



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE OCEANOGRAFIA

GABRIEL LUCA PUGLIESE BORGES

**A VARIABILIDADE DO NÍVEL MÉDIO DO MAR EM SALVADOR E SUA
TENDÊNCIA DE LONGO PRAZO.**

Salvador

2024

GABRIEL LUCA PUGLIESE BORGES

**A VARIABILIDADE DO NÍVEL MÉDIO DO MAR EM SALVADOR E SUA
TENDÊNCIA DE LONGO PRAZO.**

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia, no Instituto de Geociências, na Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme
Camargo Lessa

Salvador

2024

GABRIEL LUCA PUGLIESE BORGES

**A VARIABILIDADE DO NÍVEL MÉDIO DO MAR EM SALVADOR E SUA
TENDÊNCIA DE LONGO PRAZO.**

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia, no Instituto de Geociências, na Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Aprovado em: ____/____/____

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais, Henrique Borges e Luciane Pugliese, pelo apoio incondicional desde o início da minha vida, em que nunca me faltou nada. Além deles, expresso minha profunda gratidão aos meus tios, Marcelo e Ana Cristina, que sempre me trataram como um filho e me apoiaram em todos os momentos difíceis, oferecendo suporte e servindo de alicerce ao longo da minha trajetória. Aos meus primos-irmãos, Marcelo e Maurício, por me ensinarem, me incentivarem a seguir o que amo e me acolherem nos momentos de tristeza e incerteza, o meu muito obrigado. Ao meu eterno e querido avô, Luiz Pugliese, pelas longas conversas sobre a brevidade e os encantos da vida, e à minha querida e carinhosa avó, Denise Borges, que sempre me deu todo o suporte e amor do mundo: devo a vocês a vida! Prometo trabalhar incansavelmente para, no futuro, retribuir ao menos 10% de tudo o que me proporcionaram. Gostaria de agradecer, particularmente, à minha namorada Liz, que, de forma despretensiosa, chegou e transformou minha vida para melhor, incentivando e apoiando-me todos os dias. Obrigado por tanto carinho e amor, minha linda! Aos meus irmãos, Izaac e Gustavo, pela parceria de sempre, e à minha madrastra, Patrícia, também deixo meu agradecimento. Ao meu professor e orientador ao longo de toda a graduação, Guilherme Lessa, com quem aprendi não apenas sobre oceanografia, mas também sobre postura profissional, responsabilidade, cultura e a importância de valorizar o que realmente importa na vida. Obrigado, Gui! Você me inspira como pessoa, profissional e amigo. Desejo a você muita alegria e tudo de melhor que este mundo incrível possa oferecer. São incontáveis as pessoas importantes em minha vida, e jamais caberiam os nomes de todas em apenas uma página. Aos meus amigos de sempre e colegas da faculdade, sem vocês, eu jamais estaria no lugar em que estou hoje nem seria quem sou. Foram centenas de mergulhos e horas embarcado, além de milhares de horas em laboratório, que levarei com muito carinho para o resto da vida. Meu mais sincero agradecimento a todos.

RESUMO

Este estudo utiliza 19 anos de medições do nível da água realizadas pelo Programa de Observação Global do Nível do Mar (GLOSS), com o objetivo de quantificar a variabilidade temporal do nível da água e identificar tendências de longo prazo do nível médio do mar na cidade de Salvador e ao longo da Baía de Todos os Santos. Análises harmônicas, estatísticas e espectrais, complementadas por modelagem numérica da hidrodinâmica, mostram que o nível do mar está subindo a uma taxa de 2,11 mm/ano, uma taxa menor que a média global de 3,7 mm/ano para o mesmo período, mas em concordância com as taxas regionais calculadas pelo Programa Mercator. Observa-se uma importante variabilidade sazonal, com níveis médios do mar mais elevados, de aproximadamente + 10 cm, em abril e maio, associados a fatores meteorológicos. Os dados também mostraram um aumento na frequência e severidade de eventos extremos de elevação do nível do mar, indicando a necessidade de medidas de adaptação e mitigação, como a construção de barreiras costeiras e a relocação de comunidades vulneráveis. Simulações numéricas mostraram que a geomorfologia da Baía de Todos os Santos amplifica tanto a amplitude da maré como a superelevação do nível da água no estuário. Essa amplificação aumenta o risco de inundações em áreas urbanas costeiras, principalmente em regiões de baixa altitude e com infraestrutura precária. Este estudo contribui para o entendimento da variabilidade do nível do mar em uma região de grande importância econômica e ambiental, fornecendo subsídios para o planejamento costeiro e a gestão dos riscos associados às mudanças climáticas em Salvador.

Palavras-Chaves: Nível do mar, Baía de Todos os Santos, GLOSS, Variabilidade Temporal, Mudanças Climáticas

ABSTRACT

This study uses 19 years of water level measurements carried out by the Global Sea Level Observation Program (GLOSS), with the aim of quantifying the temporal variability of the water level and identifying long-term trends of the mean sea level in Salvador and along Todos os Santos Bay. Harmonic, statistical and spectral analyses, complemented by numerical modeling of hydrodynamics, show that the sea level is rising at a rate of 2.11 mm/year, a rate smaller than the global average of 3.7 mm/year for the same period but in agreement with regional rates calculated by the Mercator Program. Important seasonal variability is observed, with higher mean sea levels of approximately + 10 cm occurring in April and May, associated with meteorological factors. The data also showed an increase in the frequency and severity of extreme high sea level events, indicating the need for adaptation and mitigation measures, such as the construction of coastal barriers and the relocation of vulnerable communities. Numerical simulations showed that the geomorphology of Todos os Santos Bay amplifies both the tide range and the water level super-elevation in the estuary. This amplification increases the risk of flooding in coastal urban areas, particularly in low-elevation regions with poor infrastructure. This study contributes to the understanding of sea level variability in a region of high economic and environmental importance, providing subsidies for coastal planning and the management of risks associated with climate change in Salvador.

Keywords: Sea Level, Todos os Santos Bay, GLOSS, Temporal Variability, Climate Changes

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição das estações e cálculos estatísticos realizados a fim de estabelecer os comparativos entre os dados observados e os modelados.	22
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tendências do nível do mar (em mm/ano) observadas por altímetros de satélite no oceano global durante o período 1993 - 2023.	12
Figura 2 – Evolução diária do nível médio global do mar 1993 - 2023.	12
Figura 3 - Mapa da área de estudo: Salvador e a Baía de Todos os Santos com contornos batimétricos.	14
Figura 4: Médias mensais entre 2004 e 2009 da distribuição dos ventos 10 m acima do nível do mar (vetores) derivados do QuickSCAT (IFREMER, 2011), para os meses de (a) janeiro e (b) julho.	15
Figura 5 – A) Estação Maregráfica situada na Capitania dos Portos, em Salvador; B) Instrumentos de medição do nível d'água da estação maregráfica de Salvador. (1) Marégrafo de autonomia semanal. (2) Marégrafo digital com sistema encoder e radar acoplado.	16
Figura 6: Relações entre as componentes harmônicas M2 e M4.	18
Figura 7: A) Grade utilizadas nas simulações.	20
Figura 8: Mapa da Baía de Todos os Santos com estações de validação do modelo e estações para investigação da propagação da maré meteorológica	21
Figura 9: Dados observados sobrepostos pelos dados extraídos do Regional Ocean Modeling System (ROMS), sob a mesma coordenada, para alguns trechos da Baía de Todos os Santos.	21
Figura 10: Série temporal observada de nível do mar extraída da estação maregráfica do GLOSS, localizada próxima ao Porto de Salvador.	22
Figura 10: Série temporal observada de vento extraída da estação do CCMP.	23
Figura 11: Médias mensais da componente ao longo da costa do vento.	23
Figura 12: Médias anuais da componente longitudinal do vento (CCMP). Ajuste polinomial de 4ª ordem.	24

Figura 13: Climatologia mensal da componente longitudinal a costa do vento (CCMP)....	25
Figura 14: Série temporal observada de pressão atmosférica extraída da estação do INMET, localizada na entrada da Baía de Todos os Santos.	25
Figura 15: Médias mensais da Pressão Atmosférica.	26
Figura 16: Climatologia mensal da Pressão Atmosférica.	26
Figura 17: Série temporal completa do nível do mar na estação GLOSS.	27
Figura 18: Nível do Mar versus Vento Longitudinal. Médias Mensais.	28
Figura 19: Histograma de frequência das alturas de maré.	28
Figura 24: Climatologia mensal da altura de maré, a fim de se observar o comportamento médio das alturas para cada mês do ano, ao longo dos últimos 20 anos.	29
Figura 24: Assimetrias de maré e alturas entre baixa-mar e preamar e preamar e baixa-mar, como indicado no desenho ao lado dos gráficos. Ao longo do eixo x, quanto mais à direita, mais próximo aos momentos de sizígia.	30
Figura 24: Amplitudes das componentes harmônicas semi-diurnas M2 e S2 e diurnas O1 e K1 ao longo dos anos. Estação GLOSS.	31
Figura 24: Amplitudes das componentes harmônicas M4, MS4 e MN4 ao longo dos anos. Estação GLOSS.	32
Figura 25: A) Variação da razão das amplitudes das componentes harmônicas M4 e M2, que indica o grau de distorção da onda de maré. B) Variação da relação de fase entre as duas componentes, que indica o sentido da assimetria.	33
Figura 26: Fase (2.M2)-M4 –caracterizando a assimetria da maré - contra a amplitude M4/M2 – caracterizando a distorção da onda de maré.	34
Figura 27: Alturas das ondas de baixa frequência, banda infra-mareal.....	35
Figura 28: Climatologia mensal das alturas das ondas de baixa frequência, banda infra-mareal.	35
Figura 29: Gráfico da curva de permanência de nível entre os anos de 2005-2022.	36
Figura 30: Curva de permanência salientando o nonagésimo, quinquagésimo e o décimo percentil.	37
Figura 31: Tempo acumulado mensal com nível superior a 3,37 m entre os anos de 2005 e 2022.	38
Figura 32: Tempo, em horas, acumulado anual com nível superior a 3,37 m entre os anos	

de 2005 e 2022.	39
Figura 33: Climatologia mensal do nível médio do mar para a estação GLOSS.	39
Figura 34: Climatologia mensal da maré meteorológica.	40
Figura 35: Valores mensais médios do nível na estação do GLOSS, situada no Porto de Salvador. Método de Mann-Kendall.	41
Figura 36: Valores médios anuais, entre 2005 e 2023, do nível do mar na estação do GLOSS, situada no Porto de Salvador.	41
Figura 37: Diferença entre o nível das preamares do ROMS e ASTRONÔMICO ao longo de toda a BTS.....	42
Figura 38: Médias anuais do Nível do Mar e da Componente Longitudinal do Vento.....	43
Figura 39: Normal Climatológica de Precipitação. Operação Chuva 2021 – CODESAL. Dados oriundos do INMET.	44
Figura 40: Alagamento da rua do campus Ondina perto da biblioteca central (UFBA) associado à mega maré de 08 de fevereiro de 2024. – Jornal Correio	45

SUMÁRIO

1	Introdução	11
2	Caracterização da Área de Estudo	14
3	METODOLOGIA	15
3.1	Dados Observacionais	15
3.2	Processamento de dados	16
3.3	Simulações numéricas	19
4	RESULTADOS	22
4.1	Variáveis Meteorológicas	22
4.2	Variação do Nível do Mar	26
4.2.1	Maré Astronômica	29
4.3	Oscilações de Baixa Frequência	33
4.4	Tendências de Longo Prazo	39
5	Discussão	42
6	Conclusão	47
7	Referências	49

1 INTRODUÇÃO

O nível médio do mar (NMM) é influenciado por oscilações em um largo espectro de frequências, desde altas frequências associadas à maré astronômica até baixas frequências relacionadas a fenômenos climáticos interanuais como a Oscilação Sul (Trenberth, K e Caron, J., 2000) e a Oscilação Decenal do Pacífico (B. Hamlington, 2013). Uma grande complexidade das flutuações do nível médio é gerada pela interação dessas diferentes frequências de oscilação. Eventos extremos de elevação do nível d'água, com inundações de regiões costeiras mais baixas, ocorrem quando várias dessas oscilações se alinham construtivamente, como na coincidência da maré equinocial com fortes ventos locais do quadrante sul (no nosso hemisfério) empurrando água contra a costa e com a crista de uma onda de plataforma de longo período.

Subjacente à estas interações está o aquecimento global e a tendência de longo prazo de elevação do NMM na maior parte do planeta (Figura 1). O aquecimento global tem armazenado mais energia na atmosfera, o que tem causado acentuação e maior frequência de extremos climáticos (ventos mais fortes, maior energia das ondas, maior intensidade das precipitações e menores pressões atmosféricas nas tempestades), como relatado por Thompson et al. (2019). Desta forma, os eventos de inundação costeira e erosão da costa têm se tornado mais intensos.

A subida do NMM vem se tornando, cada vez mais, uma preocupação global devido aos seus impactos significativos em comunidades urbanas litorâneas e ecossistemas costeiros. O monitoramento do nível do mar foi iniciado, pontualmente, com marégrafos instalados em portos e estuários ainda no século 19 (Talke e Jay, 2013), mas foi com o advento dos satélites, na década de 1990, que se tornou possível observar e medir essa elevação em escala global com maior precisão (Cabanes et al., 2001). Os avanços tecnológicos permitiram uma compreensão mais detalhada das mudanças no nível do mar, facilitando a identificação de variabilidades regionais, os fatores que influenciam essas mudanças e momentos de aceleração/desaceleração da elevação do NMM. Como relatado por Frederiske et al. (2020), a taxa de aumento do NMM global passou de 1,56 mm/ano entre 1900-2018, para 1,78 mm/ano entre 1957-2018.

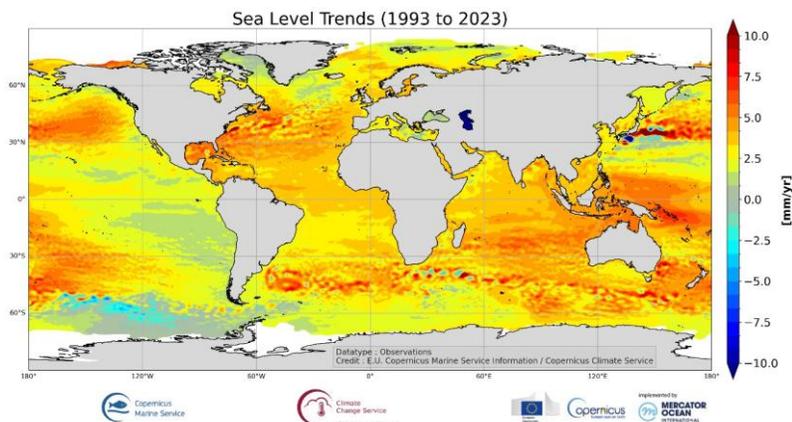


Figura 1: Tendências do nível do mar (em mm/ano) observadas por altímetros de satélite no oceano global¹ durante o período 1993 - 2023.

Já para o período entre 1993-2023, esta taxa foi de 3,4 mm/ano, a mesma calculada pelo programa Marine Copernicus (Figura 2). Observa-se assim que a taxa anual de elevação do NMM aumentou em aproximadamente 52% em relação à taxa entre 1957-2018.

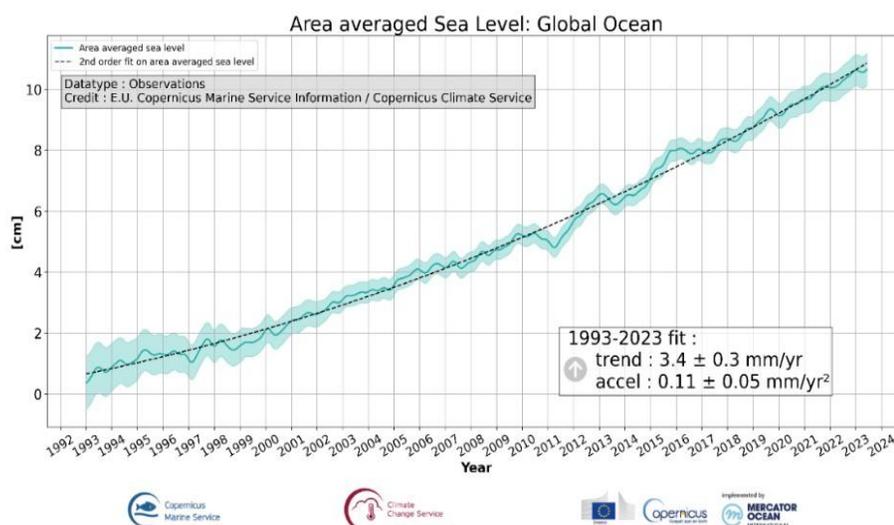


Figura 2 – Evolução diária do nível médio global do mar, em cm, no período 1993 - 2023, a partir de observações de altimetria por satélite. A área sombreada representa o intervalo de confiança de 95% na série temporal. A linha tracejada representa o ajuste de segunda ordem.

