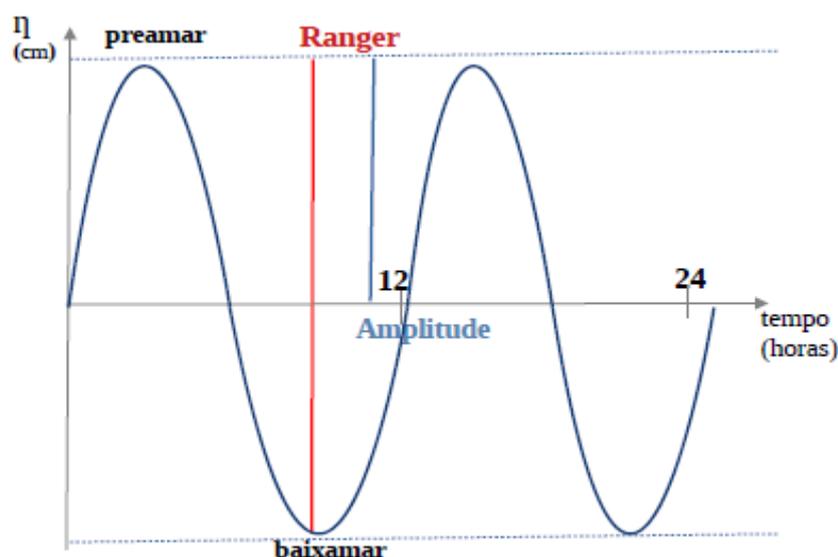


Figura 2.1: Esquemático da preamar, baixamar, range e amplitude de maré.

Fonte: Adaptado de HARARI, MESQUITA e CAMARGO (2021)

Pode-se afirmar que o estudo das marés se torna cada vez mais relevante. Além dos interesses científicos e da navegação marítima, outros campos do conhecimento e da engenharia têm se beneficiado, o que torna a necessidade de se ter dados e modelos cada vez mais precisos. Simon (2013) lista as seguintes aplicações diretas: desenvolvimento portuário; controle de inundações; uso de energia das marés; operações militares de anfíbios; engenharia de petróleo *offshore*; Geodésia; altimetria por satélite; e pesquisas sobre mudanças climáticas.

Existem duas teorias fundamentais que visam explicar o fenômeno das marés: a teoria do equilíbrio e a teoria dinâmica. A teoria do equilíbrio de maré é um desenvolvimento teórico para representar o efeito das marés. Considera que os movimentos orbitais da Terra e dos astros Lua e Sol criam uma força centrípeta que é equilibrada pela força de gravitação universal. O equilíbrio destas duas forças dá origem à força geradora de maré, que constitui a causa principal das mesmas (DRANGE, 2022). A razão dos astros se encontrarem em movimento constante implica nas alterações do nível do mar em dois quadrantes com elevações (bulbos) diametralmente opostos em relação ao centro da Terra e dois quadrantes com depressões (SIMON, 2013; HARARI, MESQUITA E CAMARGO, 2021). Vale pontuar que a teoria do equilíbrio não leva em consideração a existência dos continentes, a topografia do fundo dos oceanos, a progressão das ondas de maré, a aceleração de Coriolis, e os modos naturais de oscilação das bacias. Em decorrência disso, ela não explica as amplitudes e fases de marés observadas que são diferentes das marés calculadas (HARARI, MESQUITA E CAMARGO, 2021).

Por outro lado, a teoria dinâmica considera que as forças atrativas de maré, a inércia e outros fatores podem influenciar o movimento dos fluidos na Terra. Em outras palavras, essa teoria abrange a resposta hidrodinâmica dos oceanos reais às forças de maré, levando em conta a propagação das ondas de maré e a influência da aceleração de Coriolis (PUGH; WOODWORTH, 2014). Nesse caso, são considerados os limites dos oceanos, incluindo a presença dos continentes e a topografia do leito oceânico (HARARI; MESQUITA; CAMARGO, 2021). A teoria dinâmica oferece uma abordagem mais abrangente e precisa na compreensão do comportamento das marés, ao levar em consideração uma variedade de fatores que influenciam seu padrão e suas características observadas.

A observação das marés por certo período fornece subsídios para determinação de níveis de referência da maré bastante úteis para os mais variados trabalhos na área marítima,

os quais variam em função do local. Nesse sentido, dois conceitos fundamentais relacionados à altura das marés devem ser colocados:

- a) Maré de sizígia – período em que o range de maré é máximo. É ocasionada quando as forças de atração do Sol e da Lua se somam (ocorrem na Lua Nova e na Lua Cheia). Produz preamar muito alta e baixa-mar muito baixa.
- b) Maré de quadratura – período em que o range de maré é mínimo. Nesse caso, as forças de atração do Sol e da Lua se opõem (formam um ângulo de  $90^\circ$ ), ocorrem na Lua Crescente e na Lua Minguante. Produz preamar mais baixa e baixa-mar mais alta.

De acordo com Franco (2009) e Harari, Mesquita e Camargo (2021), podem-se citar os seguintes níveis de referência de maré para um determinado local:

1) Nível médio do mar: corresponde à média das alturas de maré observadas em um longo período em todos os estágios de oscilação da maré.

2) Níveis médios de preamares e baixa-mares: são os valores médios das elevações observadas, respectivamente, nas preamares e baixa-mares.

3) Níveis médios das preamares e baixa-mares de sizígia: correspondem aos valores médios das preamares e baixa-mares observadas nos períodos de sizígia.

4) Níveis médios das preamares e baixa-mares de quadratura: correspondem aos valores médios das preamares e baixa-mares observadas nos períodos de quadratura.

5) Nível de redução de sondagens: é um nível suficientemente abaixo do nível médio do mar, isto é, um nível que o mar não ultrapassa em condições normais. Ele é fundamental para informação aos navegantes sobre as condições mínimas de segurança de uma região costeira, e normalmente consta em todas as cartas náuticas.

## **2.2 Observação do nível do mar**

A medição da altura da superfície da água é realizada por equipamentos chamados marégrafos. Atualmente, com o avanço das técnicas e necessidades operacionais, tem-se utilizado um termo mais abrangente para esses equipamentos: estações maregráficas. Além dos sensores maregráficos que medem e transmitem, em tempo real ou quase real, a altura da superfície da água, as estações maregráficas também possuem sensores que coletam dados meteorológicos. Adicionalmente, estão conectados a equipamentos geodésicos como o

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e vinculados a Referências de Nível (RRNN) por meio do nivelamento geométrico e gravimetria absoluta (IBGE, 2021).

Os sensores maregráficos são classificados ou denominados de acordo com seu princípio básico de funcionamento. Todos têm vantagens e desvantagens, conforme a aplicação. Uma discussão sobre isso pode ser encontrada em IOC (2006).

Basicamente os mais comuns são do tipo: pressão, boia e contrapeso (ou flutuador), ondas sonoras e radar (PUGH & WOODWORTH, 2014; IBGE, 2021). Para esse trabalho será dada ênfase aos tipos (i) radar e (ii) boia e contrapeso, uma vez que os dados utilizados na pesquisa são provenientes desses tipos de sensores.

O sensor do tipo boia e contrapeso (ou flutuador) consiste em um conjunto de contrapeso conectado a um flutuador através de um cabo que transmite seu movimento vertical a uma roldana. Por meio de um codificador de eixo angular (*shaft encoder*), dispositivo eletromecânico cuja funcionalidade é transformar posição em sinal elétrico digital, é registrado o nível da água (IBGE, 2021). Esse tipo de equipamento funciona dentro de um poço de tranquilização. Este por sua vez faz a atenuação de movimentos bruscos causados pelas ondas de pequeno período além de proteger o flutuador de objetos ou elementos externos que causem perturbação do funcionamento (LUZ, 2008) além de fazer a filtragem das oscilações de alta frequência do nível d'água (IBGE, 2010). Cabe destacar que esse tipo de sensor pode ser classificado como digital, como o codificador de eixo (*shaft encoder*), ou analógico, sendo capaz de registrar as variações do nível do mar. No caso do sensor analógico, ele utiliza uma pena acoplada a um papel milimetrado chamado maregrama para esse registro.

O sensor do tipo radar é instalado em uma base fora da água. Seu princípio de funcionamento baseia-se no cálculo da distância entre a referência interna e a lâmina d'água, assim é emitido um pulso eletromagnético que, em seguida, é refletido após atingir a superfície da água. Por meio do intervalo de tempo entre a emissão e a reflexão do pulso é determinada a distância ou altura no nível d'água (IOC, 2006). Esse tipo de equipamento tem sido muito utilizado ultimamente devido à fácil instalação e manutenção. Também tem a vantagem de realizar a coleta em uma resolução temporal de 1 minuto, o que é fundamental para estações que trabalham com alerta de tsunamis e perigos costeiros (e.g. UNESCO; FLANDERS MARINE INSTITUTE, 2021). Na Figura 2.2 são mostrados os sensores

utilizados na Rede Maregráfica Permanente para Geodésia, sob gestão do IBGE, e comumente encontrados em outras estações na costa brasileira. Em a) o sensor tipo radar e em b) o sensor tipo boia e contrapeso eletrônico.



Figura 2.2: Sensor tipo radar (a) e tipo boia e contrapeso (b).

Fonte: IBGE (2021)

Outras técnicas de observação do nível do mar estão sendo estudadas e aprimoradas utilizando a Refletometria com Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS-R). Maiores detalhes podem ser encontrados em Fagundes (2020). Vale ressaltar também os satélites altimétricos que conseguem fazer observações do nível do mar em escala global cujas séries de dados são muito valiosas e permitem, assim, a realização de importantes estudos (AVISO, 2022).

Outro elemento importante de uma estação maregráfica é a régua de maré. Ela permite a observação do nível d'água instantaneamente e independente. É fundamental para aferição das observações coletadas pelos sensores maregráficos (IBGE, 2010). Ela também materializa o “zero” ou referência local; assim, para que a qualquer tempo tal referência seja recuperada, monitorada ou vinculada ao Nível de Redução (NR), no entorno das estações maregráficas são instaladas Referências de Nível que, por meio da técnica do nivelamento

geométrico, permitem fazer a vinculação de cada componente de um sistema maregráfico (SANTOS, 2021). Outros elementos necessários ao controle de qualidade das observações maregráficas são: uma estação GNSS solidária à estação maregráfica e um levantamento por gravimetria absoluta. Essas técnicas auxiliam na determinação dos movimentos verticais de origem não oceânicas que podem ocorrer no entorno dos locais que abrigam as estações maregráficas (IBGE, 2021). Adicionalmente, é fundamental o levantamento temporal por técnica de nivelamento geométrico (IBGE, 2010).

Informações adicionais sobre medição do nível do mar com utilização de variadas técnicas podem ser encontradas em: IOC (2006); Giehl (2020); IBGE (2021); Harari, Mesquita e Camargo (2021); e AVISO (2022).

### **2.3 Análise Harmônica das marés**

A Análise Harmônica de maré tem como finalidade principal possibilitar a determinação da altura do nível do mar para um determinado local em um determinado período de tempo, tanto passado quanto futuro.

O fenômeno da força geradora de maré de origem astronômica segue o preconizado pela Teoria do Equilíbrio, isto é, a diferença entre a força centrífuga e a força gravitacional exercida por cada astro (Sol e Lua). Assim, a força de origem é o elemento fundamental na determinação das frequências das componentes de maré. A cada componente ou constituinte de maré estão associadas às chamadas constantes harmônicas, isto é, uma amplitude  $H_j$  e uma fase  $G_j$  (diferença de fase da componente real em relação a componente teórica) para um dado local. Vale enfatizar que essas constantes sofrem alterações em função da morfologia dos fundos de águas costeiras, da linha de costa, da força de Coriolis entre outros aspectos físicos; essa condição influencia significativamente para a alteração e o atraso da progressão da onda de maré de equilíbrio (ANTUNES; GODINHO, 2011). Posto isto, as constantes são determinadas por meio da análise de Fourier (Franco, 2009). Em Godin (1972) encontra-se a formulação para determinação da previsão da elevação de um ponto do oceano em um determinado instante de tempo, o que na prática significa a previsão de maré.

Nesse sentido, o potencial pode ser resolvido matematicamente num número finito de componentes periódicas. De acordo com Doodson (1921), apud Harari, Mesquita e Camargo (2021), tem-se cerca de 390 componentes de maré dentre as quais 100 são de longo

período, 160 são diurnas, 115 são semidiurnas e 14 são ter-diurnas. A Tabela 2.1 apresenta as principais componentes astronômicas de maré e suas características.

Tabela 2.1: Principais componentes astronômicas de maré, com seus símbolos, frequências angulares, períodos e amplitudes de equilíbrio (referentes à M2, de amplitude genérica 100).

Componentes	Símbolo	Frequência angular (°/hora)	Período (d ou h)	Amplitude de Equilíbrio
Solar anual	Sa	0,04110	364,96 d	1,27
Solar semi anual	Ssa	0,08210	182,70 d	8,02
Lunar mensal	Mm	0,54446	27,55 d	9,09
Lunar quinzenal	Mf	1,09810	13,66 d	17,23
Maior elíptica lunar diurna	Q <sub>1</sub>	13,39866	26,87 h	7,90
Principal lunar diurna	O <sub>1</sub>	13,94304	25,82 h	41,50
Principal solar diurna	P <sub>1</sub>	14,95893	24,07 h	19,40
Luni-solar diurna	K <sub>1</sub>	15,04107	23,93 h	58,04
Maior elíptica lunar semi-diurna	N <sub>2</sub>	28,43973	12,66 h	19,20
Principal lunar	M <sub>2</sub>	28,98410	12,42 h	100,0
Principal solar	S <sub>2</sub>	30,00000	12,00 h	46,60
Luni-solarsemi-diurna	K <sub>2</sub>	30,08214	11,97 h	12,70
Lunar ter-diurna	M <sub>3</sub>	43,47616	8,28 h	1,310

Fonte: HARARI, MESQUITA e CAMARGO (2021)

De posse dos valores de amplitude é possível realizar a classificação do tipo de maré de um determinado local. Para tanto, são utilizadas especificamente as amplitudes das constantes K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> e S<sub>2</sub> para o cálculo do Número de Forma da maré (FRANCO, 2009). Sendo assim, em função desse número tem-se a seguinte classificação do tipo de maré: semidiurna, mista de desigualdades diurnas, mista com predominância diurna e diurna.

Camargo e Harari (2017) explicam que as marés do tipo semidiurna têm como componentes predominantes M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>, caracterizando-se pela ocorrência de duas preamares e duas baixa-mares aproximadamente iguais em um mesmo dia. As marés do tipo mista caracterizam-se por apresentarem duas preamares e duas baixa-mares com importante variação entre as alturas sucessivas. Esse fenômeno está diretamente relacionado com a declinação entre a Lua e o plano do Equador. Quando a declinação é pequena tem-se maré, principalmente, semidiurna. No entanto, quando a declinação é grande as componentes diurnas são suficientemente fortes para produzir uma preamar e uma baixa-mar por dia de modo, que a combinação resulta numa desigualdade diurna predominante. As marés do tipo diurna constituem um padrão no qual ocorrem apenas uma preamar e uma baixa-mar, a cada dia lunar. São produzidas principalmente pelas componentes M<sub>1</sub>, O<sub>1</sub> e P<sub>1</sub>.

A Figura 2.3 apresenta a classificação dos tipos de maré em escala global em função dos períodos dominantes de oscilação. No presente caso cabe destaque para a costa brasileira

que tem na porção norte /nordeste marés do tipo semidiurnas e na porção sudeste/sul marés semidiurnas mistas (com desigualdades diurnas, neste caso).

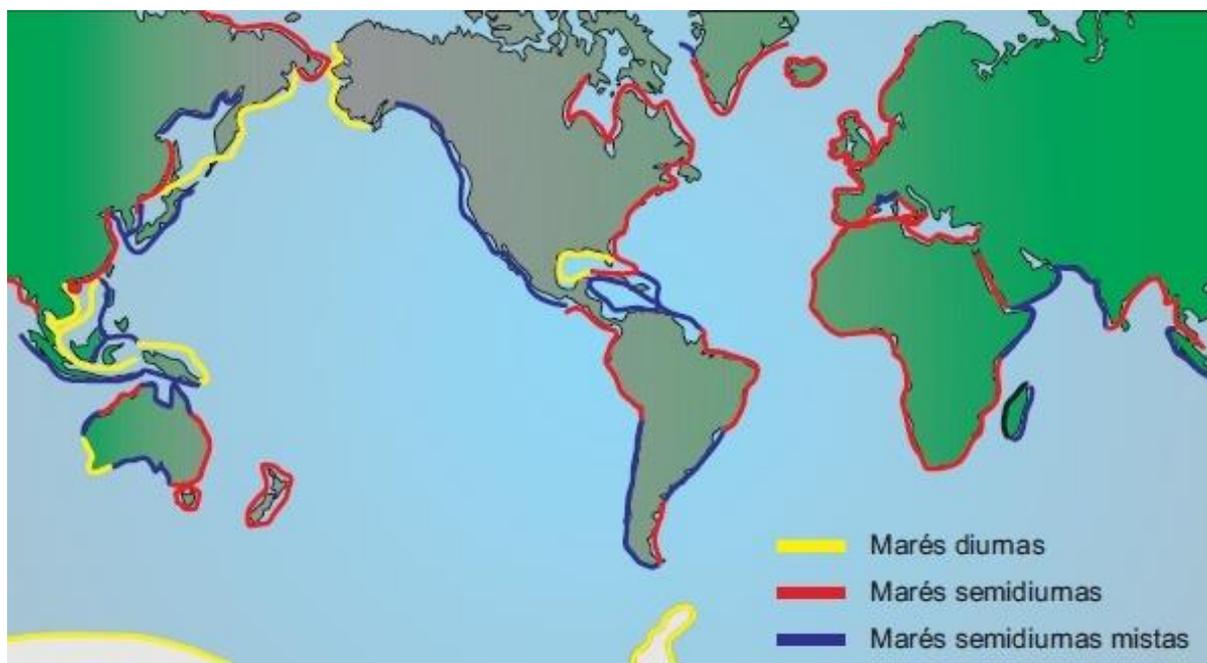


Figura 2.3: Tipos de maré em função dos períodos dominantes de oscilação

Fonte: CAMARGO e HARARI (2017)

A previsão de maré astronômica é um recurso bastante utilizado para realizar comparações acerca do nível do mar, pois permite estimar os instantes de ocorrência de preamares e baixa-mares além dos níveis d'água em qualquer instante de tempo.