¹ <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators/global-ocean-mean-sea-level-trend-map-observations>

O impacto da elevação do nível do mar é mais sentido em áreas costeiras de baixo relevo, onde pequenas variações verticais resultam em grandes deslocamentos horizontais da linha d'água. Nesse contexto, zonas estuarinas costumam ser especialmente vulneráveis à inundação devido à sua baixa elevação e a possíveis aumentos da altura da maré; como efeito do aumento de profundidade e redução do atrito com o fundo, o que facilita o escoamento da água e ampliação do prisma de maré (Talke e David, 2020). Como exemplo, a inclusão da região intermareal no modelo numérico do Cook Inlet, no Alaska, a amplitude da maré aumentou em 20% (Oey et al. 2007).

O impacto de inundações nas regiões estuarinas costuma ser elevado, dado à alta densidade populacional comumente encontrada ao seu redor. Na Baía de Todos os Santos (Figura 3), terceira maior baía costeira do Brasil (Lessa et al., 2018), a situação não é diferente. A BTS é margeada por uma grande extensão de áreas urbanas, sendo muitas com infraestruturas precária e altamente suscetíveis a inundações. O Censo 2022² informa que 617.180 pessoas, cerca de 25% da população de Salvador, residem em regiões marginais à baía, o que demonstra o potencial grau de fragilidade da infraestrutura urbana à elevação do NMM.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar a variabilidade de curto e médio prazo do nível d'água na Baía de Todos os Santos. A análise será realizada com base em séries temporais de dados maregráficos e meteorológicos, além de simulações numéricas da hidrodinâmica da região. Como objetivos específicos, são listados:

1. Caracterizar a variabilidade temporal da maré astronômica no porto de Salvador;
2. Investigar a variabilidade e tendências da maré meteorológica;
3. Determinar a frequência de inundação dos níveis altimétricos abrangidos pelas oscilações do nível d'água;
4. Identificar a tendência de comportamento do NMM em Salvador ao longo dos últimos 20 anos;

² - <https://dados.salvador.ba.gov.br/pages/bairros-de-salvador>

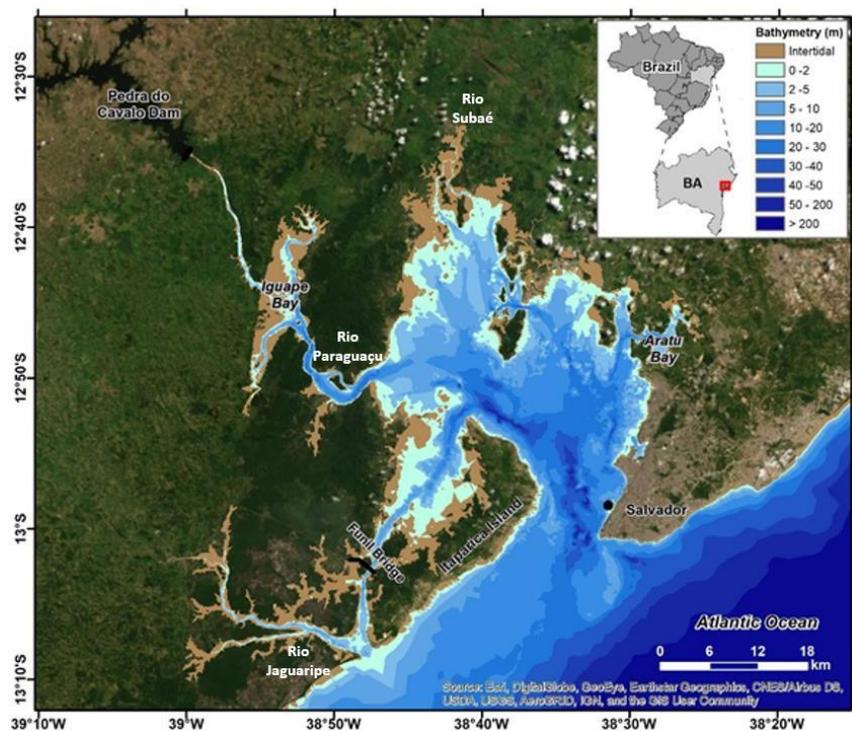


Figura 3 - Mapa da área de estudo: Salvador e a Baía de Todos os Santos com contornos batimétricos. O círculo preto corresponde à estação maregráfica do projeto GLOSS.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A BTS possui uma área máxima de 1223 km² e profundidade média de 9,8 m (Lessa et al. 2018), com vasta área intermareal distribuída ao longo de praticamente toda sua extensão. A baía recebe a descarga de três grandes bacias de drenagem, associadas aos rios Paraguaçu, Jaguaripe e Subaé (Figura 3), além de outras 91 pequenas bacias (Andrade e Hatje, 2009). Em termos oceanográficos, sua circulação é predominantemente forçada por uma maré semi-diurna, a qual tem número de forma $\frac{(K1+O1)}{(M2+S2)}$ variando entre 0.06 e 0.11 estuário adentro. A altura média de sizígia na embocadura é de 2.5 m, e a maré astronômica explica mais de 97,5% da variância da elevação (Cirano e Lessa, 2007, Lessa et al. 2009). De acordo com Martinho et al (2019), a componente M2 apresenta amplitudes entre 70 e 105 cm, e S2 entre 28 e 42 cm. Além disso, por conta da geomorfologia do estuário, existe uma predominância por correntes de vazante. (Cirano e Lessa, 2007)

As ondas de superfície no verão são predominantemente oriundas de leste com alturas entre 1 m e 2 m, com período entre 6 s e 8 s. Já durante o inverno, as ondas de sudeste têm alturas entre 2 m e 3 m, com período entre 6 s e 10 s. (Fonseca, 2019). A altura e período máximos observados foram 4 m e 17 s (Fonseca, 2019).

A região é caracterizada por um clima tropical úmido, com uma média anual de temperatura e precipitação de 25,6°C e 1833 mm (INMET, 2024) e evaporação de 1002 mm (INMET, 1992). De acordo com Cirano e Lessa (2007), sabe-se que 53% da precipitação total anual ocorre entre abril e julho. Durante o verão, os ventos de E e NE, responsáveis pelos eventos de ressurgência, costumam atuar com mais frequência. Já no inverno, o cenário é marcado por eventos de frentes subtropicais, com predominância de ventos de SSE (Figura 4). Como consequência a corrente costeira flui para sul no verão e para norte no inverno (Amorim et al., 2013).

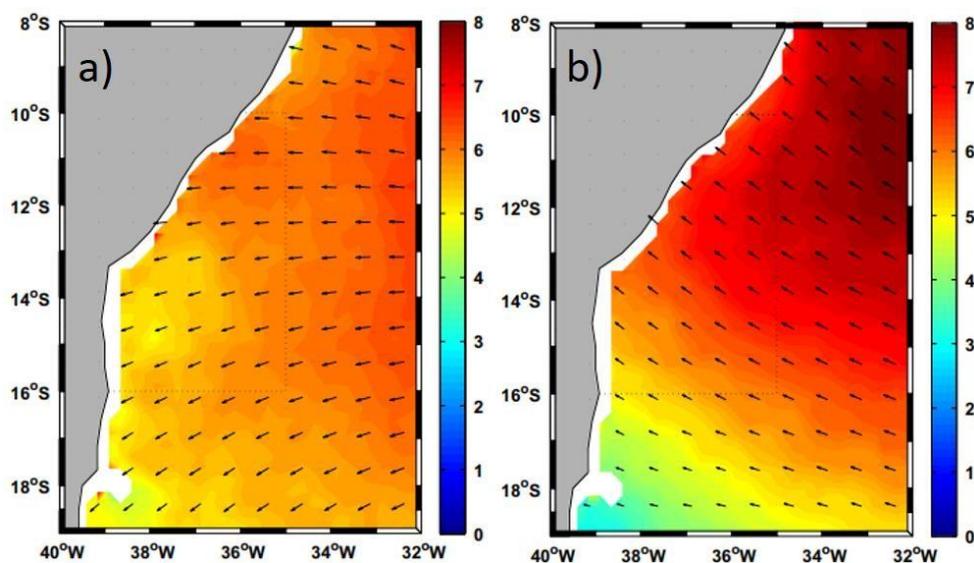


Figura 4: Médias mensais entre 2004 e 2009 da distribuição dos ventos 10 m acima do nível do mar (vetores) derivados do QuickSCAT (IFREMER, 2011), para os meses de (a) janeiro e (b) julho. As cores representam a intensidade dos ventos (m/s). Extraído de Amorim et al., (2013).

3 METODOLOGIA

3.1 Dados Observacionais

Os dados do nível do mar no Porto de Salvador são oriundos de uma estação maregráfica situada na Capitania dos Portos (EMSAL) (Figura 5). O Centro de Hidrografia

da Marinha (CHM) em conjunto com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) estabeleceram uma parceria os responsáveis pela operação desta estação maregráfica, instalada em dezembro de 2002, a qual faz parte do Global Sea Level Observing System (GLOSS). Os dados horários foram extraídos na plataforma do Sea Level Center Universidade do Havaí (<https://uhslc.soest.hawaii.edu/gloss>) para o período entre novembro de 2004 e dezembro de 2023.



Figura 5 – A) Estação Maregráfica situada na Capitania dos Portos, em Salvador; B) Instrumentos de medição do nível d’água da estação maregráfica de Salvador. (1) Datalogger. (2) Marégrafo digital com sistema encoder e radar acoplado.

Dados de pressão atmosférica na estação meteorológica de Ondina (Figura 3) foram obtidos da plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET - <https://portal.inmet.gov.br>). Dados de vento foram baixados do site do Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP - <https://www.remss.com>), o qual integra dados de satélites para fornecer campos globais de vento sobre os oceanos. A resolução espacial dos dados do CCMP é de $0,25^\circ$, sendo que os dados extraídos de um elemento da grade localizado sobre a plataforma continental na mesma latitude do aeroporto de Salvador. As séries temporais extraídas corresponderam ao período entre janeiro de 2005 e dezembro de 2023, com intervalos de aquisições de 1 hora para os dados do INMET e de 6 horas para os dados do CCMP. Os dados de vento foram decompostos em componentes transversal e paralela ao alinhamento do litoral, de aproximadamente $N+40^\circ$.

3.2 Processamento de dados

Todo o tratamento das séries temporais foi realizado através do software Matlab. Os dados do nível d’água do marégrafo foram submetidos a uma segunda análise de

consistência para identificação e eliminação de valores espúrios, possivelmente associados a erros de leitura dos sensores ou interrupções momentâneas nos registros. Os valores espúrios foram identificados segundo critério sugerido Emery e Thompson (2004), com remoção dos valores acima da média ± 2 vezes o desvio padrão de um intervalo temporal de 3 horas. De modo obter com maior precisão os momentos de preamar e baixa-mar, os dados de nível d'água foram interpolados para intervalo de dez minutos.

As oscilações da maré astronômica foram obtidas com a o pacote de análise harmônica `t_tide` do Matlab (R. PAWLOWICZ et al, 2003). Para investigar a variabilidade temporal das componentes diurnas e semi-diurnas, a análise harmônica foi também aplicada a intervalos mensais de dados. É importante frisar que, ao longo desse trabalho, o termo “nível d'água” indica os valores observados e “maré astronômica” se refere às variações do nível d'água resultantes da reconstituição da maré astronômica pelo método harmônico.

A assimetria da maré foi calculada de duas formas: 1) através da razão entre os tempos de subida e de descida da maré (razões superiores a 1 indicam intervalo de subida maior que de descida) e 2) através da relação de amplitude e fase das componentes harmônicas M4 e M2, ou seja, $M4/M2$ e $2(M4-M2)$, respectivamente. Como mostra a Figura 6, maiores razões indicam assimetrias mais acentuadas, enquanto diferenças de fase entre 0° e 180° (180° e 360°) indicam marés com intervalos de subida (descida) mais curtos. De acordo com FRIEDRICH e AUBREY (1988), menores intervalos de subida (descida) se relacionam a velocidades de corrente de maré enchente (vazante) mais fortes.

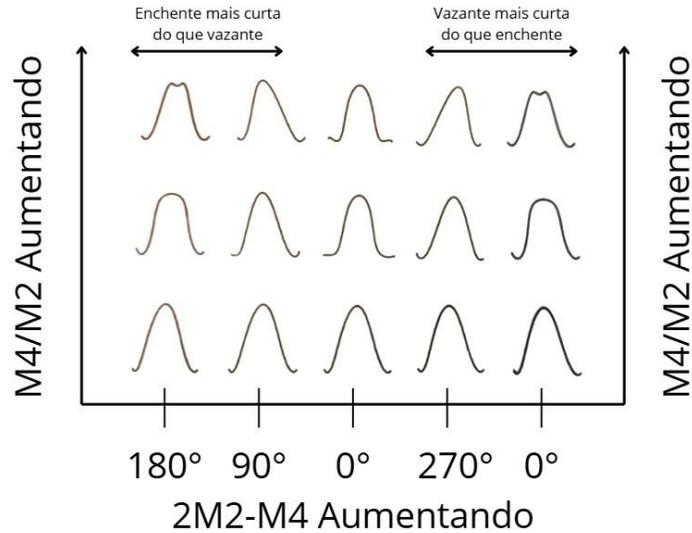


Figura 6: Relações entre as componentes harmônicas $M2$ e $M4$, de modo que o eixo y representa o incremento da razão $M4/M2$ e o eixo x a subtração $2M2-M4$. A figura ilustra as condições em que a maré enchente é mais curta que a vazante e vice-versa.

Dada a existência de desigualdades diurnas na maré, as alturas de marés foram estabelecidas a partir das diferenças entre preamares e baixa-mares e entre baixa-mares e preamares subsequentes. Para o cálculo do histograma de frequência das alturas de maré, foi definido que quadraturas são todos os valores menores do que 1,3 m e sizígias são todos os valores superiores a 2,0 m.

Oscilações de baixa frequência foram extraídas através da aplicação de um filtro lanczos passa baixa, com período de corte de 53h. Além disso, a fim de se remover a sazonalidade, efetuou-se o filtro em 6 meses, passa alta.

Curvas anuais de permanência de nível d'água foram construídas utilizando classes de elevação entre 0,74 m e 3,89 m, com incrementos de 0,1 m. As curvas foram normalizadas em intervalos de 2.5% utilizando-se o *Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial* (pchip), método de interpolação que utiliza polinômios cúbicos.

Para avaliar a frequência de ocorrência de eventos extremos na capital, utilizou-se como comparação um evento específico de inundação ocorrido em fevereiro de 2024, em que o litoral de Salvador passou por um significativo evento de maré meteorológica, quando a crista de uma onda de plataforma coincidiu com uma maré de sizígia equinocial em

situação de perigeu lunar. Foram registradas dezenas de ocorrências de processos erosivos no litoral e inundações em regiões estuarinas (CODESAL, Operação Chuva 2024³). Além da capital, 30 outros municípios decretaram situação de emergência durante o mesmo evento. A tábua de maré da CHN previu um nível máximo de preamar de 2,8 metros (em relação ao zero hidrográfico da CHM) para o dia deste evento, nível este que será aqui adotado como referência para a possibilidade de eventos significativos de inundação costeira. O zero hidrográfico do CHM está 2,23 m abaixo do nível de referência da estação, conforme sua ficha descritiva de 2015. Comparação entre os registros do marégrafo e níveis previstos pela tábua de maré indicam uma diferença média de 0,87 m.

Para investigar a variabilidade do NMM, foram calculadas médias diárias, mensais e anuais. As tendências lineares de longo prazo foram calculadas através do teste não-paramétrico de Mann-Kendall. Detalhes desta análise podem ser encontrados em VERMA e GHOSH (2019).

3.3 Simulações numéricas

Para avaliar o comportamento da maré meteorológica dentro da BTS, foram utilizadas as saídas do modelo hidrodinâmico *Regional Ocean Modelling System* (ROMS), implementado em duas grades aninhadas com resolução horizontal variando entre 200 m e 50 m na grade interna à BTS (Figura 7) (Franklin et al., SUBMETIDO). As soluções finais foram obtidas com o forçamento atmosférico pela reanálise global do CFSR, condições de contorno oceânicas do GLORYS e condições iniciais do HYCON. Ainda como condição de contorno, foram incluídas as vazões médias diárias de 42 rios afluentes ao domínio do modelo, 15 deles relacionados a pequenos cursos fluviais desaguando internamente na BTS. O forçamento de maré de todas as simulações foi obtido da base de dados TPXO 8.0 (Egbert e Erofeeva, 2002), com resolução espacial de 1/12 graus, que forneceu amplitudes e fases das oito principais componentes diurnas e semi-diurnas das correntes da maré barotrópica na região (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1 e Q1). A representação batimétrica de todas as simulações baseou-se nas cartas náuticas do CHM.

³ http://www.codesal.salvador.ba.gov.br/images/pdf/RELATORIO_OPERAO_CHUVA_2024.pdf

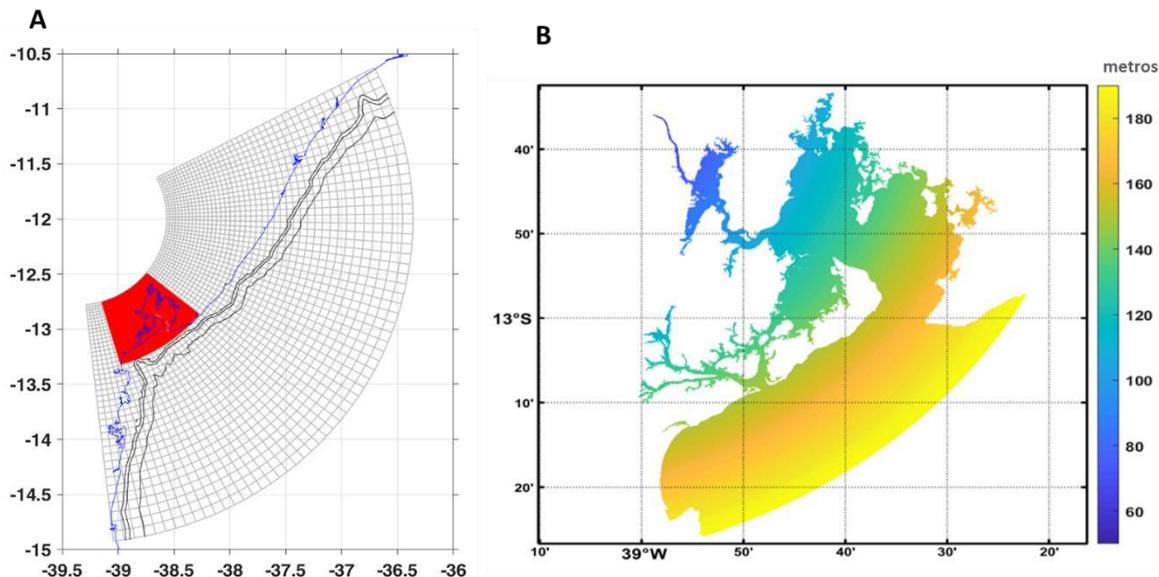


Figura 7: A) Grade utilizadas nas simulações. Em vermelho o domínio da grade aninhada. B) Variação da resolução espacial da grade aninhada.

Foram definidas 4 estações de monitoramento de nível (Figura 8 – estrelas pretas) para validação dos resultados do modelo. A comparação de dados simulados e observados é apresentada na Figura 9.

Para a investigação da propagação da maré meteorológica foram selecionados 4 pontos extraídos do modelo (Figura 8) e o evento com a maior preamar para todo o ano de 2020, ocorrido entre 09 e 10 de março.

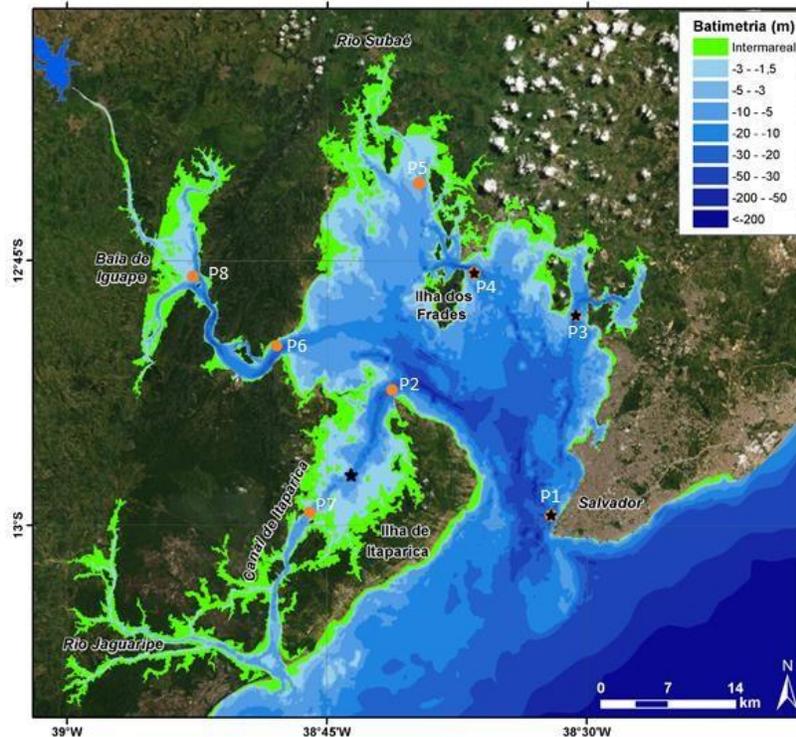


Figura 8: Mapa da Baía de Todos os Santos com estações de validação do modelo (estrelas pretas), e estações para investigação da propagação da maré meteorológica (círculos laranjas com numerações de P1-P8).

Observa-se correlações positivas, variando entre 0,98 e 0,99, em todas as estações. Os erros são inferiores a 9 cm na estação GLOSS e em Aratu, e mais elevados, entre 13 e 16 cm, nas estações mais interiorizadas. Conforme relatado por Franklin et al. (Submetido), os maiores erros nestas estações são explicados por uma representação batimétrica relativamente precária no canal de Itaparica (antigas cartas náuticas com resolução de 1:60.000) e dificuldades de reprodução, para a resolução do modelo, de uma batimetria complexa próximo a Madre de Deus (Figura 8).

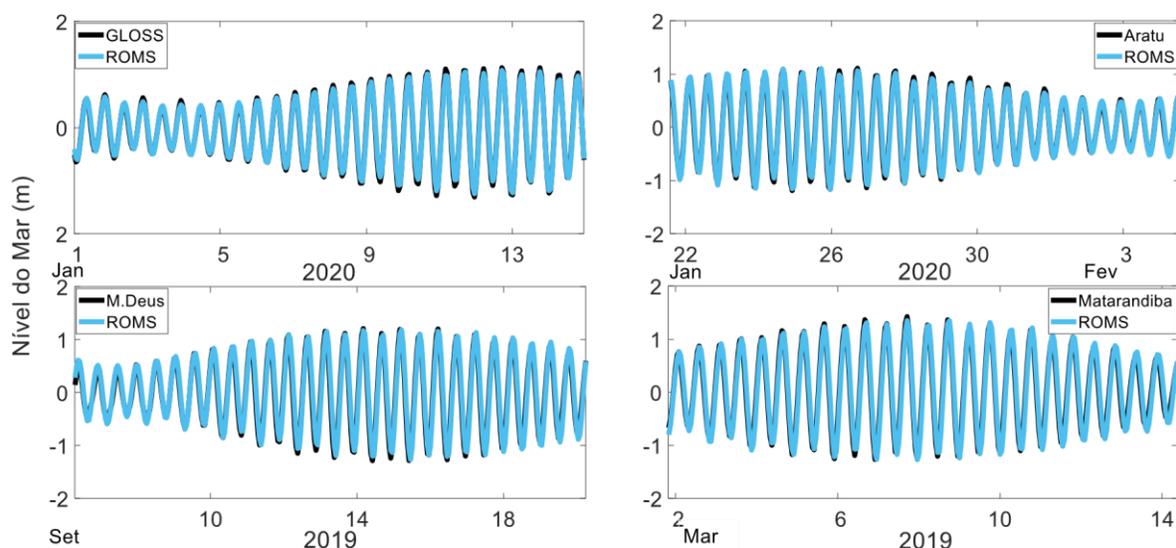


Figura 9: Dados observados sobrepostos pelos dados extraídos do Regional Ocean Modeling System (ROMS), sob a mesma coordenada, para alguns trechos da Baía de Todos os Santos.

Tabela 1: Descrição das estações e cálculos estatísticos realizados a fim de estabelecer os comparativos entre os dados observados e os modelados.

Estações	Correlação	Erro Médio (m)	MSE (m)	RMSE (m)
GLOSS	0.99	0.07	0.01	0.08
ARATU	0.99	0.08	0.01	0.09
MADRE DEUS	0.98	0.13	0.02	0.16
MATARANDIBA	0.98	0.14	0.02	0.15

4 RESULTADOS

4.1 Variáveis Meteorológicas

A velocidade da componente do vento longitudinal à costa apresenta valores máximos de 10,5 m/s para norte e 9,5 m/s para sul (Figura 10), enquanto a média do módulo da velocidade é de 2,5 m/s. Observa-se sazonalidade, melhor expressa na série temporal das médias mensais (Figura 11), com valores positivos (fluindo em direção ao norte) no inverno e valores negativos (em direção ao sul) no verão. Os valores negativos são mais frequentes ao longo do ano, com o vento direcionando-se para o sul. Ocorre uma tendência de queda do módulo da velocidade.

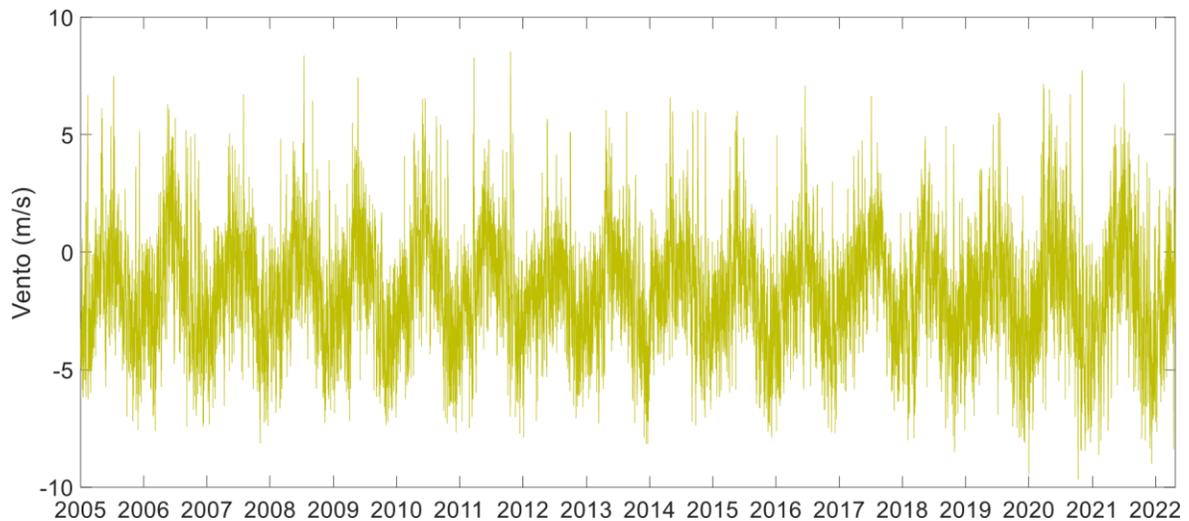


Figura 10: Série temporal observada de vento extraída da estação do CCMP.

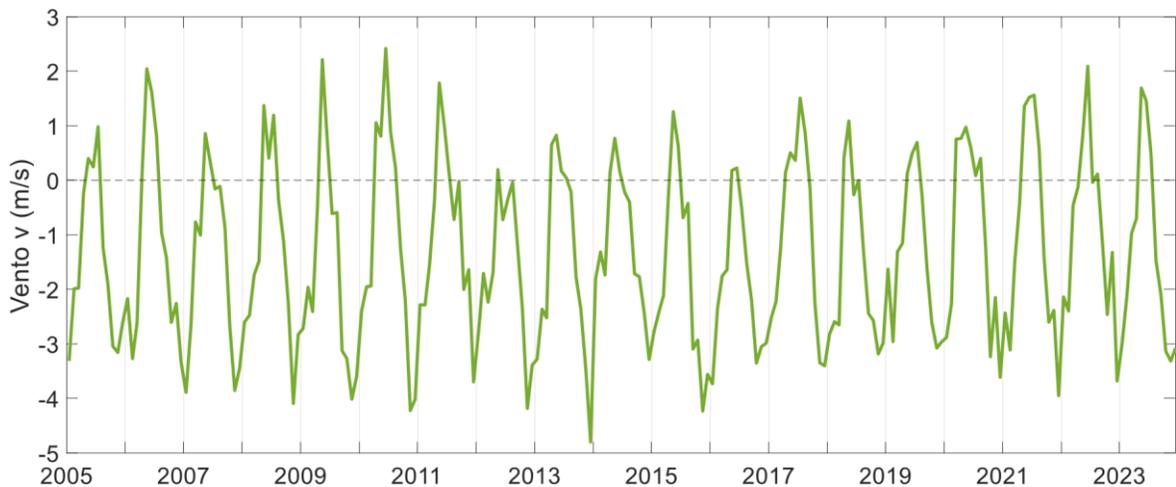


Figura 11: Médias mensais da componente ao longo da costa do vento.

O comportamento de baixa frequência indica a existência de uma oscilação intermitente, como exemplificado pelo ajuste polinomial na Figura 12, em que é possível notar uma tendência inicial de posituação dos ventos, seguida de um aumento gradual de ventos para sul entre 2011-2015 e, por fim, uma ascendência mais pronunciada até 2022, em que provavelmente dará início à uma nova queda. Apesar da irregularidade, a tendência média é de posituação dos valores.

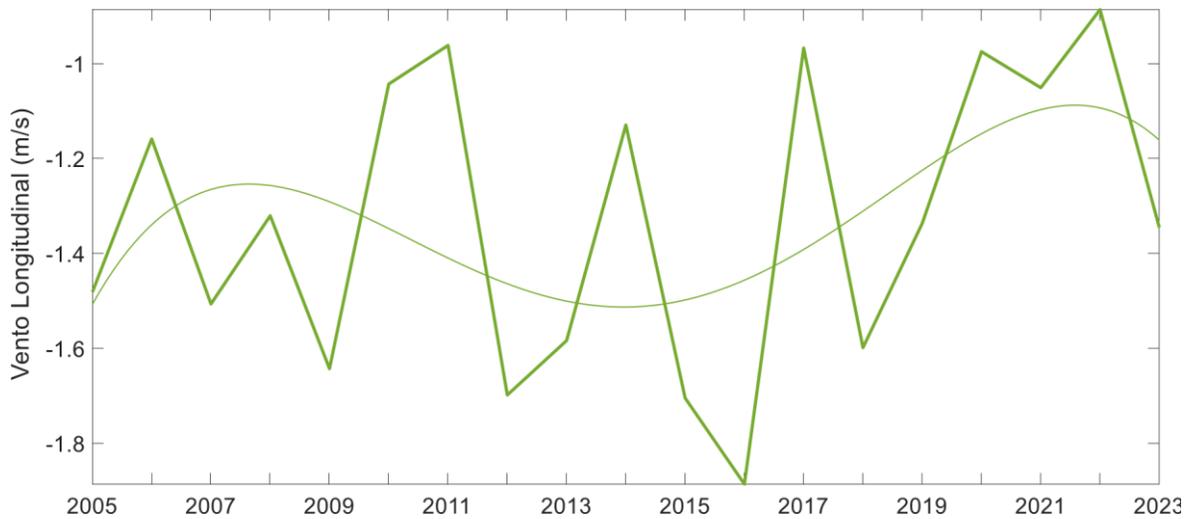


Figura 12: Médias anuais da componente longitudinal do vento (CCMP). Ajuste polinomial de 4ª ordem.

A climatologia da componente longitudinal do vento (Figura 13) apresenta um comportamento sazonal bem-marcado, com valores positivos ocorrendo, unicamente, em maio e o maior módulo da velocidade acontecendo em dezembro. O desvio padrão encontrado foi de 0,2547 m/s.