Posto que a previsão de maré é específica para um local tem-se, portanto, a vantagem de poder realizar estudos comparativos com maior precisão. Nesse sentido, é fundamental pontuar que os registros no nível do mar têm componentes de maré com amplitudes e fases diferentes dos valores teóricos provenientes dos calculados pelo potencial gerador de marés (PICKERING et al., 2012). Esse fato traz a vantagem de extrair as amplitudes e fases reais das componentes de marés e assim poder quantificar e entender como os desvios sistemáticos dos valores de nível do mar observado são afetados pela influência meteorológica de campos de pressão atmosférica e de vento sobre a superfície do oceano, principalmente, sobre a plataforma continental e regiões costeiras (CAMARGO e HARARI, 2017).

## 2.4 Efeitos não astronômicos do nível do mar

A maré meteorológica consiste em oscilações do nível do mar de natureza não astronômica. Em outras palavras, é a diferença entre a maré observada e a maré astronômica,

e é responsável pelo aumento ou diminuição do nível do mar em relação às previsões astronômicas da maré para uma determinada região (MELO FILHO, 2017; MARONE; CAMARGO, 1994). O desenvolvimento das marés meteorológicas está diretamente ligado às forçantes atmosféricas: intensidade e direção dos ventos e pressão atmosférica. Adicionalmente, o transporte de Ekman e as ondas oceânicas são fatores indiretos que contribuem para o fenômeno (MELO FILHO, 2017). A pista de vento desempenha um papel crucial na geração das marés meteorológicas, pois é nessa área oceânica que ocorre a transferência de momentum entre o ar e o mar. Segundo Marone e Camargo (1994), a pista de vento é considerada o fator mais significativo nesse processo. No entanto, antes de abordar a importância da pista de vento, é necessário levar em consideração a intensidade do vento. A atuação do vento deve persistir por um determinado período, a fim de transferir energia suficiente para que o efeito da pista de vento seja relevante ou até mesmo predominante. Como já citado, a pressão atmosférica também é um fator diretamente ligado às marés meteorológicas. Melo Filho (2017) explica que a tensão normal ou pressão sobre as águas oceânicas causa o efeito chamado de Barômetro Invertido, isto é, corresponde a uma resposta estática do oceano ao peso da atmosfera que implica nas medições de nível subtraindo/somando 1 cm para cada mb de aumento/diminuição da pressão atmosférica local em relação à pressão média.

Além dos efeitos meteorológicos, os efeitos não periódicos afetam a distribuição do nível do mar nas mais variadas escalas espaço-temporais, que fogem das previsões astronômicas. Harari, Mesquita e Camargo, (2021) sustentam que os principais efeitos são: as grandes vazões fluviais; o ciclo diurno de aquecimento solar e a brisa marítima; os sistemas frontais intensos, tempestades e furacões; as variações meteorológicas sazonais (pressão atmosférica, radiação solar, temperatura, vento, etc.); as variabilidades meteorológicas intra-sazonais; as oscilações atmosféricas inter-anuais e decadais em grande escala e as variações climáticas globais, como as associadas ao efeito estufa.

A literatura especializada tem destacado as consequências causadas pelas marés meteorológicas na costa (PUGH & WOODWORTH, 2014). Essa região é vulnerável a eventos naturais extremos que afetam amplamente as comunidades que habitam essa área. A erosão costeira e as inundações são as principais causas de danos. As regiões estuarinas e deltaicas têm estes efeitos potencializados devido às suas características topográficas e batimétricas. As ilhas oceânicas também são relevantemente suscetíveis às ações das marés

meteorológicas, já que a elevação do nível do mar pode se intensificar muito rápido (DE PAULA; DIAS, 2015). É fundamental assinalar que a ocorrência simultânea de determinados fatores pode agravar ainda mais as situações citadas. Por exemplo: ventos fortes soprando do oceano em direção ao continente, empilhando água contra a costa; coincidência da maré meteorológica com uma grande amplitude da maré de sizígia ou maré equinocial; intensificação da frente fria (DUTRA, 2008). Por outro lado, o rebaixamento acentuado do nível do mar traz riscos importantes à navegação.

O estudo das marés de tempestade é muito importante, pois elas têm grande poder destrutivo nas áreas de costa quando associadas às ondas superficiais. Além disso, de acordo com Marone e Camargo (1994), a sua intensidade pode se acentuar dependendo da amplitude, do período das ondas e das condições do tempo. Obviamente, além dos já citados efeitos dos ventos, da pressão atmosférica e da rotação da Terra (força de Coriolis), as ondas e as tempestades são fatores que têm contribuição significativa nesse processo. A duração do fenômeno varia de poucas horas até dois a três dias (FLATHER, 2001 apud MELO FILHO, 2017).

No caso do Brasil, Melo Filho (2017), sustenta que as marés de tempestade de grande amplitude são incomuns, principalmente, pela não ocorrência de furacões. O autor complementa que a confluência de fatores como vento forte soprando no sentido da costa, maré meteorológica e maré de sizígia pode ocasionar um evento extremo de sobre-elevação do nível do mar semelhante a um “*storm surge*” causado por um furacão. Além de Melo Filho, (2017) outra fonte que traz um panorama sobre a questão das *storm surges* e demais fenômenos associados é Camargo (2017).

## **2.5 Análise espectral de séries discretas**

Os efeitos que não são considerados na Teoria do Equilíbrio e que estão relacionados a como cada componente de maré é afetada em termos de amplitude e de fase podem ser analisados a partir dos registros de altura de maré pela análise de Fourier. Em vista disso, a Transformada de Fourier (TF) consiste em uma ferramenta que possibilita determinar a contribuição de cada componente presente na energia total da série temporal analisada. A TF tem como vantagem permitir realizar uma avaliação da variabilidade do sinal em função do seu comportamento periódico, ao contrário dos descritores estatísticos convencionais

(MENDES, 2005). Em Franco (2009, p. 139-162) encontra-se um detalhamento das equações fundamentais para a realização da análise de Fourier.

Na prática, por meio da TF é possível fazer um gráfico chamado periodograma o qual fornece uma curva do espectro de frequências chamada de Função de Densidade Espectral (FDE) que, por sua vez, representa a magnitude da energia total de cada componente em função da frequência das oscilações (HOLTHUIJSEN, 2007). O periodograma é dividido em dois gráficos cada um representando respectivamente a amplitude e a fase. O pico principal, valor máximo, representa os espectros de estados de mar reais já os picos secundários, um ou mais valores máximos relativos, representam as frequências dominantes em termos de conteúdo energético (MENDES, 2005). A figura 2.4 apresenta um exemplo de um periodograma de uma série temporal da elevação da superfície e os correspondentes espectros de amplitude e fase.

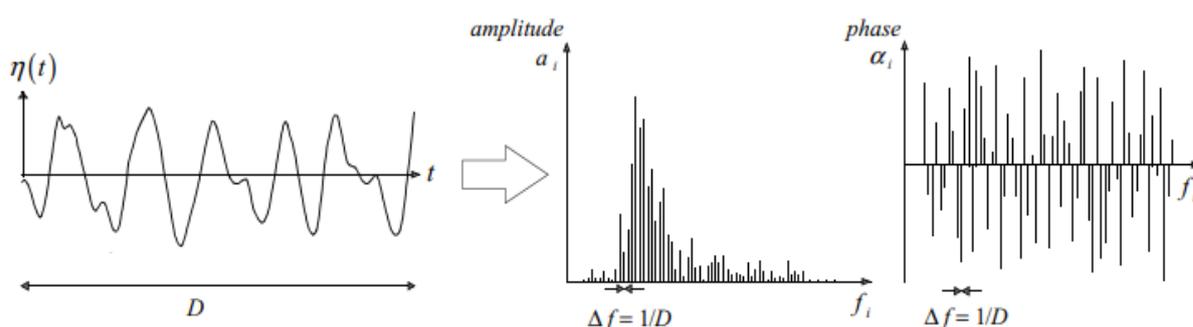


Figura 2.4: Exemplo de períodograma.

Fonte: HOLTHUIJSEN (2007)

### 3 ESTRATÉGIAS PARA DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR E CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS

#### 3.1 Estação Maregráfica da Ponta da Armação

A Estação Maregráfica da Ponta da Armação encontra-se instalada no complexo naval da Ponta da Armação na Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil no Município de Niterói-RJ ( $22^{\circ}52'59,31''\text{S}$   $43^{\circ}08'05,02''\text{O}$ , SIRGAS 2000). A Figura 3.1 esquematiza a sua posição geográfica na qual se destaca a Baía de Guanabara.

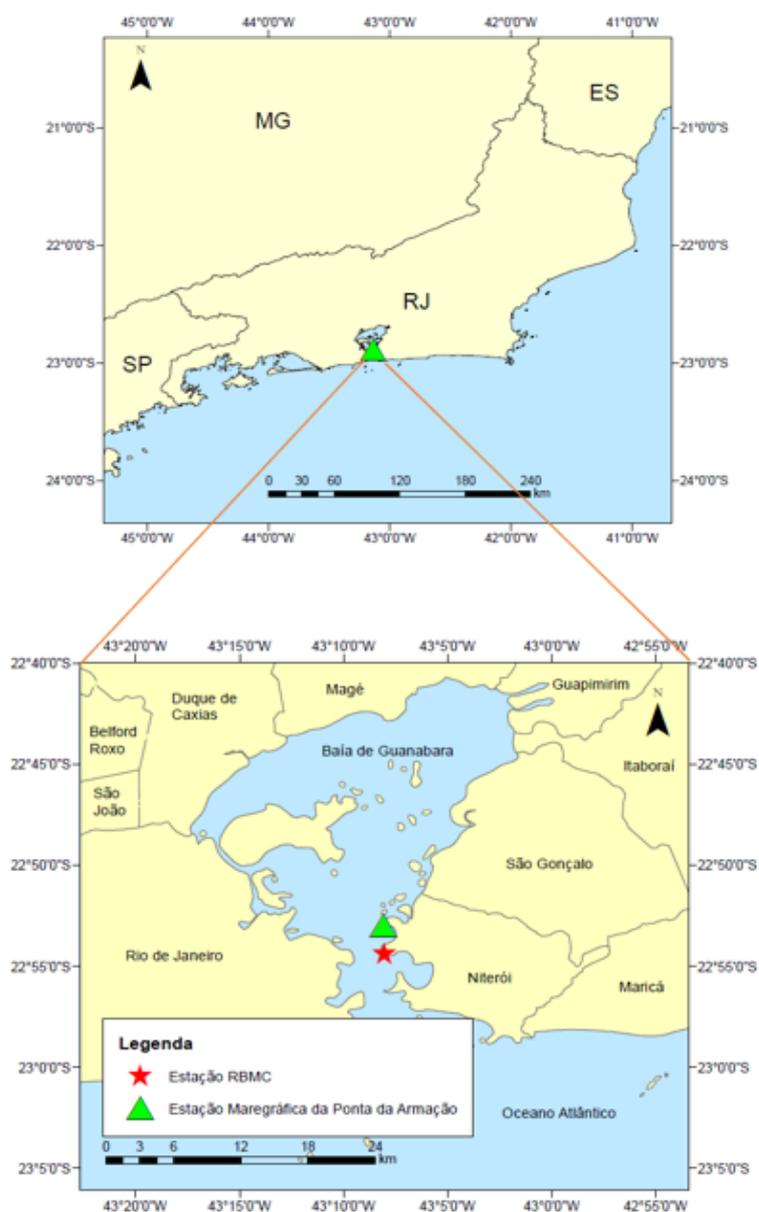


Figura 3.1: Posição geográfica da estação maregráfica da Ponta da Armação em Niterói –RJ.

Fonte: O Autor (2023)

Os sensores utilizados por essa estação são do tipo boia e contrapeso (analógico e digital) e radar. Também possui uma régua de maré de alumínio padrão Hidromec com 4,0 m de comprimento, graduada de 2 em 2 cm, fixada junto ao cais próximo ao abrigo do marégrafo e um conjunto de Referências de Nível, associadas ao Sistema Geodésico Brasileiro. A ficha para referência ao nível de redução é a F-41 50141 com atualização em 2022 a qual utilizou o período de observação de 08/02/2018 a 07/02/2020 para obtenção dos elementos de maré (DHN, 2022). Vale mencionar que a referida estação faz parte do conjunto sítios que compõem a Rede Geodésica de Referência Costeira do projeto ALT-BAT (SOARES, SANTOS e LUZ, 2019).

Esse ponto de observação do nível do mar tem grande importância para o monitoramento da Baía de Guanabara, região de economia significativa para o Estado do Rio de Janeiro. Em conjunto, existe, no outro extremo da entrada da Baía de Guanabara, a estação maregráfica da Ilha Fiscal, também operada pela Marinha do Brasil.

### **3.2 Fonte de dados e ferramentas computacionais empregadas**

Os dados de observações maregráficas foram obtidos junto à Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) – Marinha do Brasil. Trata-se das elevações horárias do nível do mar, série temporal da Estação Maregráfica da Ponta da Armação situada no Município de Niterói - RJ, no período de 1988 a 2022. Vale informar que os referidos dados foram disponibilizados pelo Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) de gestão do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

As ferramentas computacionais utilizadas para a determinação dos níveis médios do mar são provenientes do pacote de *software* SLP64 – Caldwell (2014) – desenvolvido pelo *Joint Archive for Sea Level*, uma parceria entre a *University of Hawaii Sea Level Center* (UHSLC) e o *US National Oceanographic Data Center* (US NODC). As entradas e saídas do SLP64 são geradas respectivamente pelos *softwares* CRITNM e SLPLAC (LUZ, 2008). Complementarmente, foram utilizados *scripts* específicos desenvolvidos em ambiente Matlab por Harari (2021), com devidas adaptações, além de pacotes já existentes nessa linguagem como o *t-tide* e o *u-tide*. Para geração das componentes harmônicas como subsídio à análise das séries de 19 anos foi utilizado o programa PACMARE (FRANCO, 2009) especificamente o módulo LONGSÉRIE.

### 3.3 Etapas da metodologia

A estratégia proposta para atingir os objetivos da pesquisa consiste nas seguintes etapas:

- a) executar a análise e o controle de qualidade de observações maregráficas. Em seguida, formar a série horária única e completa do nível do mar para todo o período em estudo. Posteriormente, realizar a filtragem das componentes de alta frequência das observações e, assim, estimar o nível médio do mar;
- b) realizar a quantificação dos eventos superiores e inferiores a  $\pm 2$  desvios padrão (DP) e  $\pm 3$  desvios padrão (DP), considerando a série filtrada de valores horários de elevação do nível do mar. Os períodos de análise serão divididos em quatro categorias, correspondendo às estações do ano:
  - verão - meses de dezembro, janeiro e fevereiro;
  - outono - meses de março, abril e maio;
  - inverno – meses de junho, julho e agosto;
  - primavera – meses de setembro, outubro e novembro.
- c) gerar as componentes harmônicas para cada ano, bem como as previsões astronômicas anuais utilizadas no cálculo final e, por fim, gerar os resíduos (cálculo das diferenças entre a previsão e a observação);
- d) formar séries temporais anuais e séries de 19 anos dos valores de Amplitude e Fase das principais componentes de maré (O1, K1, K2, M2, S2, M4, N2 e Q1);
- e) aplicar análises de tendências, Fourier, Função Densidade de Probabilidade (FDP) e de Excedências, bem como estatística básica.

### 3.4 Tratamento e análise preliminar das observações

Antes de proceder com os cálculos e análises propostas neste trabalho, foi necessário realizar uma etapa de depuração dos dados oriundos do BNDO. Ao averiguar os referidos

dados e metadados constatou-se que a série possuía variados tipos de sensores, plataformas e resolução temporal, como apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1: Descrições dos sensores, plataformas, tipo, resolução temporal e períodos das séries.