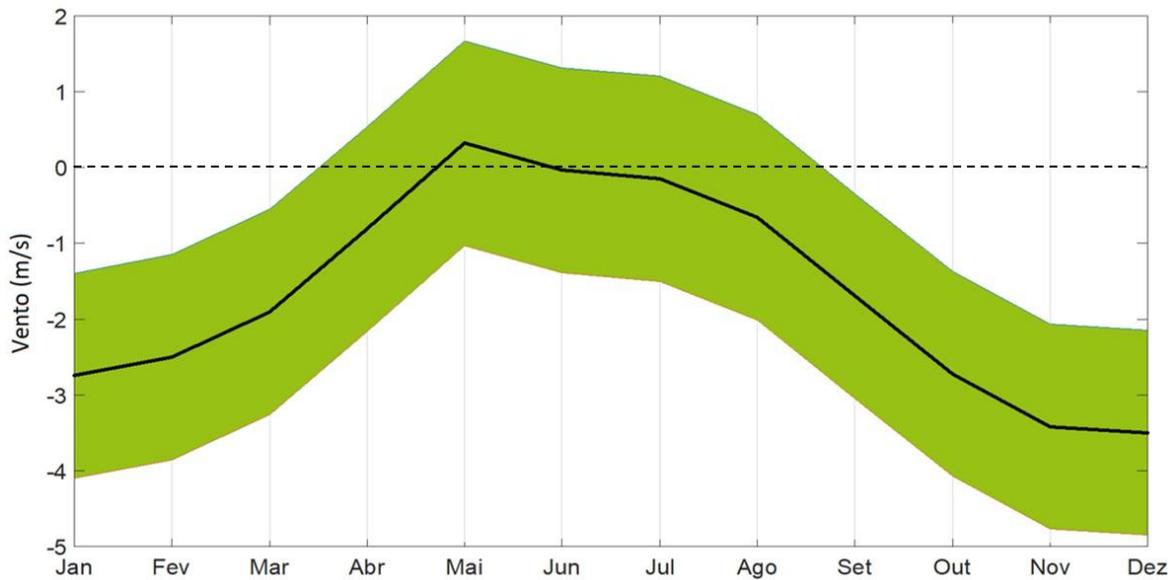


Figura 13: Climatologia mensal da componente longitudinal a costa do vento (CCMP).

A pressão atmosférica variou entre extremos de 996 mbar e 1019 mbar entre 2005 e 2022 (Figura 14), com média de 1009 mbar.

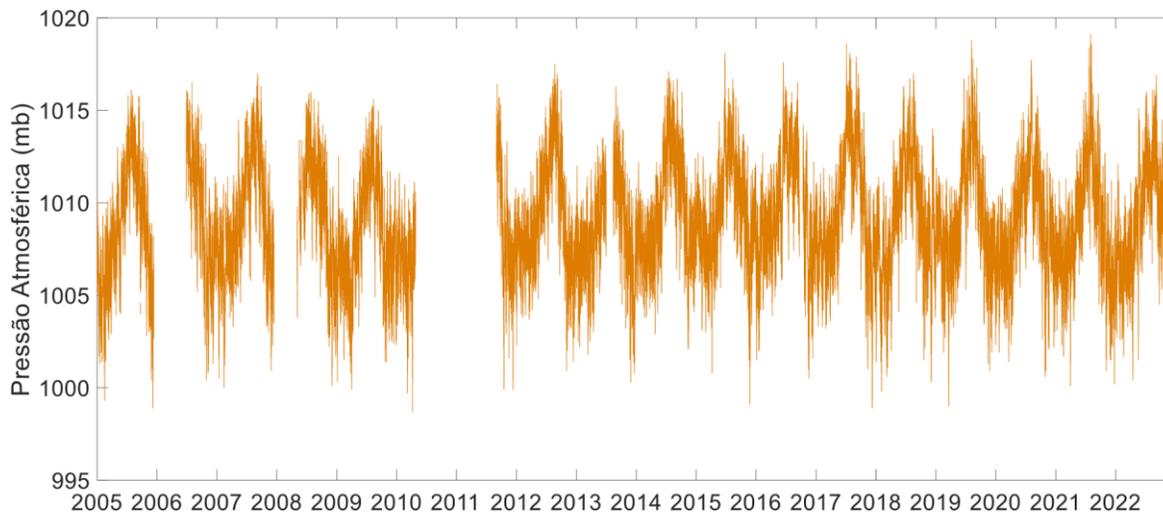


Figura 14: Série temporal observada de pressão atmosférica extraída da estação do INMET, localizada na entrada da Baía de Todos os Santos.

Observa-se sazonalidade com valores mais altos no inverno e mais baixos no verão, conforme observado na variação das médias mensais (Figura 15).

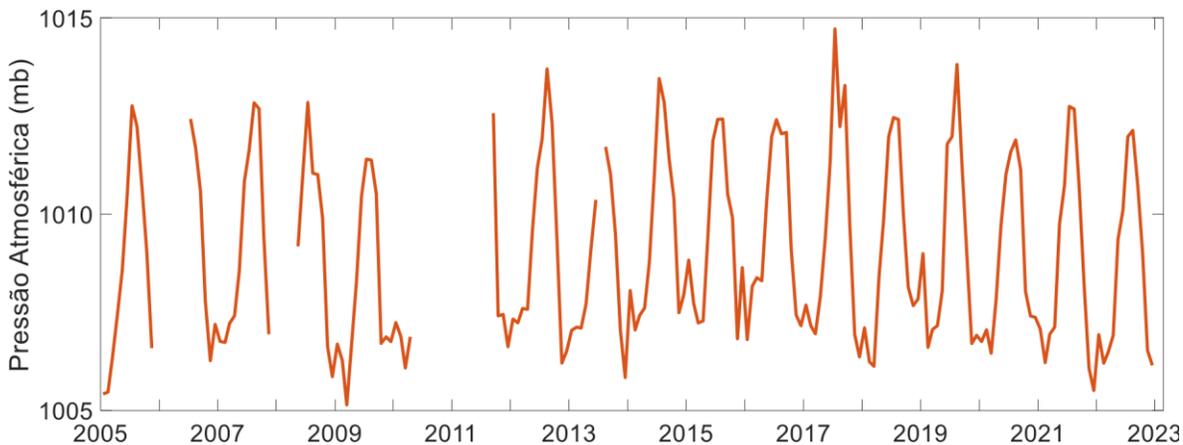


Figura 15: Médias mensais da Pressão Atmosférica.

A climatologia mensal da pressão atmosférica (Figura 16) mostrou que os valores mais altos ocorrem entre os meses de julho e agosto, atingindo até 1015 mb. A partir de

setembro, há uma queda gradual, com os menores valores próximos a 1005 mb registrados nos meses de janeiro e dezembro.

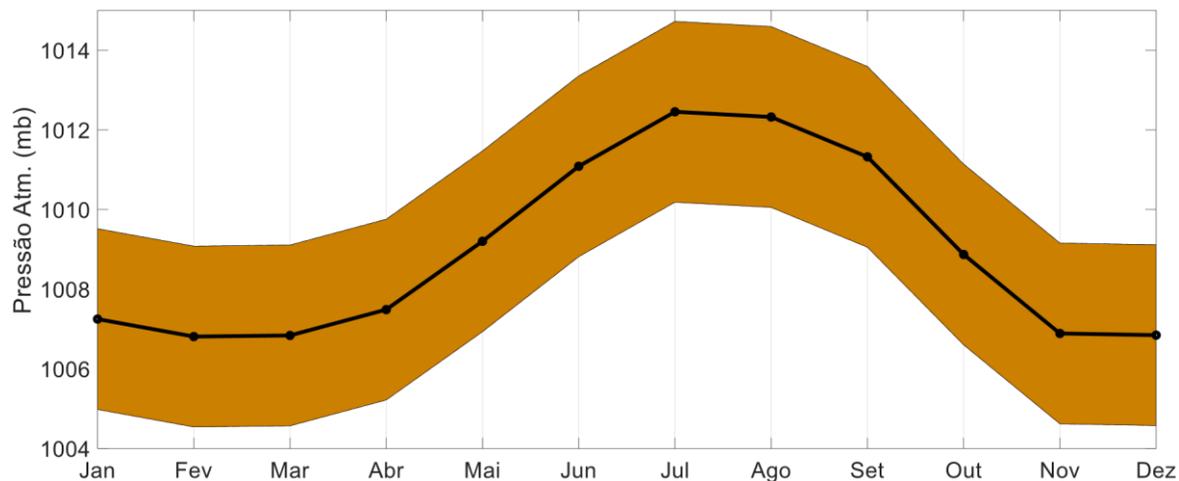


Figura 16: Climatologia mensal da Pressão Atmosférica.

4.2 Variação do Nível do Mar

O nível do mar em Salvador variou entre um mínimo de 0,74 m e um máximo de 3,90 m, resultando em uma amplitude total de 3,16 m ao longo dos 19 anos de dados (Figura 17). A média e a mediana foram de 2,29 m e 2,28 m, respectivamente.

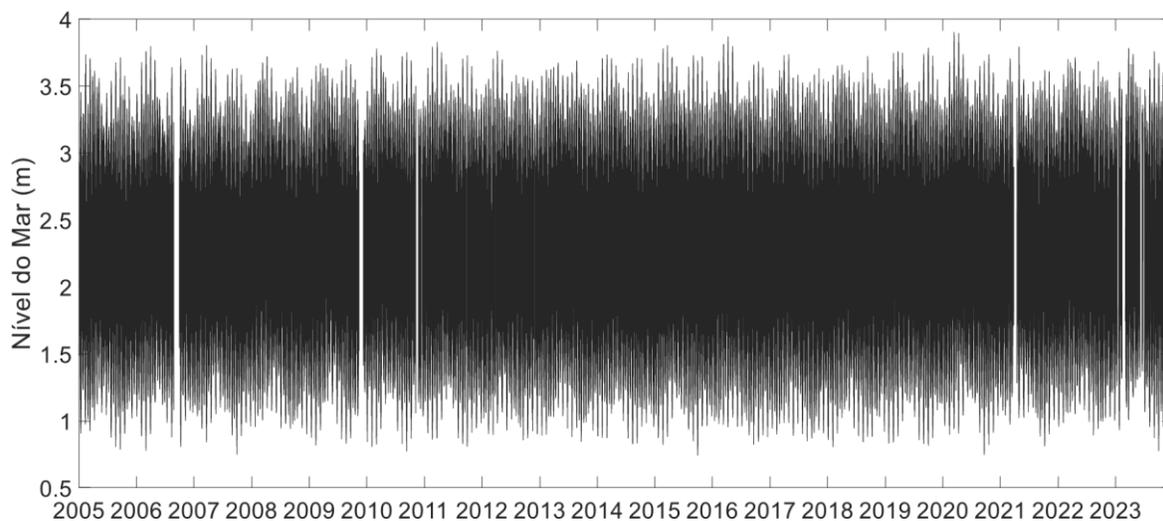


Figura 17: Série temporal completa do nível do mar na estação GLOSS.

As alturas de maré oscilaram entre 0,42 m e 2,98 m (Figura 18), com valor médio de 1,68 m. A altura média das marés de sizígia foi de 2,28 m, e de quadraturas foi de 1,02 m.

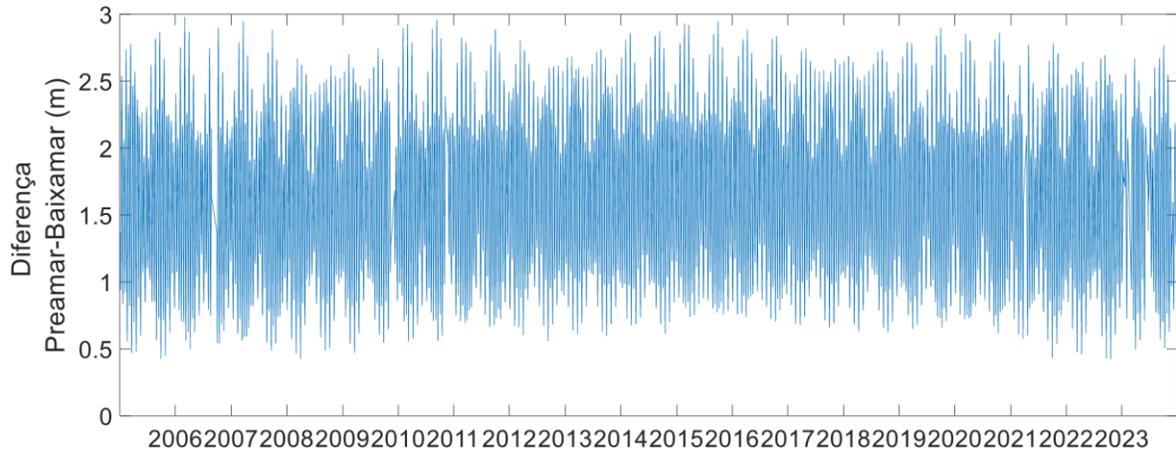


Figura 18: Variação da altura da maré (diferenças entre preamares e baixa-mares) na estação GLOSS Salvador.

O nível do mar possui uma Correlação de Pearson positiva de 0.616 com o vento longitudinal, de modo que, quanto mais positivo o vento se torna, maior é o valor da elevação (Figura 19). O valor p encontrado foi de 4.54×10^{-25} .

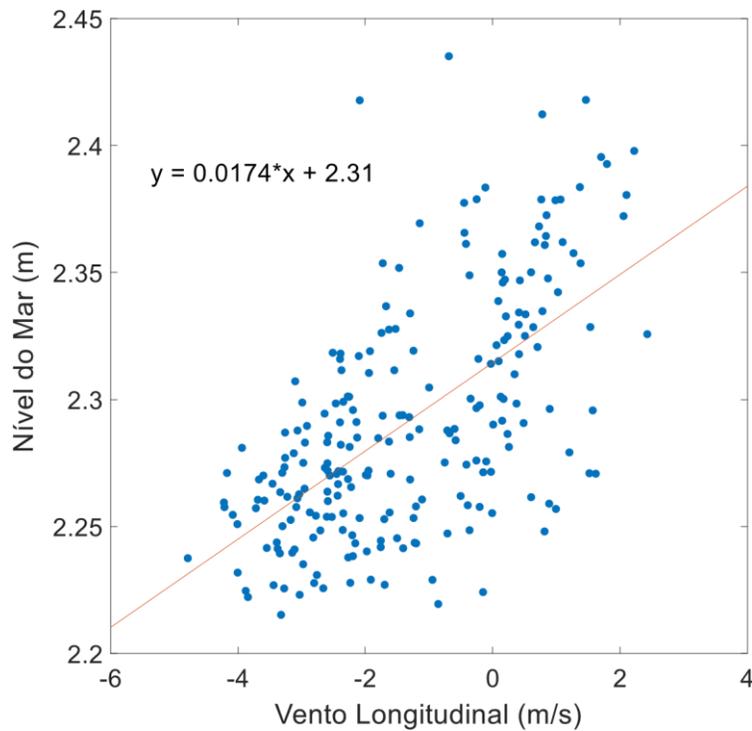


Figura 19: Nível do Mar versus Vento Longitudinal. Médias Mensais.

A distribuição das alturas de maré é bimodal, com modas de 1,30 m e 2,0 m. Os valores inferiores à primeira moda correspondem a 28% da série, enquanto os valores inferiores à segunda moda correspondem a 70% (Figura 20).

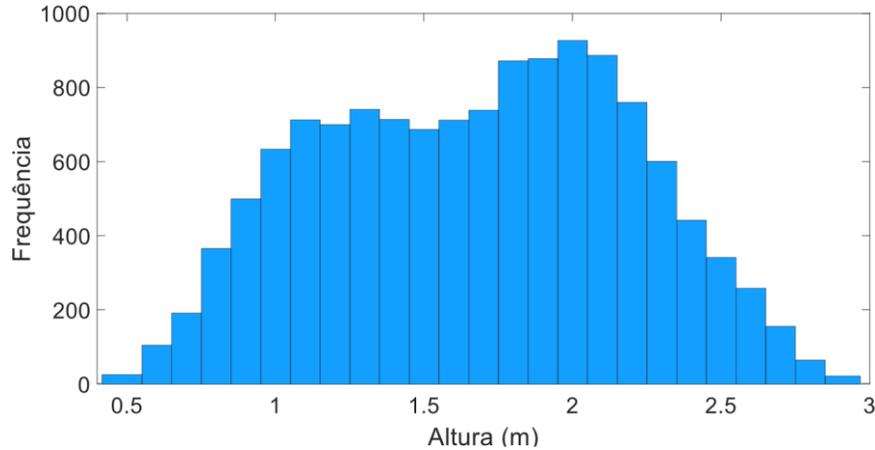


Figura 20: Histograma de frequência das alturas de maré.