Sensor	Plataforma	Tipo	Resolução temporal	Período
Boia e contrapeso	256	analógico	horária	1988-2009
Boia e contrapeso	257	digital	horária	2017-2018
Radar	400	digital	5 minutos	2008-2013
Radar	415	digital	5 minutos	2009-2022

Fonte: O Autor (2023)

Inicialmente foram realizadas a crítica preliminar e a filtragem das observações diárias do nível do mar de cada conjunto de dados com o *software* CRITNM (LUZ, 2008). Assim as observações coletadas em intervalos de 5 minutos são inicialmente “suavizadas” mediante dupla aplicação de média móvel de 13 pontos (anterior e posterior) e em seguida filtradas via spline cúbica. Nessa etapa é possível saber se existem lacunas na série e dados fora do padrão, isto é, alturas de valor zero ou *outliers*. Um relatório dos dados rejeitados é elaborado. Também é gerado um arquivo com os dados horários da altura do nível do mar. Em seguida, por meio da ferramenta *hplot\_yrs* do SLP64, são produzidos gráficos mostrando as lacunas e os dados fora do padrão.

A próxima etapa consiste em executar a análise do controle de qualidade das observações. Foram geradas as componentes harmônicas com referência no ano de 2009. Esse ano foi adotado, considerando que é o período comum às três partes principais das séries (ver Figura 4.1). De posse das componentes, foram geradas previsões astronômicas para todo o período da série de dados (1988 a 2022) e calculados os resíduos (cálculo das diferenças entre a previsão e a observação). Essa atividade foi realizada utilizando o *software* SLP64 (CALDWELL, 2014).

Uma vez que já se dispõe dos arquivos com as previsões e observações pré organizados, é realizada a concatenação dessas informações em dois arquivos, estes são utilizados como entrada para o *software* SLPLAC (LUZ, 2008). O objetivo do SLPLAC é filtrar as componentes de alta frequência das observações do nível do mar, empregando um filtro de 168 horas, conforme proposto por Pugh (1987). Através desse processo de filtragem, são obtidas as médias horárias filtradas, que, por sua vez, são utilizadas para calcular as

médias mensais do nível médio do mar. Esses cálculos são realizados utilizando a média simples de todos os valores válidos no período analisado. No entanto, como as séries não estavam na mesma referência de nível, foi preciso realizar a compatibilização para que as determinações das médias mensais, anuais, da série inteira e da tendência adquirissem consistência. Além disso, foram identificados alguns “saltos” (diferenças entre as observações de parte da série e a referência adotada) em determinados locais das séries. Esses saltos foram devidamente analisados e tratados. Uma discussão sobre a identificação e tratamentos de saltos em séries maregráficas pode ser encontrada em IBGE (2021).

O passo final para obtenção da série total consolidada foi executar as correções dos valores dos saltos no *software* CRITNM e gerar novos arquivos horários para todos os anos da série. Em seguida, esses arquivos anuais foram concatenados e novamente executados (junto com os arquivos de previsão) no programa SLPLAC. Assim, obteve-se a série total consolidada bem como as médias mensais, anuais e os resíduos. É importante salientar que apesar do período contemplado na pesquisa ser de 1989 a 2021 foram também processados os anos imediatamente inferior e superior, isto é, 1988 (novembro a dezembro) e 2022 (janeiro a setembro), dados que até a data do processamento estavam disponíveis. Tal procedimento possibilita o uso do filtro de 168 horas que precisa dos valores anteriores e posteriores para filtrar a série em questão por completo.

Para a estimativa da tendência foi utilizada a regressão linear simples de acordo como preconizado por Zervas (2001; 2009), em que  $X_i$  e  $Y_i$  representam, respectivamente, o mês e o nível médio do mar mensal correspondente, após a subtração de suas respectivas médias. Na Eq. 1 o coeficiente angular da reta, representado por  $b$ , fornece a inclinação da reta de regressão linear este indica a tendência da série. O seu erro padrão ( $S_b$ ) é encontrado por meio da Eq. 2.

$$b = \frac{\sum_i X_i Y_i}{\sum_i X_i^2} \quad (1)$$

$$S_b = \frac{S_{xy}}{\sqrt{\sum_i X_i^2}} \quad (2)$$

É necessário explicitar que  $S_{xy}$  na Eq. 2 corresponde ao erro padrão da regressão, ou seja, o desvio padrão da reta de regressão. Já  $n$  refere-se ao número total de meses observados na série. A Eq.3 traz a formulação de  $S_{xy}$ .

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_i Y_i^2 - b(\sum_i X_i Y_i)}{n - 2}} \quad (3)$$

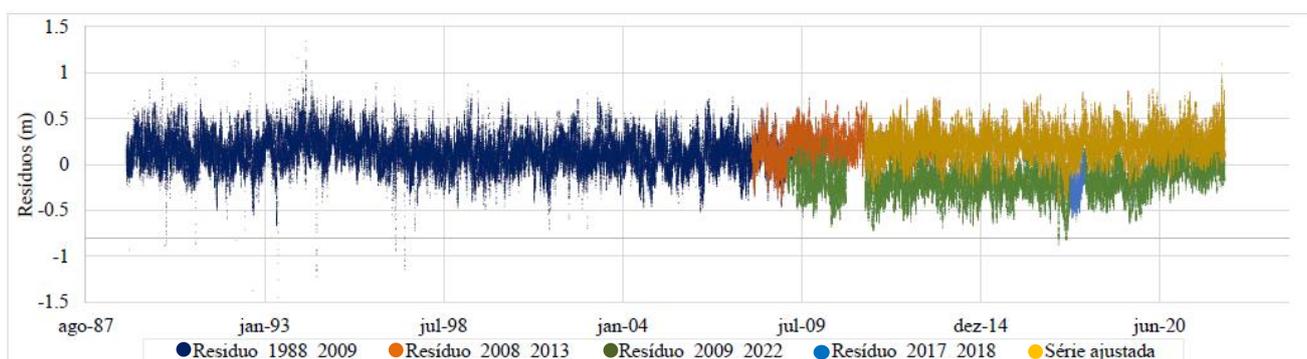


Figura 3.2: Composição da série para correção de saltos. Série 1988 a 2009 na posição do sensor boia e contrapeso e plataforma 256 (azul); série 2008 a 2013 na posição do sensor radar e plataforma 400 (laranja); série 2009 a 2022 na posição do sensor radar e plataforma 415 (verde); série 2017 a 2018 na posição do sensor boia e contrapeso e plataforma 257 (azul claro) e série 2011 a 2021 com ajustes de correção aplicados (amarelo).

Fonte: O Autor (2023)

Um ponto que cabe ser destacado é que o cálculo do nível médio do mar não levou em consideração a correção de efeitos geodinâmicos, uma vez que a estação de Ponta da Armação em Niterói-RJ, não possui uma estação GNSS contínua solidária a ela (a mais próxima fica a cerca de 3 km – RJNI código sat 96361– instalada em 2019). Esse arcabouço possibilitaria o acompanhamento do fenômeno de movimentação crustal local e, assim, separar os efeitos não-oceânicos. Dado esse fato, as variações de nível médio do mar determinadas nesse trabalho são relativas.

### 3.5 Preparação para o estudo de maré e quantificação de eventos extremos

A etapa seguinte da análise consistiu em realizar a separação da série em dois tipos: anuais e de 19 anos. Para ambas foram aplicadas a análise harmônica da Amplitude e Fase das principais componentes de maré (O1, K1, K2, M2, S2, M4, N2 e Q1) e suas tendências foram analisadas.

No presente estudo, adotou-se um desvio padrão de referência igual a 0,15 m para toda a série de dados. A determinação desse desvio padrão foi realizada com base nos valores horários filtrados do nível do mar da amostra, abrangendo a série completa de dados. Esse procedimento permitiu estabelecer um parâmetro consistente para avaliar a dispersão dos valores em relação à média. Ao considerar o desvio padrão como 0,15 m, foi possível quantificar a variabilidade dos dados e fornecer uma medida de confiabilidade para as análises subsequentes. Tal abordagem assegura uma compreensão mais precisa da variabilidade dos valores do nível do mar ao longo da série de dados considerada.

Adicionalmente foi realizada análise estatística para determinação dos eventos os quais a variação do nível do mar foi superior/inferior a 2 e 3 desvios padrão considerando o valor de referência anteriormente citado.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estimação da tendência e do nível médio do mar local

A detecção dos saltos nas séries permitiu compatibilizar em um único referencial a série geral consolidada. Trata-se de um conjunto de observações que compõe o período de novembro de 1988 a setembro de 2022. A decisão de trabalhar com série até a atualidade dos dados consistiu em tentar mostrar o comportamento do nível do mar o mais atualizado possível, principalmente pelas recentes mudanças que vêm ocorrendo no âmbito da elevação do nível do mar, como colocado na introdução deste trabalho. Assim, foram identificados os saltos mais significativos em fevereiro de 2012 (0,428 m) e março de 2020 (0,259 m). Adicionalmente, para complementar a lacuna da série do sensor radar (plataforma 415) foi preciso reposicionar as observações do período de outubro de 2017 a janeiro de 2018 (0,428 m), pertencentes ao sensor boia e contrapeso (plataforma 257), para a referência do sensor boia e contrapeso e plataforma 256.

Após as devidas correções aplicadas pode-se verificar pelo gráfico dos resíduos, apresentado na Figura 4.1, a série com posicionamento na referência de 2009. Vale mencionar, no entanto, que correções mais minuciosas não foram possíveis de serem realizadas, dado que não foram encontrados no BNDO informações a respeito do controle geodésico nem de testes de Van de Casteele, comparação entre as leituras realizadas por meio do sensor e da régua de maré a cada 15 minutos, (ver MIGUEZ, TESTUT e WÖPPELMANN, 2008) realizados na estação maregráfica. Diante desse fato, a análise contemplada nesse trabalho pode conter distorções menores ocasionadas pela troca ou movimentação dos sensores ao longo tempo. Essa questão pode ser verificada minuciosamente com a comparação da série temporal advinda do marégrafo com a série oriunda de satélites altímetros (ver GIEHL, 2020); entretanto, este aspecto foge do escopo desse trabalho. Ademais, não foram constatadas derivas instrumentais (ver IBGE, 2021 p. 55). De acordo com IOC (2006), os sensores do tipo radar e boia e contrapeso (ambos digitais) são resistentes a esse tipo de comportamento.

A análise dos resíduos permite averiguar o comportamento das observações que fogem do padrão astronômico, fato absolutamente normal e usual. Apenas visualmente ao analisar a Figura 4.1, é possível notar sinais mais pronunciados em períodos específicos, principalmente de 1989 a 1998 e em 2022. Uma análise mais criteriosa desses sinais será

mostrada na seção 4.2. Por outro lado, de modo geral, não são observados ruídos excessivos, o que caracteriza, portanto, uma série de comportamento homogêneo.

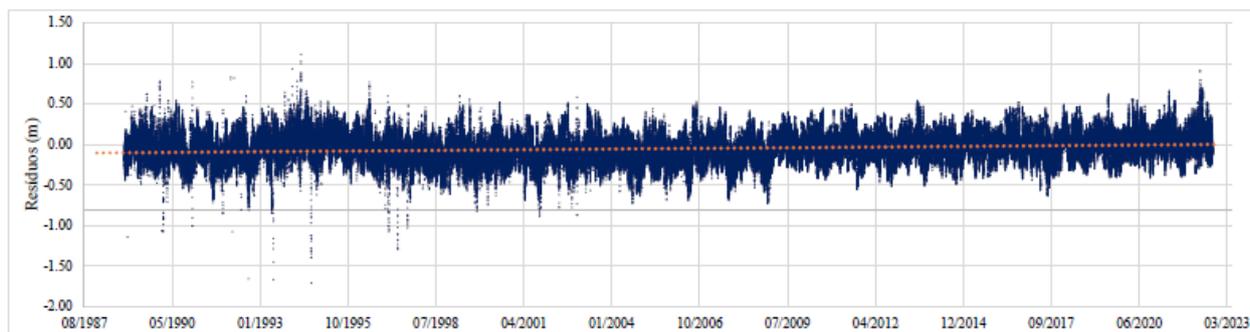


Figura 4.1: Resíduos homogêneos da série temporal na referência do ano 2009

Fonte: O Autor (2023)

O nível médio do mar calculado por meio das médias mensais teve como valor  $2,283 \text{ m} \pm 0,073 \text{ m}$  para o período de janeiro de 1989 a setembro 2022. Não foi possível referenciar esse valor a uma Referência de Nível do Sistema Geodésico Brasileiro dado o desconhecimento dos valores entre o sensor radar e a Referência de Nível primária, nem do teste de Van de Castele (como já citado). Vale informar que tais correções podem ser feitas como descrito em IBGE (2021 p. 32). A Figura 4.2 mostra os níveis médios do mar mensais reduzidos à referência zero para o período considerado.

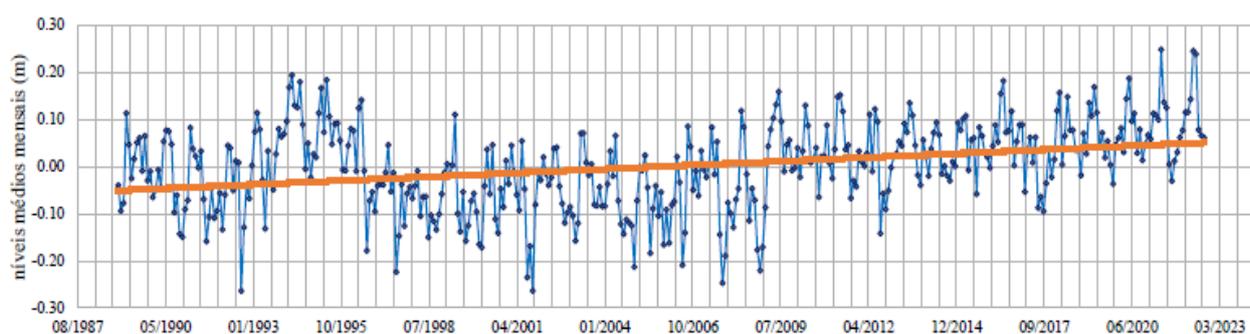


Figura 4.2: Níveis médios mensais e linha de tendência.

Fonte: O Autor (2023)

A tendência estimada da série foi de  $2,726 \text{ mm/ano} \pm 0,027 \text{ mm}$ . Esse valor concorda com as tendências apresentadas nos relatórios que utilizam as series dos satélites altimétricos (Univ.Colorado, 2021). Contudo, é importante colocar que os valores comumente estimados sofrem modificações sensíveis ao período considerado no cálculo da estimativa, pois oscilações de curto período podem inserir tendências fictícias nas séries. Nesse sentido,

Zervas (2009) chama atenção para a questão da variabilidade inter-anual do nível médio do mar, em que períodos com muitos resíduos negativos indicam condições anômalas ocorridas no oceano em determinada época. O mesmo autor sustenta que tais anomalias podem ser causadas por variações na temperatura da água, salinidade, ventos, pressão do ar, correntes ou descarga fluvial.

Diante dessa questão foram realizados alguns testes considerando outros intervalos de períodos a fim de mostrar a variabilidade da estimativa da tendência. Isto é, dependendo do período analisado, a configuração do conjunto de observações pode indicar diferentes tendências. Assim sendo, chama-se atenção para o aspecto de inferir uma determinada tendência para determinado local de que é necessário realizar a correlação dos dados com outras fontes/plataformas. Ademais, como mencionado na seção 3.4, os valores das estimativas das tendências não podem ser considerados absolutos uma vez que não sejam devidamente isolados os movimentos não-oceânicos, ou seja, soerguimento e subsidência da crosta.

A Tabela 4.1 mostra os testes realizados, na qual se pode observar como a estimativa da tendência é afetada pelo conjunto de observações utilizadas, principalmente entre 2000 e 2009. Outros fatores como pequenos saltos ocorridos ao longo do tempo também podem influenciar de forma significativa tal estimativa. Assim, é fundamental que as instituições que produzem dados maregráficos realizem a documentação dessas interferências sofridas pelo sensor ao longo tempo. Isto é, realizar o controle de qualidade dos dados como preconizado pela IOC (2020). Ou ainda, disponibilizar séries consolidadas nas quais são feitas as devidas depurações e controles.

Tabela 4.1: Testes do cálculo das tendências conforme o período considerado.

<b>Período (ano)</b>	<b>Quantidade de observações (meses)</b>	<b>NMM (m)</b>	<b>Tendência (mm/ano)</b>	<b>Erro padrão (mm)</b>
1989 - 2022	405	2,283	2,726	±0,027
1989 - 2021	396	2,280	2,534	±0,025
2000 - 2022	262	2,292	8,054	±0,051
2000 - 2021	253	2,288	7,720	± 0,047
2009 - 2022	165	2,333	3,262	± 0,013
2009 - 2021	156	2,328	3,279	± 0,012

Fonte: O Autor (2023)

Ainda no que concerne ao nível médio do mar, é importante colocar outras métricas que auxiliam no entendimento do comportamento da série temporal. Nessa diretriz são

apresentadas a seguir algumas figuras com breves comentários acerca de cada característica observada.

Primeiramente é apresentada a série de altura do nível do mar e do nível médio do mar (Figura 4.3). Em seguida, são mostrados os histogramas que explicitam os períodos de maior ocorrência das alturas observadas bem como a função densidade probabilidade (Figura 4.4). Observa-se que para o nível do mar as maiores ocorrências se concentram no intervalo de 2 a 3 m (série original sem filtro), já para o nível médio do mar as maiores ocorrências se concentram no intervalo de -0,5 a 0,5 m. Ademais são mostrados o período de retorno e as probabilidades de excedência e não excedência da série do nível médio do mar (Figura 4.5).

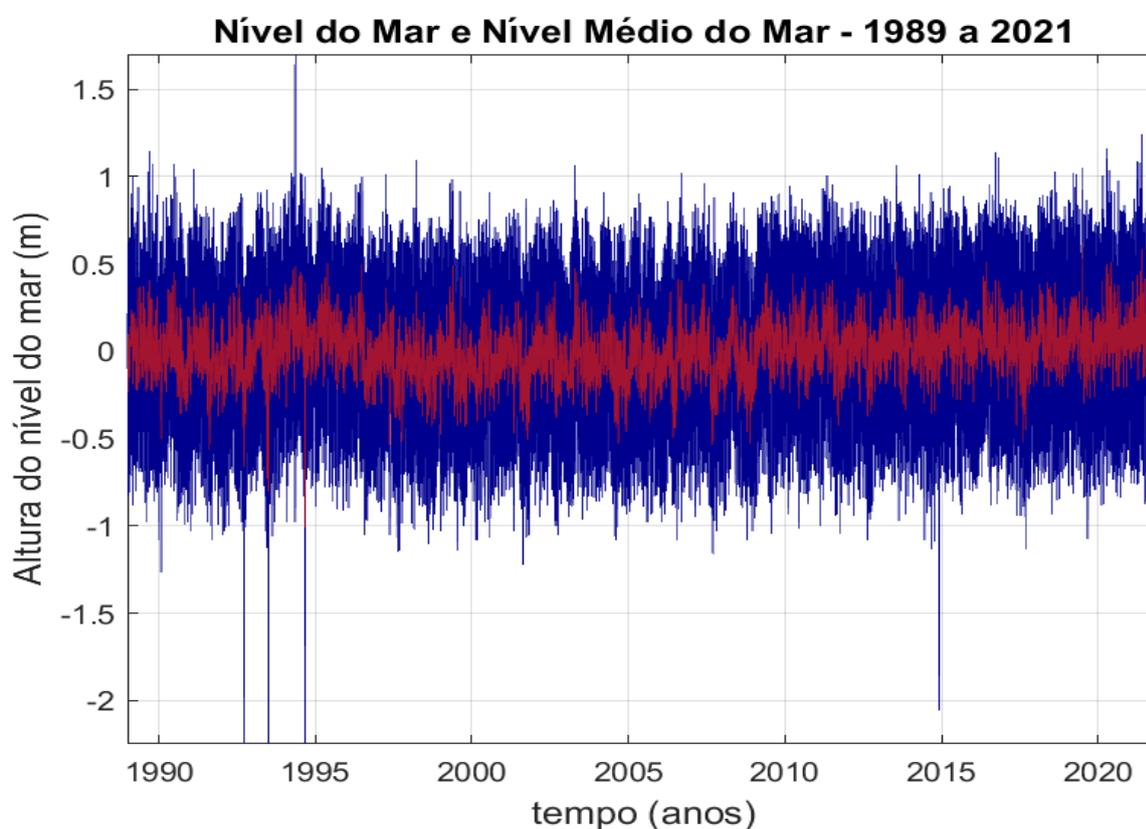


Figura 4.3: Série filtrada de altura do nível do mar e do nível médio do mar

Fonte: O Autor (2023)

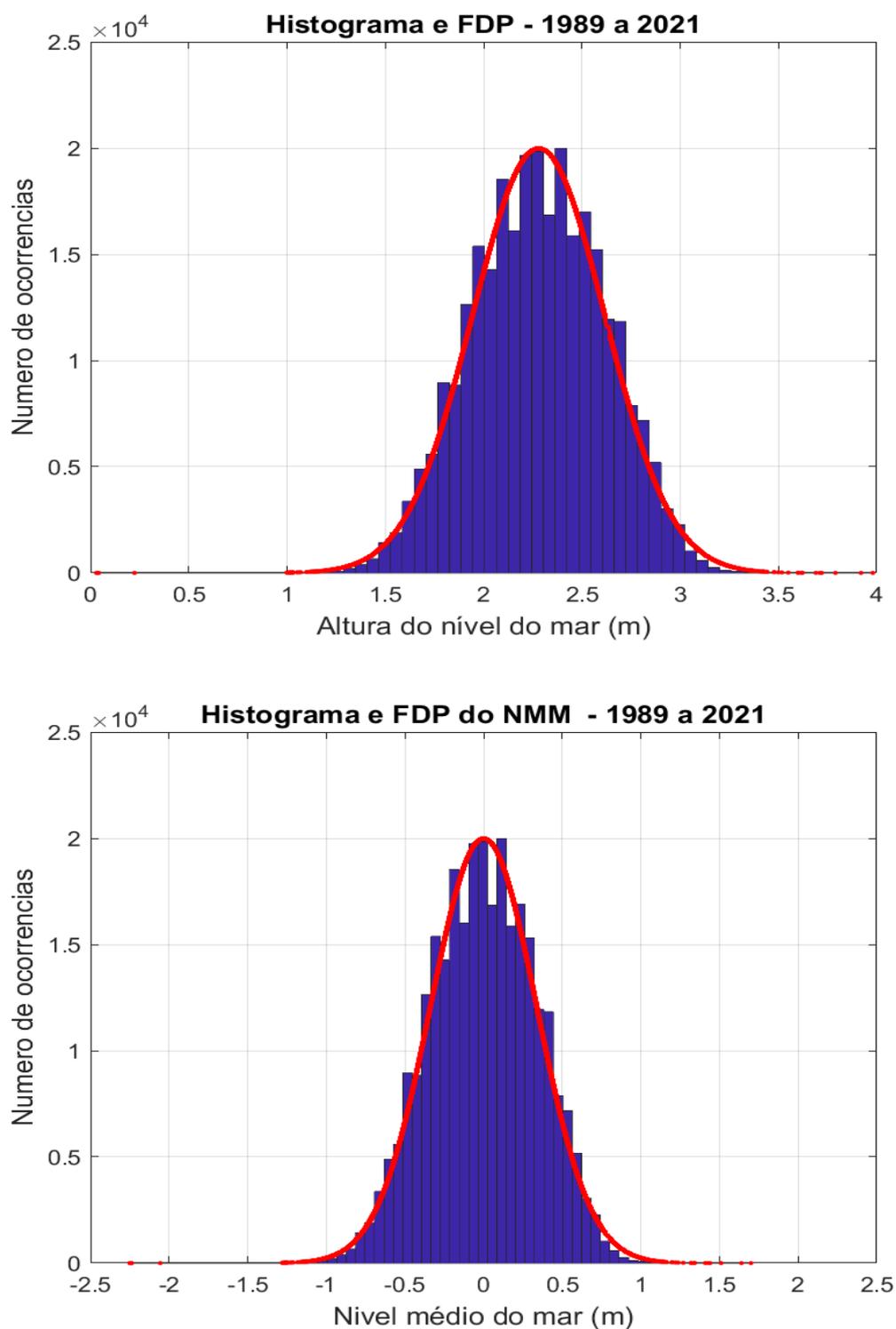


Figura 4.4: Histograma e função densidade probabilidade da altura do nível do mar e do nível médio do mar.

Fonte: O Autor (2023)

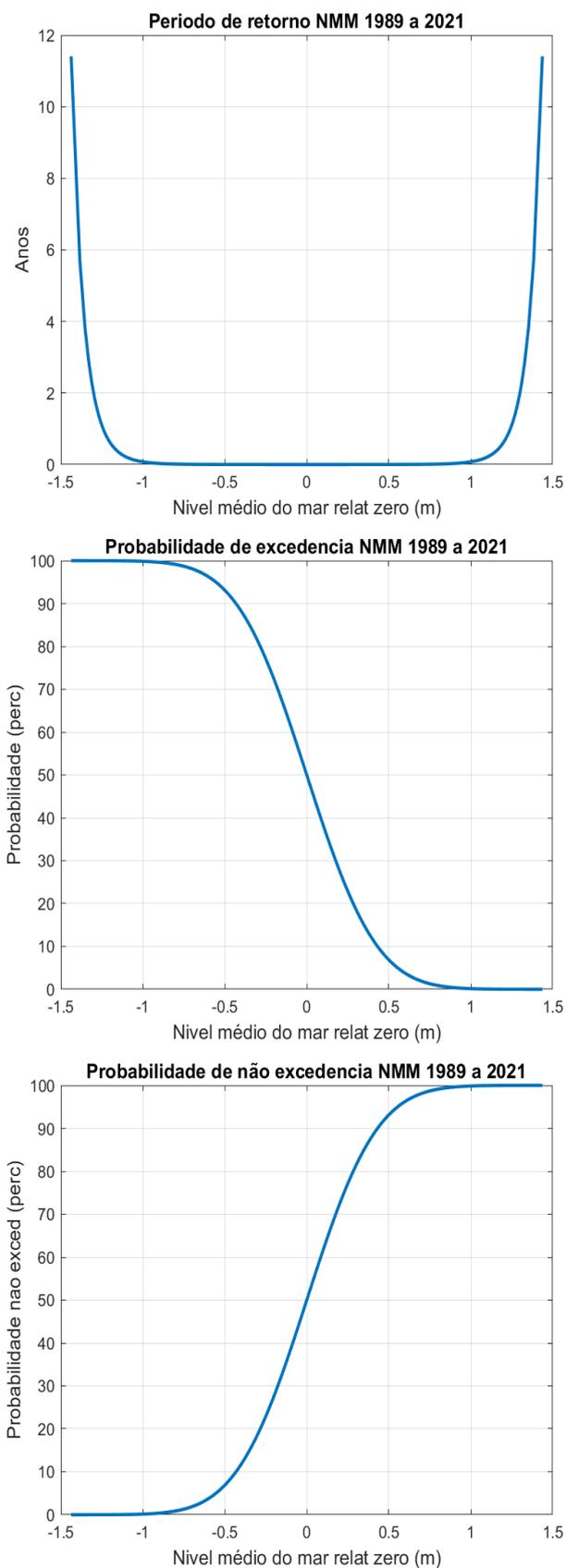


Figura 4.5: Período de retorno e probabilidade de excedência e não excedência do nível médio do mar.

Fonte: O Autor (2023)

Foi também efetuada a análise de Fourier da série residual. A análise mostra que as amplitudes mais energéticas se concentram em até 10 anos. As fases também se concentram no mesmo período. A Figura 4.6 apresenta o resultado para a amplitude e fase do período considerado.

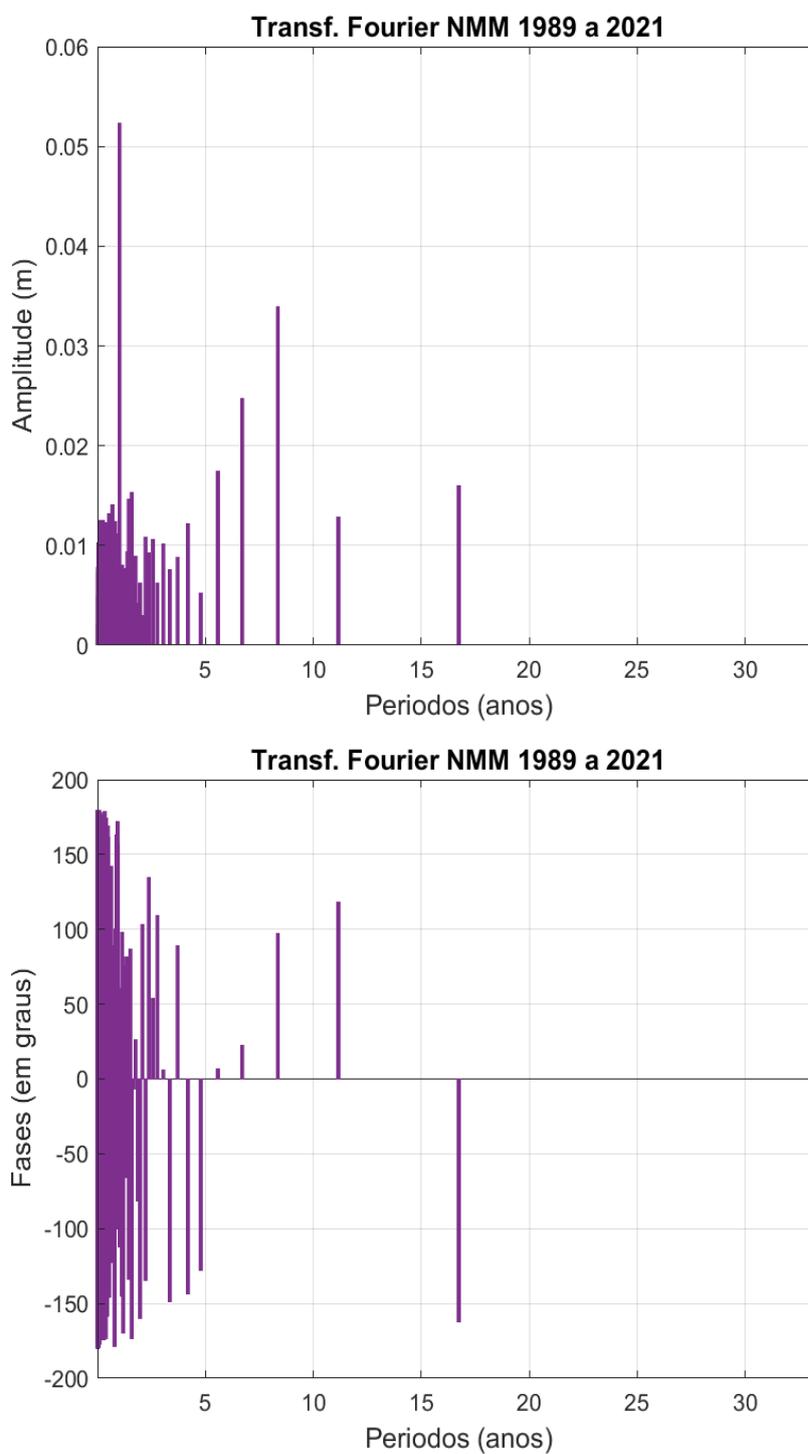


Figura 4.6: Análise de Fourier para a série de nível médio do mar.

Fonte: O Autor (2022)

## 4.2 Análise e quantificação dos eventos extremos

A determinação dos períodos que excederam  $\pm 2DP$  e  $\pm 3DP$  são importantes para detecção de anomalias que destoam da previsão astronômica. Nesse trabalho foi constatado um desvio padrão geral da série de 0,15 m o qual serviu como base para nortear a análise. Na Figura 4.7 são mostrados os limites e os valores excedentes na série temporal no período de 1989 a 2021. A quantificação dos eventos excedentes por estação do ano é apresentada na Tabela 4.2. É importante ressaltar que, na contagem dos eventos de  $\pm 2DP$ , também estão inclusos os eventos de  $\pm 3DP$ . Essa inclusão adicional é realizada com o intuito de aprimorar a análise e evidenciar eventos de maior intensidade. É válido destacar que o critério utilizado para detectar cada evento excedente baseou-se na ocorrência de um valor horário que ultrapassa o desvio padrão de referência, sem levar em consideração a duração total de um evento ao longo de vários dias, por exemplo. Esse enfoque permite uma análise mais direta e focada na detecção de eventos pontuais que se destacam em relação à variabilidade normal dos dados.