A climatologia da altura de maré mostra que as maiores alturas ocorrem em março e setembro, com valor médio de 1,74 m para ambos os meses. Em contrapartida, as menores alturas ocorrem em junho e dezembro, com média de 1,64 m para ambos os meses (Figura 21). O desvio padrão foi de 0,025 m.

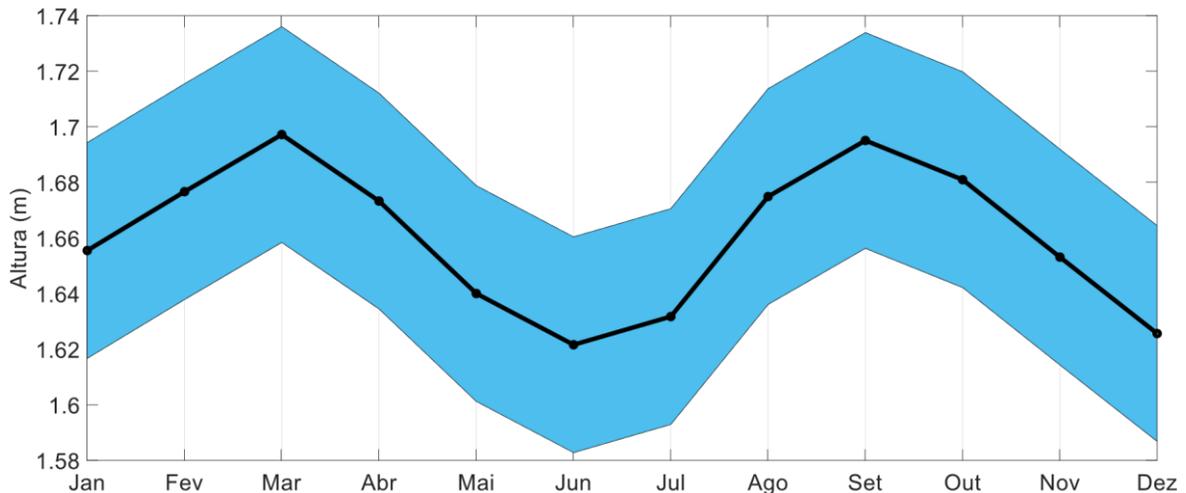


Figura 22: Climatologia mensal da altura de maré, a fim de se observar o comportamento médio das alturas para cada mês do ano, ao longo dos últimos 20 anos.

O índice de assimetria é modulado pela altura da maré. Maiores valores ocorrem em situações de maré de quadratura, ocorrendo uma tendência de marés mais simétricas com o aumento da altura da maré, especialmente no hemicíclo entre a baixa-mar e a preamar, evidenciando uma maior regularidade na duração dos fluxos de enchente e vazante (Figura 23). A análise detalhada dos dois hemicíclos revela diferenças importantes. No ciclo baixa-prea (prea-baixa), a assimetria é predominantemente positiva (negativa), indicando fluxos de enchente (vazante) mais curtos e intensos.

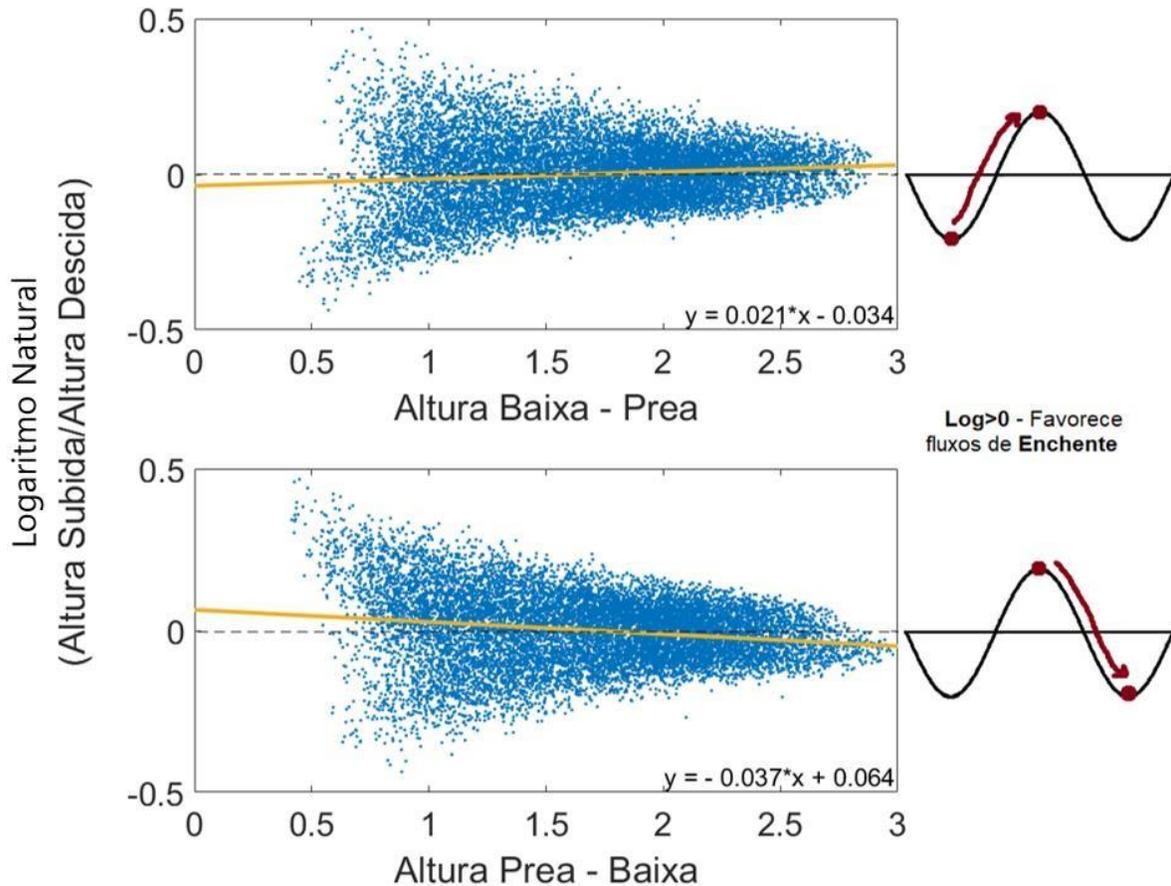


Figura 23: Assimetrias de maré e alturas entre baixa-mar e preamar e preamar e baixa-mar, como indicado no desenho ao lado dos gráficos. Ao longo do eixo x, quanto mais à direita, mais próximo aos momentos de sizígia.

4.2.1 Maré Astronômica

A amplitude das componentes semi-diurnas principais M2 e S2 variaram entre 0,73 m e 0,83 m e entre 0,22 m e 0,44 m, respectivamente. S2 apresenta comportamento sazonal

ditado pelo ciclo anual solar, com amplitudes maiores no equinócio. M2 tem oscilações de alta frequência, mas com máximas geralmente ocorrendo em fevereiro e agosto. As componentes diurnas principais O1 e K1 registraram amplitudes máximas de 0.08 m e 0.06 m, respectivamente. M2 e O1 apresentam clara oscilação de baixa frequência com período de aproximadamente 19 anos. As oscilações de baixa frequência de M2 e O1 ocorrem de forma contrária, de modo que o ápice da primeira, 0.83 m, é simultâneo com a mínima da última, 0.045 m em 2016 (Figura 24).

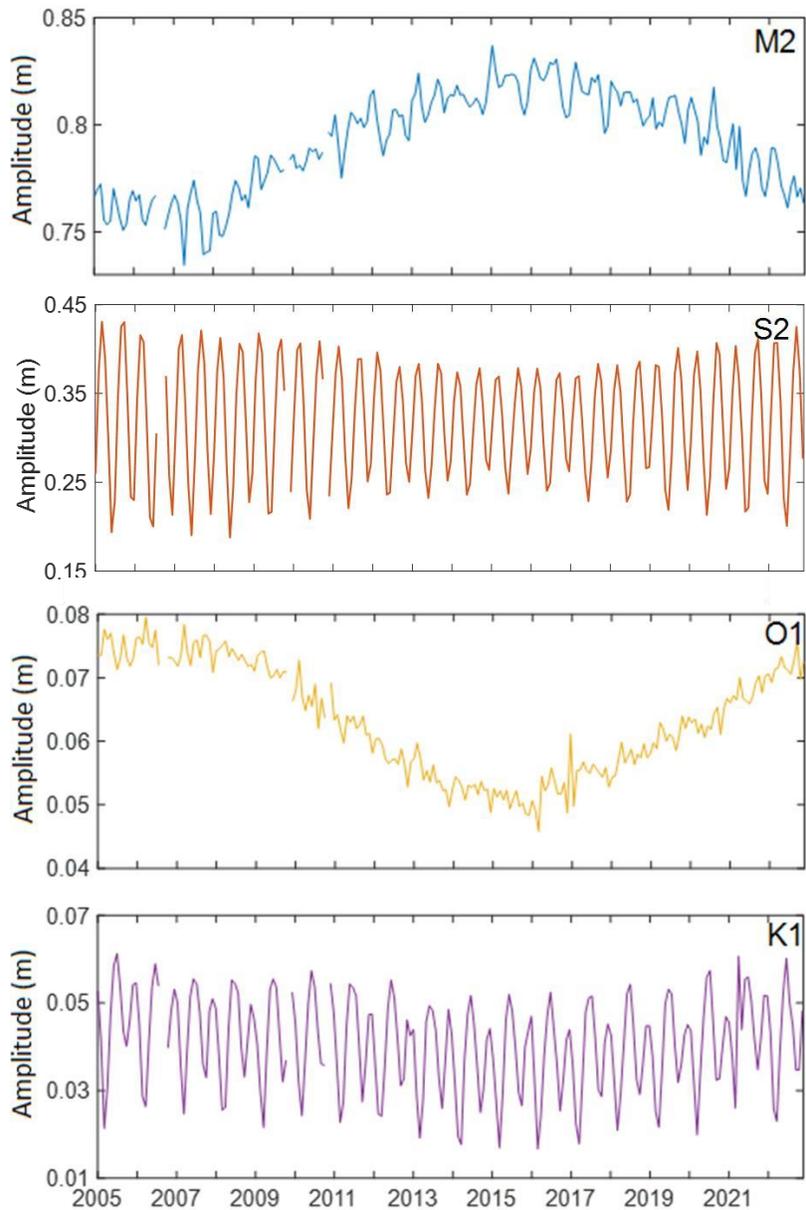


Figura 24: Amplitudes das componentes harmônicas semi-diurnas M2 e S2 e diurnas O1 e K1 ao longo dos anos. Estação GLOSS.

As componentes quarto diurnas apresentaram amplitude máxima de 0,019 m, atingido por M4. Esta componente apresenta um padrão sazonal mais pronunciado, com picos de amplitude frequentemente ocorrendo no verão (Figura 25). Já as componentes MS4 e MN4 mostram variações mais sutis, mas apresentam sazonalidade semelhante à de M4 (Figura 25).

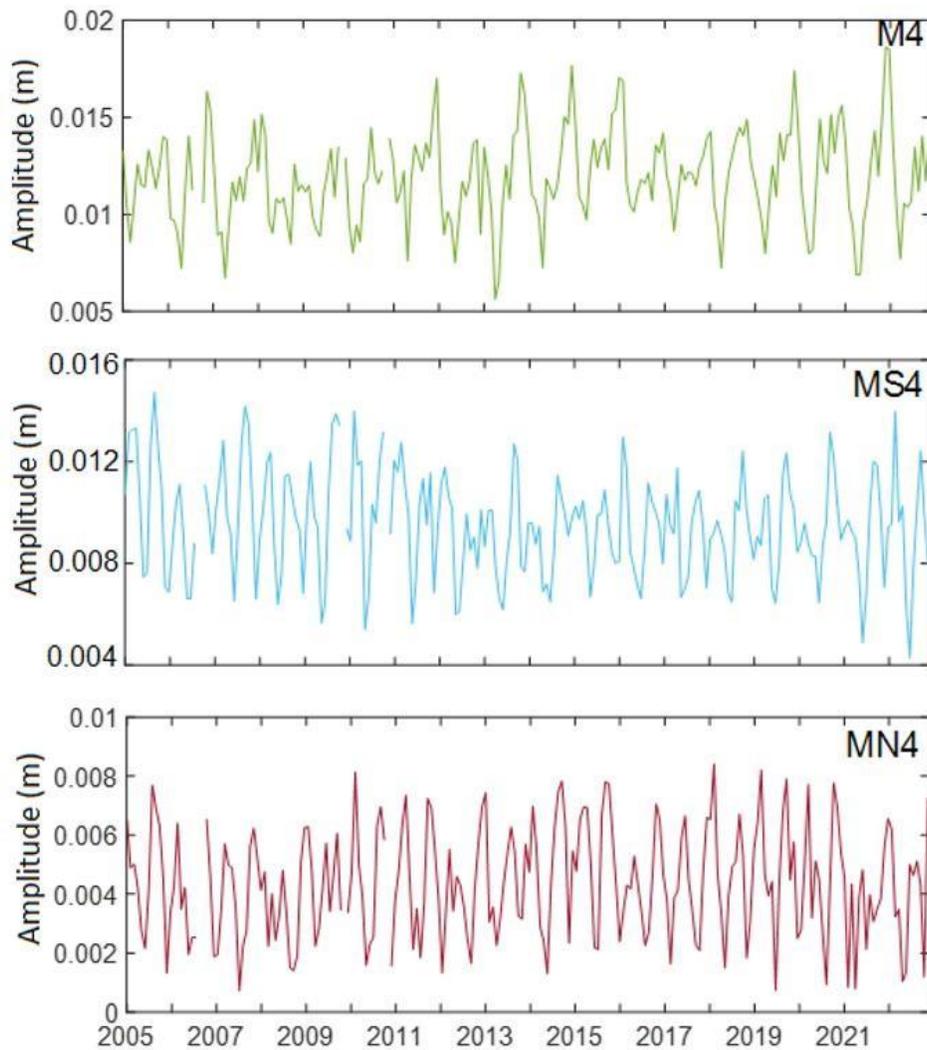


Figura 25: Amplitudes das componentes harmônicas M4, MS4 e MN4 ao longo dos anos. Estação GLOSS.

A razão entre as componentes M4 e M2, indicadora da magnitude e sentido da assimetria da maré variou, aproximadamente, entre 0,01 e 0,025 na amplitude e entre 290° e 345° na fase, ao longo do período (Figura 26). Verifica-se a existência de sazonalidade para ambas as séries com maior magnitude da assimetria no final do ano, quando a relação de fase das componentes fica menor, mais próxima de 300°. A tendência linear indica que a magnitude da assimetria aumentou um pouco com o tempo, com média passando de 0,017 m em 2005 para 0,018 m em 2022. Já a relação de fase aumentou com tempo, passando de uma média de 306° em 2005 para 317° em 2022.

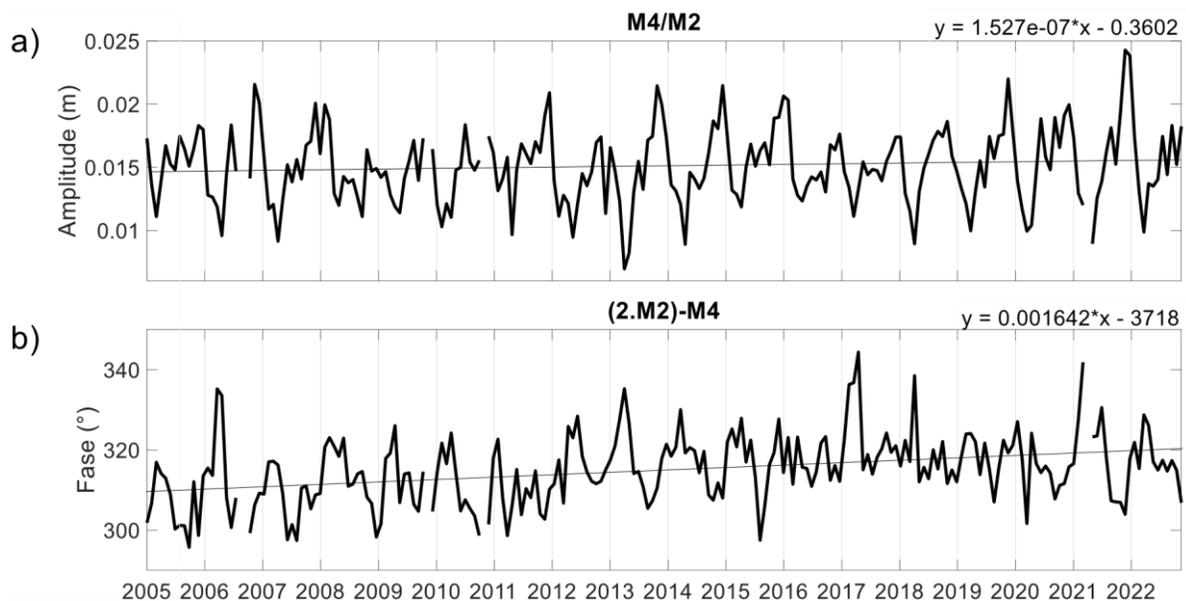


Figura 26: A) Variação da razão das amplitudes das componentes harmônicas M4 e M2, que indica o grau de distorção da onda de maré. B) Variação da relação de fase entre as duas componentes, que indica o sentido da assimetria.