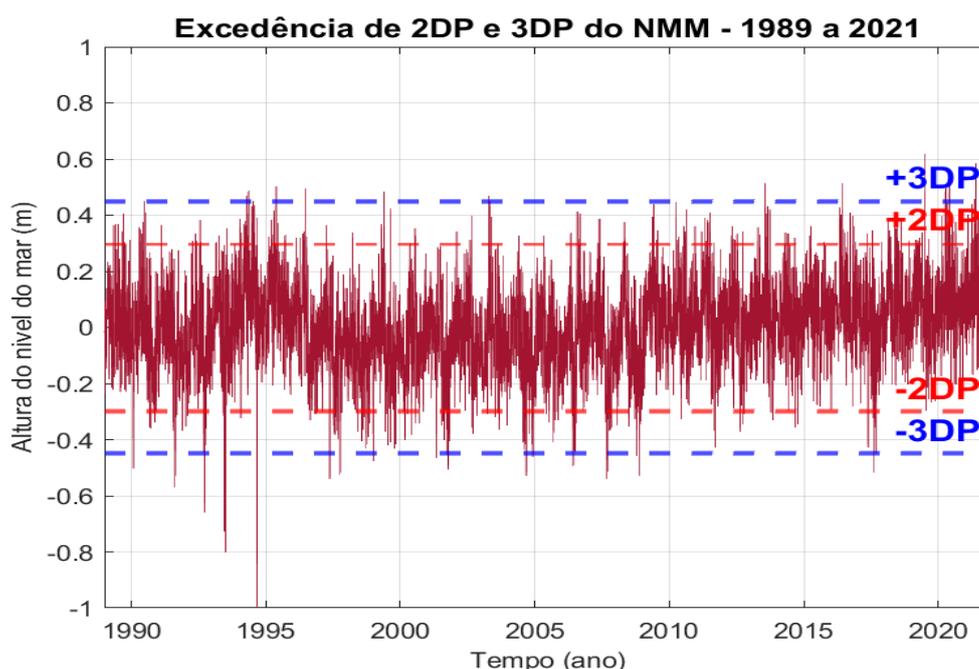
Ao examinar a Tabela 4.2 fica evidente que o outono é a estação que concentra a maior quantidade de eventos de sobre-elevação do nível do mar (54,62%), seguido do inverno (34,63%); observa-se ainda que tais eventos estão concentrados entre os anos de 2018 a 2021. O contrário é visto no inverno com 49,09% de rebaixamento seguido da primavera com 34,08%, notadamente os eventos mais acentuados acontecem entre os anos de 1990 a 1995. Ao fazer um recorte mais específico, considerando apenas os eventos excedentes a  $\pm 3DP$ , o contraponto entre eventos positivos no outono (66,20%) e eventos negativos no inverno (44,33%) fica mais explícito. Em ambos os casos se têm uma medida de maré meteorológica que ultrapassa  $\pm 0,4$  m.

É natural que se espere uma baixa ocorrência de eventos extremos no verão, e isso é confirmado com as baixas quantidades apresentadas de 7,38% para eventos positivos e de 5,85% para eventos negativos para  $\pm 2DP$ . Na análise considerando  $\pm 3DP$  tem-se 0% de sobre-elevação e 5,22% de rebaixamento para a referida estação do ano.

Tabela 4.2: Quantificação dos eventos excedentes de  $\pm 2DP$  e  $3\pm DP$ .

Excedência	Quantitativo por estação do ano				Total
	Primavera	Verão	Outono	Inverno	
Acima de +2DP	233	510	3773	2392	6908
Abaixo de - 2DP	2462	423	793	3547	7225
Acima de +3DP	0	0	378	193	571
Abaixo de -3DP	289	47	165	399	900

Fonte: O Autor (2023)

Figura 4.7: Excedência além de  $\pm 2$  desvios padrão (linha vermelha) e de  $\pm 3$  desvios padrão (linha azul).

Fonte: O Autor (2023)

Outro retrato do panorama da excedência é mostrado por meio de histogramas. Nesse caso, é possível identificar tanto o número de ocorrências quanto a magnitude dos valores excedentes para cada estação do ano. Na Figura 4.8, que apresenta os valores para  $\pm 2DP$  e  $\pm 3DP$ , fica evidente o quantitativo dos eventos de maré meteorológica que ultrapassam  $-0,4$  m na primavera e no inverno. O contrário ( $+0,4$  m) ocorre no outono com amplitudes positivas e um maior quantitativo total. O estudo realizado por Tecchio (2022), o qual utiliza o sítio da Ilha Fiscal, também situado na Baía de Guanabara, retrata uma porcentagem de concentração desses eventos de forma similar ao do presente trabalho, o que reforça a necessidade de maior atenção para esses fenômenos na extensão da Baía de Guanabara.

Adicionalmente é fundamental enfatizar os valores excedentes a  $\pm 3 DP$  a fim de explicitar os eventos mais acentuados ocorridos na série. Nesse sentido, cabe destaque para

o quantitativo de eventos de rebaixamento na primavera e no inverno (menores que  $-0,5$  m) e de sobre-elevação no outono (maiores que  $0,5$  m).

Os eventos de sobre-elevação ocorridos durante o período de outono têm causado impactos significativos na orla da cidade de Niterói. Comparando alguns avisos de mau tempo emitidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação com notícias divulgadas nos últimos dez anos em jornais observa-se uma considerável quantidade de ocorrência de eventos extremos constatados na presente análise. Podem ser citados como exemplos os eventos acentuados ocorridos entre abril e junho dos anos de 2011, 2016 e 2021 que causaram destruição de orlas, inundações, e transtornos gerais na cidade. De acordo com Tecchio (2022) os maiores índices de sobre-elevação no nível médio do mar da região devem-se a ocorrência de ventos mais intensos ocasionados pelo elevado gradiente de pressão para o quadrante S-SW.

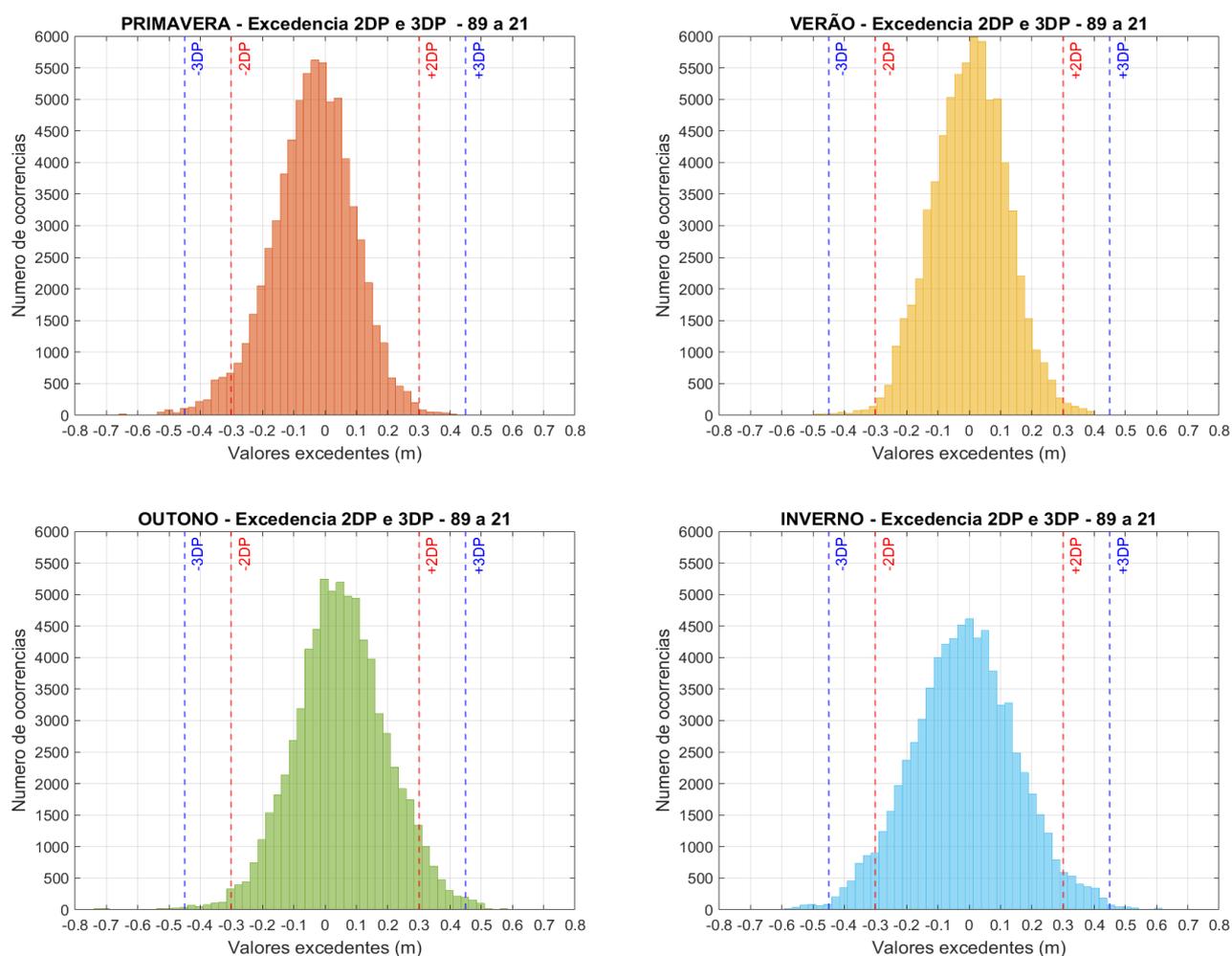


Figura 4.8: Histograma da excedência além de  $\pm 2$  desvios padrão (linha vermelha) e  $\pm 3$  desvios padrão (linha azul).

Fonte: O Autor (2023)

Um aspecto adicional a ser evidenciado trata das médias mensais do nível do mar e seus respectivos desvios padrão, apresentados na Figura 4.9. Levando isso em consideração, pode-se observar o ciclo anual que mostra os meses de março a junho (predominância do outono) com as maiores médias e os meses de agosto a novembro (predominância da primavera) com as menores médias. Vale ressaltar, nesse aspecto, a importância de considerar a sazonalidade como fator primordial na análise.

Ao avaliar a sazonalidade por meio das Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 nota-se que, de maneira geral, as maiores altas se deram nos períodos de 1993 a 1996 e de 2019 a 2021. Por outro lado, as maiores baixas correspondem aos períodos de inverno e outono, compreendendo os anos de 1997 a 1998, e os períodos de primavera e verão, contemplam os anos de 2007 a 2009. No que tange às tendências observa-se uma homogeneidade entre elas, isto é, crescem positivamente a uma taxa de 3 mm/ ano para todas as estações analisadas.

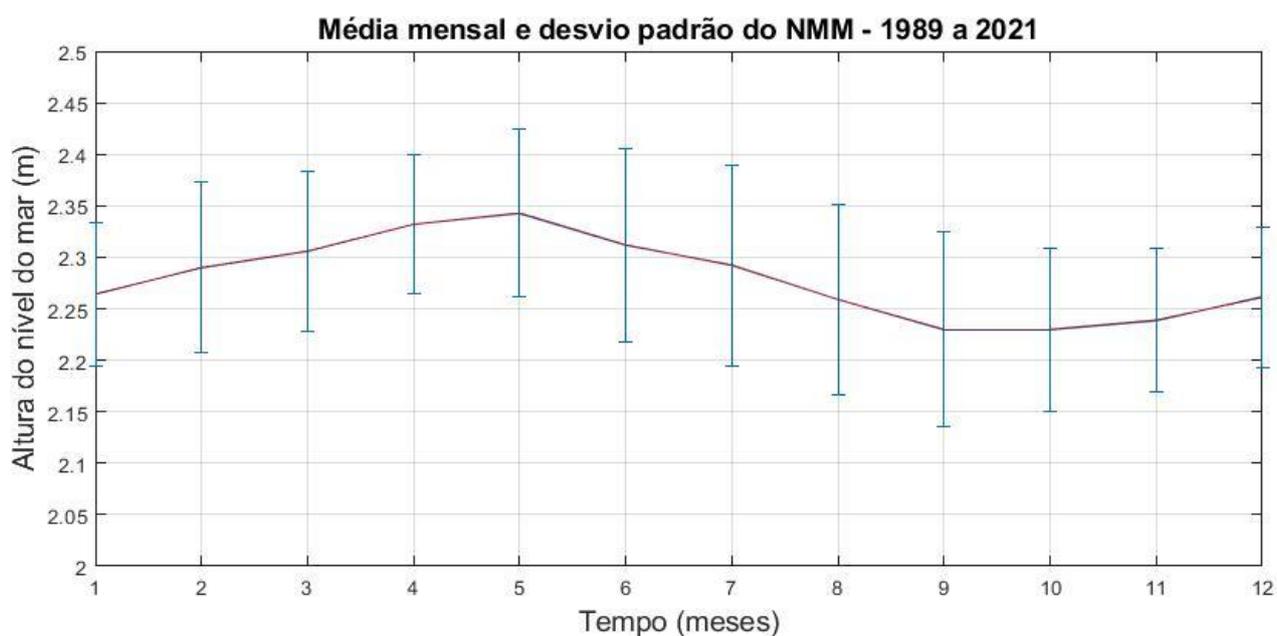


Figura 4.9: Médias mensais e desvio padrão da série

Fonte: O Autor (2023)

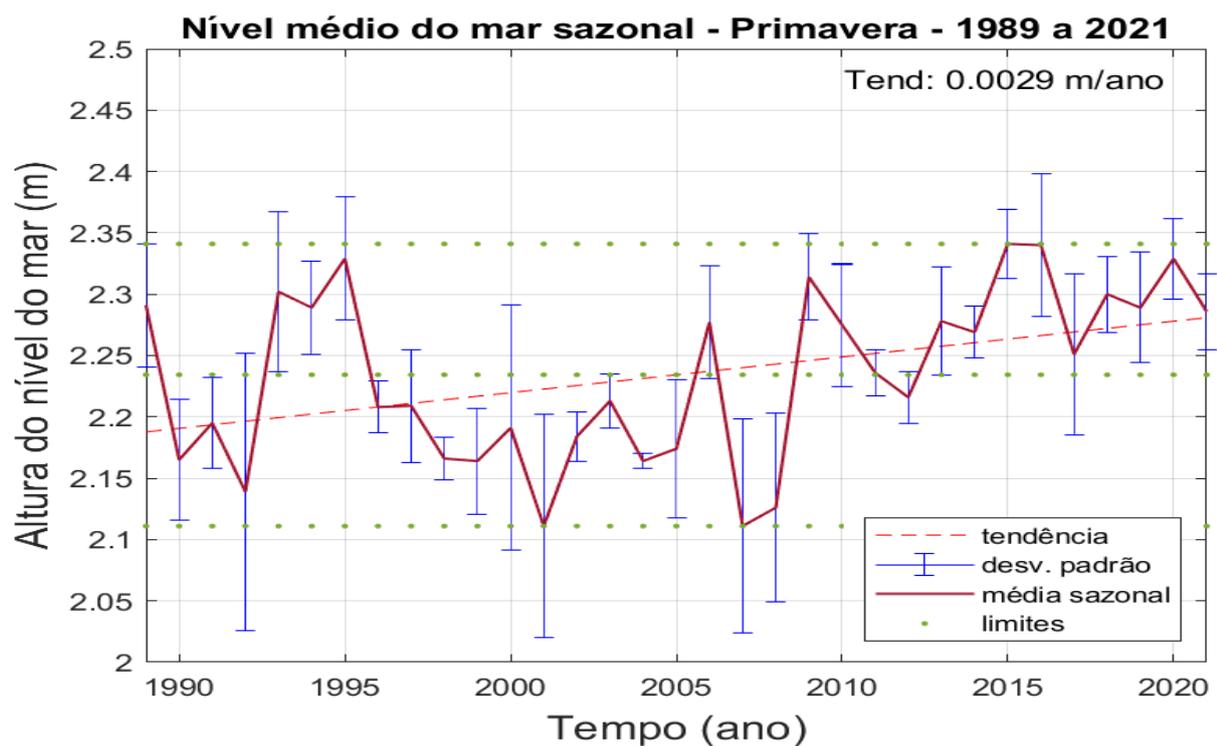


Figura 4.10: Nível médio do mar sazonal para o período da primavera (setembro, outubro e novembro)

Fonte: O Autor (2023)

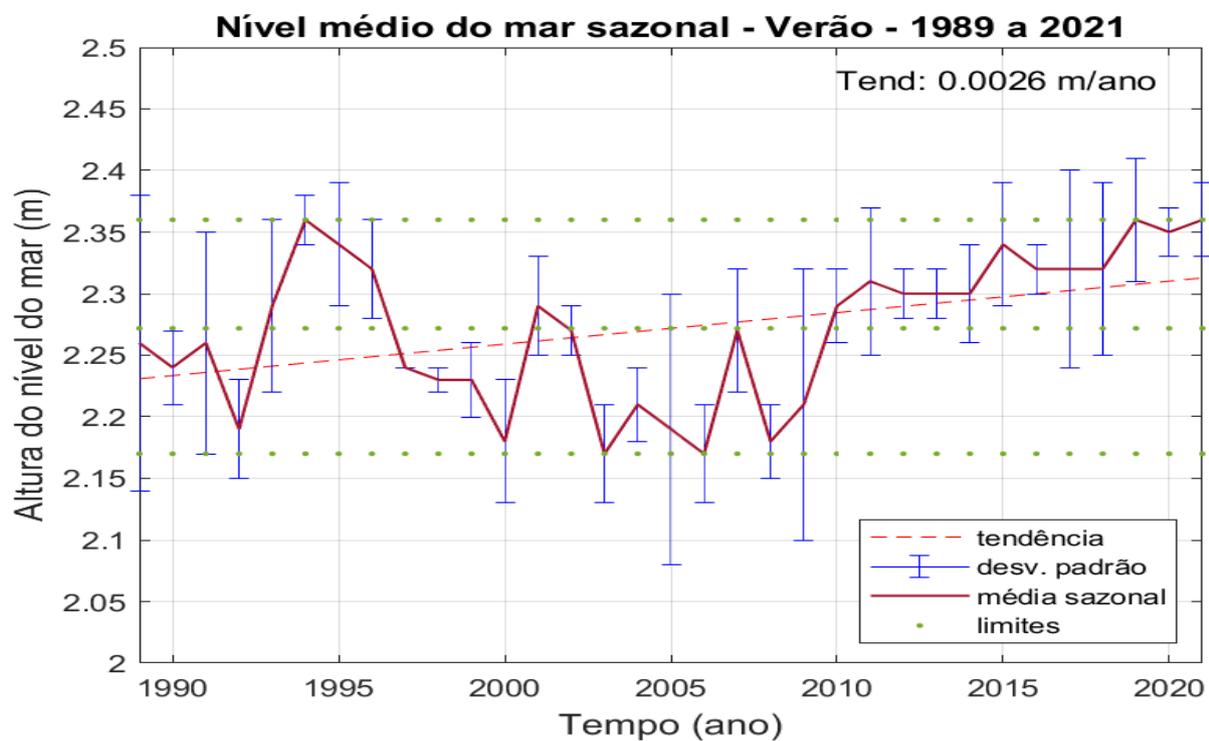


Figura 4.11: Nível médio do mar sazonal para o período do verão (dezembro, janeiro e fevereiro).

Fonte: O Autor (2023)

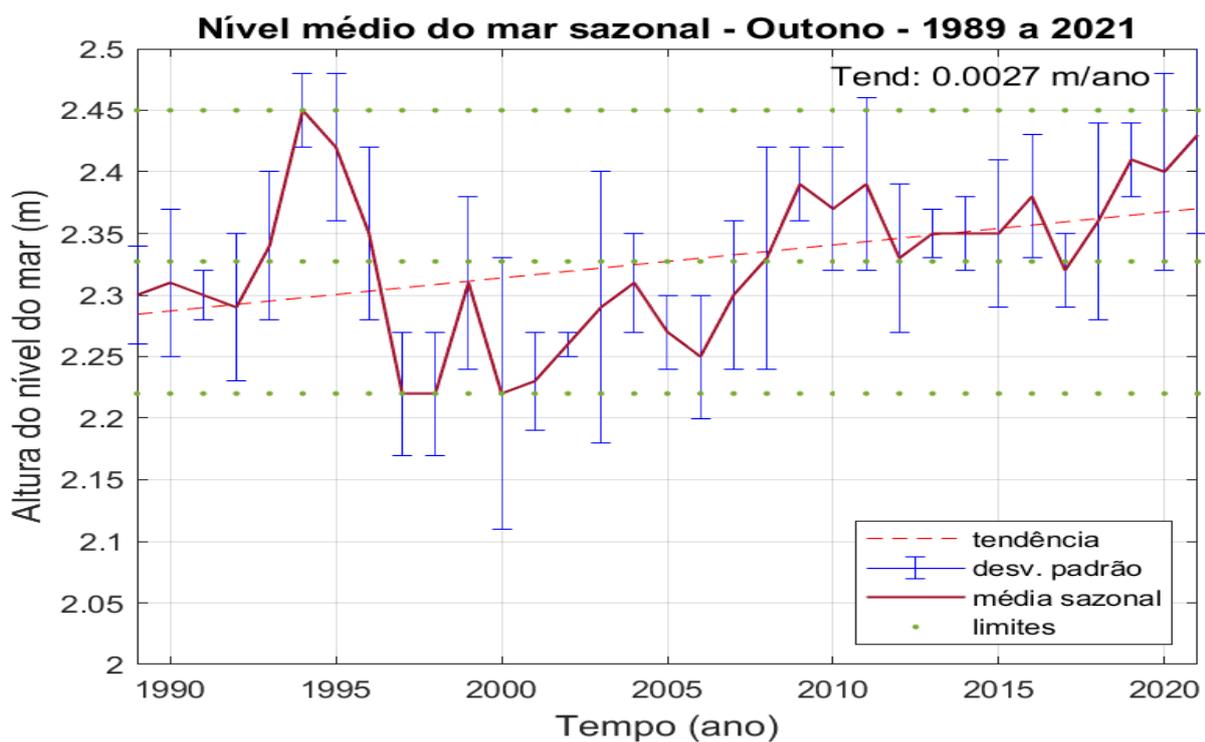


Figura 4.12: Nível médio do mar sazonal para o período do outono (março abril e maio).

Fonte: O Autor (2023)

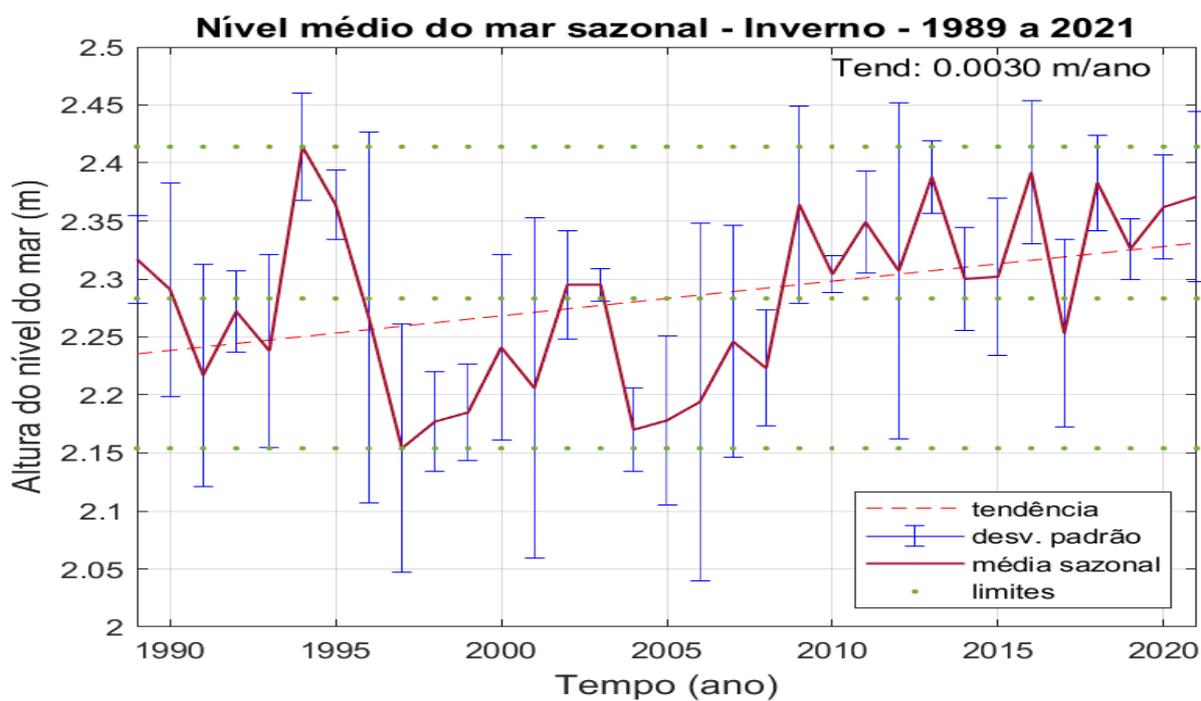


Figura 4.13: Nível médio do mar sazonal para o período do inverno (junho, julho e agosto).

Fonte: O Autor (2023)

### 4.3 Análise harmônica da série temporal

Na etapa de geração da previsão foi preciso, anteriormente, fazer o cálculo das componentes harmônicas para cada ano. Essa parte foi realizada pelo módulo TIDEANL do SLP64. Desta forma são geradas as 60 componentes mais importantes (ou de maior expressão) que foram utilizadas nos cálculos de previsão.

A Tabela 4.3 apresenta a amplitude e a fase para as componentes harmônicas estudadas nesse trabalho. São mostrados os valores referentes ao ano de 2009, o qual foi utilizado como referência para a série residual, e o ano de 2021 a título de atualização da evolução das componentes O1, K1, K2, M2, S2, M4, N2 e Q1. As quatro últimas colunas representam a amplitude (H), a fase (G) a amplitude ajustada ( $H_L$ ) e a fase ajustada ( $G_L$ ) diretamente da análise de mínimos quadrados. A fase é relativa a uma origem de tempo de referência em 00:00h de 01 de janeiro de 2009 e 2021. Vale informar que para a amplitude e a fase já foram aplicadas as chamadas correções nodais. Essas correções permitem que as componentes ajustadas sejam usadas além do período de tempo real utilizados para ajustar as componentes. Cada componente ajustada é, na realidade, a soma de uma componente principal e várias componentes satélite que estão muito próximas em frequência para serem resolvidos na análise de mínimos quadrados. Portanto, os valores de  $H_L$  e  $G_L$  não refletem com precisão a amplitude e a fase da componente principal, mas mostram uma modulação devido aos satélites. Assumindo que a razão é igual à razão das componentes de equilíbrio, é possível corrigir a componente maior para obter a amplitude e a fase que seriam adequadas se os satélites fossem resolvidos.

A Figura 4.14 apresenta os valores evolutivos da amplitude e da fase para as constantes O1, K1, K2, M2, S2, M4, N2 e Q1 bem como a linha de tendência. Os valores das tendências são explicitados na Tabela 4.4.

Pode-se compreender pela análise que as componentes têm tendência positiva a exceção da N2 no que se refere a amplitude. Cabe destaque para as componentes M2 e S2 apresentando as maiores tendências positivas. Já em relação à fase as componentes K2, N2 e Q1 são as únicas que apresentam tendência positiva.

Tabela 4.3: Principais componentes astronômicas de maré, com seus símbolos, frequências angulares, amplitudes e fase.

Nº	Constante Harmônica	Frequência angular (graus/hora)	Período inicial	Período final	Amplitude (cm)	Fase (graus)	Amplitude ajustada (cm)	Fase ajustada (graus)
12	O1	0,039	1/1/2009	31/12/2009	11,02	88,16	12,30	346,08
12	O1	0,039	1/1/2021	31/12/2021	11,07	89,02	12,02	274,57
18	K1	0,042	1/1/2009	31/12/2009	6,17	147,18	6,60	129,53
18	K1	0,042	1/1/2021	31/12/2021	6,14	147,91	6,46	144,99
36	K2	0,084	1/1/2009	31/12/2009	5,54	83,16	6,47	227,22
36	K2	0,084	1/1/2021	31/12/2021	5,82	88,71	6,54	263,27
31	M2	0,081	1/1/2009	31/12/2009	33,79	85,28	33,14	322,93
31	M2	0,081	1/1/2021	31/12/2021	34,42	88,40	33,95	273,91
35	S2	0,083	1/1/2009	31/12/2009	18,74	92,64	18,77	92,75
35	S2	0,083	1/1/2021	31/12/2021	19,08	95,76	19,09	95,63
45	M4	0,161	1/1/2009	31/12/2009	5,24	78,11	5,04	193,41
45	M4	0,161	1/1/2021	31/12/2021	5,61	84,54	5,46	95,57
29	N2	0,079	1/1/2009	31/12/2009	4,75	124,72	4,63	112,95
29	N2	0,079	1/1/2021	31/12/2021	4,36	128,55	4,29	88,58
10	Q1	0,037	1/1/2009	31/12/2009	2,54	64,61	2,80	73,09
10	Q1	0,037	1/1/2021	31/12/2021	3,04	61,13	3,31	20,61

Fonte: O Autor (2022)