A relação entre a magnitude e a direção da assimetria, exposta na Figura 27, mostra que menores assimetrias de maré tendem a aumentar a distorção das ondas de maré, aumentando suas amplitudes. A maior fase encontrada – citada anteriormente - coincidiu com amplitude de aproximadamente 0,014 m, enquanto a menor foi marcada por uma amplitude de 0,015 m.

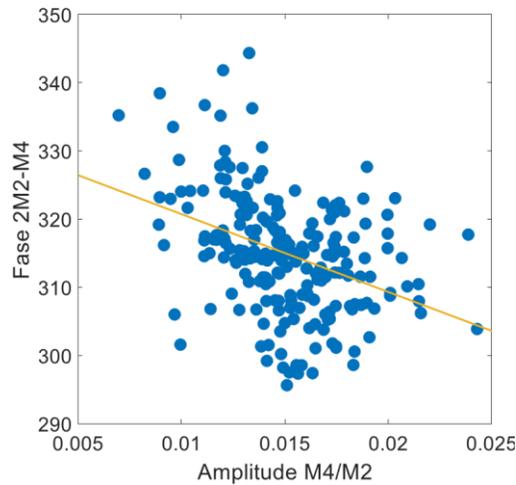


Figura 27: Fase (2.M2)-M4 contra a amplitude M4/M2.

4.3 Oscilações de Baixa Frequência

As alturas das ondas de baixa frequência (infra-mareais) variaram entre 0,01 m e 0,24 m, O ajuste polinomial de 2ª ordem mostra que inicialmente ocorre uma tendência de diminuição das alturas até 2015. Posteriormente, ocorre uma inversão na tendência, que passa a ser de ascensão até o fim da série (Figura 28). A climatologia oscila de modo que as alturas seguem em ascensão desde janeiro até junho (quando atingem a máxima de 0.08 m). Esse mês é seguido por um movimento de queda entre julho e agosto, registrando ondas entre 0.06 e 0.07 m durante o inverno. Entre setembro e novembro, um novo movimento ascendente foi observado, mas com menor intensidade, chegando a, no máximo, 0.075 m. Os meses de dezembro, janeiro e fevereiro são os mais baixos, indicando uma baixa amplitude das ondas durante o verão (Figura 29).

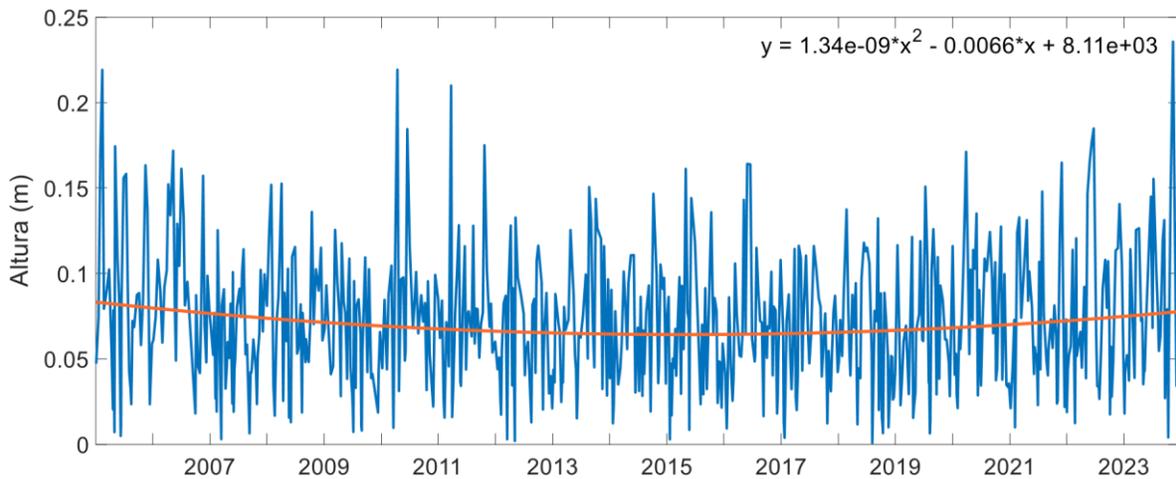


Figura 28: Alturas das ondas de baixa frequência, banda infra-mareal.

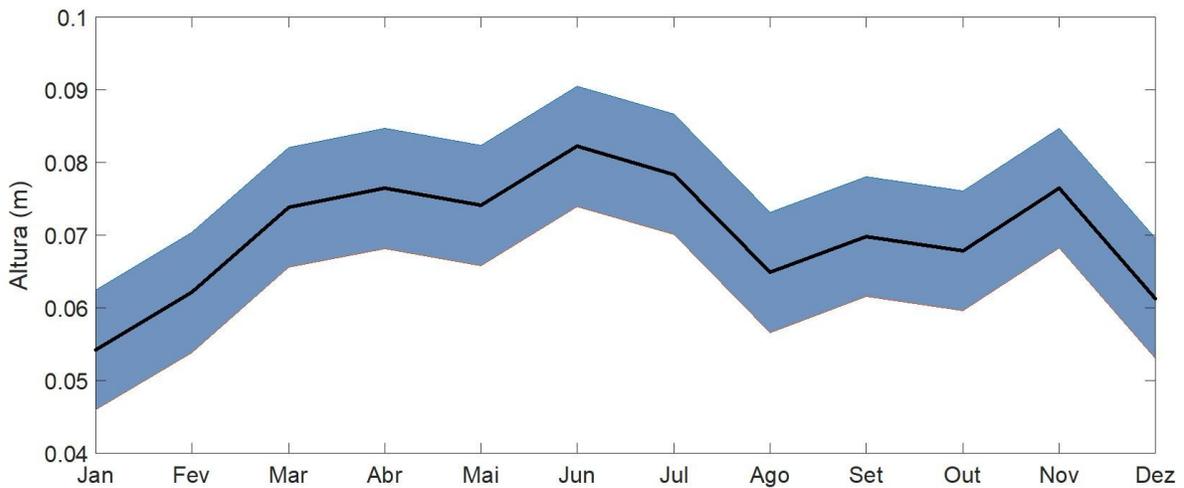


Figura 29: Climatologia mensal das alturas das ondas de baixa frequência, banda infra-mareal.

As curvas de permanência do nível d'água (Figura 30) indicam um nível mediano de 2,29 m, semelhante ao NMM. A superposição das curvas anuais indica que ocorreu um aumento da frequência de todos os níveis, mas especialmente dos níveis mais elevados. A Figura 31 mostra a variação dos percentis de 10%, 50% e 90% ao longo do tempo. O ajuste linear às séries de dados mostra que houve um aumento de 4 cm no 10° percentil, 6 cm no 50° percentil e de 7,1 cm no 90° percentil.

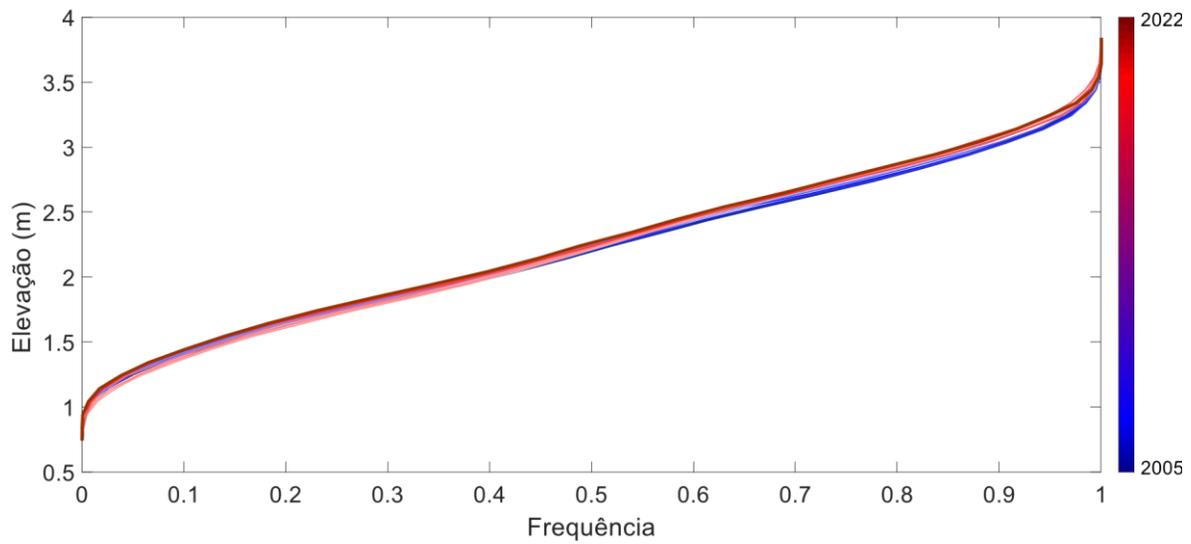


Figura 30: Gráfico da curva de permanência de nível entre os anos de 2005-2022. Os primeiros anos estão em tons mais frios e, na medida em que o tempo avança, as linhas vão sendo transicionadas para cores mais quentes.

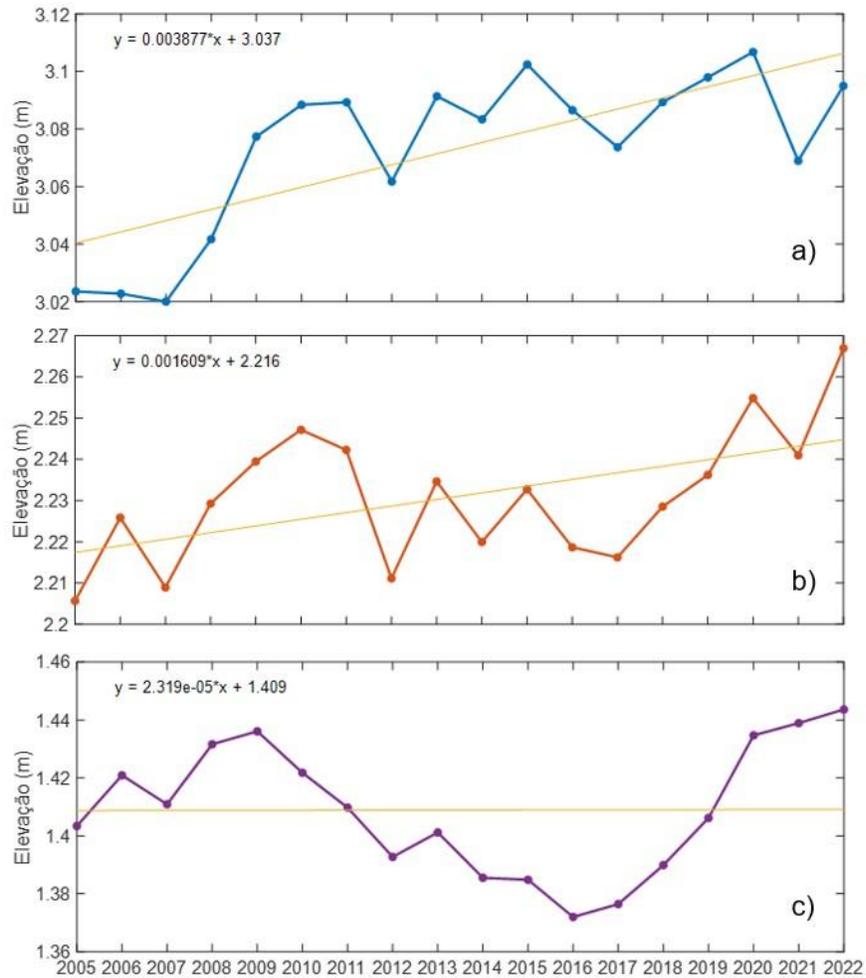


Figura 31: Curva de permanência salientando o nonagésimo (a), o quinquagésimo (b) e o décimo percentil (c), o que corresponde aos acontecimentos que ocorreram, respectivamente, em 10%, 50% e em 90% do período total de observação.

O progressivo aumento da cota altimétrica dos níveis d'água mais elevados é também observado ao se mensurar o total de horas mensais com níveis iguais ou superiores a 2,8 m acima do nível de redução do CHM, correspondente a 3,37 m na série GLOSS. A Figura 32 mostra este total de horas calculado para as marés previstas e observadas. Os totais associados à maré astronômica alcançam valores máximos em torno de 6 horas, modulados por ciclos equinociais e outro mais longo com período pouco maior que 4 anos, sem que seja observada tendência de longo prazo. Estes mesmos ciclos são também

observados nos registros de maré, porém com uma clara tendência de aumento do total de horas ao longo da série.

O total anual de horas com nível d'água observado igual ou superior a 3,37 m (Figura 33) mostra mais claramente o aumento da frequência dos níveis máximos. Em 2006 ocorreu um total acumulado de 10 horas, passando para 20 horas em 2016 e próximo de 30 horas em 2020.

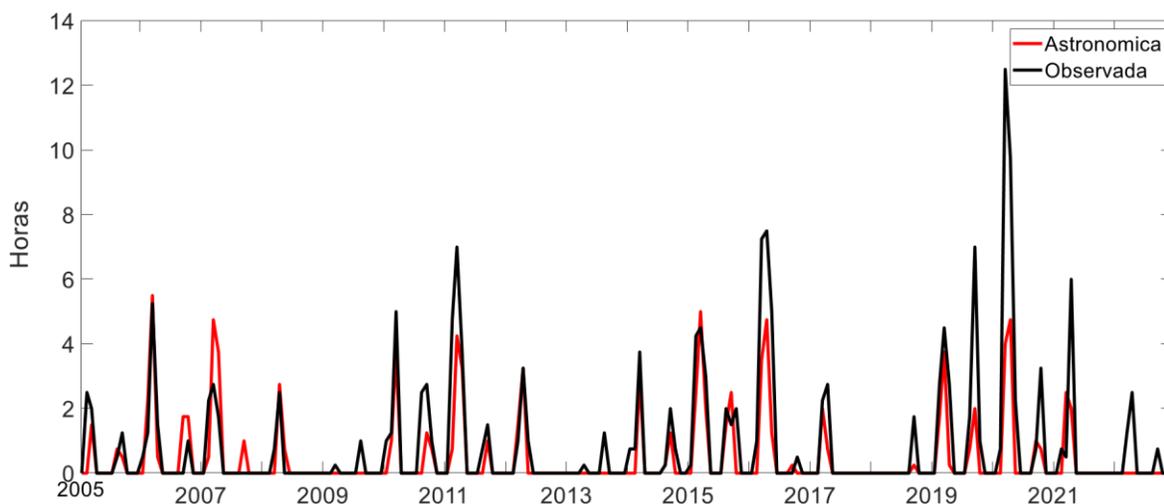


Figura 32: Tempo acumulado mensal com nível superior a 3,37 m entre os anos de 2005 e 2022.

No início da série temporal (Figura 33), a diferença entre as duas séries oscilava entre 1-2 horas. Em 2020, no pico máximo observado, essa diferença foi de, aproximadamente, 20 horas, indicando que 2/3 do que foi medido é de caráter meteorológico. Um outro ponto interessante são os ciclos com período de aproximadamente 4 anos.