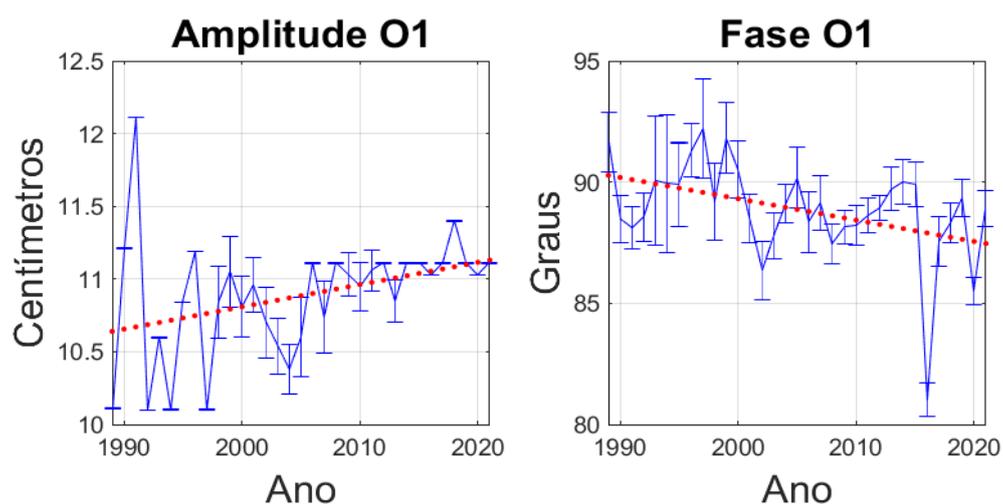


Figura 4.14: continua

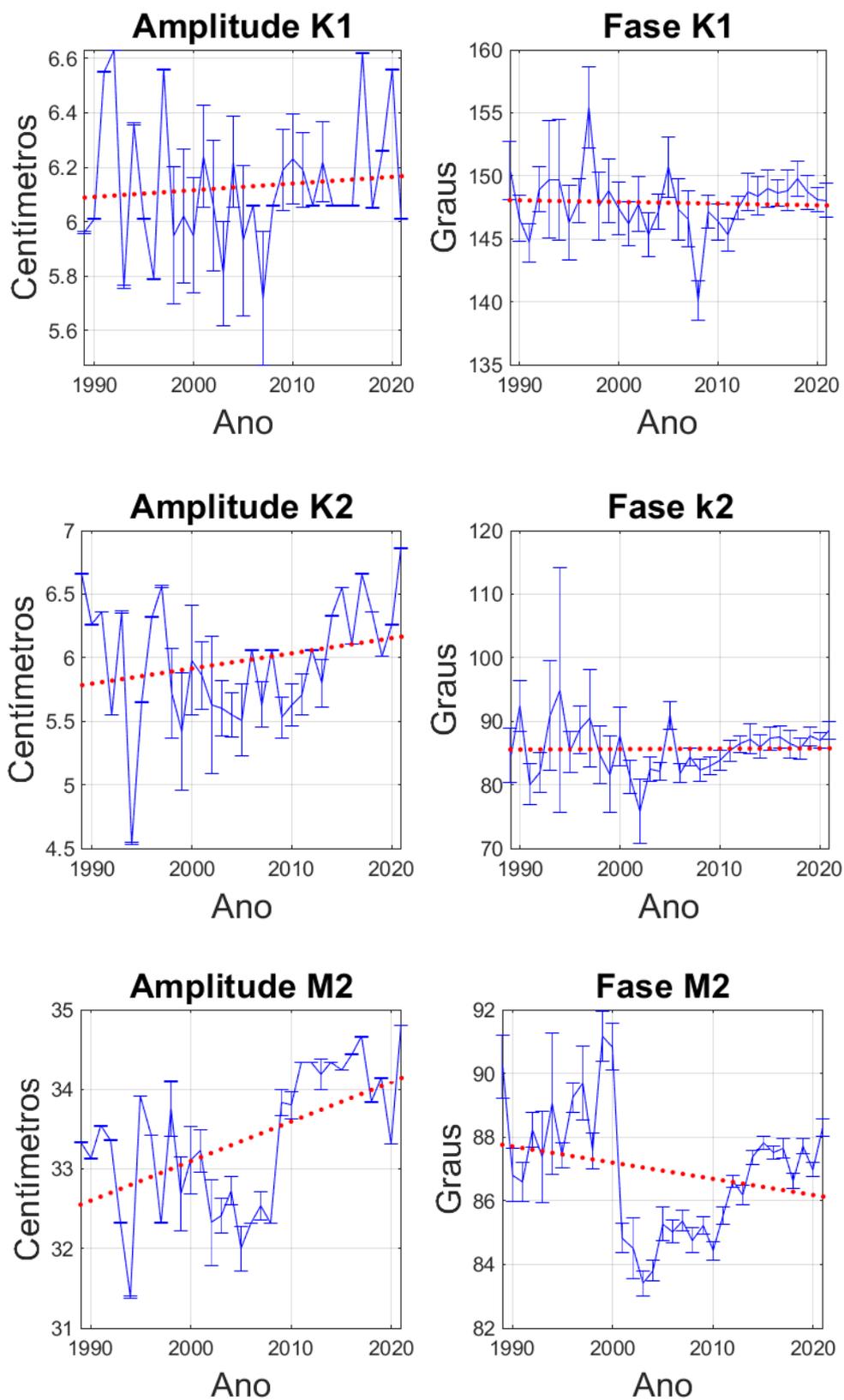


Figura 4.14: continua

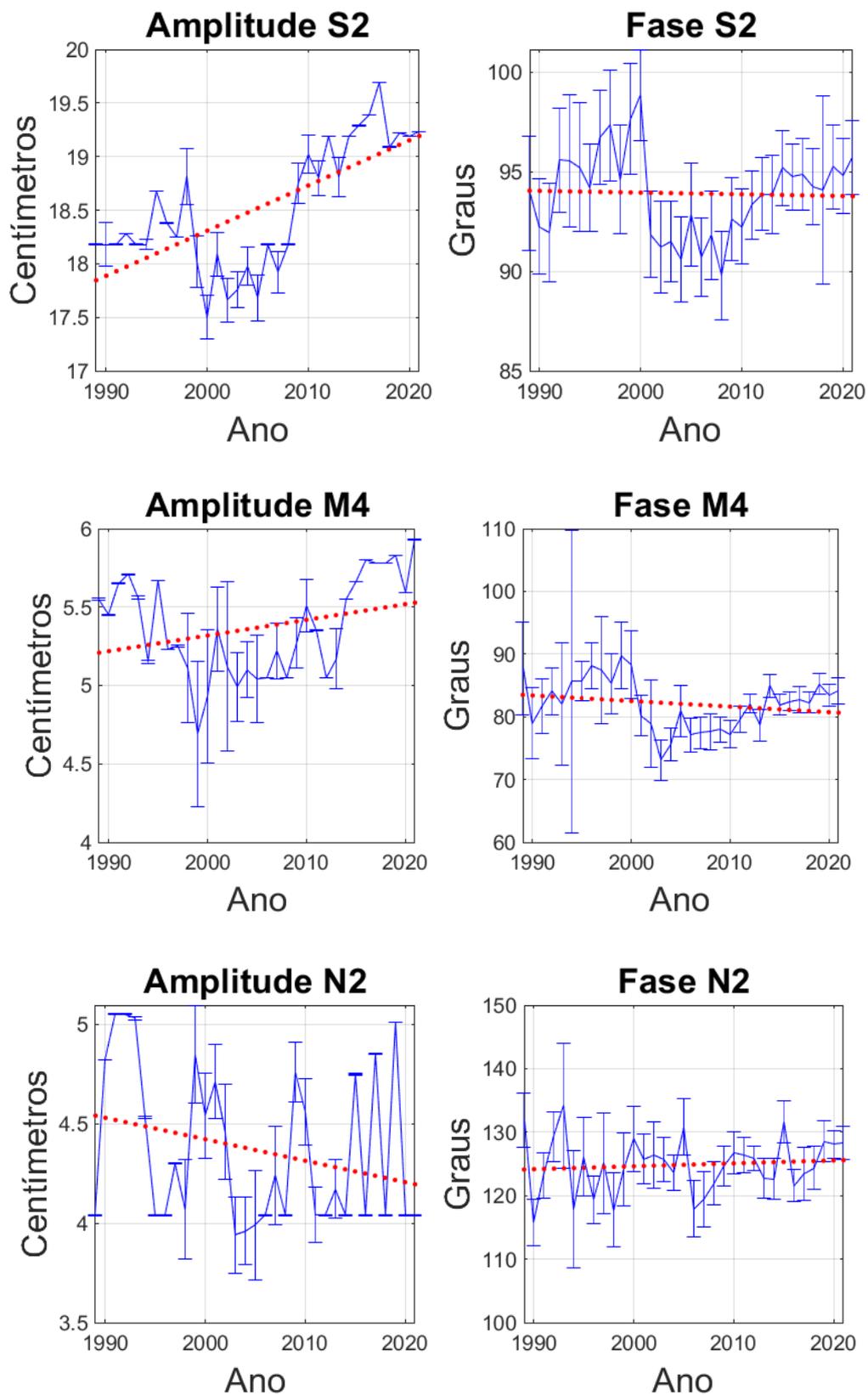


Figura 4.14: continua

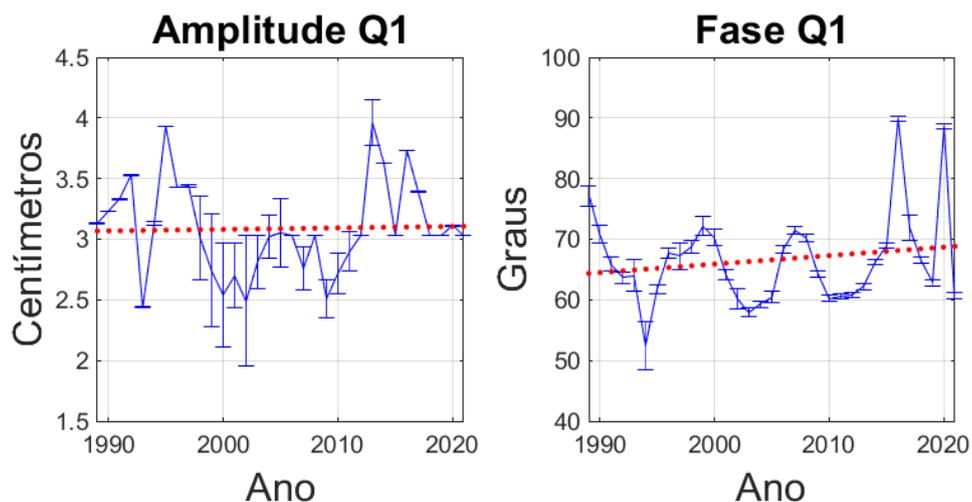


Figura 4.14: Tendência da amplitude e da fase considerando as séries anuais de variação do nível

Fonte: O Autor (2023)

Tabela 4.4: Tendência da série anual para amplitude e fase das principais componentes de maré.

Componente	Tendência	
	Amplitude (H) (cm/ano)	Fase (G) (grau/ano)
O1	0,015	-0,088
K1	0,002	-0,013
K2	0,012	0,006
M2	0,050	-0,050
S2	0,042	-0,009
M4	0,010	-0,089
N2	-0,011	0,046
Q1	0,001	0,014

Fonte: O Autor (2023)

A Figura 4.15 mostra os valores da amplitude e da fase assim como a tendência das componentes citadas anteriormente para séries de 19 anos. Nesse caso, no eixo horizontal da citada figura contém as datas de referência inicial de cada série já que os períodos compreendem os anos de 1989-2007, 1990-2009 ... 2002-2020, 2003-2021 totalizando 15 períodos.

As componentes harmônicas nessa etapa foram geradas por meio do programa PACMARÉ módulo LONGSERIE (Franco, 2009) com probabilidade de rejeição de pequenas componentes de 95%. Ao todo foram geradas para cada período analisado cerca

de 1014 componentes; no entanto o foco do trabalho é analisar as 8 principais, isto é, O1, K1, K2, M2, S2, M4, N2 e Q1. A Tabela 4.5 apresenta os valores das tendências para a amplitude e a fase de cada constante referentes a série de períodos de 19 anos.

A maior tendência positiva para a amplitude é observada na componente M2 (0,090 cm/ano) seguido da componente S2 (0,049 cm/ano). Em contraponto às análises anuais, as séries de 19 anos mostram, em sua maioria, tendências de amplitude mais acentuadas e positivas. Em relação à fase também apresentam tendências mais acentuadas que as séries anuais.

Comparando as duas séries, no que tange às tendências encontradas, observa-se que ambas apresentam valores pouco discrepantes entre si para cada componente. Os maiores valores indicados para amplitude são das componentes M2 e S2: +0,050 cm/ano e +0,042 cm/ano para a série anual e +0,090 cm/ano e +0,049 cm/ano para a série de 19 anos. A exceção da componente N2 da série anual, todas as demais apresentam tendência positiva.

No que diz respeito a fase é notado uma taxa de tendência com discrepância significativa, em sua maioria negativa.. O maior valor encontrado foi da componente M4 (-0,089 graus/ano e -0,193 grau/ano para as séries anuais e de 19 anos, respectivamente).

Dentre as causas apontadas para as diferenças encontradas nas séries Harari e Camargo (1995) explicam que estão relacionados ao processo de dragagem, que são recorrentes em portos, eventos climáticos, como os já citados e estudados neste trabalho, além de efeitos meteorológicos de longo termo que podem afetar os parâmetros de maré. Ademais, Harari, França e Camargo (2013) sustentam que as componentes M2 e S2 devem ser analisadas cuidadosamente considerando séries com resolução temporal de décadas para exprimirem uma significativa amplitude e mudança de fase, pois assim conseguem melhor evidenciar as tendências do nível relativo do mar para a costa brasileira.

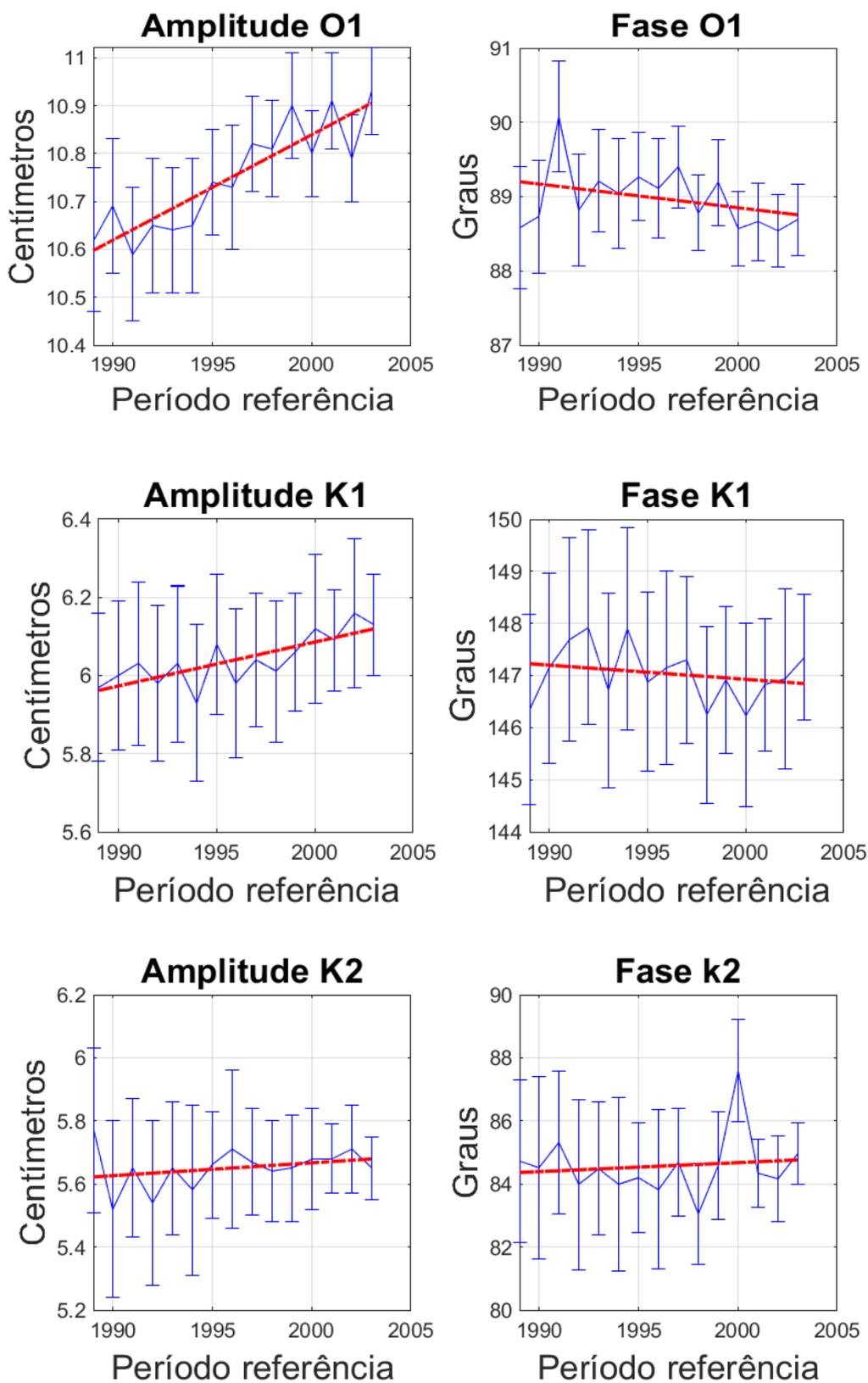


Figura 4.15: continua

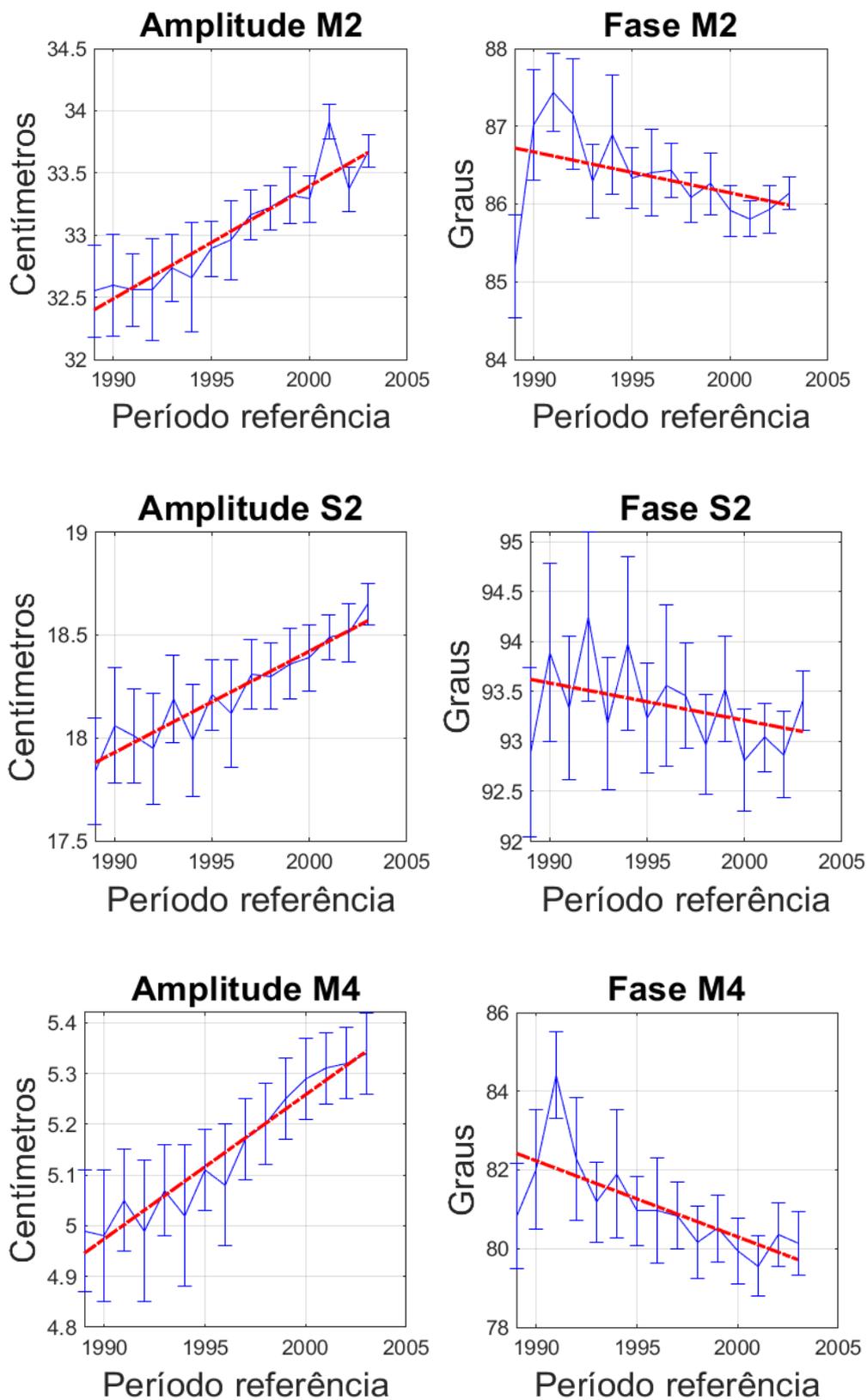


Figura 4.15: continua

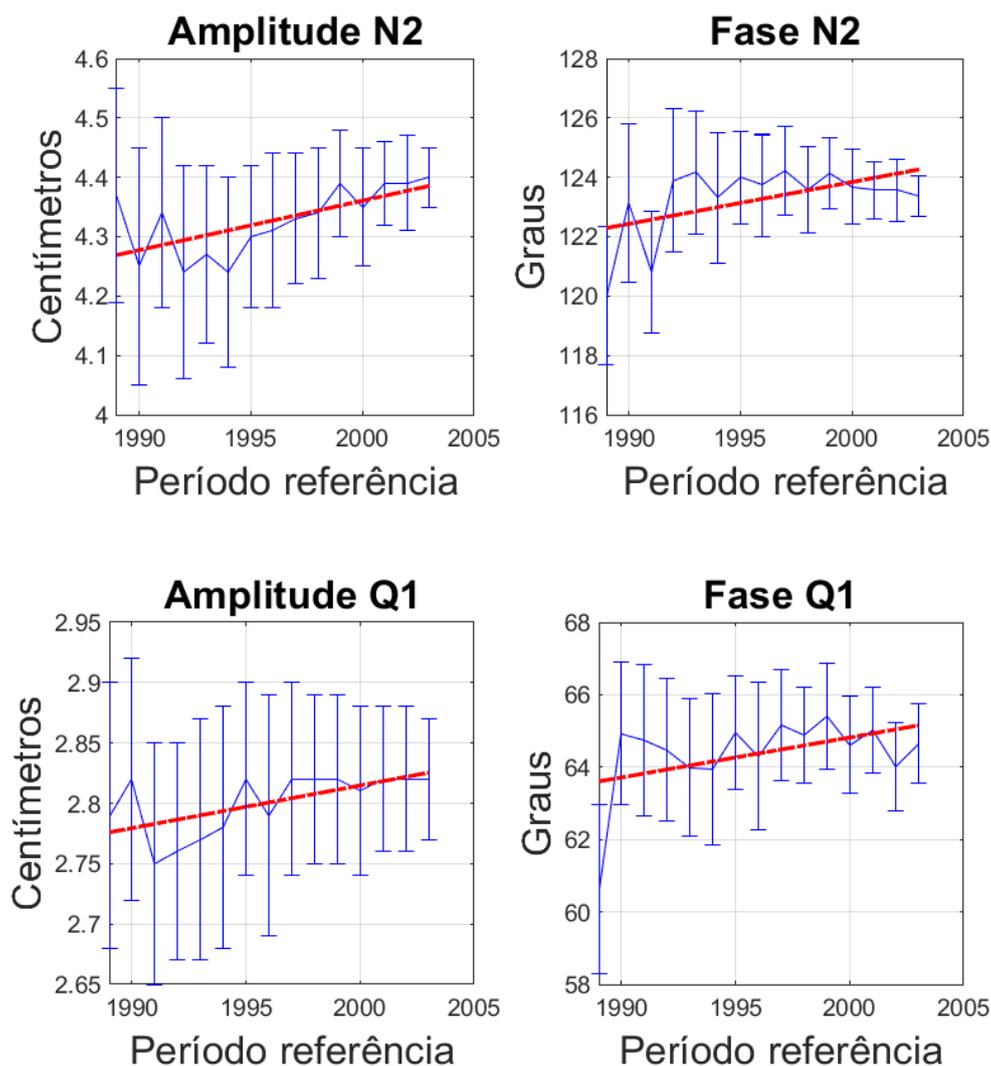


Figura 4.15: Tendência da amplitude e da fase considerando as séries de 19 anos de variação do nível do mar.

Fonte: O Autor (2023)

Tabela 4.5: Tendência das componentes de maré da série de 19 anos para amplitude e fase.

Componente	Tendência	
	Amplitude (H) (cm/ano)	Fase (G) (grau/ano)
O1	0,022	-0,032
K1	0,011	-0,027
K2	0,004	0,029
M2	0,090	-0,053
S2	0,049	-0,038
M4	0,028	-0,193
N2	0,008	0,141
Q1	0,004	0,110

Fonte: O Autor (2023)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou as características de uma série temporal do nível do mar e a presença de eventos extremos para região da Baía de Guanabara tomando como lócus de observação a estação maregráfica situada na Ponta da Armação no município de Niterói-RJ.

As análises realizadas permitiram apontar aspectos importantes acerca da qualidade dos dados existentes nos bancos oceanográficos notadamente, no que diz respeito ao controle temporal com procedimentos que garantem segurança e qualidade das informações. Ficou evidente que a série estudada necessita de uma minuciosa análise documental para poder aprimorar os resultados estimados. Tais informações permitem correlacionar e vincular os diferentes componentes de uma estação maregráfica para assegurar os resultados mais consistentes .

Apesar de não se ter os elementos desejáveis de controle, a depuração e pré-análise das observações mostraram que a tendência de evolução do nível médio do mar ( $2,726 \text{ mm/ano} \pm 0,027 \text{ mm}$  ) concorda com o que está sendo estimado pelas séries de satélites altimétricos conforme os estudos de Nerem et al. (2018), dentre outros autores.

Por meio da análise dos resíduos foi possível verificar anomalias na série o que corroborou com o processo de separação de eventos que excedem os  $\pm 2$  desvios padrão e  $\pm 3$  desvios padrão usados como limitantes da averiguação. Ficou evidente que os eventos extremos excedentes a  $\pm 2$  desvios padrão são mais frequentes durante o outono, representando 54,62% do total, seguidos pelo inverno, com 34,63% de ocorrência. Esses eventos de sobre-elevação do nível do mar foram mais pronunciados no período compreendido entre os anos de 2018 a 2021. Por outro lado, o inverno apresentou a maior proporção de eventos de rebaixamento, totalizando 49,09%, com a primavera registrando 34,08% dos casos. Notavelmente, os eventos mais intensos foram observados entre os anos de 1990 a 1995.

Ao considerar eventos extremos excedentes a  $\pm 3$  desvios padrão, verificou-se que o outono registrou a maior proporção de eventos positivos, correspondendo a 66,20% do total, enquanto o inverno apresentou a predominância de eventos negativos, totalizando 44,33%. Em ambos os casos, é importante ressaltar que a maré meteorológica medida excedeu  $\pm 0,4 \text{ m}$ . Esses resultados destacam a importância de compreender a sazonalidade dos eventos extremos relacionados ao nível do mar que têm provocado ressacas e inundações costeiras

na orla da cidade de Niterói -RJ e outras porções da Baía de Guanabara, fato que chama atenção para um melhor planejamento frente a esses eventos.

A análise das componentes harmônicas revelou a presença de tendências positivas nas amplitudes das séries anuais em ambos os casos estudados. Especificamente, foram observadas tendências mais pronunciadas nas componentes M2 e S2. No geral, as tendências estimadas para as demais componentes apresentaram uma magnitude média de 0,011 cm/ano. Em contrapartida, em relação à fase, as componentes que demonstraram as maiores tendências foram M4, N2 e Q1 (-0,193 cm/ano, 0,141 cm/ano e 0,110 cm/ano, respectivamente) para as séries anuais. Já para as séries de 19 anos, as componentes O1, M4 e N2 (-0,088 cm/ano, -0,089 cm/ano e 0,046 cm/ano, respectivamente) exibiram as maiores taxas de tendências. Esses resultados apontam para a presença de tendências significativas nas amplitudes e fases das componentes harmônicas, com variações específicas dependendo da série temporal considerada.

Para trabalhos futuros sugere-se que sejam feitos testes de Van de Casteele no sítio em questão e a partir daí realize-se uma depuração de toda a série. Ademais, é deveras importante que seja realizada uma análise de correlação com as séries de satélites altimétricos. Adicionalmente, faz-se fundamental uma comparação aprofundada entre a série aqui estudada e a série da estação maregráfica da Ilha Fiscal-RJ a fim de conhecer melhor a dinâmica da Baía de Guanabara nos aspectos abordados neste trabalho.

Além disso, recomenda-se a instalação de uma estação GNSS próxima à estação maregráfica da Ponta da Armação para que se possa determinar, em tempo, a diferença entre a movimentação oceânica e a crustal.

## REFERÊNCIAS

- ANTUNES, C.; GODINHO, J. M. Estudo da análise harmónica da maré aplicada ao marégrafo de Cascais. In: Actas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, p. 5-6, 2011. Disponível em: <[https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~cmantunes/artigos/CNCG2011\\_Artigo\\_Analise%20da%20mare\\_CA\\_.pdf](https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~cmantunes/artigos/CNCG2011_Artigo_Analise%20da%20mare_CA_.pdf)>. Acesso em: 21 jan. 2023
- AVISO. Satellite Altimetry Data. Mean Sea Surface Description. 2020. Disponível em: <<https://www.aviso.altimetry.fr/en/techniques/altimetry/principle/basicprinciple.html>>. Acesso em: 18 jan. 2021.
- BRASIL. Portaria nº 76, de 26 de março de 2018. Institui o Procosta. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1, n. 60, p. 161, 2018.
- CALDWELL, P. Hourly Sea Level Data Processing and Quality Control Software: SLP64 User Manual. Honolulu: University of Hawaii Sea Level Center, 2014. v. 4. 67 p.
- CAMARGO, R. Oscilações do nível do mar no Oeste do Atlântico Sul geradas por sistemas meteorológicos de escala sinótica: uma abordagem numérica para a descrição de suas características. 2017. 85 p. Tese de Livre-Docência – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- CAMARGO, R; HARARI. In: CASTELLO, J.P; KRUNG, L.C J (Orgs). Introdução às Ciências do Mar. Pelotas: 2017. cap 9, p 226-255
- DE PAULA, Davis Pereira (Ed.). Ressacas do mar: temporais e gestão costeira. Premium Editora, 2015.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). Descrição de Estação Maregráfica. 2020. Disponível em: <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/boxestacoesmaregraficas/estacaomare.html>>. Acesso em: 18 jan. 2023.
- DRANGE, H. Tidal Dynamics and Sea Level Variations. Notes to GEOF346. Geophysical Institute, University of Bergen. 2022. 129P. Disponível em: <https://folk.uib.no/ngfhd/Teaching/Div/geof346.pdf>. Acesso em: 27 set. 2022.
- DUTRA, F R.L.S. Marés Meteorológicas e Episódios de Erosão Costeira Severa no Litoral de Salvador/BA. 166 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) .Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/handle/ri/23052>>. Acesso em: 21 jan. 2023
- FAGUNDES, M.A.R. Projeto e validação de sensor GPS/GNSS refletométrico de código aberto e de baixo custo para monitoramento da altura da superfície da água. 104.f Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/210457>>. Acesso em: 21 jan. 2023
- FLATHER, R. A. Storm Surges. In Encyclopedia of Ocean Sciences. Edited by Steele, J. H.; Turekian, K. K.; Thorpe, S.A., p. 2882-2892, 2001.

- FRANCO, A. dos S. Marés: fundamentos, análise e previsão. 2. ed. Niterói: Marinha do Brasil, Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN, 2009. 344 p.
- GIEHL, S. Determinação de movimentos verticais da crosta por meio da integração de observações maregráficas e da altimetria por satélite no Datum Vertical Brasileiro de Imbituba no período de 2002 a 2015. 2020. 109 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2020. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/69971>>. Acesso em: 21 jan. 2023
- GIEHL, S.; DALAZOANA, R.; SANTANA, T. A. Comparação Absoluta entre Observações do Satélite Sentinel-3A e dos Marégrafos da RMPG em Imbituba, Arraial do Cabo, Salvador, Fortaleza e Santana. *Revista Brasileira de Cartografia*, [S. l.], v. 74, n. 4, p. 911–926, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n4-67213. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/67213>. Acesso em: 27 dez. 2022.
- GREGORY, J M. et al. Concepts and terminology for sea level: Mean, variability and change, both local and global. *Surveys in Geophysics*, v. 40, n. 6, p. 1251-1289, 2019.
- HARARI, J. Análise de marés oceânicas. Notas de aulas. Curso de Especialização: medição, análise, previsão e modelagem do nível do mar da Universidade de São Paulo. 2021.
- HARARI, J.; CAMARGO, R. Tides and mean sea level variabilities in Santos (SP), 1944 to 1989. Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da USP. 1995. n° 36,. 15 p..
- HARARI, J.; FRANÇA, C.A.S.; CAMARGO, R. Long-term variability of tidal and mean sea level componentes on the brazilian coast. *Revista Brasileira de Geofísica*. 2013.
- HARARI, J; MESQUITA, A.B de; CAMARGO, R. Marés e nível médio do mar. In: HARARI, Joseph (org.). *Noções de Oceanografia*. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 13: p. 277-296.
- HOLTHUIJSEN, L. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 2007.
- IBGE. Instruções técnicas para controle geodésico de estações maregráficas - CGEM e sua vinculação vertical ao Sistema Geodésico Brasileiro - SGB. Rio de Janeiro, 2010. 36 p. (Manuais técnicos em Geociências, n. 11). Acompanha 1 CD-ROM. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/metodos-e-outros-documentos-de-referencia/revista-e-manuais-tecnicos/15826-manual-tecnico-em-geociencias.html?edicao=16446&t=publicacoes>. Acesso em: dez. 2022.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Atlas das zonas costeiras e oceânicas do Brasil. 1. ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, 2011. 176 p. ISBN 978-85-240-4219-5. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv55263.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Monitoramento da variação do nível médio do mar nas estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia: 2001-2020 / IBGE, Coordenação de Geodésia. - Rio de Janeiro: IBGE, 2021. 121p. Disponível em: < <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101890>>. Acesso em: 26 jan. 2023

- INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION (IOC). Manual on Sea Level Measurement and Interpretation - An update to 2006. Paris: UNESCO-IOC, Manuals and Guides N 14, 2006. v. 4. 87 p. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000147773>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- INTERNATIONAL PANEL CLIMATE CHANGE (IPCC). 2022. Summary for policy makers. In: Climate change 2022: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; p. 4–53. doi:10.1017/9781009157926.001.
- LUZ, R. T. Estratégias para Modernização da Componente Vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua Integração ao SIRGAS. 207 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/17075>>. Acesso em: 10 jun. 2022.
- MARONE, E.; CAMARGO, R.. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: O evento de 18/08/93, Nerítica, 8 (1-2), 73-85 p., 1994.
- MELO FILHO, E. Maré meteorológica na costa brasileira. Tese (Professor Titular), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande. 2017. 328p. Disponível em: [https://sistemas.furg.br/sistemas/sab/arquivos/conteudo\\_digital/000008808.pdf](https://sistemas.furg.br/sistemas/sab/arquivos/conteudo_digital/000008808.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2023
- MENDES, A. L. T. Investigação sobre a dispersão direcional de ondas de gravidade na Baía de Campos, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. VII, 91p. 29,7 cm. COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Oceânica, 2005. Disponível em: <https://buscaintegrada.ufrj.br/Record/aleph-UFR01-000656326/Preview>>. Acesso em: 20 fev. 2023
- MIGUEZ, B. M.; TESTUT, L.; WÖPPELMANN, G. The Van de Casteele testre visited: an efficient approach to tide gauge error characterization. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Boston: American Meteorological Society - AMS, v. 25, n. 7, p. 1238-1244, July 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2007JTECHO554.1>.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA)). Procosta – Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa. Brasília, 2018. 36 p. ISBN: 978-85-7738-101-2. Disponível em: [https://antigo.mma.gov.br/images/arquivos/gestao\\_territorial/Procosta/PROCOSTA-versao\\_digital.pdf](https://antigo.mma.gov.br/images/arquivos/gestao_territorial/Procosta/PROCOSTA-versao_digital.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2023
- NEREM, R. S.; BECKLEY, B. D.; FASULLO, J. T.; HAMLINGTON, B. D.; MASTERS, D.; MITCHUM, G. T. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. Proceedings of the National Academy of Sciences, National Academy of Sciences, v. 115, n. 9, p. 2022–2025, Feb. 2018. ISSN 0027-8424. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>>. Acesso em: 16 jun. de 2022.

- PICKERING, M. D. et al. The impact of future sea-level rise on the European Shelf tides. *Continental Shelf Research*, v. 35, p. 1–15, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2011.11.011>>.
- PUGH, D. T.; WOODWORTH, P. *Sea Level Science understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Liverpool: Cambridge University Press, abr. 2014. p. 409. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139235778>
- SANTANA, F, R. Análise da incerteza temporal e conceitual do nível de redução de marés: um estudo de caso para a ilha fiscal. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de São Paulo. 2022, 52p.
- SANTOS, E.G. Integração entre a Rede Altimétrica de Alta Precisão, a Rede Geodésica de Referência Costeira e os Níveis de Referência Maregráficos. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cartográfica). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2021.
- SEA LEVEL RESEARCH GROUP. 2020\_rel1: global mean sea level (seasonal signal removed). Colorado: University of Colorado, [2021]. Disponível em: <https://sealevel.colorado.edu/data/2020rel1-global-mean-sea-levelseasonal-signals-removed>. Acesso em: ago. 2022.
- SIMON, B. *Coastal Tides*. Prince de Monaco. 413p.
- SOARES, S.; SANTOS, E. G.; LUZ, R. T. Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC) como insumo para integração de altitudes e profundidades: resultados preliminares. In: VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife:UFPE, 2018a. p. 742–751. Disponível em: <<https://www.ufpe.br/documents/39451/1384233/Anais+do+VII+SIMGEO/2ff23c73-935d-4418-8728-feb24630f34>>. Acesso em: 20 dez. 2022.
- TECCHIO, R. Caracterização de eventos extremos ocasionados por maré meteorológica e determinação da variação do nível médio do mar e das componentes de maré na baía de Guanabara (Rio de Janeiro), no período de 1990 a 2021. Trabalho de conclusão de Curso. Universidade de São Paulo. 2022. 64 p.
- UNESCO. Intergovernmental Oceanographic Commission; FLANDERS MARINE INSTITUTE. *Sea level station monitoring facility*. Paris: IOC; Ostend: Vliz, [2021]. Disponível em: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>. Acesso em: ago. 2022.
- UNIVERSITY OF COLORADO. 2021 rel2: Global Mean Sea Level (Seasonal Signals Removed). 2021. Disponível em: <<https://sealevel.colorado.edu/data/2021rel2-global-mean-sea-level-seasonal-signals-removed>>. Acesso em: 01 set. 2021.
- ZERVAS, C. *Sea level variations of the United States 1854-1999*. Silver Spring: National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA, July 2001. 186 p. (NOAA technical report NOS CO-OPS, 36). Disponível em: [https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/NOAA\\_Technical\\_Report\\_NOS\\_COOP\\_S\\_036.pdf](https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/NOAA_Technical_Report_NOS_COOP_S_036.pdf) Acesso em: dez. 2022.
- ZERVAS, C. *Sea level variations of the United States 1854-2006*. Silver Spring: National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA, Dec.2009. [194 p.]. (NOAA

technical report NOS CO-OPS, 53). Disponível em:  
[https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Tech\\_rpt\\_53.pdf](https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Tech_rpt_53.pdf). Acesso em: dez 2022.