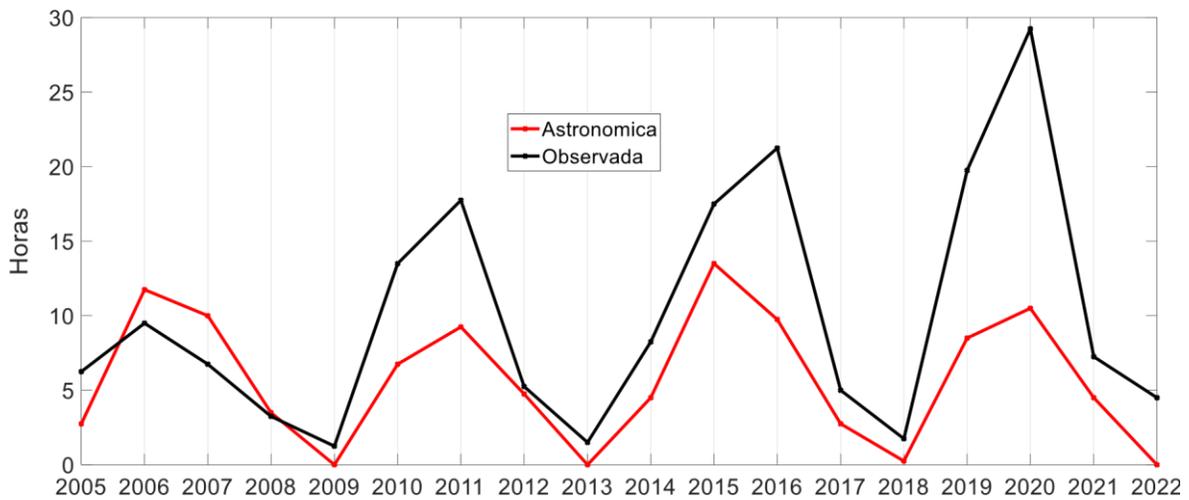


Figura 33: Tempo, em horas, acumulado anual com nível superior a 3,37 m entre os anos de 2005 e 2022.

A climatologia mensal do nível médio (Figura 34) mostra que os níveis mais elevados ocorrem em abril e maio (~2,35 m), e o mais baixo em setembro (~2,25 m), com 10 cm a menos. Menor variabilidade mensal ocorreu entre os meses de setembro e dezembro, em que os valores ficaram relativamente estáveis, oscilando entre 2,25 e 2,28 m. O desvio padrão foi de ± 0.0399 m.

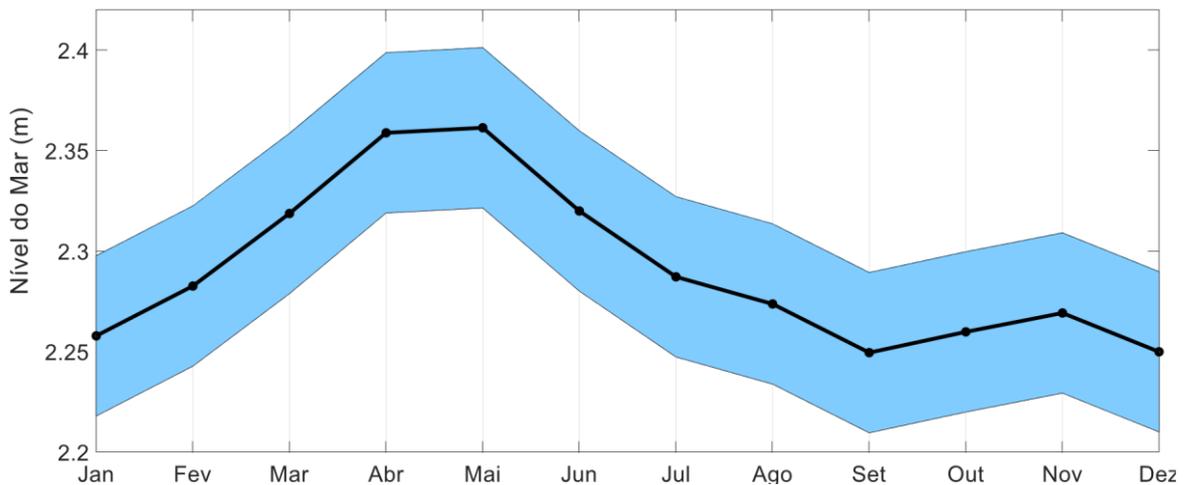


Figura 34: Climatologia mensal do nível médio do mar para a estação GLOSS.

A oscilação de nível causada por fatores meteorológicos variou entre 0,38 e 0,05 m, sendo que o desvio padrão foi de $\pm 0,0053$ m. Sua oscilação começa com um movimento

contínuo de elevação desde janeiro (0.04 m) até junho, quando atinge sua máxima de 0.05. A partir de julho já ocorre um movimento descendente, que perdura até setembro (0.04 m), que é quando o nível volta a oscilar com tendência positiva até encontrar o seu segundo pico (0.045 m) em novembro (Figura 35).

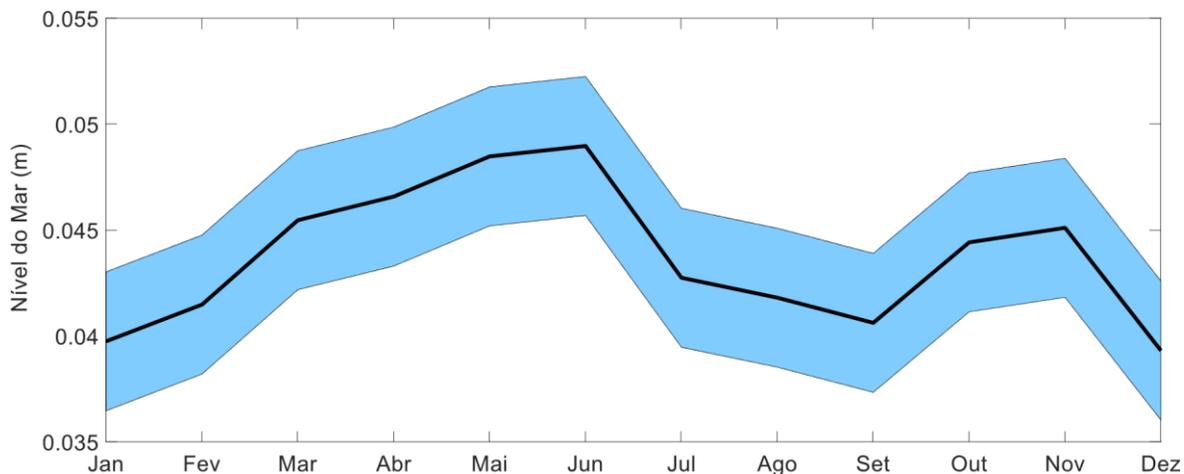


Figura 35: Climatologia mensal do nível residual (Observado – Astronômico).

4.4 Tendências de Longo Prazo

O ajuste linear à série de níveis médios mensais indica uma tendência de elevação do NMM de 2,11 mm/ano (Figura 36). É observado, no entanto, que esta tendência não é realmente linear, pois ocorre um período de queda do NMM entre 2010 e 2017. Desta forma, podem ser identificados 3 segmentos bem-marcados com diferentes taxas de variação do NMM, conforme mostra a Figura 36: 2005-2011, 2011-2017 e 2017-2023. Nestes intervalos o NMM variou a taxas de 6.96 mm/ano, -1.04 mm/ano e 6.40 mm/ano, respectivamente.

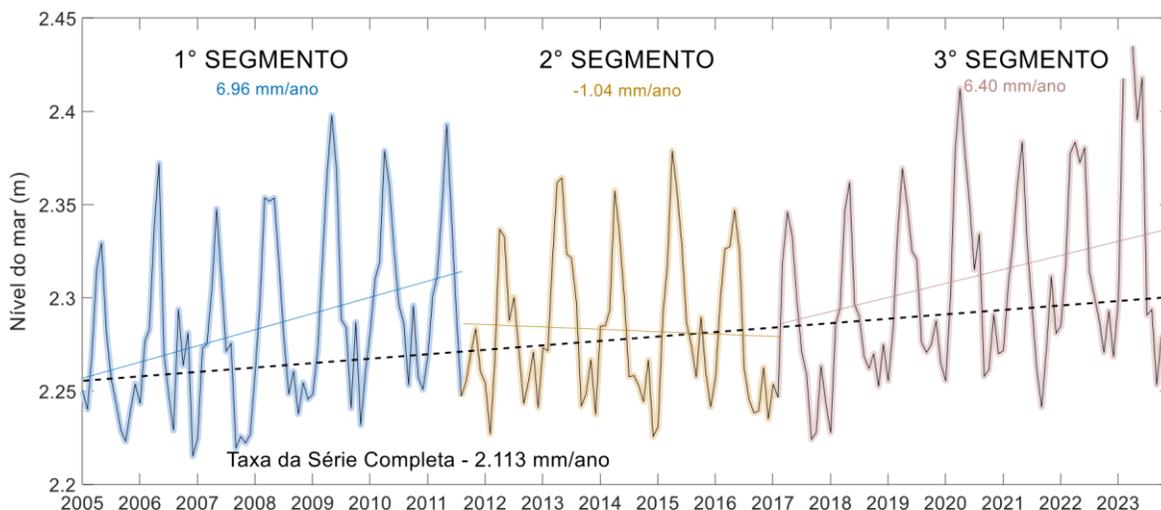


Figura 36: Valores mensais médios do nível na estação do GLOSS, situada no Porto de Salvador. Em amarelo, apresenta-se a linha de tendência obtida através do método de Mann-Kendall.

Os valores médios anuais na Figura 37 mostram que o nível aumentou de 2,26 m em 2005 para 2,32 m em 2023, indicando um acréscimo de 40 mm ao longo dos 19 anos de registros.

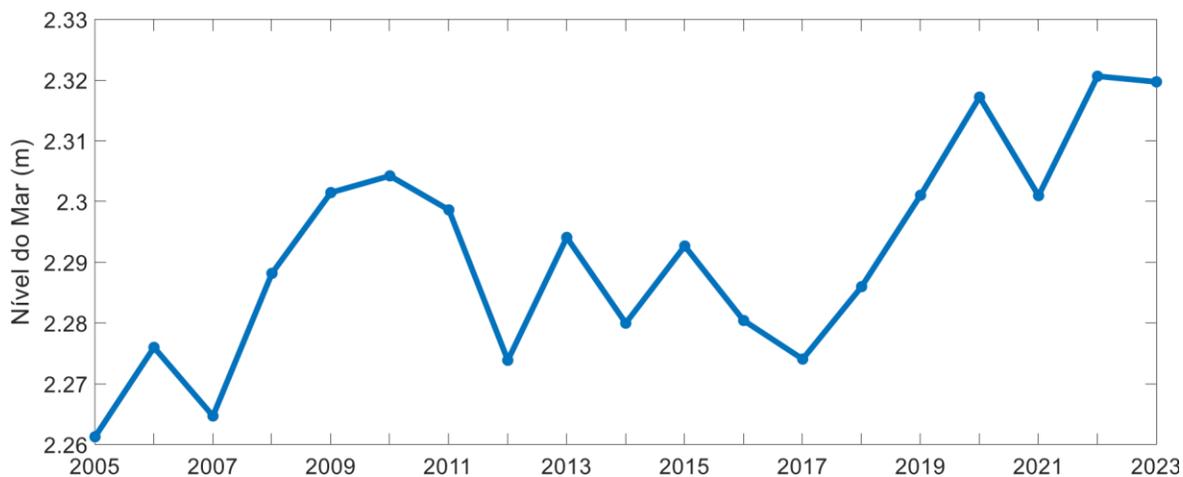


Figura 37: Valores médios anuais, entre 2005 e 2023, do nível do mar na estação do GLOSS, situada no Porto de Salvador.

A maré meteorológica sofre amplificação estuário adentro. A diferença entre os níveis máximos das preamares de 09 e 10 de março de 2020 simulada pelo ROMS e da maré astronômica extraída dos dados do modelo (Figura 38) salta de aproximadamente 0.06 m

na estação GLOSS (P1) para aproximadamente 0.12 m na Baía de Iguape (P8), a estação mais interiorizada.

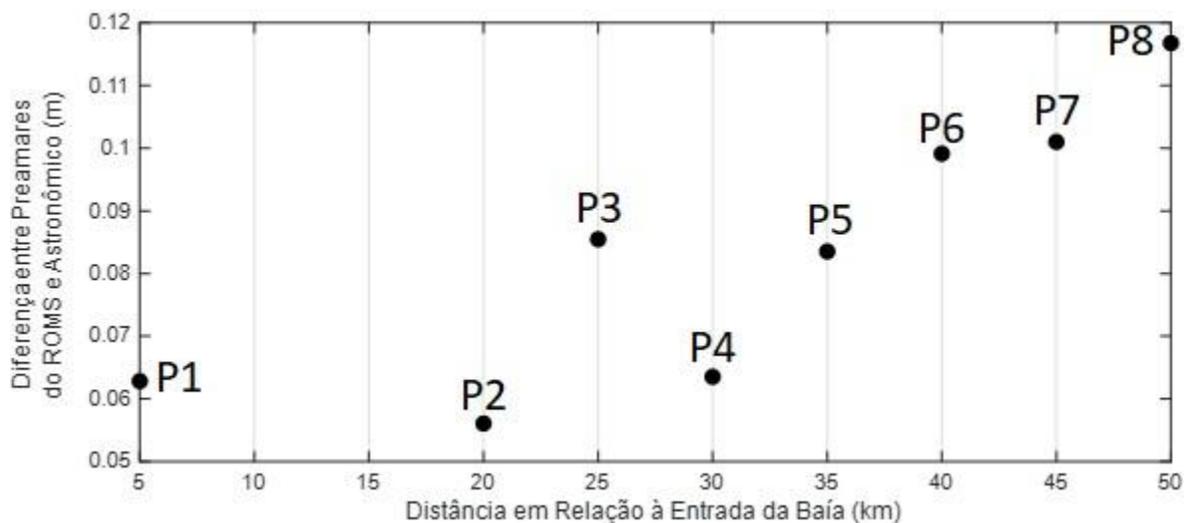


Figura 38: Diferença entre o nível das preamaras do ROMS e ASTRONÔMICO ao longo de toda a BTS.

5 DISCUSSÃO

A análise da pressão atmosférica e dos ventos na região de Salvador revelou padrões sazonais bem definidos, com valores mais elevados de pressão no inverno e mínimos no verão, coerentes com a normal climática do INMET⁴ para o período de 1990-2010 e com os valores apresentados por Lessa et al. (2009). A componente paralela à costa do vento apresentou uma tendência de redução no módulo ao longo do período estudado, refletindo uma diminuição gradual na intensidade que sopram costa abaixo e, pelo transporte de Ekman, rebaixam o nível médio perto da costa. Esse comportamento é consistente com observações que relacionam as intensificações nos regimes de vento às variações climáticas de longo prazo, como destacado por Pereira et al. em 2017 ao observar uma tendência de aumento da ocorrência de ventos extremos em diversas regiões do Brasil, incluindo o Nordeste. Além disso, observou-se uma correspondência entre a variação de baixa frequência do vento e do nível do mar, com ambas as séries temporais podendo ser divididas em 3 segmentos. Entretanto, as mudanças não ocorrem em perfeita sincronia com

⁴ <https://portal.inmet.gov.br/normais#>

as oscilações do vento, sendo reproduzidas após intervalo de cerca de 2 anos no nível do mar (Figura 39).

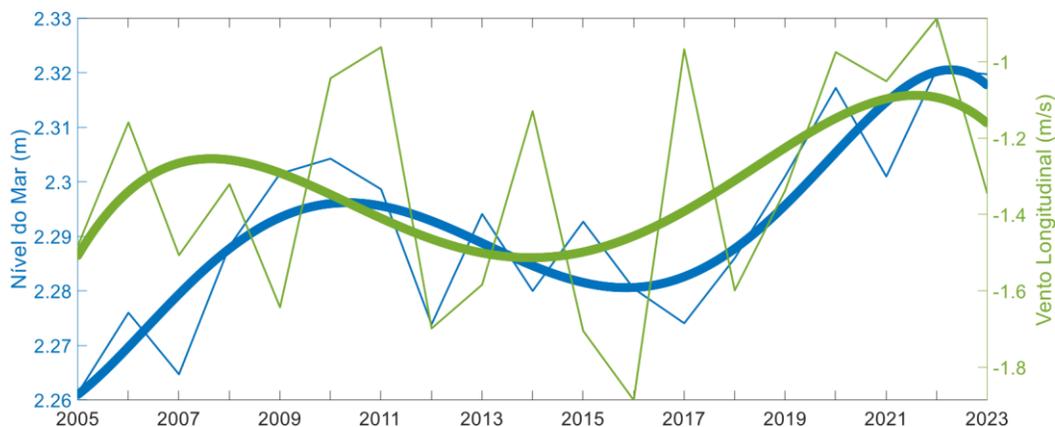


Figura 39: Médias anuais do Nível do Mar e da Componente Longitudinal do Vento. Polinômios de 4ª ordem foram aplicados em ambas para verificar a oscilação de baixa frequência.

A correlação de 0,61 encontrada entre o nível do mar e vento longitudinal encontrada indica que o transporte de Ekman tem atuado como modulador das taxas de elevação do NMM em ciclos aproximadamente decenais.

O aumento do NMM em Salvador ao longo dos 19 anos corresponde a uma taxa média anual de 2.11 mm. Esse valor é inferior à média global de 3.7 mm/ano observada nas duas primeiras décadas do século XXI (Frederiske et al., 2020; Marine Copernicus, 2024), mas é muito próximo à taxa regional que varia entre 2.5 mm e 3.1 mm apresentada na Figura 1. A partir da climatologia do nível médio do mar, observa-se a tendência de atingir altos níveis em abril e maio, o que coincide com a normal climatológica apresentada na Operação Chuva da CODESAL, em 2021 (Figura 40).

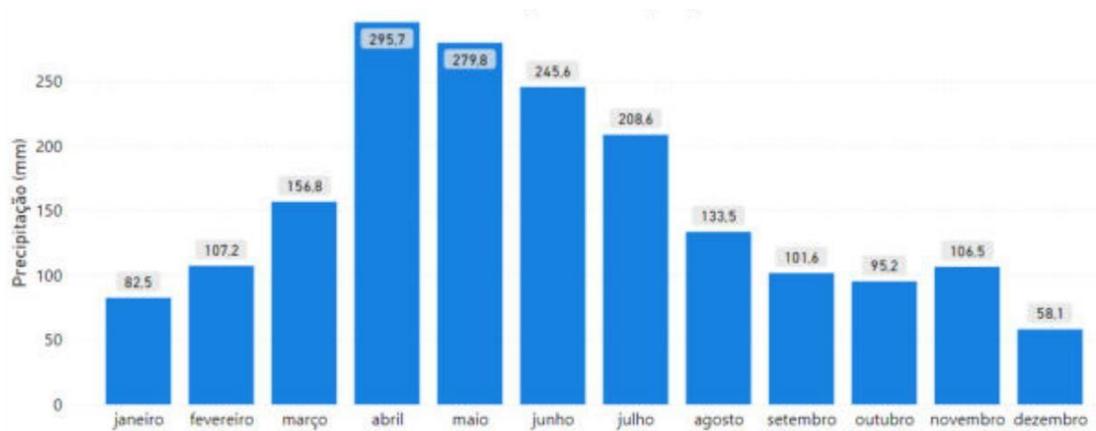


Figura 40: Normal Climatológica de Precipitação. *4Operação Chuva 2021 – CODESAL. Dados oriundos do INMET⁵.*

A alturas de maré não mostram uma tendência de aumento ao longo do período estudado (Figura 18). Já a climatologia, indica a correlação entre as alturas e os equinócios, que ocorrem em março e setembro (Figura 24), coincidindo com os meses de maiores alturas de maré, como visto anteriormente por Lessa e Dominguez em 2001.

A modulação das assimetrias de maré está diretamente relacionada à altura da maré, com comportamentos distintos entre marés de quadratura e de sizígia (Figura 24). Durante marés de quadratura, as assimetrias positivas predominam, com tempos de maré enchente mais curtos e provável predomínio das correntes de enchente de acordo com o modelo de Friedrichs e Aubrey (1988). Por outro lado, em marés de sizígia, especialmente quando a altura ultrapassa 2.5 m, a assimetria tende a ser oposta, com tempos de vazante mais curtos e correntes de vazante mais intensas. No. A variação temporal da razão M4/M2 sugere que o grau de distorção da maré está aumentando com o passar dos anos. Porém, o aumento do ângulo na relação de fase entre as duas componentes indica que esta se torna menos efetiva, se deslocando da região de dominância de vazante (Figura 26). Ao observar as duas relações simultaneamente, notou-se que as maiores distorções ocorrem com fases entre 300° - 320°, diferente do que foi observado por Pereira em 2014, que obteve as distorções máximas ocorrendo com $2M2-M4 = 270^\circ$.

⁵ <https://portal.inmet.gov.br/normais#>

O aumento da frequência de níveis extremos indica um progressivo agravamento de episódios de inundação, tanto pela invasão marinha como pela retenção do escoamento pluvial em situações de coincidência do ápice de uma maré meteorológica com um período de forte precipitação, como o que ocorreu em abril de 2024, quando uma precipitação de 175 mm de chuva em 24h (CODESAL, 2024) ocasionou 402 ocorrências, incluindo deslizamentos de terra, rompimento de pistas, desabamentos e inundações, como a do Campus UFBA em Ondina documentada na Figura 41.



Figura 41: Alagamento da rua do campus Ondina perto da biblioteca central (UFBA) associado à mega maré de 08 de fevereiro de 2024. – Jornal Correio⁶

A periodicidade de aproximadamente 4 anos identificada na série temporal de horas com níveis acima de 3,37 m (Figura 33) tem relação com os momentos em que o perigeu lunar coincide com o equinócio, ou seja, uma associação construtiva das componentes astronômicas MM (período de 27.55 dias) e da SSA (período de 182.62 dias) e uma situação de sizígia. O alinhamento das componentes MM e SSA pode ocorrer duas vezes dentro do ciclo de precessão de 8.85 anos do perigeu lunar, resultando em dois picos notáveis de marés extremas a cada 4.4 anos (RAY e MERRIFIELD, 2019).

⁶ <https://www.correio24horas.com.br/minha-bahia/campus-de-ondina-da-ufba-registra-pontos-dealagamentos-apos-fortes-chuvas-0424>

Além disso, os resultados mostrados por M2 e O1 (Figura 24) e analisados encontrando um ciclo oscilatório de, aproximadamente, 18 anos possui correlação com o ciclo nodal lunar, de 18,6 anos. Este, de acordo com BULT et al. (2024), possui a capacidade de influenciar em 3,7% na amplitude da componente semi-diurna M2, enquanto nas componentes diurnas essa intervenção pode chegar até 19%. Mesmo assim, esses valores percentuais podem ser extremamente variáveis a depender do nível de fricção do fundo, efeitos de ressonância e diversos outros fatores que gerenciam a dinâmica nos oceanos. Aparentemente, o ciclo nodal lunar ainda pode ter influência nas alturas de maré, podendo amplificá-las.

A altura alcançada pela crista da maré meteorológica aumenta estuário adentro, o que pode ser um fator adicional de risco à inundação (Figura 38). Esse aumento pode ser explicado pela configuração geomorfológica da baía, onde estreitamentos e fundos rasos favorecem a reflexão e a ressonância da onda de maré, como descrito por Talke e Jay (2020).

Os resultados obtidos deixam claro que Salvador está sofrendo os impactos do aumento do nível do mar. A taxa de elevação, embora inferior à média global, está causando uma maior frequência, e talvez maior severidade, de inundações na cidade baixa, especialmente em áreas com infraestrutura precária. Esta situação torna-se mais séria quando ocorre a coincidência com intensa precipitação atmosférica, dificultando o escoamento pluvial. O aumento da cota máxima de inundação na BTS agrava o risco de inundações no recôncavo baiano, e a tendência de aumento na frequência e intensidade de eventos extremos ressalta a necessidade de um planejamento urbano que antecipe cenários progressivamente mais graves de inundações. Para isso, recomenda-se a criação de mapas de risco que integrem dados de altimetria, uso do solo e projeções climáticas, identificando áreas mais vulneráveis e subsidiando decisões sobre planejamento urbano e gestão costeira. Medidas como impermeabilizações secas e úmidas, já aplicadas com sucesso em outras regiões do Brasil (Mantovani et al., 2024) e do mundo (Mohapatra e Pandey, 2018), devem ser consideradas para reduzir riscos e fortalecer a resiliência costeira. A combinação de estratégias estruturais e não estruturais pode ajudar Salvador a se preparar para um futuro em que eventos extremos sejam mais frequentes e intensos.

6 CONCLUSÃO

A análise harmônica das componentes astronômicas revelou uma sazonalidade marcante nas amplitudes das principais componentes de maré (M2, S2, O1 e K1) no porto de Salvador, com variações que refletem a influência das forçantes astronômicas e climáticas. Observou-se também uma tendência de aumento progressivo no grau de distorção da onda de maré, indicado pela razão $M4/M2$, bem como alterações no sentido da assimetria, sugerindo uma dominância crescente das correntes de vazante. Essas mudanças podem estar relacionadas a modificações na batimetria local ou ao aumento da profundidade média da baía, fatores que merecem investigação mais detalhada em trabalhos futuros.

A maré meteorológica está causando maior sobre-elevação do NMM. Além disso, os resultados sugerem que a componente meteorológica vem se tornando mais importante em relação a oscilação total da maré observada, o que torna mais complicado de prever seus comportamentos. Eventos como o registrado em abril de 2024 demonstram a gravidade dessas combinações, que, quando somadas a chuvas intensas, resultam em inundações severas. Essa tendência enfatiza a importância de integrar modelos climáticos e oceanográficos em estudos futuros, visando antecipar e mitigar os impactos das mudanças climáticas globais sobre a região.

Ademais, comprovou-se a maior frequência de ocorrência de níveis extremos com o passar dos anos, o que resulta em um crescente risco no aumento dos casos de erosão costeira, inundação e deslizamento de terra. Consequentemente, mais problemas de infraestrutura urbana virão à tona, a exemplo de danos significativos a edificações, vias de transporte e sistemas essenciais de serviços públicos. Essa escalada de eventos extremos também agrava os custos econômicos, pressionando orçamentos públicos e privados, além de comprometer a segurança e a qualidade de vida das populações residentes em áreas vulneráveis. Diante desse cenário, torna-se imperativo o desenvolvimento de estratégias de adaptação e planejamento urbano resiliente, com a implementação de medidas preventivas e corretivas para mitigar os impactos físicos e sociais decorrentes desses fenômenos.

A tendência de comportamento do NMM em Salvador ao longo dos últimos 20 anos revelou um comportamento ascendente claro. Entretanto, percebeu-se que isso não ocorre linearmente, mas sim de forma intermitente, com períodos de avanços seguidos por retrocessos, como uma progressão oscilante. Isso sugere que fatores variáveis, como eventos climáticos extremos ou ciclos naturais de variabilidade, podem influenciar essa dinâmica. Essa flutuação intercalada entre avanços e retrocessos reflete a complexidade dos processos que impactam o nível do mar na região. Ainda assim, Salvador não está entre os piores casos no que tange a taxa de elevação do nível médio, o que é um ponto positivo. Entretanto, isso não significa que não existe perigo em um futuro próximo, visto que existe a possibilidade de, além do nível estar subindo, a altimetria do terreno estar descendo, o que seria uma soma de fatores negativos capazes de amplificar e acelerar os riscos.

Em suma, este trabalho contribui para o entendimento da variabilidade do nível do mar em Salvador e na BTS, fornecendo subsídios fundamentais para o planejamento costeiro e a gestão de riscos associados às mudanças climáticas. Contudo, destacam-se lacunas que devem ser abordadas em pesquisas subsequentes, como a análise mais detalhada da interação entre ventos locais, pressão atmosférica e ondas de plataforma, além de projeções futuras que considerem cenários climáticos mais extremos, mapeando as áreas de maiores riscos.

7 REFERÊNCIAS

- Amorim, F. N. D., Cirano, M., Marta-Almeida, M., Middleton, J. F., & Campos, E. J. D. (2013). The seasonal circulation of the Eastern Brazilian shelf between 10 S and 16 S: a modelling approach. *Continental Shelf Research*, 65, 121-140. <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/13781>
- Andrade, J. B. D., & Hatje, V. (2009). *Baía de Todos os Santos: aspectos oceanográficos*. Edufba.
- Bult, S. V., Le Bars, D., Haigh, I. D., & Gerkema, T. (2024). The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on steric sea level changes. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL106563. <https://doi.org/10.1029/2023GL106563>
- Cirano, M., & Lessa, G. C.. (2007). Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil. *Revista Brasileira De Geofísica*, 25(4), 363–387. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000400002>
- Egbert, G. D., and S. Y. Erofeeva, 2002: Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 183–204, [https://doi.org/10.1175/15200426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2).
- Emmery, W., J & Thompson, R., E., 2004: *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. 533-539 p. <http://doi.org/10.2307/1353059>
- Fonseca, L, 2019. “A INFLUÊNCIA DA CIRCULAÇÃO GRAVITACIONAL E AÇÃO DAS ONDAS NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ARRASTO NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS”. https://oceanografia.ufba.br/Monografia_Lucas_Fonseca.pdf
- Friedrichs, C. T., & Aubrey, D. G. (1988). Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27(5), 521–545. doi:10.1016/0272-7714(88)90082-0
- Hamlington, B. D., et al. "Contribution of the Pacific Decadal Oscillation to global mean sea level trends." *Geophysical Research Letters* 40.19 (2013): 5171-5175. <https://doi.org/10.1002/grl.50950>

Lessa, G. C., Cirano, M., Genz, F., Tanajura, C. A. S., & Silva, R. R. (2009). Oceanografia Física. In V. Hatje & J. B. de Andrade (Orgs.), Baía de Todos os Santos: Aspectos Oceanográficos (pp. 71-119). EDUFBA.

Mantovani, J., Alcântara, E., Marengo, J., Londe, L., Park, E., Cunha, A., & Tomasella, J. (2024). Flood Risk Mapping during the Extreme February 2021 Flood in the Juruá River, Western Brazilian Amazonia, State of Acre. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su16072999>.

Marta-Almeida, Martinho, et al. "Realistic modelling of shelf-estuary regions: A multi-corner configuration for Baía de Todos os Santos." Ocean Dynamics 69 (2019): 1311-1331. <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-019-01304-z>

Mohapatra, P.; Pandey, A. Flood Inundation Mapping using HEC-RAS and GIS: A Case Study in Mahanadi River Basin, Odisha, India. Procedia Eng. 2018, 191, 1079–1086. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-19-0707-4_14

Oey L-Y, Ezer T, Hu C, Muller-Karger FE. 2007. Baroclinic tidal flows and inundation processes in Cook Inlet, Alaska: numerical modeling and satellite observations. Ocean Dyn. 57:205–21. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.101>

Pes, M., Pereira, E., Marengo, J., Martins, F., Heinemann, D., & Schmidt, M. (2017). Climate trends on the extreme winds in Brazil. Renewable Energy, 109, 110-120. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.12.101>.

R. Pawlowicz, B. Beardsley, and S. Lentz, "Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE", Computers and Geosciences 28 (2002), 929-937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)

Pereira, Mario Henrique. 2014. "Oscilações do Nível D'água no Porto de Salvador e Sua Relação com Duas Estações Interiorizadas na Baía de Todos os Santos – BA". https://oceanografia.ufba.br/Monografia_Mario_Henrique.pdf

Talke, S.A. and Jay, D.A., 2013. Nineteenth century North American and Pacific tidal data: lost or just forgotten? <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00181.1>

Talke, Stefan A., and David A. Jay. Changing tides: The role of natural and anthropogenic factors. Annual review of marine science 12 (2020): 121-151. <https://doi.org/10.1146/annurevmarine-010419-010727>

Thompson, P. R., Widlansky, M. J., Merrifield, M. A., Becker, J. M., & Marra, J. J. (2019). A statistical model for frequency of coastal flooding in Honolulu, Hawaii, during the 21st century. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 2787–2802. <https://doi.org/10.1029/2018JC014741>

Trenberth, K., and Caron, J. (2000). The Southern Oscillation Revisited: Sea Level Pressures, Surface Temperatures, and Precipitation. *Journal of Climate*, 13, 4358-4365. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<4358:TSORSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<4358:TSORSL>2.0.CO;2).

WILKIN, J. L., H. G. ARANGO, D. B. HAIDVOGEL, C. S. LICHTENWALNER, S. M. GLENN, AND K. S. HEDSTRÖM, (2005). A regional ocean modeling system for the long-term ecosystem observatory, *J. Geophys. Res. Oceans*, 110(C06S91), [doi:10.1029/2003JC002218](https://doi.org/10.1029/2003JC002218).

Verma, P., and S.K. Ghosh. 2019. Trend analysis of Climatic Research Unit temperature dataset for Gangotri glacier. *India: Dynamics of Atmospheres and Oceans*. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2009.07.001>